

MÉTODO MONOSCÓPICO PARA A DETERMINAÇÃO AUTOMÁTICA DA ALTURA DE EDIFÍCIOS EM FOTOGRAFIAS AÉREAS

*Monoscopic method for the automatic determination of height of buildings in air
photos*

EDGAR NOGUEIRA DEMARQUI¹
JÚLIO KIYOSHI HASEGAWA²
MAURICIO GALO²

UNESP - Universidade Estadual Paulista

²FCT – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Cartografia

¹Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

Rua Roberto Simonsen, 305, C. Postal 467, Presidente Prudente, Cep 19060-900
edgardemarqui@gmail.com, {hasegawa, galo}@fct.unesp.br

RESUMO

Este trabalho propõe um método monoscópico para a determinação automática da altura de edifícios em fotografias aéreas digitais, baseada no deslocamento radial dos pontos projetados no plano-imagem e na geometria no momento da obtenção da fotografia. A determinação da altura de edifícios pode ser utilizada para a modelagem da superfície em áreas urbanas, planejamento e gerenciamento urbano, entre outros. A metodologia proposta emprega um conjunto de etapas para a detecção de bordas dispostas radialmente em relação ao sistema de coordenadas fotogramétrico, sendo que estas bordas caracterizam as arestas laterais verticais dos edifícios presentes numa fotografia. Na primeira etapa realiza-se a redução do espaço de busca por meio da detecção das sombras projetadas pelos edifícios, gerando sub-imagens das áreas no entorno de cada sombra detectada. Em seguida, para cada sub-imagem são extraídas automaticamente bordas que passam por testes de consistência de modo que sejam caracterizados como segmentos de reta dispostos radialmente. Deste modo, a partir destas arestas, e com o conhecimento da altura de vôo, são estimadas as alturas dos edifícios. Os resultados alcançados em experimentos com imagens reais digitalizadas, obtidas com câmaras métricas, mostraram-se promissores para a determinação das alturas de edifícios.

Palavras-chave: Altura de Edifícios; Deslocamento Devido ao Relevo; Detecção de Sombras.

ABSTRACT

This paper proposes a monoscopic method for automatic determination of building's heights in digital photographs areas, based on radial displacement of points in the plan image and geometry at the time the photo is obtained. Determination of the buildings' heights can be used to model the surface in urban areas, urban planning and management, among others. The proposed methodology employs a set of steps to detect arranged radially from the system of photogrammetric coordinates, which characterizes the lateral edges of buildings present in the photo. In a first stage is performed the reduction of the searching area through detection of shadows projected by buildings, generating sub-images of the areas around each of the detected shadow. Then, for each sub-image, the edges are automatically extracted, and tests of consistency are applied for it in order to be characterized as segments of straight arranged radially. Next, with the lateral edges selected and the knowledge of the flight height, the buildings' heights can be calculated. The experimental results obtained with real images showed that the proposed approach is suitable to perform the automatic identification of the buildings height in digital images.

Keywords: Height of Buildings; Relief Displacement; Shadows Detection.

1 INTRODUÇÃO

Um dos grandes avanços proporcionado pela Fotogrametria Digital se caracteriza pela possibilidade de automação de várias etapas do processo de produção fotogramétrico. Neste contexto, a extração de feições presentes nas fotografias aéreas de forma robusta e automática por meio de algoritmos computacionais não estar totalmente resolvida, devido à complexidade desta tarefa. Em Mayer (2008), o autor faz uma abordagem sobre o estado da arte, e as direções mais promissoras, em relação à automação da extração de feições no contexto da fotogrametria.

Com o propósito de viabilizar técnicas para a obtenção automática de informações que descrevam as feições presentes em imagens aéreas (ou terrestres), tais como edificações, quadras, estradas e rodovias, etc uma série de pesquisas no âmbito da Fotogrametria Digital e Processamento Digital de Imagens (IRVIN e McKEOWN, 1989; McGLONE e SHUFELT, 1994; LIN e NEVATIA, 1994; WEI, ZHAO e SONG, 2004; MAYER, 2008) são desenvolvidas. No caso de edifícios, o conhecimento de sua localização e altura pode ser útil não só para fins de mapeamento, como também para outras aplicações: modelagem do terreno, realidade virtual, computação gráfica, planejamento urbano, estudos para a instalação de antenas de transmissão de sinais, planejamento de rotas para aeronaves etc.

No trabalho apresentado por McGlone e Shufelt (1994) é proposto um método para a identificação de linhas horizontais e verticais, assim como suas dimensões, a

partir do conhecimento prévio sobre a geometria de uma imagem aérea oblíqua e parâmetros de orientação. Essas linhas são consideradas como indicativos da existência de edificações, as linhas verticais extraídas são utilizadas para estimar a altura destas feições, e desta forma permitir a geração de modelos tridimensionais das edificações.

Lin e Nevatia (1994) utilizam a informação da localização de áreas de sombra para verificar a hipótese de bordas extraídas estarem relacionadas com a descrição de edificações, sendo utilizadas, também, propriedades relativas à forma do edifício para validar esta hipótese.

Em relação à modelagem de terreno, as estações fotogramétricas digitais, através da utilização de técnicas de correspondência em imagens, tornaram a geração de Modelos Digitais do Terreno (MDT) mais rápida e eficiente. Entretanto, ainda se faz necessária a etapa de edição do modelo por parte do operador, com o objetivo de corrigir eventuais erros. Para o caso de áreas urbanas o modelo gerado representa os topos das feições naturais (vegetação) e artificiais (edificações) presentes nas imagens, obtendo-se assim, o chamado Modelo Digital de Superfície (MDS) para estas áreas.

Com isto, para gerar o MDT é necessário que o operador realize a edição manual do modelo para a obtenção da diferença entre a altitude na base da edificação e o seu topo (altura da edificação), útil em algumas aplicações, como por exemplo na geração de ortoimagens verdadeiras (*true-ortho*).

No processo de representação do terreno também podem ser citados os sistemas *laserscanning*, ou sistemas de varredura a LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), os quais proporcionam modelos de representação do terreno com grandes amostras de pontos com coordenadas tridimensionais sobre uma superfície, coletadas em um curto espaço de tempo (HUG, 1997). Entretanto, embora o tempo de coleta seja reduzido, deve-se considerar que o seu uso ainda é limitado no Brasil, face ao custo do sistema de varredura a LASER.

Deste modo, este trabalho propõe um método monoscópico para a determinação automática da altura de edifícios presentes em fotografias aéreas, através do conhecimento prévio dos parâmetros de orientação interior e exterior da câmara e utilizando os conceitos referentes à disposição radial das arestas laterais dos edifícios.

Os pontos centrais da metodologia apresentada neste trabalho são: seleção das sombras dos edifícios e subsequente geração de sub-imagens com o objetivo de reduzir o espaço de busca na fotografia aérea; extração das bordas radiais; seleção das bordas que representam edificações, retificação dos pontos das bordas selecionadas e cálculo da altura dos edifícios através do conhecimento da altura de vôo e das distâncias entre os pontos extremos das arestas determinadas e o ponto nadir da fotografia aérea. O processo de retificação da imagem ou das coordenadas

é necessária uma vez que no desenvolvimento da equação que permite o cálculo da altura das edificações admite-se que as imagens são verticais.

Nas seções seguintes o procedimento proposto é detalhado, sendo apresentados os resultados e as análises com imagens reais.

2 MÉTODO PROPOSTO

O método proposto neste trabalho é dividido em 3 etapas: 1) redução do espaço de busca através da detecção das sombras dos edifícios presentes na imagem e geração de sub-imagens da região abrangendo o entorno destas sombras; 2) extração de bordas para cada sub-imagem gerada na etapa anterior, retificação das coordenadas dos pontos que definem as bordas e determinação das arestas laterais dos edifícios por meio da análise da disposição radial das bordas; 3) cálculo da altura dos edifícios.

2.1 Definição do Espaço de Busca

Partindo do pressuposto que as sombras presentes nas imagens estão ligadas também a edifícios, a primeira etapa consiste na identificação das sombras dos edifícios, delimitando assim uma região de interesse (sub-imagem) no entorno da sombra. A opção pela identificação das sombras se justifica pelo fato das áreas com presença de sombras apresentarem características específicas, que possibilitam a sua identificação de forma automática.

Diversas pesquisas visam o desenvolvimento de metodologias eficientes para a identificação automática de áreas com presença de sombras em imagens aéreas e/ou orbitais (LI et al., 2004; MADHAVAN et al., 2004; SALVADOR et al., 2004; SANTOS et al., 2006; POLIDÓRIO et al., 2003).

SALVADOR et al. (2004), propuseram uma técnica de segmentação de sombras, a qual explora as propriedades espectrais e propriedades geométricas das sombras. A validação da presença de regiões de sombra é realizada através da combinação de imagens coloridas e propriedades geométricas da sombra, ou seja, referente às bordas formadas pela sombra e o objeto relacionado com ela.

Li et al. (2004), apresentaram uma metodologia para detectar e remover sombras presentes em imagens de alta resolução em ambiente urbano, onde as sombras são detectadas com uso de um modelo do terreno (MDT – Modelo Digital do Terreno) e do azimute do Sol. Deste modo, a detecção da sombra necessita de informações externas, sendo que a técnica se mostrou eficiente na detecção de sombras projetadas por edificações, porém não apresentou os mesmos resultados quando se tratava de sombra projetada por veículos e vegetação de pequeno porte.

Santos et al. (2006) relatam o uso de uma técnica baseada na aplicação de um filtro para a detecção de sombras em imagens monocromáticas, denominado como SAD (*Shadow Automatic Detection*), que destaca os objetos que possuem baixo valor de cinza.

Polidório et al. (2003) propõem uma metodologia baseada nas características radiométricas e atributos de cor das regiões de sombra. Segundo estes autores, nas regiões afetadas por sombras o efeito do espalhamento atmosférico de Rayleigh, no qual as moléculas do ar na atmosfera desviam as ondas eletromagnéticas de pequeno comprimento de onda, correspondente ao azul e violeta, é realçado.

Com isto, as áreas sombreadas apresentam pouco brilho e ficam azuladas em imagens digitais, possibilitando a definição de um índice para a detecção de sombras. Polidório et al. (2003), propõem a utilização do sistema de cores HSI (*hue*, *saturation* e *intensity* – matiz, saturação e intensidade), a partir do qual determina-se o índice SDW (*ShaDoW*), que é obtido a partir da análise da diferença I-S, sendo I a intensidade e S a saturação. Deste modo, os *pixels* de uma imagem são selecionados como sombra para os casos em que I-S assumem valores menor ou igual a um limiar (k) pré-estabelecido, ou seja:

$$SDW = \begin{cases} 1, & \text{se } I-S \leq k \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (1)$$

onde SDW = 1, indica região de sombra e SDW = 0, indica região sem sombra.

O valor de k é dependente das características e da altitude do sensor utilizado para a obtenção das imagens analisadas. Como resultado final gera-se uma imagem binária com as áreas de sombra em branco e o restante em preto (POLIDÓRIO et al., 2003). Neste trabalho utilizou-se o valor de k = 1.

Neste trabalho, para a extração das áreas com presença de sombras em imagens digitais foi utilizada a técnica proposta por Polidório et al. (2003), pelo fato da mesma ser baseada em propriedades físicas da formação das sombras e na sua facilidade de aplicação.

Na implementação do algoritmo foi utilizada uma função disponível na biblioteca UPTK, onde o dado de entrada é uma imagem colorida (RGB), enquanto que os dados de saída são as componentes HSI. Com isto é calculado o índice SDW (Equação 1), para cada *pixel*, sendo determinadas as regiões presença de sombra.

Para a identificação das sombras relacionadas com os edifícios presentes na imagem aérea optou-se por analisar o valor da área delimitada pelas sombras detectadas na etapa anterior, de forma a serem selecionadas somente aquelas que se enquadram dentro de um intervalo pré-definido. Em primeiro lugar é realizada a contagem do número de *pixels* das áreas de sombras detectadas e posteriormente é feita a conversão para o espaço-objeto através do valor do GSD (*Ground Sample Distance*) obtido a partir do conhecimento dos valores da escala da fotografia e do tamanho do *pixel* na imagem.

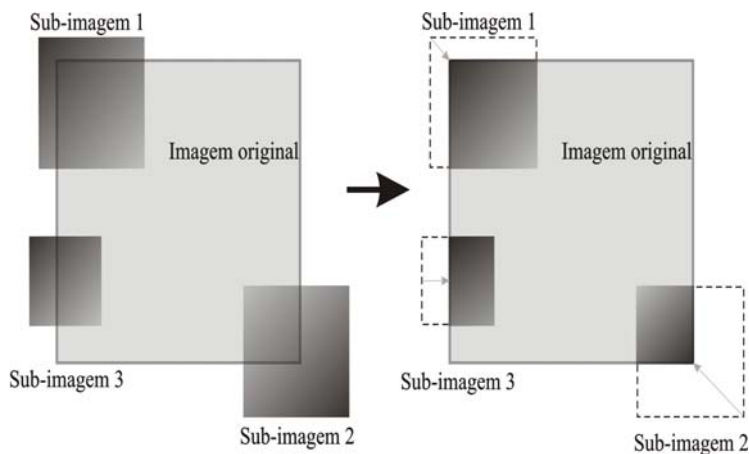
Através da realização de testes em diferentes imagens aéreas observou-se que as sombras de interesse, de um modo geral, abrangiam superfícies com áreas entre 100 m² e 600 m², de modo que estes valores foram definidos como limiar inferior e superior, respectivamente. Com isto, são selecionadas as áreas de sombra que estão

no intervalo definido pelos limiares, devendo-se ressaltar que estes limiares podem ser modificados pelo usuário, dependendo do porte das edificações de interesse.

Para garantir a presença completa do edifício que originou a sombra, o retângulo envolvente teve suas dimensões expandidas em 200%, tanto na altura como na largura, deste modo que cada sub-imagem gerada possua uma área 900% maior que a definida pelo retângulo envolvente da região de sombra.

Ao aplicar este procedimento podem ocorrer situações em que as sombras selecionadas encontram-se próximas das bordas da imagem e neste caso a definição da sub-imagem pode exceder os limites da imagem aérea analisada. Com isto, faz-se necessário redefinir as sub-imagens, para que a área de interesse selecionada ocupe apenas a área útil da imagem original (Figura 1).

Figura 1 – Readequação das sub-imagens geradas para não exceder as dimensões da imagem analisada.



FONTE: Adaptado de Demarqui (2007).

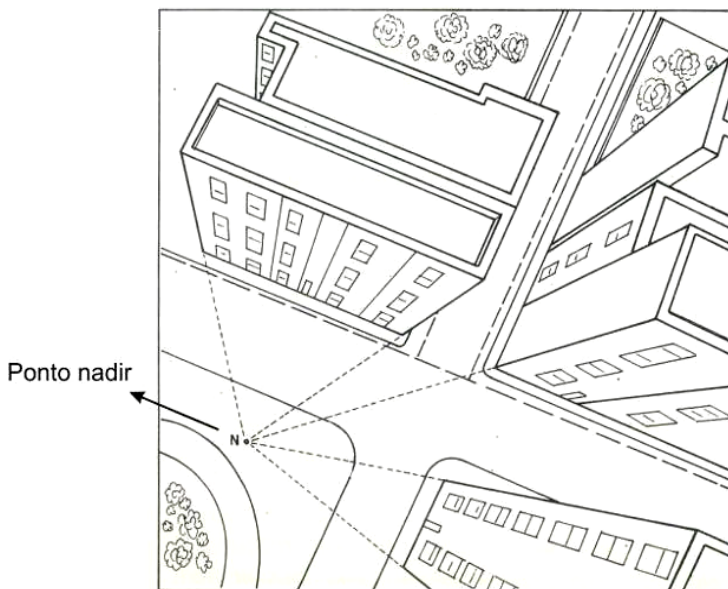
2.2 Determinação das Arestas Laterais de Edifícios

A determinação das arestas laterais de edifícios baseia-se no deslocamento radial dos pontos projetados no plano-imagem e na geometria no momento da obtenção da fotografia, sendo que neste trabalho são exploradas estas características através do cálculo analítico das retas candidatas às bordas. Considerando uma fotografia aérea vertical, a projeção perspectiva e o deslocamento devido ao relevo ocasionam a mudança ou deslocamento na posição fotográfica de edificações presentes na imagem, sendo que isto não ocorre nas edificações localizadas no ponto nadir da imagem, ou mesmo nas proximidades dele.

Os demais edifícios apresentarão um deslocamento radial na imagem, que permite a visualização das arestas e faces laterais de edificações voltadas para o centro da imagem. A geometria perspectiva descrita pode ser mais facilmente verificada em imagens aéreas de regiões urbanas com presença de edifícios.

Esta aparente inclinação das edificações, no plano imagem, é mais acentuada na medida em que aumenta a distância em relação ao ponto nadir da imagem, ou seja, é diretamente proporcional à distância da edificação ao ponto nadir e inversamente proporcional a altura de voo. É importante notar que as linhas que definem as bordas verticais dos edifícios são radiais e que, quando prolongadas, convergem para o ponto nadir na imagem (Figura 2).

Figura 2 - Representação do comportamento radial de arestas laterais de edifícios em uma imagem aérea vertical.



FONTE: Adaptado de Tavares e Fagundes (1991).

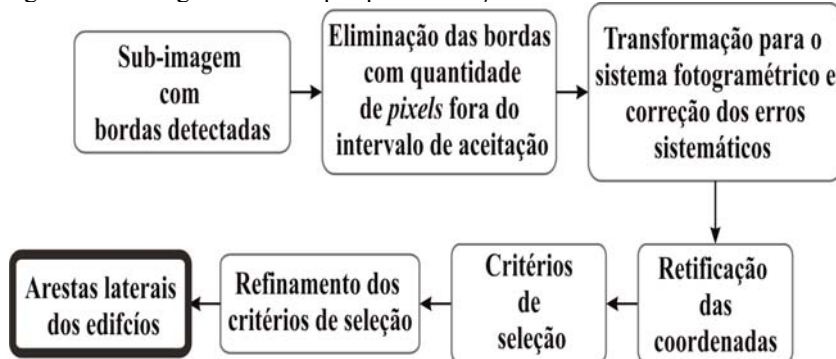
Considerando-se uma situação ideal sem a presença de erros e as coordenadas referenciadas ao sistema fotogramétrico, ao se analisar a equação da reta ($y=a.x+b$) das linhas que definem as arestas laterais dos edifícios, observa-se que o seu coeficiente linear (b) terá um valor igual a zero.

Entretanto, devem-se observar com cuidado os casos dos edifícios cujas arestas laterais são próximas ao eixo y do sistema fotogramétrico, nesta situação o termo a (parâmetro angular da reta) tende ao infinito e torna-se indeterminado, não

sendo possível a seleção das arestas dos edifícios nesta situação. Uma das alternativas é usar a equação da reta na forma $x=a'.y + b'$.

Na Figura 3 é apresentado um fluxograma onde são mostradas as etapas para a extração das arestas laterais dos edifícios.

Figura 3 - Fluxograma das etapas para a seleção das bordas das arestas laterais.



FONTE: Adaptado de Demarqui (2007).

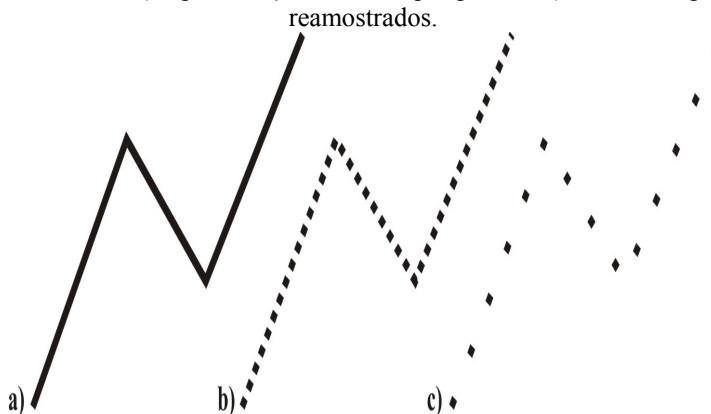
2.2.1 Primeira Fase – Pré-seleção dos pontos extremos das bordas de interesse

Dando continuidade com os processamentos anteriores, nesta etapa foram aplicados alguns processamentos sobre cada sub-imagem gerada, para manter somente as bordas das feições de interesse. Com o intuito de diminuir a quantidade de pontos analisados, sem modificar o formato da borda em questão (Figura 4) e feita uma generalização, fazendo uma reamostragem a uma taxa de 1/10 (a cada 10 pontos seleciona-se 1). Esta taxa de reamostragem foi definida após alguns testes realizados durante a execução deste trabalho.

Após esta reamostragem, assumindo que para cada borda a quantidade de pontos seja n , serão analisados $(n-1)!$ segmentos de retas, de forma a não aceitar retas formadas por pares de pontos já testados. Cada ponto p_i é selecionado sucessivamente com os pontos que o precedem, isto é, p_{i+1} , p_{i+2} , p_{i+3}, \dots, p_n , formando os pares que serão analisados.

Na sequência do processamento, cada par de pontos tem suas coordenadas retificadas através das equações de colinearidade e os parâmetros de orientação da imagem (informações de entrada do processamento). Isto se torna necessário para que a verificação da disposição radial da aresta formada pelo par de pontos não seja realizada em relação à imagem inclinada.

Figura 4 – Representação do processo de reamostragem das bordas analisadas: a) borda extraída; b) representação da borda por pontos; c) borda com pontos reamostrados.

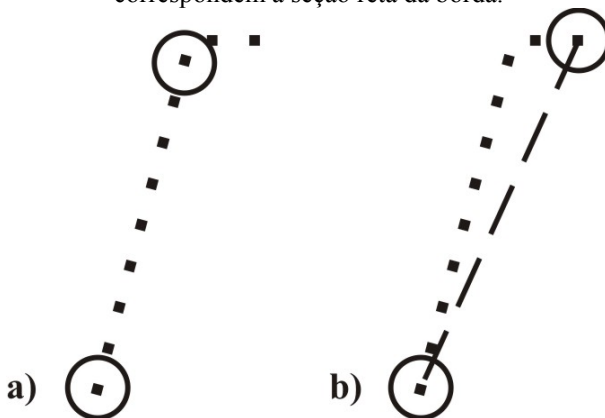


A determinação quais pares de pontos provavelmente representam da aresta do edifício, sendo observados três critérios gerais, os quais são:

Disposição radial: as arestas verticais dos edifícios presentes na imagem estão dispostas radialmente, e devem apresentar o coeficiente linear (b) da equação da reta próximo de zero. Como a extração das retas é feita sobre imagens não necessariamente verticais foi feita a seleção dos segmentos de reta em que o valor do coeficiente linear é menor do que um limiar de tolerância. Para os casos dos edifícios dispostos quase paralelos ao eixo y fez-se a análise da componente x, de modo a selecionar apenas os segmentos radiais;

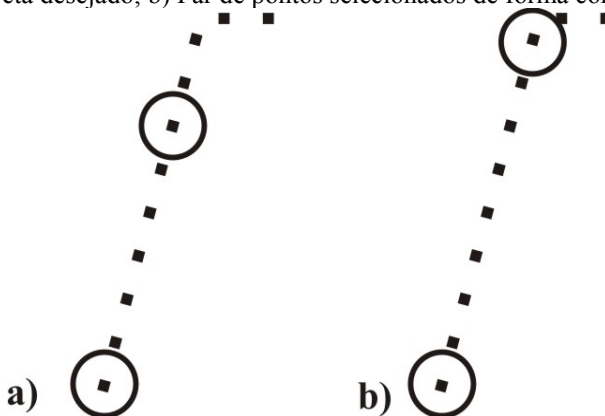
Distância transversal com a borda rotulada: este critério tem como finalidade evitar a seleção de pontos que não correspondem às retas (conforme exemplo da Figura 4a), as quais são formadas por pares de pontos que não apresentam correspondência com a borda analisada ou parte desta (mesmo estando dispostos radialmente). Neste caso, verifica-se que a reta formada pelos pontos tem uma distância nula com a borda ou esteja numa distância máxima de 2 *pixels* (critério de proximidade);

Figura 4a – Representação do critério de distância transversal: a) par de pontos selecionados corretamente a seção reta da borda detectada; b) par de pontos que não correspondem à seção reta da borda.



Distância radial da reta: selecionar o par de pontos que tenha a maior distância entre si, ou seja, que forma o maior segmento de reta dentre aqueles analisados (Figura 5).

Figura 5 – a) Seleção de pontos que não correspondem aos extremos do segmento de reta desejado; b) Par de pontos selecionados de forma correta.



Estes três critérios são utilizados em duas fases, sendo que a primeira constitui-se numa filtragem do total de pares de pontos, utilizando limiares pré-definidos para cada critério citado anteriormente. A definição dos limiares se deu após várias análises e testes, sendo que os seguintes fatores foram considerados:

- I. Coefficiente linear da reta: dependente da qualidade dos parâmetros de orientação das imagens aéreas utilizadas, tendo sido definido como 1,20% do valor da diagonal da fotografia o valor máximo deste parâmetro, assumindo que retas onde o coeficiente linear esteja fora deste intervalo são não radiais e portanto devem ser descartadas;
- II. Limiar de distância transversal: são considerados próximos da borda os segmentos de reta que possuem pelo menos 80% dos seus pontos a uma distância igual ou inferior a 2 *pixels* da borda;
- III. Limiar de distância radial: consideram-se os pares de pontos cuja distância entre si esteja dentro do intervalo entre 0,60% e 2,30% do valor da diagonal da imagem, de modo a garantir que não sejam selecionadas retas muito grandes e que não tenham relação com os edifícios presentes na imagem.

Após a aplicação destes critérios, apenas os pares de pontos com possibilidades de representarem a lateral de um edifício serão usados na fase seguinte do no processamento.

2.2.2 Segunda Fase – Definição das arestas laterais dos edifícios

Nesta fase são selecionados os segmentos de reta que atendem aos critérios citados no item anterior. Os valores relacionados com os pares de pontos que formam o segmento devem apresentar valores máximos para os critérios de distância e proximidade, enquanto que para o critério do coeficiente linear devem apresentar valores mínimos, sendo recalculados a cada borda analisada.

Os pares selecionados na primeira etapa são avaliados quanto à sua equivalência, em relação aos valores extremos calculados para a borda as quais pertencem, utilizando a Equação 2:

$$\text{valor}_{\max} = \frac{p_{dr} \times R_{dr} + p_{dt} \times R_{dt} + p_b \times R_b}{p_{dr} + p_{dt} + p_b} \quad (2)$$

onde: R_{dr} – razão entre a distância do par de pontos e a distância máxima; R_{dt} – razão entre a porcentagem da distância radial dos pontos definidos pelo par analisado e a maior porcentagem; R_b – razão entre o parâmetro b definido pelo par de pontos e o valor mínimo do parâmetro b; p_{dr} – peso de R_{dr} ; p_{dt} – peso de R_{dt} ; p_b – peso de R_b .

Os valores dos pesos p_{dr} , p_{dt} e p_b foram definidos, após vários testes empíricos, como sendo, respectivamente: 1,2; 1,8 e 0,3. O valor de p_b é menor em relação aos outros pesos, pois este parâmetro se mostrou mais suscetível à variações abruptas

nos testes realizados, e por isso foi necessário reduzir sua atuação no cálculo. Além disso, pode ocorrer de um valor pequeno de b estar relacionado a um par de pontos que não esteja representando uma borda ou parte da mesma.

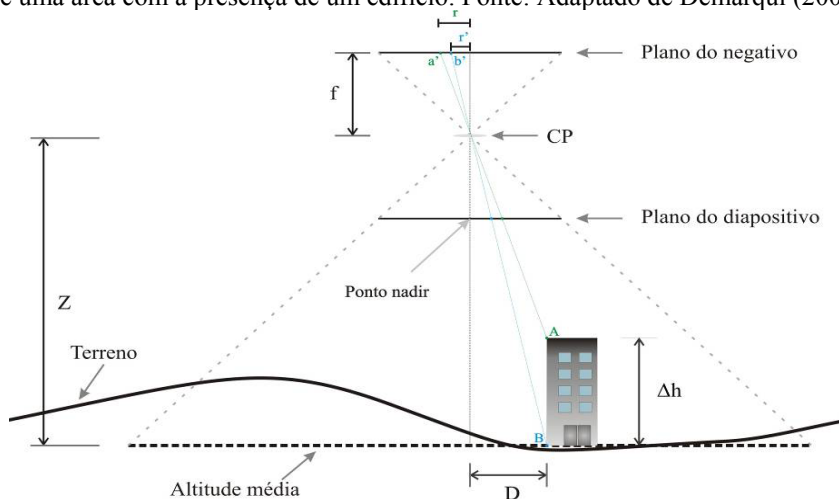
Já o valor de p_{dt} é o mais alto devido à necessidade de se selecionar pares de pontos que formem retas que não estejam distantes mais do que dois *pixels* da borda rotulada. Para o peso p_{dr} foi definido um valor próximo de 1, pois as variações deste fator são mais suaves, e seu efeito no valor final não necessita de redução nem de ampliação. Deste modo, pretende-se selecionar o par de pontos que tenha o maior valor calculado pela Equação 2 (critério de seleção).

2.3 Cálculo da Altura dos Edifícios

Através do comprimento dos segmentos de retas determinados nas fases anteriores, e conhecida a altura do vôo referente às fotografias analisadas, é possível calcular a altura dos edifícios.

A Figura 6 ilustra a geometria formada pelo feixe de luz em relação a um edifício, onde os pontos A e B representam o topo e a base do edifício, respectivamente, de forma a expor o princípio explorado pelo método proposto.

Figura 6 – Representação geométrica da tomada de uma fotografia aérea (vertical) de uma área com a presença de um edifício. Fonte: Adaptado de Demarqui (2007)



Nesta figura os seguintes elementos são destacados: CP - centro perspectivo da câmara; D - distância, no terreno, entre a projeção do ponto nadir e o edifício; Δh - altura do edifício; Z - altura de vôo, em relação ao ponto B (base do edifício); f - distância focal da câmara; r - distância radial, na imagem, entre o ponto nadir e o

topo do edifício e r' - distância radial, na imagem, entre o ponto nadir e a base do edifício.

A partir da geometria apresentada, considerando a fotografia aérea como vertical, e da semelhança de triângulos, pode-se calcular a altura da edificação através da seguinte equação (MIKHAIL et al., 2001):

$$\Delta h = \frac{Z}{r}(r-r') = \frac{Z}{r}dr \quad (3)$$

Através da determinação do segmento de reta pertencente à borda, representando a aresta lateral do edifício, são obtidos os valores dos pontos extremos desta aresta, os quais são utilizados para o cálculo das distâncias entre estes pontos e o ponto nadir da fotografia.

Estes pontos são analisados para se determinar qual representa a base do edifício e qual representa o topo. Para realizar esta tarefa seleciona-se a maior distância como r (topo do edifício) e a menor como r' (base do edifício). Em seguida calcula-se $dr=r-r'$ e juntamente com o valor da altura de vôo (Z) pode-se estimar o valor de Δh , sendo que os cálculos acima são realizados para cada borda selecionada na fase anterior, obtendo-se assim a altura do edifício correspondente.

3 EXPERIMENTOS REALIZADOS

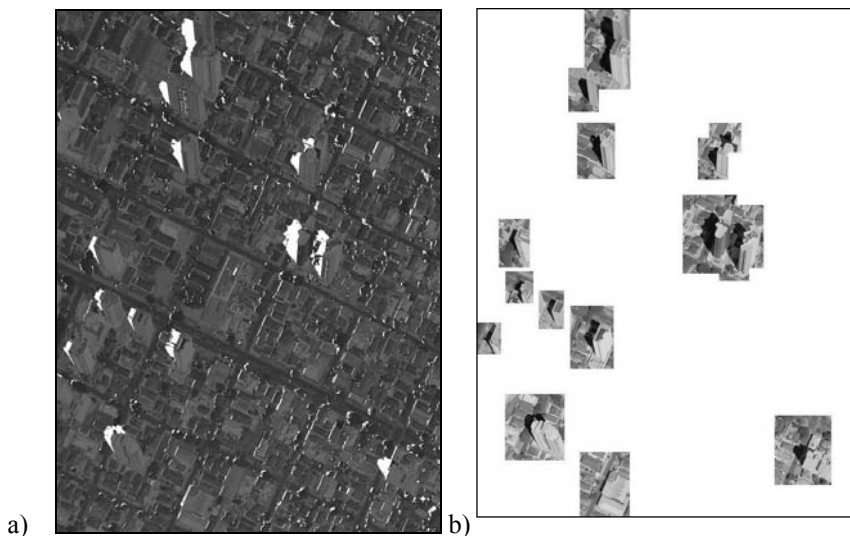
3.1 Extração das sub-imagens

Para a realização dos experimentos mostrados neste trabalho foram utilizadas fotografias aéreas digitalizadas, obtidas por uma câmara métrica de distância focal igual à 153,16 mm, na escala 1:8.000 da área urbana de Presidente Prudente, provenientes de um levantamento aerofotogramétrico realizado no ano de 2003. Os dados referentes ao processo de triangulação deste levantamento podem ser obtidos em Prado et al. (2006).

A técnica desenvolvida por Polidório et al. (2003) apresentou bons resultados para a extração das sombras, tendo extraído praticamente todas as presentes na imagem (tanto as sombras de edificações quanto de vegetação). A Figura 7a mostra as sombras selecionadas (representadas em branco) que se enquadravam no intervalo de área adotado, conforme visto na Seção 2.1, sendo descartadas as restantes.

Na Figura 7b observa-se que o espaço de busca foi sensivelmente reduzido para as sub-imagens, a partir da detecção das sombras mostradas na Figura 7a. As áreas que serão processadas abrangem apenas a vizinhança dos edifícios presentes na cena. Além disso, algumas das sub-imagens estão sobrepostas a outras, devido à proximidade dos edifícios e das respectivas sombras extraídas.

Figura 7 – a) Resultado da extração das sombras em um recorte de uma fotografia aérea; b) Sub-imagens geradas a partir da extração das sombras dos edifícios presentes na imagem.



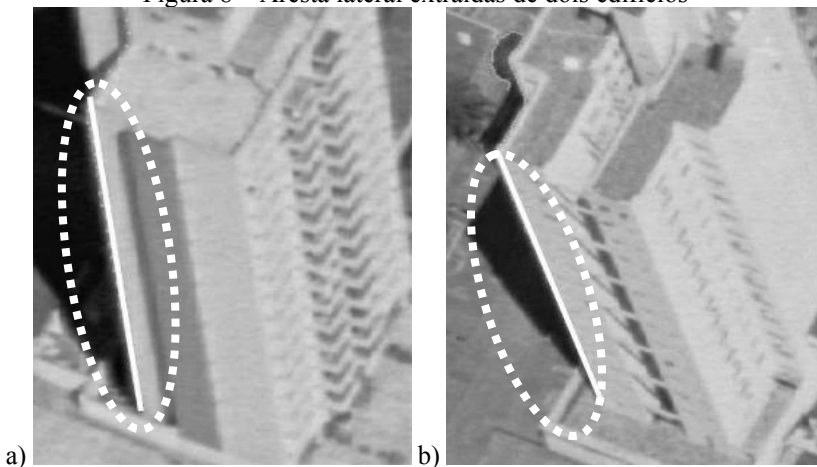
6.2 Detecção das arestas dos edifícios

Nas Figuras 8 a 10 são mostrados os resultados referentes aos experimentos realizados para determinação de algumas das arestas laterais para os casos de seis edifícios. As seções das bordas selecionadas pelo método proposto estão indicadas por um traço branco, o qual é destacado por uma elipse tracejada.

Pela imagem da Figura 8a pode ser visto que a seção detectada da borda corresponde à toda a extensão da aresta lateral do edifício. Já na Figura 8b, a aresta detectada apresentou uma pequena falha e não atinge a base do edifício, pois a segmento da borda extraída não abrange esta parte da lateral.

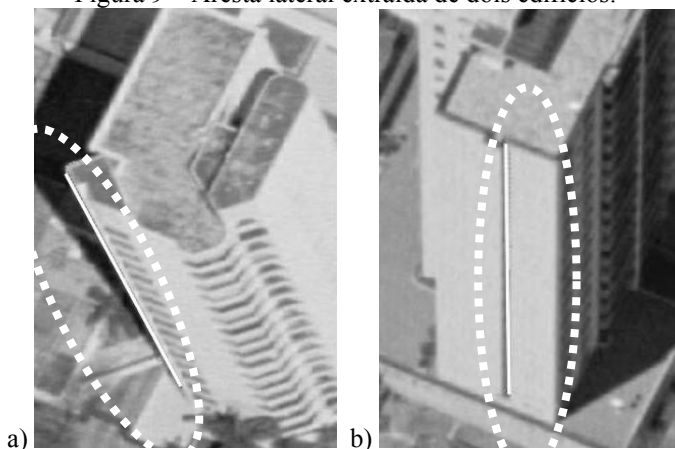
Esta falha ocorreu porque o processo de extração de bordas não conseguiu extrair esta parte da edificação, fato este que afeta a estimativa da altura do edifício pelo método proposto.

Figura 8 – Aresta lateral extraídas de dois edifícios



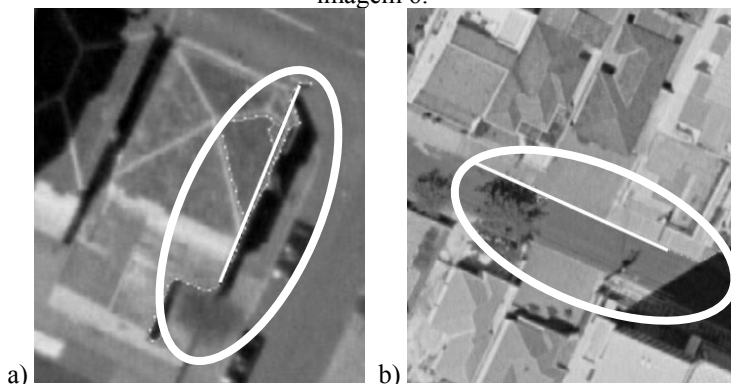
Pela Figura 9a pode-se observar a ocorrência de um problema na parte inferior da seção da borda representando a aresta do edifício, enquanto que no restante da lateral não houve falha. Isto também ocorreu devido ao processo de extração de bordas não ter proporcionado a correta representação de toda a extensão lateral do edifício, frente à complexidade da cena. Já na pela Figura 9b a borda extraída corresponde a uma das arestas laterais do edifício.

Figura 9 – Aresta lateral extraída de dois edifícios.



Nas Figuras 10a e 10b são mostrados dois casos particulares, onde foram detectadas feições não desejadas. As bordas de duas feições foram extraídas como sendo arestas de edifícios, mas na realidade se tratavam de outros tipos de feições presentes nas proximidades dos edifícios presentes nas sub-imagens.

Figura 10 – a) Aresta determinada na sub-imagem 5; b) Aresta determinada na sub-imagem 6.



Na primeira, a borda representa o telhado de uma casa, enquanto que a outra borda está relacionada com o alinhamento de uma quadra, sendo que, em ambos os casos, estas feições selecionadas estavam dispostas justamente de forma radial na fotografia aérea. Além disso, no caso da direita pode-se observar a proximidade da feição extraída, de uma sombra. Nos experimentos realizados (num total de 28) apenas estes dois casos de falsas bordas de interesse foram observadas.

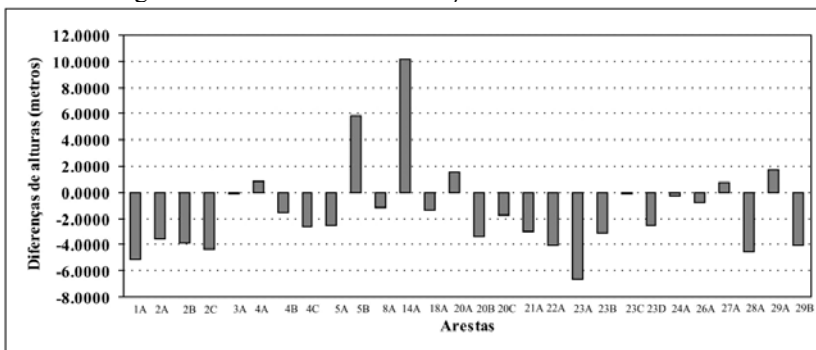
6.3 Cálculo das alturas

Após a detecção das bordas são calculadas as distâncias radiais entre os pontos extremos das arestas selecionadas e o ponto nadir da fotografia. Com estas distâncias e a altura de vôo as alturas dos edifícios podem ser estimadas.

Com o objetivo de comparar os resultados alcançados com o método proposto foi realizada a extração manual dos pontos extremos das mesmas arestas determinadas, e calculadas as alturas dos respectivos edifícios.

Na Figura 11 é mostrado o gráfico mostrando os valores das diferenças entre as alturas estimadas pelo método proposto e de forma manual.

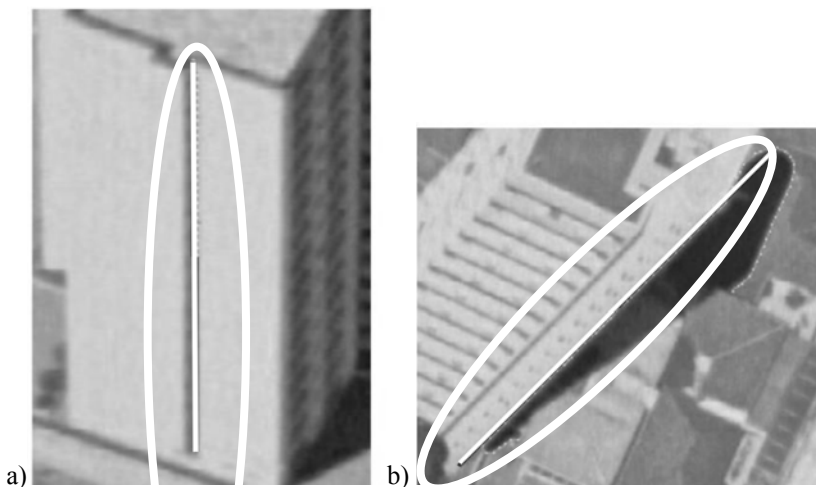
Figura 11 – Gráfico das diferenças de alturas calculadas.



Conforme pode ser visto pelo gráfico da Figura 11, a partir de um total de 28 amostras obteve-se o valor médio das diferenças entre as alturas foi de -1,42 m e o desvio padrão apresentou um valor de 3,42 m.

A menor diferença foi de 0,03 m, obtido para a diferença de alturas em relação à uma das arestas determinadas referentes ao edifício da Figura 12a. Já a maior diferença foi de 10,21 m para o caso do edifício da Figura 12b, sendo que este problema ocorreu devido ao fato da seção da borda selecionada, representando a aresta do edifício, não representar corretamente a lateral do edifício e, também, porque o algoritmo falhou em descartar esta situação.

Figura 12 – a) Melhor resultado na estimativa da altura; b) Edifício com o pior resultado.



6.4 Análise de sensibilidade

Com o intuito de analisar a qualidade dos resultados obtidos na determinação automática das alturas dos edifícios, com os valores teoricamente esperados foi feita a propagação de erros no cálculo de Δh (Equação 3), a qual resultou na Equação 6.

$$\Sigma_{\Delta h} = \begin{bmatrix} \frac{r-r'}{r} & \frac{Zr'}{r^2} & \frac{-Z}{r} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \sigma_Z^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_r^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{r'}^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \frac{r-r'}{r} \\ \frac{Zr'}{r^2} \\ \frac{-Z}{r} \end{bmatrix} \quad (6)$$

onde: σ_Z - desvio padrão da altura de vôo; σ_r - desvio padrão da distância r ; e $\sigma_{r'}$ - desvio padrão da distância r' .

Foram realizadas simulações do cálculo das alturas dos edifícios considerando-se σ_Z como sendo igual à 30m. Este valor para σ_Z foi obtido através da medida de pontos cotados, em carta topográfica na escala 1:2.000, localizados na região representada na fotografia, tendo estes pontos apresentado valores altimétricos (altitude ortométrica) entre 406,50m e 473,0m. Deste modo, como o valor da altitude do terreno apresenta uma variação de aproximadamente 66,3m utilizou-se nos experimentos um valor médio para esta variação, ou seja, adotou-se $\sigma_Z = 30m$.

Na aplicação da Equação 6 foram utilizados os valores de ± 2 pixels (equivalente à $\pm 0,042mm$) para $\sigma_{r'}$ e σ_r , sendo que para o valor de σ_Z foram considerados valores entre 0 e 35 m (variando de 5 em 5m). Na Tabela 1 estão dispostos os resultados obtidos para $\sigma_{\Delta h}$ em relação aos diferentes valores de σ_Z utilizados.

Tabela 1 – Efeitos dos erros inseridos na determinação de Z na estimativa do erro em Δh .

σ_Z (metros)	$\sigma_{\Delta h}$ (metros)
0	0,54
5	0,56
10	0,61
15	0,69
20	0,79
25	0,90
30	1,08
35	1,14

Considerando as diferenças entre medidas manuais e automáticas das arestas selecionadas, foi obtido o resultado $\sigma_{\Delta h} = 3,42\text{m}$ que é 3,2 vezes maior do que seu respectivo valor estimado (vide Tabela 1), ou seja, considerando $\sigma_Z = 30\text{m}$ tem-se $\sigma_{\Delta h} = 1,08\text{m}$.

Entretanto, esta diferença na qualidade das alturas se deve principalmente à qualidade da extração automática das arestas, pois conforme foi observado nos testes realizados os valores obtidos na propagação de σ_r e σ_r equivalem, respectivamente, à 9 e 11 *pixels*.

Deste modo, realizando a propagação de erros em $\sigma_{\Delta h}$ e considerando estes valores de 9 e 11 *pixels*, e novamente $\sigma_Z = 30\text{m}$, resultaria em: $\sigma_{\Delta h} = 2,59\text{m}$ e $\sigma_{\Delta h} = 3,12\text{m}$ (respectivamente). Nota-se por estes valores, que os erros da determinação das arestas têm uma maior participação na composição do valor de $\sigma_{\Delta h}$ do que o erro proveniente da altura de voo.

Pela Tabela 2 observa-se a influência nos valores de $\sigma_{\Delta h}$ através da variação da precisão na determinação dos pontos extremos das arestas (σ_{xy}), também considerando $\sigma_Z = 30\text{m}$.

Tabela 2 – Influência da variação de σ_{xy} na estimativa do erro em Δh .

σ_{xy} (pixels)	$\sigma_{\Delta h}$ (metros)
1	0,90
2	1,02
3	1,19
4	1,39
5	1,61
6	1,84
7	2,09
8	2,34
9	2,59
10	2,85
11	3,12
12	3,37

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A comparação entre os valores das alturas determinadas pelo procedimento proposto com os valores das alturas medidas manualmente indicam que o método pode ser utilizado em algumas aplicações. A tarefa de extrair feições específicas em imagens aéreas de modo robusto automaticamente é complexa, mas funcionou para a maioria dos casos. De um total de 28 experimentos realizados houve somente dois

casos em que as bordas de duas feições não foram identificadas corretamente, estando estas feições, em ambos os casos, dispostas justamente de forma radial.

Pelo fato das arestas são determinadas a partir das bordas extraídas, o método se mostra dependente da qualidade da detecção destas últimas. A extração correta das bordas é afetada por outros detalhes da fachada como sacadas e janelas e em outros casos devido à sombra do próprio edifício que é projetada sobre a sua face lateral visível na imagem.

Como sugestões para trabalhos futuros são recomendadas:

- Aplicação de uma pré-análise nas imagens analisadas para a eliminação das áreas de vegetação, para que não aconteça a seleção de sombras de vegetação na etapa de geração das sub-imagens;
- Testes com outros detectores de borda, devido à importância desta etapa para o método proposto;
- Melhorias na definição dos limiares utilizados, de modo a torná-los mais genéricos;
- Adaptação da metodologia para a aplicação em imagens provenientes de sensores orbitais de alta resolução, visando à análise dos resultados e possibilidades de uso.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao prof. Dr. Mário Luiz Lopez Reiss do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelas sugestões no desenvolvimento dos algoritmos e auxílio no uso das funções da biblioteca UPTK bem como à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio dado na forma de bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS

- AMHAR, F.; JANSÁ, J.; RIES, C. The Generation of True Orthophotos Using a 3d Building Model in Conjunction with a Conventional DTM. IAPRS, Vol. 32, Part 4 "GIS-Between Visions and Applications", Germany. 1998.
- BRUNN A., WEIDENER, U. *Extracting buildings from digital surface models*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXII/3-4W2, 1997. pp. 27-34.
- DEMARQUI, E. N. *Determinação Automática da Altura de Edifícios em Imagens Aéreas*. 2007 134 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.
- HUG, C. and WEHR, A. *Detecting and Identifying Topographic Objects in Imaging Laser Altimeter Data*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 32, Part 3-4W2, Stuttgart, 1997.

- IRVIN, R. B.; MCKEOWN, D. M. JR. *Methods for Exploiting the Relationship Between Buildings and Their Shadows in Aerial Imagery*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, v. 19 n. 6, 1989. p. 1564-1575.
- LI, Y.; SASAGAWA, T.; GONG, P. A System of the Shadow Detection and Shadow Removal for High Resolution City Aerial Photo. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING CONGRESS, XX, 2004, Istambul. Anais do XX ISPRS Congress, 2004.
- LIN, C.; HUERTAS, A.; NEVATIA, R. *Detection of Building Using Perceptual Grouping and Shadows*. Transactions on Robotics and Automation, v.10, n.2, 1994. p. 62-69.
- MADHAVAN, B. B; TACHIBANA, K.; SASAGAWA, T.; OKADA, H.; SHIMOZUMA, Y. Automatic Extraction of Shadow Regions in High-Resolution ADS40 Images - By Robust Approach of Feature Spaces Analysis. International Society For Photogrammetry and Remote Sensing Congress, XX, 2004, Istambul. Anais do XX ISPRS Congress, 2004.
- MAYER H. *Object extraction in photogrammetric computer vision*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 63, 2008. p. 213-222.
- MCGLONE, J. C.; SHUFELT, J. A. *Projective and Object Space Geometry for Monocular Building Extraction*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, v.10, n.2, 1994. p. 54-61.
- MIKHAIL, E. M., BETHEL, J. S., MCGLONE, J. C. *Introduction to modern Photogrammetry*. New York: John Wiley & Sons, 2001. 479 p.
- PRADO, F. A.; SOUZA, G. G. B.; SILVA, H. A.; BARBOSA, L.; BARBOSA, L. A. *Geração de Base Cartográfica a partir de Fotografias Aéreas*. Trabalho de Graduação. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Curso de Graduação em Engenharia Cartográfica, Presidente Prudente, 2006.
- POLIDORIO, A. M.; IMAI, N. N.; TOMMASELLI, A. M. G.; FLORES, F. C.; FRANCO, C. Realce do grau de artificialidade de feições em imagens aéreas coloridas. In: Edson Aparecido Mitishita; Antonio Maria Garcia Tommaselli; (Org.). *Série em Ciências Geodésicas*. 1 ed. Curitiba: Editora da Universidade Federal do Paraná, 2003, v. 3, p. 277-291.
- REISS, M. L. L.; TOMMASELLI, M. G. UPTKImage: Uma Classe de Objetos para Manipulação de Imagens Digitais em Fotogrametria. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, XXII, 2005, Macaé. *Anais do XXII Congresso Brasileiro de Cartografia*. Rio de Janeiro – RJ: Sociedade Brasileira de Cartografia, 2005. v.1. p.1-9.
- SALVADOR, E., CAVALLARO, A., EBRAHIMI, T. *Cast shadow segmentation using invariant colour feature*. Computer Vision and Image Understand. Vol. 95, pp. 238-259, 2004.

- SANTOS, D. R.; DALMOLIN, Q.; BASSO, M. A. Detecção Automática de Sombras em Imagens de Alta Resolução. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 12, nº 1, p. 87-99. Curitiba, 2006.
- TAVARES, P.; FAGUNDES, P. M. *Fotogrametria*. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Cartografia. 1991. 376p.
- WIE, Y. F.; ZHAO, Z.; SONG, J. *Urban Building Extraction from High-Resolution Satellite Panchromatic Image Using Clustering and Edge Detection*. IEEE 2004. p. 2008-2010.
- WOLF, P. R.; DEWITT, B. D. *Elements of Photogrammetry – with Applications in GIS*. 3rd ed. United States of America: McGraw-Hill, 2000. 608p.

(Recebido em agosto/07. Aceito em maio/08)