



Revista Brasileira de Cartografia (2012) N^o 64/3: 273-285
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

MÉTODO PARA O GEORREFERENCIAMENTO DE CARTAS URBANAS BASEADO NA ATRIBUIÇÃO DE PESOS AOS PONTOS DE CONTROLE

Method for the Georeferencing of Urban Maps Based on the Attribution of Weights to the Control Points

**Adriana Goulart dos Santos¹, Paulo Cesar Lima Segantine²
& Irineu da Silva²**

¹Universidade do Estado de Santa Catarina – UFSC
Centro de Ciências Tecnológicas – CCT
Departamento de Engenharia Civil
Campus Universitário Professor Avelino Marcante
Rua Paulo Malschitzki, s/n – Joinville-SC
dec2ags@joinville.udesc.br

²Universidade de São Paulo – USP
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Transportes
Rua Trabalhador São Carlense – 400 – São Carlos-SP
seganta@sc.usp.br, leicabr@attglobal.net

Recebido em 23 Março, 2011/ Aceito em 03 Julho, 2011
Received on March 23, 2011/ Accepted on July 03, 2011

RESUMO

O georreferenciamento das informações extraídas de cartas urbanas, em meio digital, é realizado por meio de modelos matemáticos de transformação geométrica de coordenadas. Para que o desempenho da transformação de coordenadas não comprometa a fidelidade do georreferenciamento gerado, é importante que cada coordenada de ponto de controle receba um peso apropriado, de modo que as coordenadas que apresentam maior exatidão, na carta, recebam um peso maior que aquelas que apresentam menor exatidão. Com isso, é possível melhorar o resultado de georreferenciamento, quando comparado com aqueles gerados por métodos convencionais, que desconsideram a exatidão das coordenadas na carta. Neste contexto, este artigo tem como objetivo principal apresentar um método de georreferenciamento baseado na atribuição de pesos apropriados às coordenadas dos pontos de controle em função de suas exatidões na carta urbana a ser georreferenciada. Mostra-se que o resultado do georreferenciamento se torna melhor quando esta consideração é levada em conta.

Palavras chaves: Transformação de Coordenadas, Cartas Urbanas, Exatidão, Pesos, Pontos de Controle.

ABSTRACT

The mathematical model for the geometric transformation of coordinates is used to georeference information extracted from urban maps. In order to avoid that the performance of the coordinate transformation model reduce the reliability of the georeferencing, it is important that each coordinate receives an appropriate weight according to its accuracy. Thus,

it is possible to improve the outcome of georeferencing, compared with those generated by conventional methods, which ignore the accuracy of the coordinates on the map. In this context, the objective of this study was to present a method of georeferencing based on the attributing weights to the coordinates of the control points as a function its accuracy in the urban map to be georeferenced. Georeferencing becomes better when this question is taken into account.

Keywords: Coordinate Transformation, Urban Map, Accuracy, Weight, Control Point.

1. INTRODUÇÃO

Para o georreferenciamento de uma carta, em meio digital, utiliza-se funções polinomiais no espaço bidimensional para relacionar coordenadas da carta às suas coordenadas homólogas de referências, as quais são medidas no terreno. Pontos de controle distribuídos sobre esta carta podem, por exemplo, modelar efeitos como a translação, a rotação, mudança de escala, os quais correspondem a erros de posicionamento.

Desse modo, o desempenho da transformação de coordenadas está diretamente relacionado à exatidão das coordenadas dos pontos de controle identificados na carta digital, pois, atualmente, pelo uso da tecnologia *Global Navigation Satellite System* (GNSS), não existe mais a dificuldade de se medir coordenadas de pontos, no terreno, com exatidão. Sendo assim, se as coordenadas dos pontos de controle forem posicionadas com exatidão sobre a carta, é possível a obtenção de um bom resultado de georreferenciamento.

Entretanto, se as cartas estiverem desatualizadas ou mal elaboradas, pode ocorrer uma dificuldade de se localizar pontos de controle bem determinados dentre os elementos geográficos representados na carta. Até mesmo, aliado à qualidade posicional da carta e pelo modo como foram identificadas na mesma, estas coordenadas podem apresentar diferentes graus de confiabilidade, em função de suas exatidões. Tal fato se não for levado em conta, pode comprometer o desempenho da transformação de coordenadas, e dependendo da escala da carta, inviabilizar um projeto ou estudo que dependa de uma boa exatidão de coordenadas de pontos obtidas a partir de um produto cartográfico georreferenciado. Como exemplo, cita-se a atualização de cartas topográficas, mapeamento de áreas urbanas, levantamento de áreas agropastoris, identificação e localização de deslizamentos de encostas, levantamentos cadastrais

a fim de determinar os limites de propriedades imobiliárias, etc.

Neste contexto, com o intuito de evitar que o desempenho da transformação de coordenadas comprometa a fidelidade do georreferenciamento gerado, é importante que cada coordenada receba um peso apropriado, de modo que as coordenadas que apresentam maior exatidão, ou seja, de maior confiança, recebam um peso maior que aquelas que apresentam menor exatidão. Assim, é possível obter um resultado de georreferenciamento melhor, quando comparado com aquele gerado por métodos que desconsideram a exatidão dos pontos de controle na carta.

Sob este enfoque, o presente artigo tem como objetivo apresentar um método de georreferenciamento baseado na exatidão das coordenadas dos pontos de controle identificadas na carta. Mostra-se que esse método proporciona melhor resultado quando comparado com os métodos convencionais.

2. MODELOS MATEMÁTICOS DE TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS

As transformações geométricas de coordenadas são as que relacionam as coordenadas entre dois sistemas de coordenadas diferentes. Para tal, é primordial conhecer os modelos matemáticos que podem ser utilizados para a transformação entre os sistemas, e as coordenadas de alguns pontos homólogos nos dois sistemas, denominados pontos de controle. De posse destes elementos, aplica-se o modelo de transformação e se determinam os parâmetros de transformação entre os dois sistemas. Uma vez determinados os parâmetros de transformação, eles podem ser usados para converter qualquer coordenada do sistema de origem para o sistema de destino.

Na prática, são seis os parâmetros que caracterizam a transformação de um sistema de coordenadas para outro, em duas dimensões. A Figura 1 representa tais parâmetros, os quais são designados por:

- 1) T_x = translação na origem na direção X;
- 2) T_y = translação na origem na direção Y;
- 3) θ = rotação do eixo de um sistema de coordenadas em relação ao outro;
- 4) k_x = mudança de escala em X;
- 5) k_y = mudança de escala em Y;
- 6) ε = ângulo de não ortogonalidade entre os eixos dos dois sistemas de coordenadas.

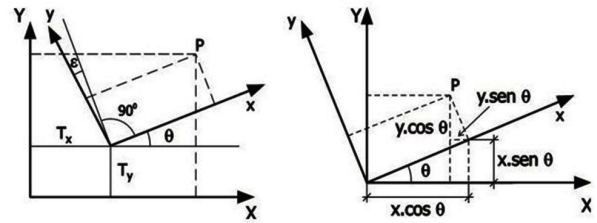


Fig. 1 – Parâmetros de transformação de um sistema de coordenadas em duas dimensões. Fonte: Adaptado de Greenfeld, 1987.

$$\begin{aligned} X &= k.(x.\cos\theta + y.\sen\theta) + T_x \\ Y &= k.(x.\sen\theta + y.\cos\theta) + T_y \end{aligned} \quad (1)$$

Onde:

- k = fator de escala;
- θ = ângulo de rotação;
- T_x = translação em x;
- T_y = translação em y.

2.1 Modelo determinado em função de 4 parâmetros de transformação

No caso da transformação de coordenadas entre dois sistemas de coordenadas cartesianas plano (x,y) e (X,Y) realizado a partir da determinação de 4 parâmetros existem três passos a serem considerados:

- a) rotação dos eixos (x,y) para torná-los paralelos aos eixos (X,Y)
- b) mudança da escala para adequar as dimensões do sistema (x,y) ao sistema (X,Y)
- c) translação da origem do sistema (x,y) para coincidir com a origem do sistema (X,Y).

Esse tipo de transformação é conhecido pelo nome de Transformação de Helmert 2D ou Transformação Ortogonal. Uma transformação deste tipo é dita transformação linear ortogonal ou de similaridade. A condição de ortogonalidade ocorre pelo fato da matriz de rotação R ser uma matriz ortogonal, ou seja, $R^T = R^{-1}$. Isso significa que ambos os eixos, nos dois sistemas de coordenadas, são ortogonais entre si e se mantêm ortogonais após a transformação.

Por se tratar de uma transformação de coordenadas com 4 parâmetros de transformação, é necessário que se tenha pelo menos 2 pontos homólogos nos dois sistemas de coordenadas. Cada ponto permitirá escrever duas equações de transformação. No caso de haver mais de dois pontos homólogos é necessário lançar mão de um processo de ajustamento. A solução do problema, neste caso, pode ser obtida diretamente a partir da solução do Sistema de Equações Normais do Método de Ajustamento Paramétrico. Considerando a figura 1, a formulação algébrica para a Transformação de Helmert é dada pelo sistema de equações 1.

2.2 Modelo determinado em função de 6 parâmetros de transformação

Este modelo é conhecido como Transformação Afim de Coordenadas e para sua determinação é necessário definir 6 parâmetros de transformação entre ambos os sistemas de coordenadas (x, y) e (X, Y), sendo eles:

- a) 1 rotação (θ) dos eixos (x,y) para torná-los paralelos aos eixos (X,Y)
- b) 2 fatores de escala (k_x e k_y) para adequar as dimensões do sistema (x,y) ao sistema (X,Y);
- c) 2 translações (T_x e T_y) da origem do sistema (x,y) para coincidir com a origem do sistema (X,Y);
- d) 1 fator de não-ortogonalidade (ε) entre os eixos do sistema.

A Transformação de Coordenadas Afim é também uma transformação de coordenadas linear. Neste caso, porém, a matriz de rotação não satisfaz a condição de ortogonalidade, ou seja, a Transformação Afim não conserva os ângulos e, tampouco as superfícies.

A Transformação Afim nada mais é que um polinômio de 1º grau e o tratamento matemático para a determinação é semelhante ao da Transformação de Helmert. Desse modo, considerando a Figura 1 ter-se-á a formulação geral para a Transformação Afim dada pelo sistema de equações 2.

$$\begin{aligned} X &= k_x \cdot x \cdot \cos \theta - k_y \cdot y \cdot (\sin \theta + \text{sen} \varepsilon \cdot \cos \theta) + T_x \\ Y &= k_x \cdot x \cdot \sin \theta + k_y \cdot y \cdot (\cos \theta + \text{sen} \varepsilon \cdot \sin \theta) + T_y \end{aligned} \quad (2)$$

Onde:

k_x = fator de escala no eixo x;

k_y = fator de escala no eixo y;

θ = ângulo de rotação;

ε = ângulo de não ortogonalidade;

T_x = translação em x;

T_y = translação em y.

Por se tratar de uma transformação de coordenadas com 6 parâmetros, é necessário que se tenha pelo menos 3 pontos homólogos nos dois sistemas de coordenadas. Cada ponto permitirá escrever duas equações de transformação. Nas situações em que se têm mais de três pontos homólogos deverá ser utilizado um método de ajustamento de observações adequado.

3. TÉCNICAS USADAS PARA CRIAR COORDENADAS DE PONTOS DE CONTROLE NA CARTA

Uma questão de grande relevância, neste estudo, é como atribuir um peso ao ponto de controle em função da sua localização, isto é, da sua exatidão na carta a ser georreferenciada. Com este objetivo, foram utilizadas algumas técnicas que serviram para criar coordenadas de pontos de controle na carta. Vale ressaltar que, o uso destas técnicas tem utilidade para mapas desatualizados ou que não possuam pontos de controle bem visíveis e determinados dentre os elementos geográficos representados na carta. Tais técnicas servem também para mensurar

o grau de confiança do ponto de controle, pois, cada uma delas criou coordenada de pontos com determinada exatidão, as quais posteriormente receberam um peso.

3.1 Imagem de satélite

A imagem de satélite pode ser usada para identificar pontos que não existem na carta, com o objetivo de transferi-lo para a mesma. A seguir será demonstrado, através de um exemplo, como é realizado este procedimento:

A) São escolhidos pontos bem identificados na imagem e que não aparecem na carta. A Figura 2 mostra, por exemplo, um ponto no centro de um campo de futebol visível na imagem, porém que não aparece na carta;

B) Para transferir um ponto da imagem para a carta são selecionados quatro pontos de coordenadas conhecidas tanto na imagem quanto na carta, estando localizados os mais próximos possíveis do ponto a ser transferido. Neste exemplo, estes pontos correspondem às esquinas bem visíveis em ambas. Na Figura 3 é mostrada a localização dos pontos homólogos na imagem (esquerda) e na carta (direita);

C) A partir disso, são extraídos os valores de coordenadas de cada ponto tanto na imagem quanto na carta com o intuito de realizar uma transformação de coordenadas. Cabe enfatizar que, deve ser dispensada atenção ao sistema de referência da imagem de satélite. As coordenadas dos pontos oriundas da carta são consideradas as coordenadas referentes ao sistema de referência e as coordenadas obtidas da imagem as do sistema

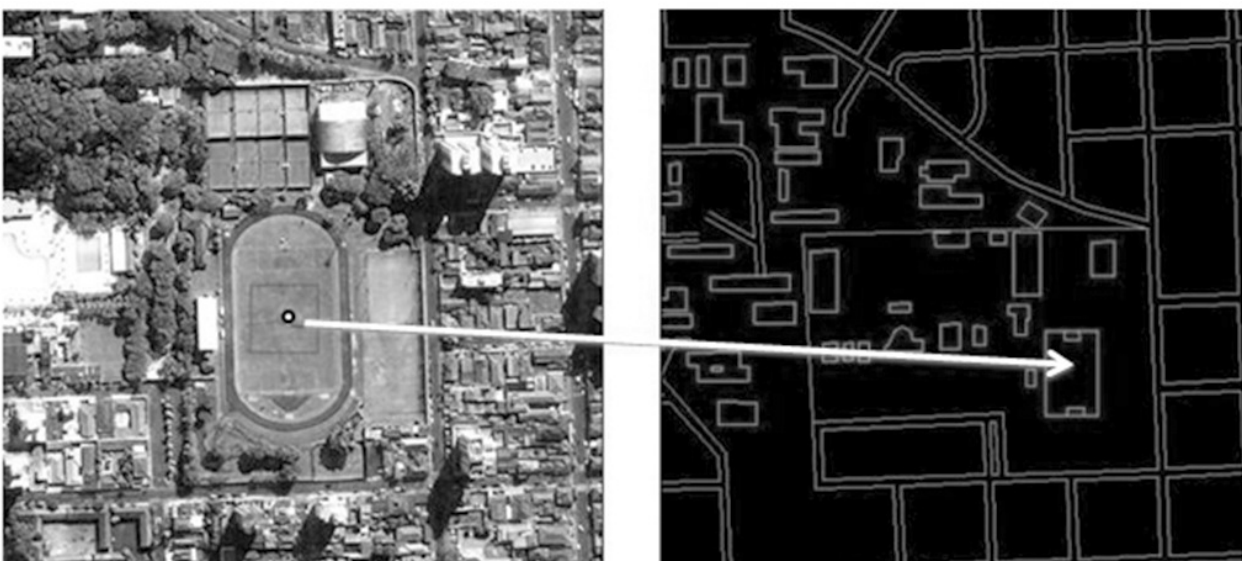


Fig. 2 – Identificação de um ponto perceptível na imagem e que não aparece na carta (centro de um campo de futebol). Fonte: Santos, 2009.

homólogo. Dessa maneira, torna-se possível transformar, através de uma Transformação de Coordenadas Afim, a coordenada do centro do campo de futebol da imagem para o sistema de coordenadas de referência, que no caso é o da carta. Posteriormente, o ponto é localizado na carta a partir do valor desta coordenada.

3.2 Foto aérea – Retificação Gráfica

Neste estudo, aplicou-se nas fotos aéreas digitais uma técnica de fotogrametria geométrica chamada de retificação gráfica. A retificação gráfica é uma modalidade de transformação que permite transferir, graficamente, pormenores de uma foto inclinada em projeção central, para uma base cartográfica em projeção ortogonal. É uma técnica aplicável a atualização planimétrica de cartas. O

procedimento de retificação gráfica está baseado nas razões de proporções denominada de relação harmônica, a qual pode ser evidenciada no estudo de Tavares e Fagundes (1992).

Sejam os pontos A' , B' , C' e D' , na foto inclinada, e seus homólogos A , B , C e D , na carta, como mostra a Figura 4. Baseando-se na relação harmônica existente entre as duas figuras projetivas, pode-se transferir um ponto de uma foto para uma carta desatualizada, através do seguinte procedimento:

- 1) O propósito é encontrar o homólogo do ponto P' na carta, conforme ilustra a Figura 4;
- 2) A Figura 4 mostra o eixo 1, na foto, interceptando os segmentos de retas $A'D'$, $A'C'$, $A'B'$ e $A'P'$. Este eixo, transferido para a carta, tem uma única posição compatível com as direções AD , AC e

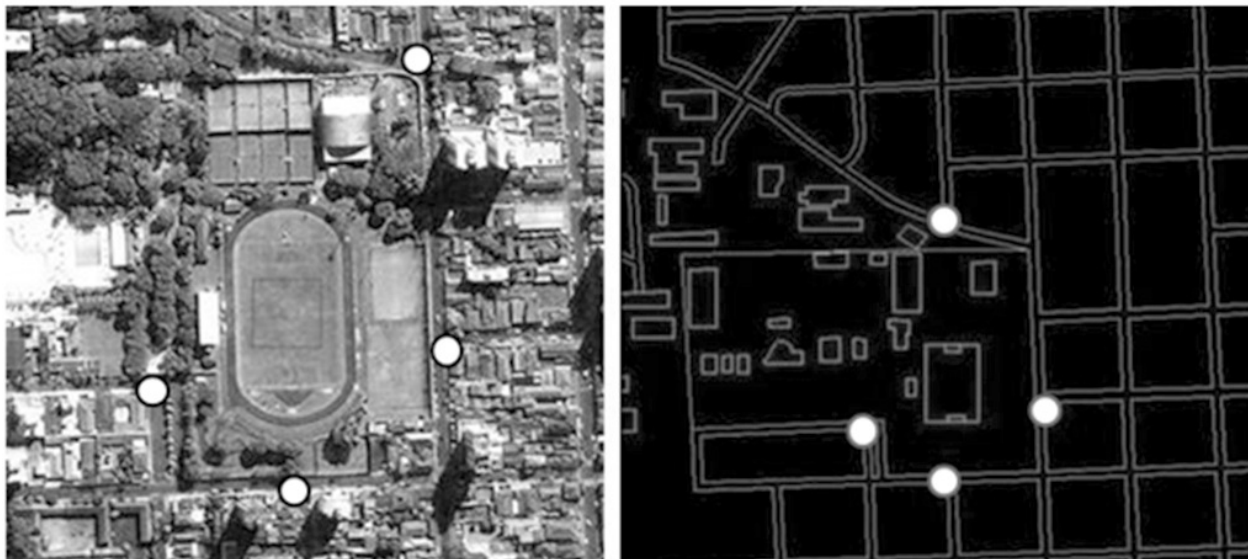


Fig. 3 – Os quatro pontos seleccionados de coordenadas homólogas na imagem e na carta. Fonte: Santos, 2009.

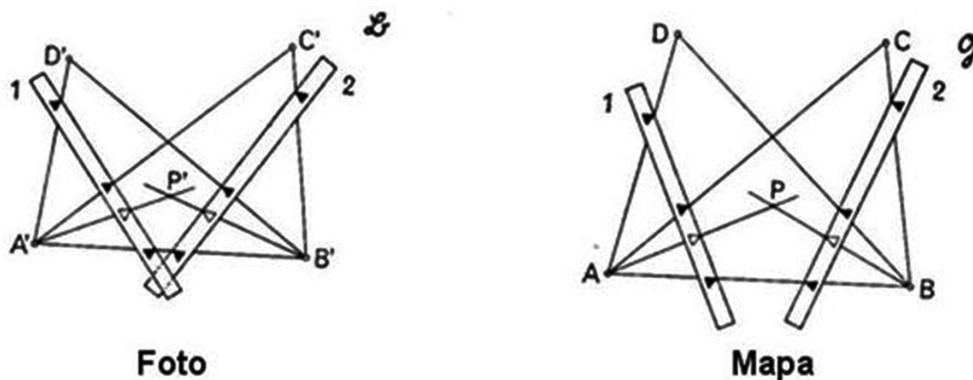


Fig. 4 – Representação de uma retificação gráfica entre uma foto e uma carta. Fonte: Tavares e Fagundes, 1992.

AB. Encontrada essa posição, ter-se-á a direção AP.

- 3) O mesmo ocorrerá com o eixo 2 passando pelos segmentos de reta B'C', B'D', B'A' e B'P' e transferido para a carta, resultando na direção BP;
- 4) Cruzadas as direções AP e BP tem-se o ponto P, na carta, transformado de P'.

Por esta técnica, pode-se verificar que, identificados dois quadriláteros homólogos, na foto e na carta, é possível transferir pontos da imagem para a carta. Se uma seqüência de pontos representando algum elemento geométrico da imagem puder ser transferida, torna-se possível representar na carta alguns elementos geométricos que não estavam representados, tais como: quarteirões, ruas, cercas, estradas, etc.

3.3 Prolongamento dos meios fios de calçadas

A terceira técnica consistiu no prolongamento do meio-fio de calçadas de esquinas desenhadas na carta. O encontro destes prolongamentos, como mostra a Figura 5, representa a coordenada do ponto a ser determinado.

4. DETERMINAÇÃO DOS PESOS

A próxima etapa do estudo foi a determinação dos pesos atribuídos às coordenadas de pontos de controle criados por cada uma das técnicas mencionadas. Por isso, tornou-se necessário quantificar qual a relevância de cada técnica citada, em termos de exatidão de coordenadas criadas. Com o intuito de atingir este propósito, foi utilizada uma planta topográfica cujos elementos nela representados fossem fiéis aqueles encontrados no terreno. A utilização de uma planta sem esta garantia poderia comprometer a veracidade de tal avaliação.

Para isso, foi levantada, no terreno, uma planta, denominada de planta de calibração, a qual retratasse com a maior exatidão o alinhamento dos eixos de ruas e calçadas do trecho escolhido para o levantamento. A planta de calibração foi elaborada por meio de um levantamento topográfico planimétrico, a partir do qual foram medidos os dados necessários à reprodução geométrica de uma malha retangular de 8 x 9 quarteirões de uma região central da cidade de São Carlos-SP. O levantamento topográfico foi realizado a partir do estabelecimento de uma poligonal fechada, percorrendo esquina por esquina da malha a ser

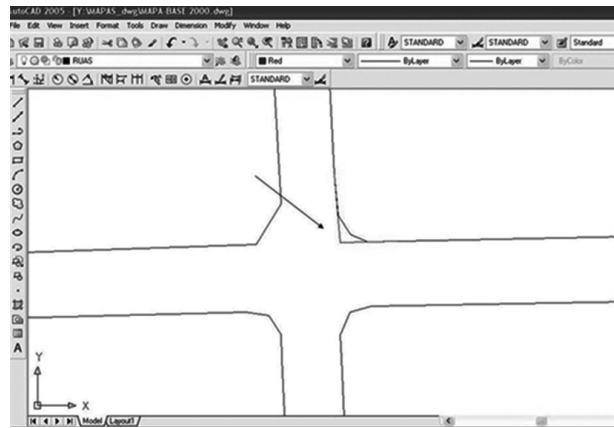


Fig. 5 – Representação do prolongamento de meio-fio de calçada numa carta (Fonte: Santos, 2009)

gerada. De posse dos elementos levantados no terreno com a estação total TCR 403 da Leica Geosystems, foi realizado, no escritório, o trabalho de unir todos os pontos medidos desenhando assim a planta, que resultou num arquivo de dados vetorial na escala 1:2.000, na extensão dwg. A planta foi georreferenciada através da sua amarração a dois pontos materializados no terreno e de coordenadas conhecidas.

De acordo com Wolf e Ghilani (1997), os pesos são usados para controlar o tamanho da correção aplicada às medidas num processo de ajustamento, sendo que o peso de uma observação é uma estimativa das precisões relativas das observações. Uma medida precisa apresenta pequenos valores de desvio padrão e, desta forma, pode-se dizer que a observação é de boa qualidade e a ela deve-se atribuir um valor de peso maior do que as outras de menor precisão. Desse modo, conhecendo-se a variância de uma observação adota-se o peso desta observação. Para isso, é atribuído a cada observação um peso tanto maior quanto menor for a variância da observação.

Esta afirmativa pode ser confirmada através da maneira como é determinada a matriz peso das observações, que é utilizada para a solução do Sistema de Equações Normais do Método de Ajustamento Paramétrico, no caso de existirem pontos de controle com precisões diferentes. Neste caso, para qualquer medição independente com variância igual a σ^2 recebe um peso definido pela equação (3).

$$w_i = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_i^2} \quad (3)$$

Se uma determinada observação recebe peso igual a 1, então $\sigma_0^2 = \sigma_i^2$ ou $\sigma_0^2 = 1$. Assim, σ_0^2 é frequentemente chamado de variância da unidade peso de uma observação ou, simplesmente, variância da unidade peso, de modo que a sua raiz quadrada é chamada de desvio padrão da unidade peso. Se σ_0^2 é igual a 1, então a equação (3) é expressa pela equação (4).

$$w_i = \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (4)$$

A equação (4) demonstra o que foi antes afirmado, que o peso atribuído a uma observação é o inversamente proporcional à sua variância. Vale ressaltar que, quando as observações são independentes e de igual precisão, tanto a matriz peso como a matriz co-fatora são matrizes identidade.

4.1 Variabilidades das coordenadas dos pontos de controle criadas em relação aos valores esperados

Neste estudo não foi determinada a variância propriamente dita das medidas relativas a cada uma das técnicas apresentadas. Foi determinada a variabilidade das coordenadas criadas por cada uma destas técnicas em relação aos respectivos valores esperados, pois, se considera que o peso deve ser atribuído em função da exatidão e não da precisão destas medidas.

Foram criados 25 diferentes pontos na planta de calibração, por cada uma das três técnicas, e verificado o quanto a coordenada de cada um destes pontos se afastou do valor esperado, que neste caso é a sua coordenada equivalente na carta, definida aqui de coordenada padrão. Para uma maior confiabilidade nos valores gerados optou-se trabalhar com pontos referentes a eixos de ruas tanto para a coordenada de pontos criados pela imagem de satélite quanto pela foto aérea. O cálculo da variabilidade das coordenadas criadas por cada uma das técnicas em relação aos respectivos valores esperados foi determinado pela equação (5).

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{ie})}{n} \quad (5)$$

Onde:

σ^2 = variabilidade das coordenadas criadas em relação aos respectivos valores esperados;

$(x_i - x_{ie})^2$ = diferença quadrática do valor da variável aleatória x de um ponto genérico i em relação ao seu valor esperado.

n = número de medições.

Cabe enfatizar que, foi definido o número de 25 pontos para a determinação da medida de variabilidade em relação aos valores esperados porque, segundo a estatística tradicional, este número é suficiente para garantir a normalidade.

4.2 Definição dos Pesos

De posse dos valores de variabilidade das três técnicas avaliadas foi calculado o peso atribuído as coordenadas de pontos de controle criados por cada uma delas. Neste caso, foi adotado que a variabilidade da unidade peso é igual ao maior valor delas, ou seja, a variabilidade referente à técnica da imagem de satélite, cujo valor é 2,012m².

Assim, considerando a equação (3) foram calculados os pesos atribuídos a coordenadas de pontos criados por cada uma das técnicas apresentadas, os quais estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Pesos atribuídos.

Técnica	σ^2 (m ²)	Peso
Imagem de satélite	2,012	1
Foto aérea	1,534	1,31
Prolongamento de esquinas	0,364	5,53

Pela Tabela 1 verifica-se que os valores de pesos atribuídos às coordenadas de pontos criados pelas técnicas referentes à foto aérea e imagem de satélite são muito semelhantes, o que pode ser explicado pelo fato de criarem coordenadas de pontos com quase a mesma exatidão. Já o valor de peso atribuído a coordenadas de pontos criados pela técnica do prolongamento dos meios-fios de calçadas é maior, ou seja, os pontos criados por esta técnica, na carta, apresentam maior exatidão.

4. GEORREFERENCIAMENTO USANDO A TABELA DE PESOS

A avaliação do georreferenciamento atribuindo pesos aos pontos de controle foi realizada usando uma carta correspondente a malha urbana

da cidade de São Carlos-SP, no formato *dwg*. Esta base cartográfica foi elaborada a partir de levantamento aerofotogramétrico realizado em junho de 1998, sendo a escala de voo 1:8000 e a escala da restituição 1:2000.

Para a efetuação do georreferenciamento foi utilizada a Transformação Afim de Coordenadas por ser um modelo matemático usualmente utilizado nos programas de Sistema de Informações Geográficas (SIG). Foram inseridas 24 coordenadas de pontos de controle, na carta, a partir do emprego das técnicas citadas na seção 3, e atribuídos pesos a estas coordenadas conforme indicado na Tabela 1. Estes pontos foram distribuídos uniformemente pela área da carta, garantindo-se que não fossem concentrados pontos em uma única região, o que afetaria a fidelidade do resultado obtido. Além dos pontos de controle, foram inseridos mais 12 pontos, denominados pontos de verificação, para avaliar a fidelidade do georreferenciamento obtido. Os pontos de verificação foram inseridos, na carta, por meio do prolongamento dos meios-fios de calçadas, por ser esta a técnica que cria coordenada de pontos com maior exatidão. Cabe enfatizar que, a quantidade de 24 pontos de controle foi determinada a partir do cálculo baseado no tamanho de amostras.

Posteriormente, os 34 pontos foram medidos no terreno, determinando-se assim um sistema de referência. Para isso, foi utilizado o método de posicionamento *Global Navigation Satellite System* (GNSS) no modo relativo estático. As medições foram realizadas com receptores geodésicos de dupla frequência. O tempo de coleta dos dados foi de 30 minutos, com uma taxa de observação de 10 segundos.

De posse dos valores das coordenadas dos pontos de controle, em ambos os sistemas, foi realizada a transformação de coordenadas. Por meio dos parâmetros de transformação obtidos foram transformadas as coordenadas dos pontos de controle, referentes ao sistema homólogo (carta), para o sistema de coordenadas de referência. A Tabela 2 apresenta as coordenadas UTM, no datum geodésico de referência SAD-69, das 24 coordenadas dos pontos de controle transformadas, os valores dos erros residuais entre estas coordenadas e as coordenadas de referência, bem como os valores de erros residuais entre as mesmas. Os pontos designados pelas abreviaturas PR, FO e IM correspondem, respectivamente, à técnica do

prolongamento dos meios-fios de calçadas, foto aérea e imagem de satélite. A avaliação do erro total cometido na transformação foi efetuada através do EMQ (Erro Médio Quadrático), calculado pela equação (6).

$$EMQ = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(V_{x_i})^2 + (V_{y_i})^2}}{n} \quad (6)$$

Onde:

EMQ = erro médio quadrático;

V_{x_i} = erro residual da coordenada x de um ponto genérico *i*;

V_{y_i} = erro residual da coordenada y de um ponto genérico *i*.

Pela Tabela 2, analisando os valores de resíduos das coordenadas de cada ponto de controle transformado foi constatado que, os pontos que apresentaram menores valores foram os pontos determinados, na carta, através da técnica do prolongamento dos meios-fios de calçadas. Dentre as coordenadas dos 8 pontos criados por esta técnica, o ponto 2 foi o que apresentou o menor valor de resíduo, que foi de 0,143m. Já o ponto 5 foi o que apresentou o maior valor, igual a 0,914m, que é um valor superior àquele esperado em função da exatidão proporcionada pela técnica que o criou. Dentre as coordenadas dos pontos criados pela técnica da foto aérea o valor de resíduo variou do mínimo de 0,804m ao máximo de 6,730m. Já para as coordenadas de pontos criados pela técnica da imagem de satélite o valor de resíduo variou de 0,689m a 4,820m. Como os pesos atribuídos às coordenadas dos pontos de controle criados por ambas as técnicas apresentam valores próximos, era esperado que os valores de resíduos destes pontos fossem mais aproximados do que os apresentados na referida tabela. Esta circunstância levanta a seguinte indagação: será que as exatidões das coordenadas dos pontos de controle, na carta, estão condizentes com aquela esperada em função das considerações exibidas no item 3?

Diante disto, a próxima etapa foi verificar o desempenho da transformação aplicando os parâmetros de transformação às 10 coordenadas dos pontos de verificação referentes ao sistema homólogo. Dois pontos de verificação tiveram que ser eliminados da avaliação por não apresentarem um bom posicionamento na carta. A Tabela 3 apresenta estas coordenadas transformadas para o

Tabela 2 – Valores das coordenadas transformadas e o erro residual.

Ponto	Técnica	X (m)	Y (m)	V_{x_i} (m)	V_{y_i} (m)	Resíduo = $\sqrt{(V_{x_i})^2 + (V_{y_i})^2}$
1	PR	196.909,22	7.566.594,78	0,043	-0,267	0,27
2	PR	198.229,74	7.565.060,20	-0,047	0,135	0,143
3	FO	199.123,63	7.564.214,42	-1,709	0,245	1,726
4	PR	200.863,53	7.566.393,76	-0,485	0,289	0,564
5	PR	200.776,76	7.564.611,96	-0,125	0,905	0,914
6	IM	202.547,15	7.564.694,12	2,973	-0,901	3,107
7	IM	200.137,88	7.564.391,88	0,817	4,02	4,102
8	FO	200.534,27	7.563.403,92	-2,035	0,263	2,051
9	PR	202.089,24	7.563.449,03	-0,386	0,241	0,455
10	IM	203.637,41	7.563.667,00	-0,619	3,072	3,134
11	FO	204.802,86	7.564.797,41	0,126	-0,794	0,804
12	IM	201.286,22	7.562.924,24	0,329	1,037	1,088
13	PR	199.113,34	7.562.097,34	0,221	-0,001	0,221
14	IM	201.621,16	7.562.425,06	4,635	1,323	4,82
15	PR	203.429,67	7.562.590,51	-0,198	0,729	0,755
16	PR	205.120,66	7.563.208,40	0,44	-0,114	0,455
17	IM	199.631,29	7.561.434,12	0,335	1,333	1,375
18	FO	199.919,43	7.560.368,67	5,127	-1,097	5,243
19	FO	200.660,72	7.561.129,05	-1,166	-4,983	5,118
20	FO	201.521,50	7.561.795,89	-3,156	-5,944	6,73
21	IM	203.104,43	7.561.189,92	-2,021	-1,971	2,823
22	FO	201.679,88	7.560.955,27	-1,094	-1,356	1,742
23	IM	204.288,53	7.560.515,92	-0,055	-0,687	0,689
24	FO	201.302,79	7.560.730,03	1,257	-0,003	1,257

sistema de referência e os valores resíduos calculados.

Pela Tabela 3, foi verificado que os valores de resíduos variam do mínimo de 0,122m ao máximo de 1,292m. Era esperado que todos os pontos de verificação apresentassem valores condizentes com a exatidão de coordenadas de pontos criadas pela técnica do prolongamento dos meios-fios de calçadas. Como isto não ocorreu, é notório que existem diferenças significativas de exatidões das coordenadas destes pontos na carta, fato que confirma a indagação levantada anteriormente.

4.1 Avaliação do georreferenciamento considerando a matriz peso como identidade

É pertinente examinar o que aconteceria no resultado do georreferenciamento se todas as coordenadas dos pontos de controle recebessem pesos iguais a 1,00, ou seja, se fosse considerado que todos os pontos de controle possuísem a mesma exatidão na carta. É esperado que o desempenho da transformação de coordenadas seja inferior nesta situação. Desse modo, se os

Tabela 3 – Valores das coordenadas transformadas e de resíduos.

Ponto	X (m)	Y (m)	Resíduo (m)
1	200.491,36	7.561.007,94	0,471
2	200.748,69	7.565.166,44	0,522
3	200.727,64	7.561.961,61	0,122
4	201.421,24	7.559.929,26	0,461
5	200.452,87	7.562.994,75	0,162
6	201.183,72	7.564.322,47	0,362
7	201.457,69	7.563.532,40	1,241
8	201.896,69	7.562.841,37	1,098
9	201.954,26	7.564.134,47	0,96
10	205.717,97	7.562.595,89	0,967

parâmetros da transformação forem calculados pelo Sistema de Equações Normais do Método de Ajustamento Paramétrico, a matriz peso é igual à identidade. Para esta situação, foi realizada uma nova transformação de coordenadas.

Neste caso, o valor do EMQ das coordenadas dos pontos de controle transformados foi de 2,084m. Este valor foi próximo do EMQ obtido quando foram atribuídos pesos às coordenadas dos pontos de controle em função da sua exatidão na carta, cujo valor foi de 2,066m e é

procedente da Tabela 2. Esta ocorrência foi contrária ao esperado. A diferença entre os valores de EMQ dos pontos de controle transformados, oriundos das duas situações distintas, deveria ser mais significativa.

A etapa seguinte foi avaliar a transformação através dos pontos de verificação. O valor de EMQ das coordenadas dos pontos de verificação transformados foi de 0,714m. Este é um valor 14,61% superior daquele obtido na situação anterior. Contudo, pela proximidade dos valores de EMQ dos pontos de controle e de verificação transformados oriundos das avaliações efetuadas neste item e no item anterior, ficou evidente que a indagação levantada anteriormente é real. As exatidões das coordenadas dos pontos de controle criadas, na carta, pelas técnicas citadas não foram condizentes com o almejado, o que comprometeu a fidelidade do resultado de georreferenciamento obtido.

Isto ocorreu, provavelmente, pelo fato da qualidade posicional da carta em questão não ser satisfatória, como também porque algumas regiões da carta estavam desatualizadas e outras mal desenhadas. Tais circunstâncias prejudicaram o correto posicionamento dos pontos na carta. Perante estas averiguações, foi procurada uma solução que atenuasse o problema, a fim de proporcionar ao avaliador uma maneira de obter um resultado de georreferenciamento melhor, que é o objetivo principal deste trabalho.

5. ITERAÇÕES DO GEORREFERENCIAMENTO A PARTIR DA NORMALIZAÇÃO DOS PESOS

Como de um modo geral, não é comum o avaliador conhecer a qualidade da carta a ser georreferenciada foi verificada uma maneira de atenuar o problema a partir de iterações do georreferenciamento realizado na seção 4. Em cada uma das referidas iterações, foi realizada uma etapa de normalização dos pesos das coordenadas dos pontos de controle procedentes de uma mesma técnica. Com este procedimento foi almejado obter um resultado de georreferenciamento melhor do que aquele obtido na seção 4.

5.1 Avaliação do georreferenciamento - 1º iteração

A partir dos valores de resíduos das coordenadas dos pontos de controle transformados

da Tabela 2 foi realizada a etapa de normalização dos pesos de pontos de controle procedentes da mesma técnica. A normalização foi realizada da seguinte maneira: dentre os valores de resíduos dos n pontos determinados pela mesma técnica, foi selecionado o maior valor de resíduo dentre estes pontos. Este valor foi dividido pelo valor de resíduo de um ponto individual, em seguida o valor oriundo desta divisão foi multiplicado pelo peso da técnica em questão, cujos valores são provenientes da Tabela 1. Esta prática foi realizada para cada um dos pontos determinados pela mesma técnica. As equações 7, 8 e 9 mostram, respectivamente, como é calculada a normalização dos pesos para pontos determinados pelas técnicas: prolongamento dos meios-fios de calçadas, foto aérea e imagem de satélite.

$$\text{Peso}_{(i)} = \frac{\text{Resíduo}_{\text{máximo}}}{\text{Resíduo}_{\text{ponto}(i)}} \times 5,50 \quad (7)$$

$$\text{Peso}_{(i)} = \frac{\text{Resíduo}_{\text{máximo}}}{\text{Resíduo}_{\text{ponto}(i)}} \times 1,30 \quad (8)$$

$$\text{Peso}_{(i)} = \frac{\text{Resíduo}_{\text{máximo}}}{\text{Resíduo}_{\text{ponto}(i)}} \times 1,00 \quad (9)$$

Onde:

$\text{Peso}_{(i)}$ = peso correspondente ao ponto genérico i ;

$\text{Resíduo}_{\text{máximo}}$ = resíduo máximo dentre os pontos determinados pela técnica em questão.

$\text{Resíduo}_{\text{ponto}(i)}$ = resíduo do ponto genérico i dentre aqueles determinados pela mesma técnica.

A Tabela 4 apresenta os valores das coordenadas dos pontos de controle transformados referentes à transformação de coordenadas realizada na seção 4. A tabela citada também apresenta os valores dos pesos normalizados, conforme os procedimentos de cálculos descritos neste item. A partir destas coordenadas e dos respectivos pesos foi realizada uma nova transformação de coordenadas. Ainda pela Tabela 4, comparando os valores dos pesos com os valores de resíduos, que os geraram, é notório que: dentre as coordenadas dos pontos de controle criadas pela mesma técnica, aquela que apresentou o maior valor de resíduo foi a que recebeu o menor valor de peso. Este valor é igual ao peso atribuído à técnica que a criou. Já a coordenada do ponto que apresentou o menor valor de resíduo foi a que recebeu o maior

Tabela 4 – Valores das coordenadas dos pontos de controle e seus respectivos pesos.

Ponto	Técnica	X	Y	Resíduo	Peso
1	PR	196.909,22	7.566.594,78	0,27	18,61
2	PR	198.229,74	7.565.060,20	0,143	35,15
3	FO	199.123,63	7.564.214,42	1,726	5,07
4	PR	200.863,53	7.566.393,76	0,564	8,91
5	PR	200.776,76	7.564.611,96	0,914	5,5
6	IM	202.547,15	7.564.694,12	3,107	1,55
7	IM	200.137,88	7.564.391,88	4,102	1,17
8	FO	200.534,27	7.563.403,92	2,051	4,26
9	PR	202.089,24	7.563.449,03	0,455	11,05
10	IM	203.637,41	7.563.667,00	3,134	1,54
11	FO	204.802,86	7.564.797,41	0,804	10,88
12	IM	201.286,22	7.562.924,24	1,088	4,43
13	PR	199.113,34	7.562.097,34	0,221	22,75
14	IM	201.621,16	7.562.425,06	4,82	1
15	PR	203.429,67	7.562.590,51	0,755	6,66
16	PR	205.120,66	7.563.208,40	0,455	11,05
17	IM	199.631,29	7.561.434,12	1,375	3,51
18	FO	199.919,43	7.560.368,67	5,243	1,67
19	FO	200.660,72	7.561.129,05	5,118	1,71
20	FO	201.521,50	7.561.795,89	6,73	1,3
21	IM	203.104,43	7.561.189,92	2,823	1,71
22	FO	201.679,88	7.560.955,27	1,742	5,02
23	IM	204.288,53	7.560.515,92	0,689	6,99
24	FO	201.302,79	7.560.730,03	1,257	6,96

peso. Isto torna evidente que, existe uma proporcionalidade entre os valores de resíduos e os respectivos valores de peso. Foi por meio desta proporcionalidade, em cada uma das iterações realizadas, que se almejou a obtenção de um resultado de georreferenciamento melhor do que os métodos anteriores.

Realizada a transformação de coordenadas, o valor obtido do EMQ dos pontos de controle transformados foi de 2,062m. Este valor foi inferior daquele obtido na transformação realizada no item 4, que apresentou o valor de EMQ igual a 2,066m. O valor do EMQ dos pontos de verificação transformados apresentou um valor de 0,613m, que é um valor inferior quando comparado com aquele obtido na seção 4, cujo valor foi de 0,623m. Esta constatação está de acordo com o previsto, isto é,

que o valor de EMQ das coordenadas dos pontos de verificação transformados tende a diminuir nas primeiras iterações até o momento que ocorra a estabilização ou que este valor volte a aumentar.

5.2 Avaliação do georreferenciamento - 2º iteração

A partir dos valores de resíduos dos pontos de controle transformados foi realizada novamente a normalização dos pesos, de acordo com o procedimento descrito no item anterior. Desse modo, a partir das coordenadas dos pontos de controle transformados da seção 5.1 e de seus respectivos pesos normalizados foi realizada a transformação de coordenadas.

O valor de EMQ dos pontos de controle provenientes desta nova transformação é de 2,059m. Este valor foi inferior ao da transformação

realizada na seção 5.1, cujo valor de EMQ foi igual a 2,062m. A próxima etapa foi avaliar a transformação aplicando os parâmetros de transformação aos valores de coordenadas dos pontos de verificação oriundas da 1ª iteração do georreferenciamento, a fim de verificar se os valores de resíduos procedentes desta transformação aumentariam ou não.

Foi verificado que na 2ª iteração do georreferenciamento o valor do EMQ das coordenadas dos pontos de verificação transformados foi de 0,559m, que é um valor 10,27% inferior daquele obtido na seção 5.1. Esta verificação permanece de acordo com a explanação mencionada anteriormente, isto é, que o referido valor tende a diminuir nas primeiras iterações do georreferenciamento. A fim de examinar se esta tendência continuaria a suceder, foi realizada a 3ª iteração do georreferenciamento.

5.3. Avaliação do georreferenciamento - 3ª iteração

O valor de EMQ dos pontos de controle transformados nesta iteração é de 2,172m. Este valor é superior ao obtido na transformação realizada na seção 5.2, cujo valor de EMQ foi igual a 2,059m.

Na 3ª iteração do georreferenciamento o valor do EMQ dos pontos de checagem transformados foi de 0,562m, que é um valor superior quando comparado com aquele obtido na 2ª iteração do georreferenciamento. Tal ocorrência evidencia que, as iterações devem ser interrompidas nesta etapa, o que leva a constatação que o georreferenciamento gerado na 2ª iteração é o melhor de todos.

6. CONCLUSÕES

Este artigo teve como principal objetivo apresentar um método para georreferenciar cartas urbanas baseado na atribuição de pesos aos pontos de controle. O artigo levantou uma questão até então desconsiderada, que é a importância de se atribuir pesos às coordenadas dos pontos de controle em função da sua exatidão na carta. Foi demonstrado que o georreferenciamento se torna melhor quando esta consideração é levada em conta.

Foi apresentado um modo de atribuir pesos apropriados às coordenadas de pontos de controle em função de suas exatidões na carta urbana a ser georreferenciada. Foram propostas algumas

técnicas que serviram para criar coordenadas de pontos de controle na carta.

Dentre as técnicas propostas, a que criou coordenadas de pontos com maior exatidão foi a do prolongamento dos meios-fios de calçadas. As técnicas referentes à imagem de satélite e foto aérea criaram coordenadas de pontos com quase a mesma exatidão, acarretando que os pesos atribuídos a cada uma delas apresentaram valores próximos. A partir destas considerações, o avaliador poderá criar coordenadas de pontos de controle na carta a ser georreferenciada e usar a tabela de pesos.

Através das avaliações efetuadas nos georreferenciamentos realizados foi constatado que, quando foram atribuídos pesos adequados aos pontos de controle em função da sua exatidão na carta, melhor foi o desempenho da transformação de coordenadas. Entretanto, foi verificado que a qualidade posicional da base cartográfica influencia diretamente na fidelidade do georreferenciamento gerado. Sendo assim, foi proposto um método de georreferenciamento onde são feitas iterações do mesmo e em cada iteração é realizada a etapa de normalização de pesos dos pontos de controle. Com isso, o resultado do georreferenciamento sofreu uma melhoria de 11,45%. Caso este resultado fosse comparado com aquele procedente da transformação de coordenadas quando se desconsiderou a exatidão dos pontos de controle na carta, há uma melhoria de 27,73%.

Sendo assim, conclui-se que o método proposto a partir da normalização dos pesos nas iterações realizadas, produz um resultado de georreferenciamento melhor que os métodos convencionais, sendo indicado para usar no georreferenciamento de cartas urbanas independentemente de sua qualidade posicional.

Finalmente, espera-se que as considerações expostas neste trabalho sejam usufruídas por todos os profissionais que almejam extrair informações concisas das cartas urbanas georreferenciadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DAMMALAGE, T. L., SAMARAKOON, L., SUSAKI, J. Geometric correction of high resolution satellite data effect of the distribution, accuracy and number of GCP. In: 26th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS 2005), Hanoi, Vietnam. **Anais eletrônico**...Hanoi. Disponível em: <http://

www.aars-acrs.org/acrs/proceedings2005.php>

Acesso em 08 de mar. 2008.

GREENFELD, J. S. Least squares weighted coordinate transformation formulas and their applications. **Journal of Surveying Engineering**, v.123, p. 147-161. 1997.

KATIYAR, S. K., DIKSHIT, O. KUMAR, K. Ground control for the geometric correction of PAN imagery from Indian Remote Sensing (IRS) satellites. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), **Proceedings**. v. 6, p. 4041-4043, 2003.

LEVINE, D. M., BERENSON, M. L., STHEPAN, D. **Estatística: Teoria e Aplicações**. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro. 2000. 811 p.

NERO, M. A. **Proposta para o controle de qualidade de bases cartográficas com ênfase em qualidade posicional**. 2005, 291p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2005.

SANTOS, A. G. **Método para o georreferenciamento de mapas urbanos baseado na atribuição de pesos aos pontos de controle**. 2009. 206p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2009.

TAVARES, P. E. M.; FAGUNDES, P. M. **Fotogrametria**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Cartografia, 1992. 376 p.

WOLF, P., R. **Elements of Photogrammetry**. MacGraw-Hill, São Paulo. 1983.

WOLF, P., R., GHILANI, C. D. **Adjustment Computations: statistics and least squares in surveying and GIS**. New York: John Wiley & Sons, 1987.