

Revista Brasileira de Cartografia (2011) N^o 63/5: 619-631
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

ANÁLISE DE DIFERENTES TRANSFORMAÇÕES PARA A CORREÇÃO GEOMÉTRICA DE IMAGENS ORBITAIS DE ALTÍSSIMA RESOLUÇÃO

*Analysis of Different Transformations for Geometric Correction on Very High
Resolution Orbital Image*

**Giuliano Sant'Anna Marotta¹, Dalto Domingos Rodrigues²,
Carlos Antonio Oliveira Vieira³ & George Sand Leão Araújo de França¹**

¹Universidade de Brasília - UnB

Instituto de Geociências - IG

Campus Universitário Darcy Ribeiro ICC - Ala Central - CEP 70910-900 - Brasília - DF

marotta@unb.br

georgesand@unb.br

²Universidade Federal de Viçosa – UFV

Departamento de Engenharia Civil - Setor de Engenharia de Agrimensura

Av. PH Holfs, S/N – CEP 36570-000 - Viçosa - MG

dalto@ufv.br

³Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Centro de Filosofia e Ciências Humanas - Departamento de Geociências

Campus Universitário - Trindade - CEP 88040-970 - Florianópolis - SC

carlos.vieira@cfh.ufsc.br

Recebido em 25 Março, 2011/ Aceito em 05 Junho, 2011

Received on March 25, 2011/ accepted on June 05, 2011

RESUMO

A alta resolução espacial de imagens provenientes de sensores orbitais proporciona grande facilidade na identificação de feições e pontos para a realização da correção geométrica. Contudo, há a necessidade de se estimar as coordenadas dos pontos fiduciais com grande precisão, pois os erros inerentes a estas coordenadas se propagam, de forma significativa, para a imagem corrigida geometricamente. Consequentemente, para avaliar a qualidade das imagens corrigidas, há a necessidade de se empregar técnicas que evidenciem a incerteza posicional de forma espacializada. O presente trabalho tem por objetivo avaliar a correção geométrica em uma imagem orbital de altíssima resolução espacial, proveniente do sensor *QuickBird*, aplicando diferentes modelos de transformação de coordenadas no espaço, como modelos de projeção afim, projetivo e projetivo modificado. Utilizando coordenadas dos pontos fiduciais, no sistema terrestre, com precisão devidamente avaliada, o método dos mínimos quadrados e a propagação de variâncias, foi possível estimar as incertezas dos parâmetros para cada modelo utilizado e propagar as variâncias para as coordenadas da imagem corrigida geometricamente, possibilitando a estimativa do erro médio quadrático para cada pixel da imagem.

Palavras chaves: Correção Geométrica, Incerteza Posicional, Propagação de Variâncias.

ABSTRACT

The high spatial resolution of images provided by orbital sensors allows great facilities in points' and features' identification, in order to perform geometrical corrections. However, the acquisition of high precision referential coordinates is required, because the errors in the referential coordinates can significantly spread to the geometrical corrected image. Consequently, in order to evaluate the quality of the images after geometric correction, there is a need to involve techniques that spatializes the positional uncertainties. The objective of this work is to evaluate the geometrical correction in a high resolution orbital image, from *Quickbird* sensor, applying different models of spatial coordination transformations, such as: related projections, projective and projective modified models. Using the reference coordinates, with accuracies properly evaluated, as well as using the least squares method, and the variance propagation rule, it was possible to estimate the parameter uncertainties for each model, propagate them to the geometrical corrected image coordinates, allowing the medium square error estimative for each pixel of the image.

Keywords: Error Propagation, Geometric Correction, Positional Uncertainty.

1. INTRODUÇÃO

Imagens provenientes de sensores orbitais sofrem diversas distorções geométricas que degradam a precisão posicional das informações nelas representadas. Conseqüentemente, para melhorar a qualidade posicional das informações, torna-se necessária a correção geométrica das imagens, utilizando modelos matemáticos que levam em consideração o comportamento das distorções no universo tridimensional.

Segundo Pedro (2005), nos últimos 15 anos, vários modelos matemáticos têm sido formulados para extrair informações 3D e gerar ortoimagens de dados levantados por sensores remotos que utilizam CCD - *Charge-Coupled Device*.

Modelos matemáticos têm sido desenvolvidos usando informações do sensor, modificando equações de colinearidade, e em alguns casos, incluindo parâmetros para modelagem de erros e orientação interior ou calibração em órbita, ou ainda incorporando informações orbitais. (BALSAVIAS *et al.*, 2001).

Há um número considerável de modelos baseados em equações de colinearidade que foram formulados tradicionalmente para a execução da transformação fotogramétrica do espaço imagem para o espaço objeto, incluindo modelo polinomial, interpolação da grade e modelos de funções racionais. (FRASER *et al.*, 2004).

Os modelos de funções racionais ou o modelo polinomial racional da câmera são formados por parâmetros denominados RPCs (*Racional Polinomial Coeficientes*). Estes parâmetros, geralmente, são fornecidos juntamente com a imagem, como é o caso de alguns produtos

comercializados provenientes do sensor *Ikonos* e *QuickBird*.

Contudo, quando não se tem conhecimento das características físicas do sensor, da lente, e de parâmetros RPCs, torna-se necessário recorrer à outros modelos derivados na tentativa de corrigir ao máximo as distorções inerentes à imagem orbital.

Dentre outros modelos amplamente empregados estão os modelos de projeção afim, projetivo e projetivo modificado.

2. OBJETIVO

O presente trabalho tem por objetivo, avaliar as incertezas geradas no processo de correção geométrica das coordenadas bidimensionais de uma imagem *QuickBird*, aplicando os seguintes modelos, planos e espaciais, de transformações geométricas: modelo de projeção afim, modelo projetivo e modelo projetivo modificado.

Dispondo de uma boa estimativa da precisão das coordenadas terrestres dos pontos fiduciais, este trabalho realiza a estimativa das coordenadas terrestres de pontos na imagem e de suas incertezas.

Conhecendo-se as incertezas dos parâmetros que relacionam referencial terrestre e de imagem, para os diferentes modelos empregados, torna-se possível propagar estas incertezas gerando um valor do erro médio quadrático (RMS), em metros, para cada pixel da imagem.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Caracterização da área de estudos

A área de estudos (Fig. 1), localizada no município de Viçosa - MG, abrange um total de aproximadamente 1,26 km² e está situada no campus da Universidade Federal de Viçosa – UFV.



Fig. 1 – Localização da área de estudos.

A área se encontra em uma região predominantemente plana com algumas áreas de relevo ondulado, cuja diferença de nível máxima é de aproximadamente 100 metros.

3.2. Materiais

Para realização do presente trabalho, foi utilizada uma imagem proveniente do sensor *QuickBird* (Fig. 1). Esta imagem foi adquirida em sua forma bruta e o objeto de estudos engloba a banda Pancromática, que possui resolução espacial nominal de 0,6 metros, resolução radiométrica de 11 bits e dimensões de 1977 colunas e 1771 linhas.

Para visualização da imagem orbital e extração de coordenadas no sistema de tela foi utilizado o software *Erdas Imagine 8.3.1*.

Na obtenção das coordenadas terrestres, foram utilizados 3 (três) receptores GPS de uma frequência, com precisão nominal horizontal de 5mm + 1 ppm e precisão vertical de 10 mm + 2 ppm. As coordenadas terrestres dos pontos fiduciais foram determinadas através da técnica de posicionamento relativo utilizando como base uma estação pertencente à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo – RBMC. Esta estação pertence à rede de referência do SIRGAS 2000. A estação consiste em um pilar de concreto dotado de dispositivo de centragem forçada e de um receptor GNSS *TRIMBLE NetR5* e antena tipo *ZEPHYR GNSS GEODETIC MODEL 2*.

No processamento dos dados de rastreamento e ajustamento dos vetores foi utilizado o software *Trimble Geomatics Office 1.63*.

Para a realização da transformação de coordenadas, bem como o ajustamento de

observações e a análise apresentada neste trabalho, foram desenvolvidas rotinas em linguagem “C” utilizando o compilador *Borland C++ v. 5.02*.

3.3. Metodologia

Como metodologia empregada no presente trabalho propõe-se a realização e análise de precisão de transformações geométricas em uma imagem orbital de altíssima resolução, envolvendo o espaço bi e tridimensional, através de modelos de projeção afim e projetiva.

Para a realização das transformações geométricas, primeiramente, foi necessária a identificação dos pontos fiduciais na imagem e seus respectivos homólogos em campo, a fim de estabelecer uma relação entre os diferentes sistemas de coordenadas. Após a identificação dos pontos fiduciais, procedeu-se a extração de suas coordenadas de tela e, posteriormente, a determinação das coordenadas terrestres em campo. De posse destas coordenadas, passou-se ao processo de transformação geométrica.

Para estimar os parâmetros dos modelos de transformação empregados, bem com as suas incertezas, foi empregado o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ).

A fim de minimizar possíveis tendências no modelo ajustado, os pontos fiduciais foram homogeneamente distribuídos em toda área de estudos.

A aplicação dos modelos de transformação se deu através das seguintes etapas:

- Modelos de transformação afim e projetivo 2D: nesta etapa foram utilizadas as equações que não levam em consideração a altitude no cálculo dos parâmetros. Para estimar os parâmetros foram utilizadas somente as coordenadas planimétricas terrestres e de imagem dos pontos fiduciais. Estes modelos são muito utilizados na correção geométrica de imagens de baixa e média resolução, em que as deformações devido ao relevo não são significativas.

- Modelos de transformação afim, projetivo e projetivo modificado utilizando altitude fixa: nesta etapa foram utilizadas as equações que levam em consideração as altitudes dos pontos fiduciais na estimativa dos parâmetros, contudo, após a determinação dos parâmetros, foi arbitrada uma altitude constante para a realização da correção geométrica na imagem. A altitude constante se deve

ao fato de não haver informações de altitudes para toda a porção da imagem.

- Modelos de transformação afim, projetivo e projetivo modificado utilizando altitude variável: nesta etapa, além de utilizar as equações que levam em consideração as altitudes dos pontos fiduciais na estimativa dos parâmetros, após a determinação dos parâmetros, foram utilizadas informações de altitude para cada pixel da imagem para a realização da correção. As altitudes foram extraídas de um Modelo Digital do Terreno – MDT gerado a partir de curvas de nível advindas de uma carta topográfica vetorial na escala de 1:50.000 com equidistância de 20 metros entre as curvas.

Por não haver informações de altitudes com maior precisão, optou-se por tomar como verdade as informações de altitudes geradas pela carta topográfica, uma vez que este trabalho pretende demonstrar o comportamento de diferentes modelos de transformação e definir uma metodologia de espacialização das incertezas na imagem.

3.3.1. Coordenadas dos pontos fiduciais

A fim de relacionar o sistema da imagem com o sistema terrestre é necessário conhecer as coordenadas dos pontos fiduciais nestes dois sistemas.

Para isto, inicialmente foram identificados 13 pontos homogeneamente distribuídos em toda imagem e perfeitamente identificáveis e acessíveis em campo (Fig. 2). O número de pontos coletados foi suficiente para suprir a quantidade de observações necessárias no ajustamento de observações em todos os modelos de transformação utilizados.

Após identificar e medir as coordenadas no sistema de imagem destes 13 pontos, empregando software *Erdas Imagine 8.3.1*, foi realizado o rastreamento de sinais GPS em cada um deles.

O rastreamento dos sinais de satélite se deu utilizando a técnica de posicionamento relativo estático, com intervalo de gravação de 5 segundos, tempo de rastreamento de 30 minutos e máscara de elevação de 15°. Para isto, além dos receptores em campo, foi utilizada uma base fixa da RBMC situada dentro da área de estudos.

Todo o processamento e ajustamento dos dados foram realizados utilizando as coordenadas geodésicas referenciadas ao sistema SIRGAS 2000 (época 2000,4), Fig. 2.

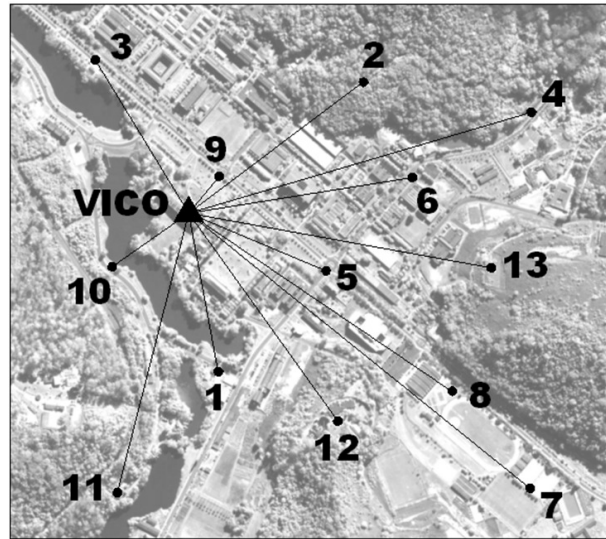


Fig. 2 – Pontos Fiduciais.

Após estimar as coordenadas terrestres geodésicas (latitudes e longitudes, em graus do sistema sexagesimal) dos pontos fiduciais, foi realizada a transformação dessas coordenadas para o sistema de projeção UTM (unidade linear) a fim de viabilizar o desenvolvimento dos modelos matemáticos responsáveis pelas transformações geométricas na imagem.

3.3.2. Modelos de transformação de coordenadas

Os modelos de transformação são modelos matemáticos com a característica de transformar coordenadas entre dois ou mais sistemas.

A transformação entre sistemas se dá através da adequação de três conjuntos de parâmetros implícitos em um modelo matemático, que basicamente são rotações, translações e escalas nos eixos dos sistemas envolvidos (Fig. 3).

Dentre os modelos utilizados na transformação das coordenadas de imagem (C, L, z) para coordenadas terrestres (E, N, h), foram utilizados os modelos de projeção afim e o modelo projetivo envolvendo o espaço bi e tridimensional, e modelo projetivo modificado.

Estes modelos de transformação utilizados são modelos simplificados, de fácil implementação, que visam, além de transformar as coordenadas de um sistema para outro, corrigir algumas distorções inerentes às características físicas da imagem, como rotações, translações e escalas.

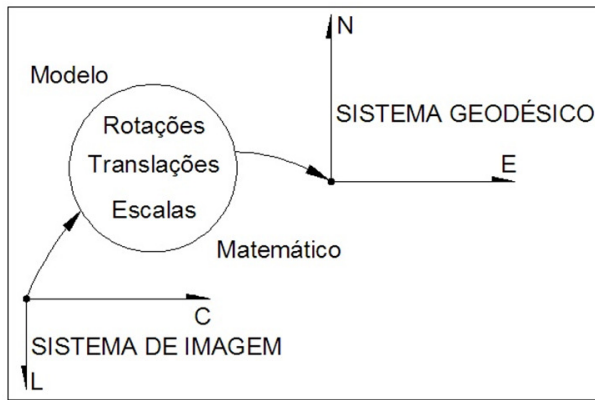


Fig. 3 – Transformação entre sistemas.

De acordo com Lugnani (1987) o modelo afim projeta o espaço 3D no plano 2D, que é um caso particular da projeção central onde o centro de projeção foi deslocado para o infinito. Este modelo pode ser representado pela seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} C \\ L \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_5 & a_6 & a_7 \\ a_9 & a_{10} & a_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ N \\ h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_4 \\ a_8 \\ a_{12} \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde : C, L, z representam as coordenadas dos pontos no espaço imagem; E, N, h representam as coordenadas dos pontos no espaço objeto; e $a_1...a_{np}$ representam os elementos da matriz dos parâmetros de transformação, com np igual ao número total de parâmetros;

Em modelos de transformação envolvendo o espaço 3D, é considerado que existe uma escala para cada ponto em função da sua altitude ou cota.

Na transformação de coordenadas em imagens, onde não há informações de z , foi considerada a condição a seguir como verdadeira:

$$a_9E + a_{10}N + a_{11}h + a_{12} = 0 \quad (2)$$

Daí, após simplificação, tem-se para o modelo afim 3D:

$$C = a_1E + a_2N + a_3h + a_4 \quad (3)$$

$$L = a_5E + a_6N + a_7h + a_8 \quad (4)$$

$$z = 0 \quad (5)$$

Para o modelo afim 2D, onde $h = 0$, tem-se:

$$C = a_1E + a_2N + a_3 \quad (6)$$

$$L = a_4E + a_5N + a_6 \quad (7)$$

O modelo de transformação projetiva representa uma simplificação do modelo de colinearidade, onde agrupando os parâmetros de forma a simplificá-los, tem-se a forma final da transformação projetiva tridimensional, dada por:

$$C = \frac{a_1E + a_2N + a_3h + a_4}{a_9E + a_{10}N + a_{11}h + 1} \quad (8)$$

$$L = \frac{a_5E + a_6N + a_7h + a_8}{a_9E + a_{10}N + a_{11}h + 1} \quad (9)$$

De acordo com Ghilani & Wolf (2006) a transformação projetiva de coordenadas bidimensionais requer oito parâmetros e a utilização desta transformação é apropriada quando um sistema bidimensional de coordenadas é projetado em outro sistema não paralelo.

A fim de determinar o modelo de transformação projetiva no espaço 2D, ou seja, o modelo que associa dois sistemas bidimensionais não ortogonais, despreza-se o valor da altitude do ponto do espaço objeto, fazendo $h = 0$ nas equações (08) e (09), e após as simplificações inerentes ao referido modelo de transformação, tem-se:

$$C = \frac{a_1E + a_2N + a_3}{a_7E + a_8N + 1} \quad (10)$$

$$L = \frac{a_4E + a_5N + a_6}{a_7E + a_8N + 1} \quad (11)$$

O modelo projetivo modificado, proposto por Wang (1999), consiste na adição de mais um parâmetro (a_{12}) na equação (09) referente ao modelo projetivo envolvendo o espaço tridimensional. Este modelo define 12 parâmetros que relacionam as coordenadas entre os espaços 2D e 3D, e pode ser explicitado pelas seguintes equações :

$$C = \frac{a_1E + a_2N + a_3h + a_4}{a_9E + a_{10}N + a_{11}h + 1} \quad (12)$$

$$L = \frac{a_5 E + a_6 N + a_7 h + a_8}{a_9 E + a_{10} N + a_{11} h + 1} + a_{12} \cdot C \cdot L \quad (13)$$

Segundo Wang (1999) o modelo projetivo modificado é um processo de transformação linear entre coordenadas da imagem e coordenadas de terreno, com uma correção adicional para coordenadas da imagem (parâmetro a_{12}) para o ajuste de erros sistemáticos. Usando este modelo, nenhum parâmetro de orientação interior ou parâmetros aproximados de orientação exterior (informações de efemérides) são necessários.

De acordo com Wang (1999) e Valadan (2003) este modelo é também chamado de *Self Calibration Direct Linear Transformation* (SDLT).

3.3.3. Ajustamento das observações

Para estimar os parâmetros foi utilizado o Método dos Mínimos Quadrados – método paramétrico.

A principal característica do método paramétrico é que as observações mais os resíduos das observações devem ser funções dos parâmetros ajustados:

$$L_b + V = F(X_a) \quad (14)$$

onde L_b é o vetor dos valores observados, V o vetor dos resíduos dos valores observados e $F(X_a)$ é o vetor das funções dos parâmetros ajustados.

Neste trabalho foram utilizados 13 pontos observados na imagem, totalizando 26 coordenadas planimétricas observadas no sistema da imagem para a realização do ajustamento pelo MMQ.

O modelo estocástico foi estabelecido com base nas variâncias das observações das coordenadas de tela (C_{Lb}). Uma vez desconhecidas as variâncias (σ^2), estas foram arbitradas, a priori, em 0,25 pixels ao quadrado, de forma que todas as observações tiveram desvios padrão de 0,5 pixels.

$$C_{Lb} = \text{diag} [\sigma_{C_1}^2 \ \sigma_{L_1}^2 \ \dots \ \sigma_{C_n}^2 \ \sigma_{L_n}^2] \quad (15)$$

Com os valores das variâncias das coordenadas de tela, a priori, determinam-se os pesos (P) nas observações.

$$P = \sigma_0^2 \cdot C_{Lb}^{-1} \quad (16)$$

onde σ_0^2 é a variância do ajustamento, que a priori é igual a uma unidade.

Definido o modelo matemático, o número de parâmetros (incógnitas) e o número de observações, passa-se ao cálculo da matriz das derivadas parciais, utilizando a seguinte expressão:

$$A = \frac{\partial F (X_a)}{\partial X_a} \quad (17)$$

De posse da matriz das derivadas (A) juntamente com os valores observados e os pesos das observações, passa-se ao cálculo do vetor das correções aos valores aproximados dos parâmetros, dado por:

$$X = (A'PA)^{-1}A'PL \quad (18)$$

onde

$$L = L_b - L_0 \quad (19)$$

L_b é o vetor das observações e L_0 o vetor cujos elementos são calculados substituindo os parâmetros aproximados (X_0) no modelo.

Através dos valores do vetor das correções e dos valores dos parâmetros aproximados, calculam-se os parâmetros ajustados (X_a):

$$X_a = X_0 + X \quad (20)$$

Após calcular os parâmetros, passa-se ao cálculo dos resíduos das observações (V) e fator de variância *a posteriori* ($\hat{\sigma}_0^2$), a fim de se verificar possíveis discrepâncias nos valores observados e possível inconsistência no ajustamento realizado.

Para o cálculo dos resíduos, têm-se:

$$V = A \cdot X - L \quad (21)$$

Para o cálculo do fator de variância *a posteriori*, têm-se:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V' \cdot P \cdot V}{GL} \quad (22)$$

em que GL representa o grau de liberdade (diferença entre o número de observações e o número de parâmetros).

De posse dos parâmetros devidamente ajustados e das coordenadas de imagem (C e L) de qualquer ponto, pode-se realizar a transformação entre os sistemas obtendo através de um modelo inverso, as coordenadas E, N e/ou h para cada pixel da imagem.

3.3.4. Estimativa do erro

A estimativa do erro, no processo de correção geométrica da imagem, de acordo com as transformações geométricas propostas, se deu através de análises das incertezas e dos resíduos das coordenadas terrestres dos pontos fiduciais, das coordenadas de imagem e dos parâmetros de transformação.

Dentre os elementos estatísticos utilizados na determinação da qualidade da transformação, estão os resíduos, os resíduos padronizados (RP), o fator de variância *a posteriori*, e o Erro Médio Quadrático (RMS), aplicado aos resultados do ajustamento de observações.

Ao analisar os resíduos, é possível verificar a discrepância entre seus valores. Estes valores podem evidenciar possíveis erros grosseiros nas coordenadas de imagem e terrestres dos pontos fiduciais.

Uma forma de analisar os resíduos é através do Resíduo Padronizado. Apesar de não haver um valor chamado ótimo, é muito utilizado, pois este resíduo dá uma idéia do comportamento dos resíduos das observações em relação a seus respectivos desvios padrão.

O Resíduo Padronizado é calculado por:

$$RP = \frac{V_{OBS}}{\sigma_{V_{OBS}}} \quad (23)$$

onde V_{OBS} representam os resíduos das observações e $\sigma_{V_{OBS}}$ os desvios padrão dos resíduos das observações.

O cálculo do desvio padrão dos resíduos das observações foi realizado a partir da Matriz da MVC dos resíduos que é dada por:

$$C_V = \hat{\sigma}_0^2 \cdot [C_{Lb} - A \cdot (A^t \cdot P \cdot A)^{-1} \cdot A^t] \quad (24)$$

Uma forma consistente de analisar os resíduos e verificar a possível presença de erros grosseiros é

através do “teste de Tau ”, onde, utilizando informações do RP e comparados a um dado grau de liberdade na curva de distribuição de Tau . Caso valores calculados excedam valores tabelados do referido teste, pode-se inferir que estes apresentam erros grosseiros, devendo ser descartadas ou refeitas as observações.

A qualidade do ajustamento é avaliada através do $\hat{\sigma}_0^2$, onde se verifica, pela discrepância do valor calculado com o valor estabelecido a priori ($\sigma_0^2 = 1$).

Para se verificar a hipótese de que o fator de variância *a posteriori* ($\hat{\sigma}_0^2$) é estatisticamente igual a 1 (um), emprega-se o teste *Qui-Quadrado* (χ^2). Compara-se o valor tabelado, ao nível de significância de 0,10, com o valor da variância de referência *a posteriori* dividido pelo número de graus de liberdade. Se o valor calculado se encontrar dentro do intervalo dos valores tabelados, não se rejeita a hipótese de que a variância de referência, ou fator de variância, *a posteriori* é estatisticamente igual a 1 (um). Caso o valor calculado esteja fora do intervalo dos valores tabelados, deve-se proceder a uma análise mais cuidadosa do ajustamento, verificando a possível presença de observações com erros grosseiros (observações com resíduos excessivamente grandes), a presença de observações super ou subestimadas (observações com pesos muito grandes ou pequenos) e possíveis erros sistemáticos decorrentes da inconsistência do modelo matemático.

Após a análise da variância de referência *a posteriori*, dos resíduos e dos pesos das observações, calcula-se a Matriz Variância Covariância (MVC) *a posteriori* dos valores observados e dos parâmetros ajustados, dadas por:

$$C_{Lb} = \hat{\sigma}_0^2 \cdot P^{-1} \quad (25)$$

e

$$C_{PAR} = \hat{\sigma}_0^2 \cdot (A^t \cdot P \cdot A)^{-1} \quad (26)$$

Um índice que pode ser usado para indicar a qualidade da transformação geométrica da imagem é a seguinte média, denominada aqui de RMS_i :

$$RMS_i = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{V_{E_i}^2 + V_{N_i}^2}}{n} \quad (27)$$

onde n é o número de pares de coordenadas.

Quanto menor o RMS_i , melhor a transformação. Apesar de ser um índice que não leva em consideração o aspecto posicional dos valores observados utilizados no cálculo dos parâmetros dos modelos de transformação, este é utilizado como indicador de qualidade da imagem transformada.

Como forma alternativa de se avaliar a qualidade da transformação, utilizou-se os princípios da lei de propagação das covariâncias, a fim de propagar as incertezas inerentes às fases de observações de coordenadas em campo e na imagem juntamente com as incertezas calculadas dos parâmetros de transformação. A finalidade da propagação foi de proporcionar uma grandeza que demonstre maior confiabilidade na interpretação dos resultados. De posse dessa grandeza, foi realizada a extrapolação do erro para toda a imagem a fim de gerar um parâmetro a ser analisado com o objetivo de detectar a variação das incertezas em toda a imagem e, conseqüentemente, verificar a possível presença de tendências na imagem transformada.

A lei de propagação de covariâncias pode ser representada pelo seguinte modelo:

$$C_v = J \cdot C_{par, obs} \cdot J^T \quad (28)$$

onde C_v é a matriz variância-covariância das coordenadas transformadas.

$$C_{par, obs} = \begin{bmatrix} MVC_{par} & 0 & 0 \\ & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \sigma_C^2 & 0 \\ 0 & \dots & & \sigma_L^2 \end{bmatrix} \quad (29)$$

e J é a matriz das derivadas parciais de E e N em relação aos parâmetros da transformação (a_i) e às observações (C, L), ou seja:

$$J = \frac{\partial F(E, N)}{\partial (a_1, a_2, \dots, C, L)} \quad (30)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As coordenadas de tela dos pontos fiduciais empregadas para a realização das transformações geométricas utilizando diferentes modelos matemáticos, bem como os desvios padrão adotados, estão na Tabela 1.

Tabela 1. Coordenadas dos pontos de referência no sistema de imagem (em pixel).

Ponto	Coluna	Coluna	Linha	Linha
1	708	0,5	1324	0,5
2	278	0,5	184	0,5
3	1719	0,5	1600	0,5
4	335	0,5	867	0,5
5	1043	0,5	879	0,5
6	1462	0,5	1278	0,5
7	690	0,5	568	0,5
8	1227	0,5	207	0,5
9	1723	0,5	354	0,5
10	1446	0,5	510	0,5
11	369	0,5	1627	0,5
12	1587	0,5	871	0,5
13	1083	0,5	1378	0,5

Tabela 2. Coordenadas dos pontos de referência no sistema de projeção UTM e as altitudes geométricas (h) e seus respectivos desvios padrão (em metros).

Ponto	Este (E)	Este	Norte (N)	Norte	h	h
1	721834	0,001	7702379	0,001	650,998	0,002
2	721585	0,001	7703060	0,001	647,328	0,003
3	722442	0,001	7702225	0,001	656,256	0,003
4	721615	0,001	7702653	0,001	647,328	0,003
5	722040	0,002	7702650	0,001	654,516	0,004
6	722290	0,001	7702415	0,001	656,254	0,002
7	721829	0	7702834	0	651,286	0,001
8	722154	0,001	7703050	0,001	709,544	0,002
9	722452	0,009	7702967	0,004	677,397	0,023
10	722284	0,002	7702872	0,002	665,209	0,005
11	721631	0,079	7702198	0,018	661,354	0,073
12	722366	0,001	7702657	0,001	695,651	0,003
13	722061	0,001	7702351	0,001	691,864	0,004

Após a identificação dos pontos fiduciais em campo, o rastreamento de sinais GPS, o processamento e o ajustamento dos dados, foram estimadas as coordenadas terrestres e seus respectivos desvios padrão (Tabela 2).

Após a realização do ajustamento das coordenadas de tela observadas, empregando os diferentes modelos, foram realizadas análises para verificar a qualidade proporcionada por cada modelo de transformação, analisando-se, primeiramente, os resíduos (Tabelas 3 e 4).

Nas Tabelas 3 e 4 podem-se verificar as discrepâncias dos resíduos a fim de se detectar algum tipo de inconsistência nos valores que poderia levar a um indicativo de erro grosseiro ou sistemático. Após a análise, observou-se maiores resíduos no ponto 1 para a transformação afim 2D,

Tabela 3. Resíduos (V) calculados empregando o modelo de transformação afim (em pixel).

Ponto	afim 2D		afim 3D	
	Coluna	Linha	Coluna	Linha
1	-3,142	4,639	-3,202	5,111
2	0,968	-1,484	0,851	-0,556
3	0,47	-2,437	0,285	-0,967
4	0,583	-1,07	0,517	-0,544
5	0,264	-1,736	0,133	-0,692
6	1,397	-2,161	1,235	-0,874
7	-0,361	-2,315	-0,484	-1,34
8	-0,639	3,394	-0,267	0,441
9	0,623	0,15	0,555	0,691
10	-0,699	-0,435	-0,829	0,6
11	1,137	0,128	1,287	-1,059
12	-0,357	1,631	-0,15	-0,01
13	-0,244	1,698	0,071	-0,8

Tabela 4. Resíduos (V) calculados empregando os modelos de transformação projetiva (em pixel).

Ponto	projetiva 2D		projetiva 3D		projetiva 3D modificada	
	Coluna	Linha	Coluna	Linha	Coluna	Linha
1	-3,276	4,483	-1,037	-0,549	-0,915	0,17
2	0,861	-0,901	-1,202	-0,509	-1,135	-0,209
3	0,392	-1,878	-0,546	0,607	-0,519	-0,17
4	0,874	-0,786	0,856	-1,054	0,127	-0,681
5	-0,161	-1,496	0,861	1,119	0,459	0,435
6	1,148	-1,784	-1,199	0,412	-1,911	-0,058
7	-0,741	-2,01	0,378	-0,057	0,616	0,413
8	-0,852	2,896	0,112	0	0,582	0
9	1,429	-0,567	0	0	0	0
10	-0,645	-0,636	0	0	0	0
11	1,87	-0,926	0	0	0	0
12	-0,214	1,841	0	0	0	0
13	-0,686	1,765	0	0	0	0

e, ao analisar outros modelos, como o projetiva 3D modificada, os mesmos resíduos sofreram uma queda significativa. Porém, a discrepância do valor analisado pode ser um indicativo da possível presença de erros grosseiros na observação.

Após a análise dos resíduos, passa-se à análise da variância *a posteriori* do ajustamento, onde se pode verificar através da Tabela 5 o comportamento do ajustamento para cada modelo utilizado.

De acordo com os resultados das variâncias *a posteriori*, pode-se concluir que os modelos que mais se adequaram ao ajustamento foram o Projetivo 3D e Projetivo 3D modificado. Porém, para analisar a qualidade do ajustamento, foi aplicado o teste de precisão, onde através da comparação dos valores de variância *a posteriori* e graus de liberdade com os valores pré-

estabelecidos pela distribuição *Qui-Quadrado*, em módulo, verifica-se a hipótese estatística de que os valores calculados são estatisticamente iguais aos valores tabelados.

Na Tabela 6 têm-se os valores tabelados da distribuição *Qui-quadrado* a 10% de significância.

Ao comparar os valores de *Qui-quadrado* tabelados com os valores calculados, apresentados na Tabela 5, multiplicados pelo grau de liberdade (*GL*), conclui-se que para cada modelo de transformação testado, a 10% de significância, as precisões dos modelos ajustados não se apresentaram adequadas. Para resolver este problema, foram verificadas as possíveis fontes de erros, e após constatadas a ausência destas, procedeu-se a verificação do modelo estocástico, onde os pesos das observações foram readequados multiplicando-os pelo inverso da variância de referência *a posteriori*, estabelecendo assim um novo desvio padrão para as observações utilizadas para cada modelo de transformação testado (Tabela 7).

Após a análise da variância *a posteriori* e da precisão através do teste *Qui-Quadrado*, passou-se à análise dos resíduos padronizados (Tabelas 8 e 9).

Observando os resultados dos resíduos padronizados, pôde-se verificar que para os

Tabela 5. Variância *a posteriori* calculada no ajustamento pelo MMQ para os diferentes modelos de transformação.

afim 2D	afim 3D	projetiva 2D	projetiva 3D	projetiva 3D modificada
15,485	10,966	16,103	2,493	2,263

Tabela 6. Distribuição *qui-quadrado* para os diferentes modelos de transformação.

afim 2D	afim 3D	projetiva 2D	projetiva 3D	projetiva 3D modificada
28,412	25,989	25,989	22,307	21,064

Tabela 7 – desvios padrão das coordenadas de imagem observadas, para cada modelo de transformação (em pixel).

afim 2D	afim 3D	projetiva 2D	projetiva 3D	projetiva 3D modificada
1,968	1,656	2,006	0,789	0,752

Tabela 8. Resíduos padronizados calculados para os modelos de transformação afim (em pixel).

Ponto	afim 2D		afim 3D	
	Coluna	Linha	Coluna	Linha
1	-1,757	2,593	-2,138	3,412
2	0,642	-0,985	0,69	-0,45
3	0,299	-1,553	0,231	-0,782
4	0,338	-0,62	0,358	-0,377
5	0,14	-0,918	0,085	-0,445
6	0,78	-1,208	0,851	-0,603
7	-0,199	-1,276	-0,324	-0,896
8	-0,372	1,975	-0,241	0,398
9	0,38	0,091	0,406	0,505
10	-0,39	-0,243	-0,564	0,408
11	0,74	0,083	1,039	-0,855
12	-0,198	0,906	-0,105	-0,007
13	-0,134	0,937	0,054	-0,612

Tabela 9. Resíduos padronizados calculados para os modelos de transformação projetiva (em pixel).

Ponto	projetiva 2D		projetiva 3D		projetiva 3D modificada	
	Coluna	Linha	Coluna	Linha	Coluna	Linha
1	-1,828	2,481	-1,505	-0,805	-1,449	0,265
2	0,688	-0,718	-2,45	-1,11	-2,675	-0,552
3	0,296	-1,413	-1,067	1,342	-1,156	-0,432
4	0,504	-0,461	1,27	-1,604	0,202	-1,088
5	-0,086	-0,793	1,211	1,54	0,743	0,629
6	0,638	-0,995	-1,749	0,604	-2,952	-0,089
7	-0,407	-1,101	0,542	-0,081	0,97	0,614
8	-0,5	1,726	0,218	0	1,209	0
9	0,977	-0,37	0	0	0	0
10	-0,358	-0,353	0	0	0	0
11	1,428	-0,741	0	0	0	0
12	-0,117	1,023	0	0	0	0
13	-0,381	0,956	0	0	0	0

modelos de transformação Projetiva 3D e Projetiva 3D modificada há observações discrepantes, porém no geral, a relação entre os resíduos e os desvios padrão dos resíduos permanece baixa em relação a outros modelos de transformação utilizados. Porém, para verificar a presença de erros grosseiros, ou *outliers*, aplicou-se o “teste de *Tau*”.

O “teste de *Tau*” é realizado comparando os valores do *RP* determinados pela equação (23) com os valores da distribuição de *Tau* tabelados. Se os valores apresentados nas Tabelas 8 e 9, em módulo, apresentarem-se maiores que o valor estabelecido pela distribuição, para cada modelo analisado, rejeita-se a hipótese de que os valores calculados são isentos de erros grosseiros.

A Tabela 10 apresenta os valores definidos pela distribuição *Tau*.

Comparando-os com os resultados das Tabelas 8 e 9 com os valores apresentados na Tabela 10, conclui-se que com o modelo de transformação afim 3D (18 graus de liberdade), rejeitam-se as coordenadas do ponto 01, enquanto com o modelo de transformação projetiva 3D modificada (14 graus de liberdade), rejeitam-se as coordenadas do ponto 06. Apesar de nos outros modelos não haver observações rejeitadas, as duas observações mencionadas também apresentam indícios de erros grosseiros.

Ao analisar o RMS (Tabela 11) pôde-se concluir que o pior modelo a ser adotado na transformação geométrica de imagens é o modelo afim 2D com um RMS para os resíduos de 2,092 pixels e o melhor modelo a ser adotado é o modelo de transformação Projetiva 3D modificada, com um RMS para os resíduos de 0,553 pixels, induzindo assim a aceitar o último como o melhor modelo matemático a ser utilizado.

Uma vez que as análises dos resultados e índices apontaram quais os melhores e piores modelos de transformação, sem levar em consideração o aspecto espacial, estes resultados e índices são passivos de tendência na coleta de pontos de controle. A fim de contornar este problema, foi realizada a propagação das variâncias nos modelos de transformação inversos a fim de se obter o RMS dos resíduos para cada pixel da imagem, referenciadas ao sistema de coordenadas terrestre, levando as incertezas dos parâmetros

Tabela 10. Valores da distribuição de *TAU* tabelados.

Número de observações	26			
	projetiva 3D modificada	Projetiva 3D	afim 3D e projetiva 2D	afim 2D
	14	15	18	20
<i>Tau</i> tabelado	2,73	2,76	2,81	2,84

Tabela 11. RMS - erros médios quadráticos calculados para cada modelo de transformação (em pixel).

Posição	afim 2D	afim 3D	projetiva 2D	projetiva 3D	projetiva 3D modificada
Linha	0,837	0,759	1,011	0,476	0,482
Coluna	1,791	1,053	1,69	0,331	0,164
Global	2,092	1,346	2,073	0,602	0,553

ajustados às coordenadas transformadas (Fig.3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, e 10).

Neste trabalho, para os modelos matemáticos que utilizam a altitude como observação, foram definidos e utilizados separadamente um valor fixo de 650 m de altitude e valores de altitudes extraídas do MDT gerado para o cálculo do modelo inverso

a fim de se obter as coordenadas e se propagar às variâncias.

Analisando as Fig. 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10, e considerando as equações apresentadas para cada modelo de transformação, pode-se verificar que há uma variação considerável de precisão na transformação das coordenadas e que os modelos

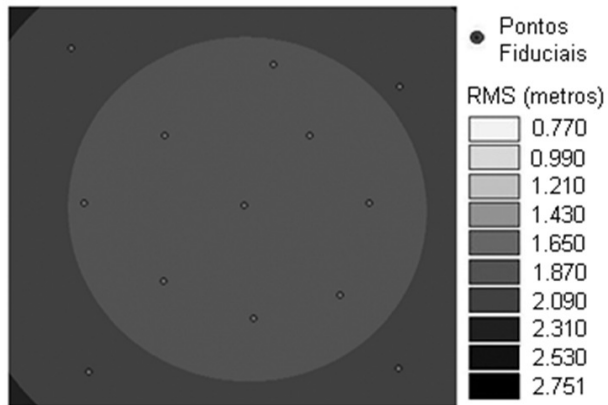


Fig. 3 – RMS calculado para o modelo de transformação afim 2D.

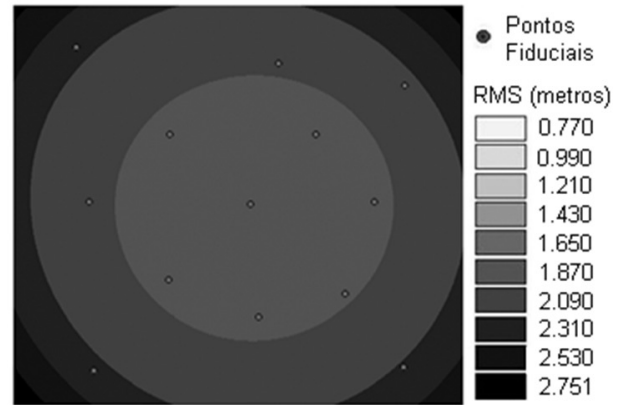


Fig. 6 – RMS calculado para o modelo de transformação projetiva 2D.

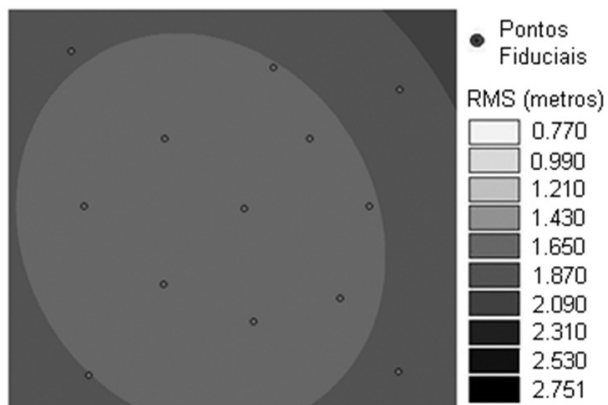


Fig. 4 – RMS calculado para o modelo de transformação afim 3D fixando a altitude média do terreno.

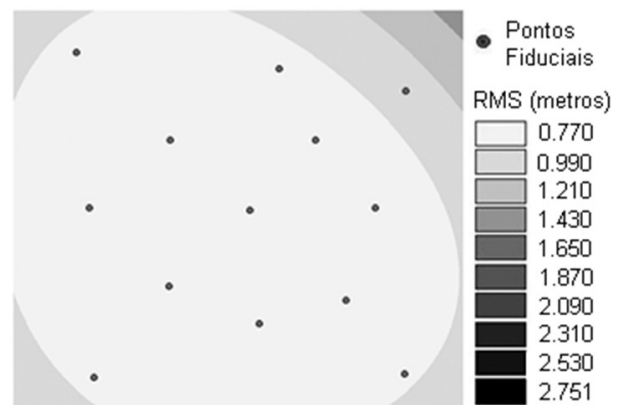


Fig. 7 – RMS calculado para o modelo de transformação projetiva 3D fixando a altitude média do terreno.

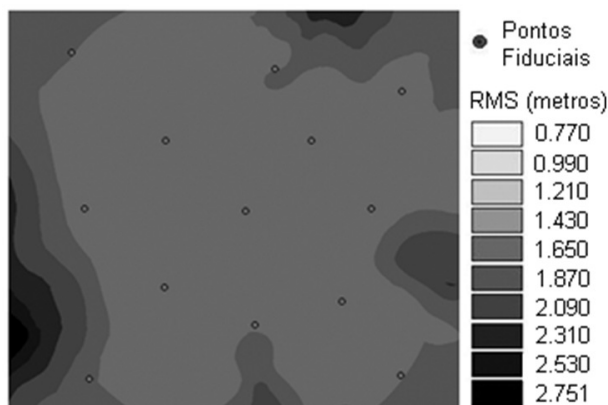


Fig. 5 – RMS calculado para o modelo de transformação afim 3D utilizando MDE.

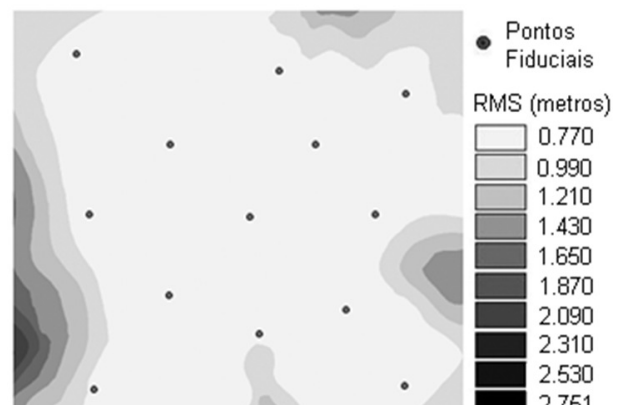


Fig. 8 – RMS calculado para o modelo de transformação projetiva 3D utilizando MDE.

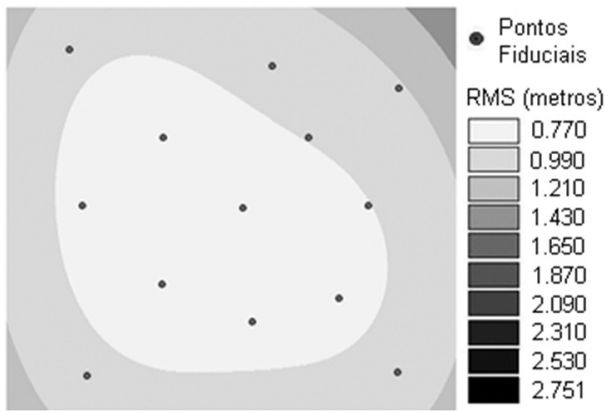


Fig. 9 – RMS calculado para o modelo de transformação projetiva 3D modificada fixando a altitude média do terreno.

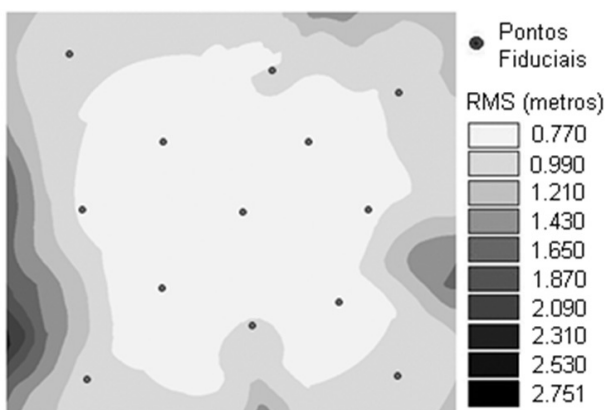


Fig. 10 – RMS calculado para o modelo de transformação projetiva 3D modificada utilizando MDE.

mais simplificados, que possuem menor número de parâmetro, apresentam-se com menor precisão (Fig. 3 e 6).

Os modelos que utilizaram valores fixos de altitude (Fig. 4, 7 e 9), por apresentarem parâmetros de transformação adicionais, mostram-se mais precisos que os modelos que envolvem o espaço 2D (Fig. 3 e 6).

Ao analisar os modelos que utilizam variações nas altitudes para cada pixel da imagem, foi possível verificar que houve uma melhora significativa na precisão (Fig. 5, 8 e 10) quando comparados aos demais modelos de transformação analisados.

Através da análise espacial, pôde-se verificar que apesar dos índices e resultados apontarem o modelo de transformação projetiva 3D modificada como mais preciso, ao analisar o comportamento das áreas de menor RMS, pôde-se concluir que o modelo de transformação projetiva 3D (Fig. 8) é mais preciso, por apresentar maior área com menor valor de RMS.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho permitiu concluir, através de experimentos utilizando técnicas de georreferenciamento indireto e análise posicional do comportamento dos diferentes modelos matemáticos, que:

- É correto afirmar que os melhores resultados ocorreram nas transformações de coordenadas que empregam a abordagem posicional 3D, mesmo que utilizando um valor fixo para a altitude.

Através das análises realizadas, verifica-se que modelos simplificados, como o afim 2D, representa perda de informação considerável no processo de transformação geométrica em imagens orbitais de altíssima resolução. Esta simplificação do modelo de transformação proporcionou menor precisão e evidenciou menor adequação às variações de relevo, impossibilitando a correção adequada das distorções inerentes à aquisição da imagem.

- Após estimar os parâmetros de transformação, juntamente com suas covariâncias, e aplicar o modelo inverso para transformar coordenadas de tela em coordenadas terrestres, foi possível, através do emprego da lei de propagação das covariâncias, estimar as precisões para cada pixel da imagem, viabilizando a análise de forma pontual. Consequentemente, torna-se possível a correção geométrica de imagens orbitais de altíssima resolução juntamente com a representação espacial da incerteza posicional das mesmas.

AGRADECIMENTOS

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos durante a realização deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Civil, setor de Engenharia de Agrimensura, da Universidade Federal de Viçosa, pelo fornecimento dos materiais e softwares utilizados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALTSAVIAS, E.; PATERAKI, M.; ZHANG, L. Radiometric and Geometric Evaluation of Ikonos Geo Images and Their Use for 3d Building Modelling. **ISPRS Workshop “High Resolution Mapping From Space, Hannover – Germany, 2001.** 19-21p.
- FRASER, C. S.; YAMAKAWA, T. Insights Into the Affine Model for High-Resolution Satellite Sensor Orientation. **Journal of Photogrammetry**

& Remote Sensing – ISPRS, v. 58, p. 275-288. 2004.

GHILANI, C. D.; WOLF, P. R. **Adjustment Computations: spatial data analysis**. John Wiley & Sons, Inc., 4th ed, Hoboken, New Jersey. 2006.

LUGNANI, J. B. **Introdução à Fotogrametria**. Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba – PR. 1987. 134p.

VALADAN ZOEJ, M. J.; SADEGHIAN, S. **Rigorous and Non-Rigorous Photogrammetric**

Processing of Ikonos Geo Image. Disponível em <<http://www.ipi.uni-hannover.de/html/publikationen/2003/workshop/valadan.pdf>>. Acesso em 10 julho 2007

WANG, Y., 1999. **Automated Triangulation of Linear Scanner Imagery**. In: Veröffentlichungen des Instituts für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen, Universität Hannover, Nr. 18. Joint Workshop of ISPRS WG I/1, I/3 and IV/4, Sensors and Mapping from Space, Hanover. 1999.