

ORTORRETIFICAÇÃO DE IMAGEM QUICKBIRD UTILIZANDO MODELOS GEOMÉTRICOS DEPENDENTES DE TERRENO E MODELO DE SUPERFÍCIE GERADO COM DADOS LASER SCANNING

Araki, H.¹, Centeno, J. A. S.¹, Huinca, S. C. M.² e Cavalheiro, A. C.²

1- Depto. de Geomática, Universidade Federal do Paraná - (haraki, centeno) @ufpr.br

2- Curso de Eng. Cartográfica, Universidade Federal do Paraná - (suelnhuinca, annacarolina) @ufpr.br

RESUMO – Este artigo descreve a geração de ortoimagem a partir de imagens QuickBird, utilizando um Modelo Digital de Superfície (MDS) obtido a partir de dados laser scanning. O MDS foi obtido projetando os pontos medidos pelo laser scanning numa malha regular e aplicando o operador morfológico fechamento. Para a modelagem geométrica, foram utilizadas a transformação projetiva e os polinômios racionais de primeiro, segundo e terceiro graus, e foi efetuada uma comparação do desempenho destes modelos, sendo que os modelos mais simples apresentaram melhor desempenho. É descrita uma metodologia para minimizar o efeito da tomada inclinada (off-nadir) das imagens QuickBird para a geração de ortoimagens para áreas urbanas.

ABSTRACT – This paper describes the orthoimage generation from Quickbird images using Digital Surface Model (DSM) obtained from laser scanning data. The DSM was obtained by projecting the laser scanning data points into a regular grid and by using morphological closing operator. Geometric processing with projective transformation, rational function model using 1, 2 and 3 degree polynomials are compared. It is proposed one method to minimize the sensor off-nadir acquisition effect in the QuickBird orthoimage generation for urban areas.

PALAVRAS CHAVE: Correção geométrica, Ortorretificação, Modelo Digital de Superfície.

1 INTRODUÇÃO

As imagens dos sensores de alta resolução espacial proporcionam informação mais detalhada da cobertura superficial da Terra do que as imagens obtidas pelos sensores anteriormente disponíveis. A ortorretificação de imagens requer modelos digitais de elevação para corrigir o efeito do deslocamento na imagem causado pela variação da superfície topográfica. O modelo de polinômios racionais é utilizado para substituir o modelo físico do sensor, e os coeficientes dos polinômios, fornecidos juntamente com as imagens, são utilizados no processo de correção geométrica.

Os sensores de alta resolução como o QuickBird e o Ikonos são direcionáveis de modo a aumentar a possibilidade de imageamento de uma determinada região sem que o satélite esteja posicionado exatamente acima do local a ser imageado; como consequência, as imagens apresentam um efeito de perspectiva devido à visada do sensor estar inclinada em relação a vertical. Este problema é agravado em áreas urbanas densas pela existência de sombras projetadas pelos edifícios, que encobrem as feições existentes.

As coordenadas tridimensionais obtidas pelos sensores laser scanning possibilitam a geração de um modelo da superfície com grande rapidez, denominado Modelo Digital de Superfície (MDS), o qual representa as feições existentes sobre a superfície topográfica, como as

edificações e árvores. Assim, o MDS contém informação de elevação das edificações, necessária para a correção da visada inclinada das imagens de alta resolução. O presente artigo apresenta o resultado de testes referentes à modelagem geométrica mediante a utilização da transformação projetiva e de polinômios racionais de diferentes graus, visando a geração de uma ortoimagem QuickBird. Este artigo está organizado em cinco seções. Na seção 2 é apresentada uma descrição dos dados obtidos pelos sensores QuickBird e laser scanning, bem como o pré-processamento efetuado para preparar a etapa de ortorretificação da imagem. Na seção 3 são apresentados os modelos geométricos utilizados e os resultados obtidos; na seção 4 é descrito o procedimento para retirar o efeito residual ainda existente na imagem; e, na seção 5, são apresentadas conclusões e considerações.

2 PRÉ-PROCESSAMENTO

2.1 Imagem QuickBird

As imagens adquiridas pelos sensores orbitais de alta resolução espacial como o QuickBird e o Ikonos consistem de bandas multiespectrais, de menor resolução espacial, e uma pancromática, de maior resolução espacial. A resolução espacial das imagens Quickbird é de 61cm no modo pancromático, e de 2,4m

no modo multiespectral. O intervalo espectral imageado pelo QuickBird corresponde às regiões visível e infravermelho próximo do espectro eletromagnético, conforme a Tabela 1.

As imagens QuickBird em geral apresentam um efeito de perspectiva pelo fato de terem sido adquiridas com visada inclinada, não nadiral. O ângulo máximo de inclinação do sensor QuickBird é de 30 graus, havendo diminuição da resolução espacial no caso de visadas inclinadas para 70 cm e 2,5m, respectivamente, para os bandas pancromática e multiespectral. A Figura 1 ilustra a diferença entre a visada vertical (nadiral) e inclinada de um objeto.

Banda	Faixa espectral (nm) e região do espectro eletromagnético
1	450 a 520 – Visível (Azul)
2	520 a 600 – Visível (Verde)
3	630 a 690 – Visível (Vermelho)
4	760 a 900 – Infravermelho próximo
Pan	450 a 900 – Visível e infravermelho próximo

Tabela 1. Bandas do sensor QuickBird.

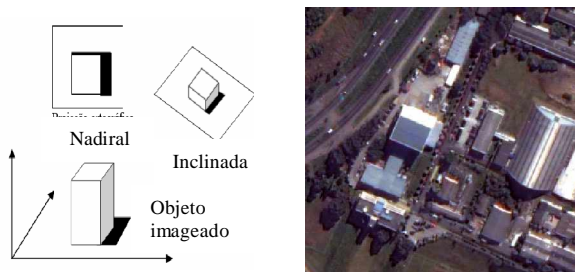


Figura 1. (a) Diferença no imageamento devido ao direcionamento do sensor. (b) Recorte de imagem QuickBird com visada inclinada.

As bandas pancromática e multiespectrais podem ser combinadas por meio de um processo de fusão, gerando imagens híbridas que combinam a resolução espacial mais refinada da banda pancromática com a informação espectral presente nas bandas multiespectrais. Para a imagem utilizada neste estudo, correspondente à área do Campus Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná em Curitiba, foi utilizado o método de fusão pela substituição da componente principal. Este método utiliza a técnica estatística da transformação em componentes principais, a qual exige três passos: primeiro, a construção da matriz covariância (ou da matriz correlação) das bandas multiespectrais; segundo, a determinação dos autovalores e autovetores desta matriz; e, terceiro, a formação das componentes principais usando os autovetores como peso.

A transformação em componentes principais permite obter, a partir das bandas multiespectrais, um novo

conjunto de bandas (componentes principais) que são combinações lineares das bandas originais. A primeira componente caracteriza-se por estar orientada segundo a direção de maior variância dos dados originais, apresentando maior contraste do que as demais componentes (Gonzales e Woods, 2000). A primeira componente então conterá teoricamente a informação que é comum a todas as bandas originais, enquanto outras componentes conterão informações espectrais específicas. Assim, a primeira componente é substituída pela banda pancromática e é efetuada a operação inversa para levar os dados combinados de volta ao espaço da imagem.

As bandas híbridas resultantes do processo de fusão apresentam alteração espectral em relação às bandas originais uma vez que primeira componente principal não é exatamente igual à banda pancromática. A Figura 1b mostra em cores verdadeiras um recorte das bandas 1, 2 e 3 da imagem híbrida resultante da fusão. Como se pode perceber na Figura 1b, a imagem Quickbird apresenta um efeito de perspectiva causado pela geometria da aquisição da imagem. Este efeito é maior para edificações mais altas, e deve ser corrigido na geração da ortorectificação, ou seja uma imagem em projeção ortogonal. A modelagem da superfície topográfica e da altura das edificações, necessárias no processo de correção geométrica, podem obtidas a partir dos dados adquiridos pelo laser scanning.

2.2 Dados Laser scanning

A tecnologia laser scanning foi desenvolvida acompanhando a melhoria da qualidade do posicionamento GPS e da capacidade de medida de altitude com unidades de medida inercial, e permite uma rápida aquisição de modelos digitais de superfície (MDS). O sistema de varredura ótico-mecânico emite pulsos laser e registra o retorno após reflexão pelos materiais presentes na superfície terrestre. A Figura 2 mostra o padrão de medidas do laser scanning. A distância é dada pela medida do tempo que a emissão laser necessita para percorrer a dupla distância da aeronave à superfície. A direção do feixe é calculada combinando o ângulo de sistema de varredura com a orientação da aeronave, proporcionada pela unidade de medida inercial. A posição da aeronave e, portanto a origem do feixe laser é conhecida usando GPS e a unidade de medida inercial; assim, as coordenadas de pontos medidos podem ser calculadas em um sistema terrestre de referência (Baltasvias, 1999).

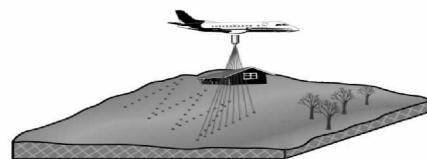


Figura 2. Padrão de varredura laser scanning.

A partir das coordenadas tridimensionais correspondentes às medidas (combinação do primeiro e do último pulso) adquiridas pelo sensor ALTM2050, foi gerado o modelo digital de superfície com a resolução espacial de 70 cm. Para gerar o MDS foi efetuada a projeção dos pontos medidos numa malha com espaçamento horizontal de 70cm. Nós da malha correspondentes a locais onde não houve medidas laser scanning foram preenchidos mediante aplicação do operador morfológico fechamento, o qual consiste de uma dilatação seguida de erosão. O operador dilatação permite eliminar padrões escuros em tons de cinza, tendo como consequência o clareamento da imagem. O efeito resultante depende da dimensão do elemento estruturante utilizado; no processamento realizado neste experimento, o elemento estruturante foi definido com a dimensão 3x3, ou seja, para cada posição ocupada pelo centro do elemento estruturante se tomou o valor maior de elevação numa janela contendo 9 pixels. A seguir, foi feita a erosão com o mesmo elemento estruturante, ou seja, para cada posição ocupada pelo centro do elemento estruturante se tomou o menor valor de elevação. Este procedimento permitiu manter a forma das edificações mas atenuou pequenos detalhes.

Devido à visada inclinada nas medidas efetuadas pelo laser scanning, ocorrem áreas de oclusão ao lado das edificações, onde o pulso laser não chegou. Tais áreas foram preenchidas buscando no MDS o menor valor de elevação na sua vizinhança. O algoritmo de geração do MDS foi implementado no ambiente MATLAB. A Figura 3 mostra um recorte do MDS.

No MDS não se tem a mesma definição dos contornos de edificações como caso das imagens de sensores multiespectrais de alta resolução. A densidade de pontos amostrados, o espaçamento da grade regular e o método de interpolação utilizado para gerar o MDS afetam a possibilidade de discriminar as bordas das feições. Entretanto, a informação altimétrica pode ser combinada com a informação de sensores multiespectrais, possibilitando discriminar diferentes tipos de cobertura que não são espectralmente separáveis, como é o caso de solo exposto e telhado. Além disso, a informação altimétrica é imprescindível para a correção geométrica das imagens de alta resolução.

3 ORTORRETIFICAÇÃO DA IMAGEM QUICKBIRD

Modelos geométricos são necessários para estabelecer a relação funcional entre espaços imagem e objeto. Os modelos podem ser físicos ou generalizados (Tao e Hu, 2001). Nos modelos físicos, cada parâmetro tem um significado físico e tem relação com a posição e a orientação do sensor com relação a um sistema de coordenadas do espaço-objeto. Nos modelos generalizados, a transformação entre os espaços imagem e objeto é representada como uma função geral como, por

exemplo, um polinômio. Em geral, por não precisarem de conhecimento da geometria do sensor, os modelos generalizados podem ser aplicados a diferentes tipos de sensores.

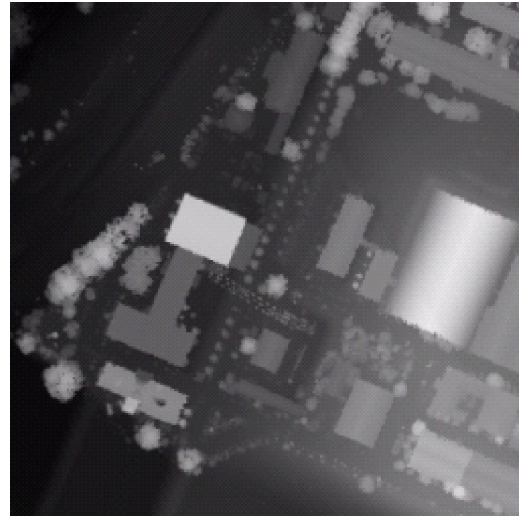


Figura 3. Recorte do MDS.

Com a disponibilidade de imagens de alta resolução espacial, o modelo de polinômios racionais está sendo amplamente utilizado para a correção geométrica. O modelo físico do sensor é utilizado para gerar uma grade de pontos e esta grade é utilizada para obter os parâmetros incógnitos no modelo de polinômios racionais. Como não existem relações funcionais entre os parâmetros do modelo físico e aqueles dos polinômios racionais, os parâmetros físicos não podem ser recuperados a partir dos coeficientes dos polinômios (Shi e Shaker, 2003). Por estas razões, as empresas proprietárias dos sensores de alta resolução espacial fornecem os parâmetros dos polinômios racionais, mas não fornecem os parâmetros relacionados ao modelo físico do sensor.

Os coeficientes fornecidos juntamente com as imagens podem nem sempre corresponder ao processo real de imageamento ou à superfície terrestre verdadeira. A imagem Quickbird com o nível básico de correção geométrica, como a utilizada neste trabalho, apresenta precisão métrica horizontal de 23m. O refinamento da correção geométrica pode ser realizado com um modelo generalizado quando se tem um modelo digital de superfície, e se tem pontos identificados nos dois espaços, terreno (MDS) e imagem (QuickBird). Neste caso, o efeito causado pelo visada do sensor pode ser também corrigido, já que o MDS representa a altura de cada edificação.

Nos modelos generalizados dependentes de terreno, o processamento geométrico possui dois passos: a transformação espacial que especifica matematicamente a relação entre a imagem de entrada e a imagem de saída, e

a interpolação de valores de cinza para construir a imagem de saída. Os parâmetros da transformação geométrica são calculados utilizando-se o método dos mínimos quadrados (MMQ) para um conjunto de pontos conhecidos nos dois espaços, imagem e terreno, denominados de pontos de controle. Para uma avaliação isenta da qualidade dos parâmetros determinados e da transformação espacial utilizada, deve-se dispor de um segundo conjunto de pontos também conhecidos nos dois espaços, denominados pontos de verificação. Neste estudo, foram utilizadas as transformações utilizando polinômios racionais com diferentes graus e a transformação projetiva.

3.1 Polinômios racionais

O modelo de polinômios racionais amplamente utilizado para modelar a superfície topográfica (representada pelo modelo digital de elevação) na correção geométrica de imagens de alta resolução espacial. Um polinômio racional é essencialmente uma razão entre dois polinômios e permite melhor interpolação com menor erro de aproximação do que quando da utilização de um único polinômio.

Neste estudo, serão testados diferentes graus de polinômios (primeiro, segundo e terceiro graus) na ortoretificação de uma imagem QuickBird utilizando o modelo da superfície (MDS) obtida dos dados adquiridos pelo laser scanning. A resolução dos polinômios racionais foi efetuada pela solução direta (Tao e Hu, 2001), sendo consideradas como observações (ou medições) apenas as coordenadas de imagem; assim, o método adotado para o ajustamento pelo MMQ foi o paramétrico.

A equação geral para os polinômios racionais é:

$$\begin{aligned} L_n &= P1(X_n, Y_n, Z_n) / P2(X_n, Y_n, Z_n) \\ C_n &= P3(X_n, Y_n, Z_n) / P4(X_n, Y_n, Z_n) \end{aligned} \quad (1)$$

onde L_n e C_n são, respectivamente, as coordenadas de imagem (linha e coluna) normalizadas correspondentes a um ponto objeto cujas coordenadas normalizadas são X_n , Y_n , e Z_n . Para o caso de 3º grau, os polinômios são expressos como:

$$\begin{aligned} P1 &= (1 \ Z_n \ Y_n \ X_n \ Z_n Y_n \ \dots \ Y_n^3 \ X_n^3)^T \cdot (a_0 \ a_1 \ \dots \ a_{19})^T \\ P2 &= (1 \ Z_n \ Y_n \ X_n \ Z_n Y_n \ \dots \ Y_n^3 \ X_n^3)^T \cdot (b_1 \ \dots \ b_{19})^T \\ P3 &= (1 \ Z_n \ Y_n \ X_n \ Z_n Y_n \ \dots \ Y_n^3 \ X_n^3)^T \cdot (c_0 \ c_1 \ \dots \ c_{19})^T \\ P4 &= (1 \ Z_n \ Y_n \ X_n \ Z_n Y_n \ \dots \ Y_n^3 \ X_n^3)^T \cdot (d_1 \ \dots \ d_{19})^T \end{aligned}$$

Os termos a_i , b_i , c_i e d_i são os coeficientes a serem determinados.

3.2 Transformação Projetiva

Uma transformação geométrica simples, para a qual a determinação dos parâmetros pode ser feita sem a

necessidade de grande número de pontos de controle, é a transformação projetiva (Ji e Zhang, 2002). A transformação projetiva permite relacionar coordenadas tridimensionais de objetos e sua representação bidimensional. A relação entre as coordenadas no MDS (X, Y, Z) e na imagem QuickBird (L, C), pode ser descrita geometricamente por uma transformação projetiva que, na forma matricial para coordenadas homogêneas, tem a forma:

$$\begin{pmatrix} L' \\ C' \\ 0 \\ W \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Os termos a_{ij} são os parâmetros da transformação projetiva, e $(L', C', 0, W)$ são as coordenadas homogêneas para o pixel de coordenadas (L, C) . As coordenadas de imagem (L, C) são obtidas fazendo-se

$$\begin{aligned} L &= L' / W \\ C &= C' / W \end{aligned} \quad (4)$$

ou, de modo equivalente,

$$\begin{aligned} L &= \frac{(a_{11} X + a_{12} Y + a_{13} Z + a_{14})}{(a_{41} X + a_{42} Y + a_{43} Z + 1)} \\ C &= \frac{(a_{21} X + a_{22} Y + a_{23} Z + a_{24})}{(a_{41} X + a_{42} Y + a_{43} Z + 1)} \end{aligned} \quad (5)$$

3.3 Experimentos e Resultados

Para a determinação dos parâmetros das transformações descritas acima foram medidas coordenadas de pontos situados em topo e base de edificações. Após a depuração para a eliminação de erros introduzidos no processo de medição, os pontos foram separados em dois conjuntos, o primeiro contendo 38 pontos para serem utilizados na determinação dos parâmetros, e o segundo conjunto contendo 15 pontos de verificação. O número de parâmetros para cada transformação está apresentado na Tabela 2. Para a determinação dos parâmetros da transformação projetiva também foram consideradas observações (ou medições) apenas as coordenadas da imagem QuickBird, e o método adotado para o ajustamento pelo MMQ foi o paramétrico. Considerou a matriz peso como equivalente à matriz identidade. A Tabela 2 também apresenta o erro médio quadrático obtido para os pontos de controle e de verificação, bem como os erros máximo e mínimo.

Analisando os resíduos para os pontos de controle e para os pontos de verificação consta-se que aumentando o

grau do polinômio houve diminuição dos resíduos para os pontos de controle, mas um aumento dos resíduos para os pontos de verificação. O resíduo máximo encontrado para pontos de verificação também aumentou. Estes resultados indicam que está havendo uma adaptação melhor para o conjunto de pontos de controle, sendo que este comportamento não se aplica para os pontos que não participam deste conjunto.

	Transf. Projetiva	Pol. 1º grau	Pol. 2º grau	Pol. 3º grau
Parâmetros	15	14	38	74
Resíduos para pontos de controle (em metros)				
Média	0,76	0,54	0,26	0,06
Mínimo	0,05	0,23	0,07	0,00
Máximo	1,64	1,11	0,54	0,26
Resíduos para pontos de verificação (em metros)				
Média	0,69	0,66	0,58	1,04
Mínimo	0,16	0,24	0,05	0,09
Máximo	1,27	1,21	2,28	9,69

Tabela 2. Erro médio quadrático para pontos de controle e para pontos de verificação.

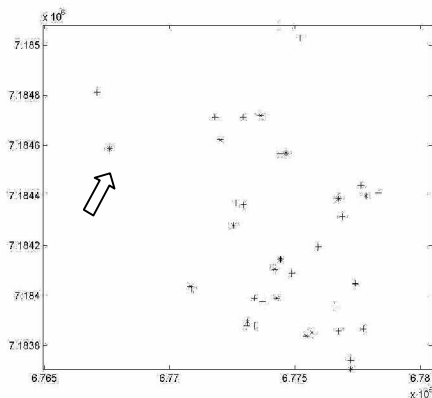


Figura 4. Distribuição dos pontos de controle e de verificação.

A Figura 4 mostra a distribuição dos pontos de controle e verificação. A seta indica a localização do ponto de verificação para o qual o resíduo foi maior (9,69m no caso do polinômio racional de terceiro grau). Percebe-se que não existem pontos de controle nas proximidades deste ponto, indicando que os polinômios de segundo e terceiro graus não tem boa característica de extrapolação. Uma distribuição espacial adequada de pontos de controle deve contemplar toda a variação planimétrica existente na região.

O polinômio de primeiro grau e a transformação projetiva apresentaram menor variação de resíduos para

os pontos de verificação do que os polinômios de grau mais elevado, embora os resíduos para pontos de controle sejam maiores. Na imagem gerada mediante a utilização dos modelos mais simples tem-se boa aproximação do topo das edificações em relação à sua base, como se pode perceber na Figura 5.

Na geração da ortoimagem foi efetuada a interpolação bilinear na determinação do valor dos pixels para cada banda Quickbird. Conforme a Figura 5, na ortoimagem há coincidência da base com o topo das edificações, porém, ainda existe o deslocamento residual do topo das edificações devido à visada inclinada na tomada da imagem. Este deslocamento aparente precisa ser tratado; este passo é descrito na próxima seção.

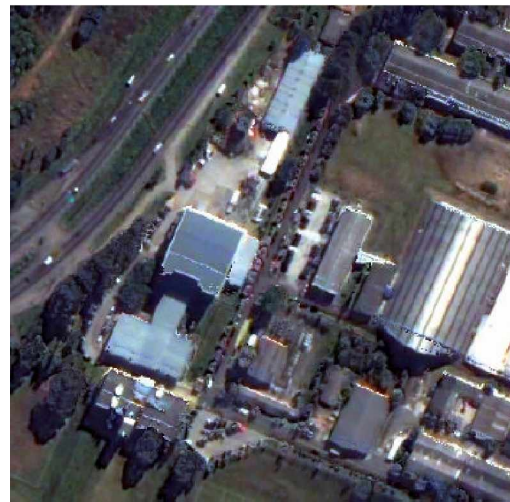


Figura 5. Imagem resultante da aplicação da transformação projetiva.

4 CORREÇÃO DO EFEITO DA VISADA INCLINADA

A partir da imagem corrigida e do MDS, pode-se determinar o azimute do sensor e sua elevação. A elevação do sensor foi calculada a partir da medida do deslocamento do topo (na imagem) e da altura das edificações (no MDS), e o azimute a partir da direção do deslocamento. A Figura 6a ilustra os elementos envolvidos na correção. Dispondo do azimute e do ângulo de elevação do sensor, pode-se percorrer o MDS projetando para cada edificação a "sombra" em função da sua altura. Considerou-se que as regiões da imagem correspondentes à "sombra" podem ter valor de cinza igual a zero, pois correspondem a regiões onde a informação sobre o tipo de cobertura do solo não foi adquirida pelo sensor. A Figura 6b mostra a imagem resultante do cálculo da "sombra" para as edificações, a qual foi aplicada como máscara sobre a imagem ortoimagem. O resultado está mostrado na Figura 7.

5 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES

Na comparação efetuada para uma área pequena com variação em altitude de cerca de 75 metros, a transformação projetiva e o polinômio racional de primeiro grau se mostraram mais eficazes do que os polinômios racionais de segundo e terceiro graus. Também o efeito da visada do sensor foi corrigido, sendo que a altura de cara edificação, proporcionada pelo MDS, é necessária no processo de geração da ortoimagem.

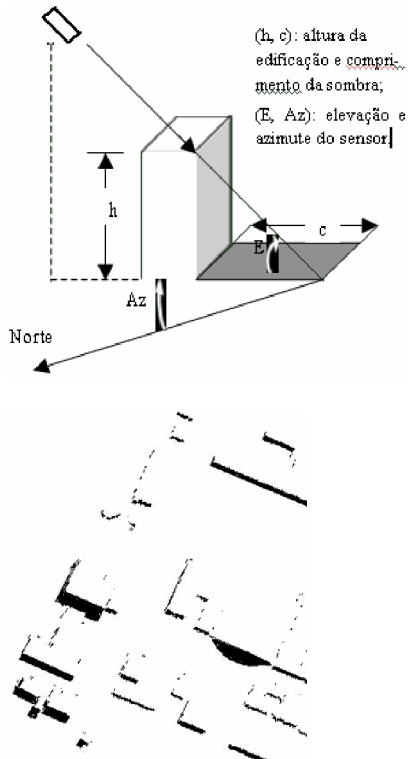


Figura 6. (a) Posição do sensor e do objeto.
(b) Áreas de oclusão ("sombras").

A verificação da transformação geométrica mais adequada deve levar em conta o número e a distribuição de pontos de controle, bem como a variação altimétrica devido às edificações. Outros testes devem ser realizados para verificar o comportamento dos modelos mais simples em regiões urbanas mais densas. Na geração do MDS, deve-se busca uma resolução que permita a representação mais fiel das medidas efetuadas pelo laser scanning; também se deve efetuar a correção dos erros introduzidos no processo de medida tridimensional de pontos.

Nas regiões de sombra, devido à alta resolução radiométrica do sensor QuickBird, é possível recuperar a informação espectral sobre os tipos de cobertura. Já para as aéreas onde o valor de cinza foi considerado zero devido à oclusão, não existe informação sobre o tipo de cobertura. Mas as informações sobre estas regiões estão

disponíveis na intensidade do retorno do feixe laser, ou podem ser buscadas em outras fontes como fotografias aéreas e base cartográfica. Assim, quando se deseja efetuar a análise do uso/cobertura do solo, deve-se utilizar, além da imagem QuickBird corrigida (ortoimagem), informação adicional proveniente de outras fontes.



Figura 7. Ortoimagem final.

6 REFERÊNCIAS

- Baltsavias, E. P., 1999. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, vol. 54, pp 199-214.
- Gonzales, R. C. e Woods, R. E. **Processamento de Imagens Digitais**. Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 2000. 509p.
- Ji, Z. e Zhang, J., 2002. 3D visualization of building from lidar and Ikonos image. **ISPRS Comission II Symposium**, pp 213-216.
- Shi, W. e Shaker, A., 2003. Approximate approaches for geometric corrections of high resolution satellite images. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.69, n.12, pp. 1359-1366.
- Tao, C. V. e Hu, Y., 2001. A comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.67, n.12, pp 1347-1357.

7 AGRADECIMENTOS

Ao LACTEC pelos dados laser scanning, e à CETILGEO pela disponibilização da imagem QuickBird.