

MÉTODO PARA O GEORREFERENCIAMENTO DE MAPAS URBANOS BASEADO NA ATRIBUIÇÃO DE PESOS AOS PONTOS DE CONTROLE

A.G. Santos, P.C.L. Segantine, I. Silva.

RESUMO

O georreferenciamento das informações extraídas dos mapas, 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, no mapa, 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 no mapa. Neste contexto, este artigo tem como objetivo apresentar um método de georreferenciamento baseado na exatidão das coordenadas dos pontos de controle identificadas no mapa.

1 INTRODUÇÃO

Para o georreferenciamento de um mapa, em meio digital, utiliza-se funções polinomiais no espaço bidimensional para relacionar coordenadas do mapa às suas coordenadas homólogas de referências, as quais são medidas no terreno. Pontos de controle distribuídos sobre este mapa 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 no mapa 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 o mapa, é possível a obtenção de um bom resultado de georreferenciamento.

Entretanto, se os mapas estiverem desatualizados ou mal elaborados, pode ocorrer uma dificuldade de se localizar pontos de controle bem determinados dentre os elementos geográficos representados no mapa. Até mesmo, aliado à qualidade posicional do mapa e pelo modo como foram identificadas no mesmo, 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 do mapa, 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 no mapa.

Sob este enfoque, o presente artigo tem como objetivo apresentar um método de georreferenciamento baseado na exatidão das coordenadas dos pontos de controle identificadas no mapa. 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.

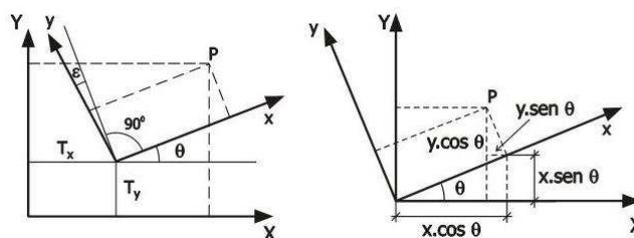


Figura 1 - Parâmetros de transformação de um sistema de coordenadas em duas dimensões (Fonte: Adaptado de Greenfeld, 1987).

2.1 Modelo matemático 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.

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

Onde:

k = fator de escala;

θ = ângulo de rotação;

T_x = translação em x ;

T_y = translação em y .

2.2 Modelo matemático 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 ATRIBUIÇÃO DE PESOS AOS PONTOS DE CONTROLE

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 no mapa a ser georreferenciado. Com este objetivo, foram utilizadas algumas técnicas que serviram para criar coordenadas de pontos de controle no mapa a ser georreferenciado. 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 no mapa. 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.

Uma das técnicas aplicadas com este intuito consistiu na utilização de uma imagem de satélite IKONOS da área urbana da cidade de São Carlos-SP, outra consistiu na utilização de fotos áreas da mesma região e a última técnica no prolongamento dos meio-fios de calçadas de esquinas existentes no mapa.

Para quantificar qual a relevância de cada técnica citada, em termos de exatidão de coordenadas criadas, foi levantado, no terreno, um mapa, denominado de mapa de calibração, o qual retratasse com a maior exatidão o alinhamento dos eixos de ruas e calçadas do trecho escolhido para o levantamento. A utilização de um mapa sem esta garantia poderia inviabilizar uma correta estimativa dos pesos.

A partir disto, foram criados 25 diferentes pontos no mapa 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 no mapa, definida de coordenada padrão. Cabe enfatizar que, foi estabelecido o número de 25 pontos porque, segundo a estatística tradicional, este número é suficiente para garantir a normalidade.

Por meio dos valores de variabilidade de coordenadas criadas em relação aos respectivos valores esperados por cada uma das técnicas, foi possível determinar os pesos a serem atribuídos às coordenadas destes pontos. Com isso, o usuário tem condições de criar coordenadas de pontos de controle no mapa que pretende georreferenciar e, por conseguinte, usar a tabela de pesos representada pela Tabela 1.

Tabela 1 – Pesos atribuídos

Técnica	Peso
Imagem de satélite	1,00
Foto aérea	1,31
Prolongamento de esquinas	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, no mapa, apresentam maior exatidão.

4 GEORREFERENCIAMENTO USANDO A TABELA DE PESOS

A avaliação do georreferenciamento atribuindo pesos aos pontos de controle foi realizada usando um mapa 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 vôo 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, no mapa, a partir do emprego das técnicas citadas no item 3, e atribuídos pesos a estas coordenadas conforme indicado na Tabela 1. Estes pontos foram distribuídos uniformemente pela área do mapa, 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, no mapa, 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.

O mapa da figura 2 mostra a localização dos pontos de controle, que estão representados pelos triângulos em vermelho, e a localização dos pontos de verificação, representados pelos triângulos em azul.

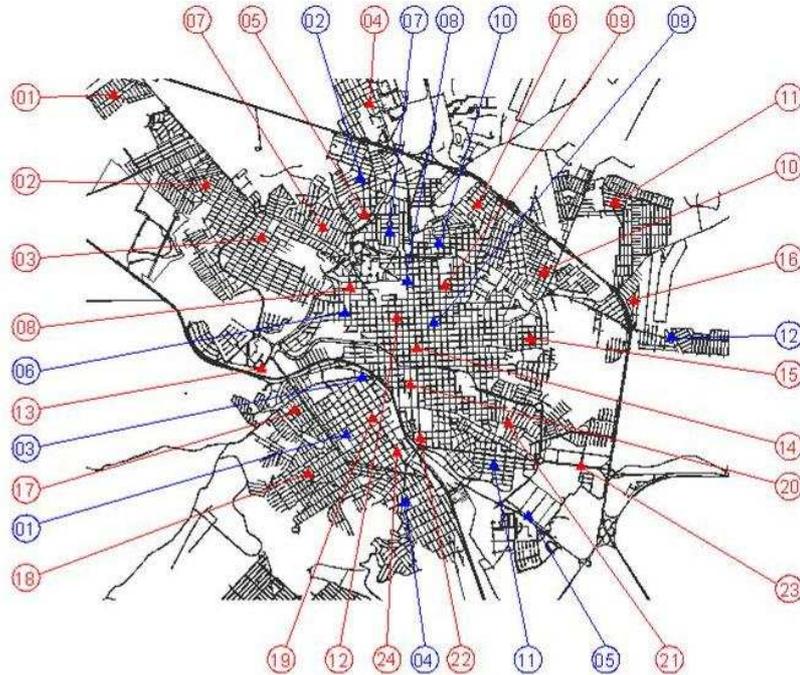


Figura 2 – Localização dos pontos de controle e de verificação no mapa

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 (mapa), para o sistema de coordenadas de referência. A Tabela 2 apresenta as coordenadas UTM, no sistema 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 Resíduo Médio Quadrático (RMS) 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 RMS, calculado pela equação (3).

$$RMS_{\text{médio}} = \frac{\sum_i^n \sqrt{(V_{x_i})^2 + (V_{y_i})^2}}{n} \quad (3)$$

Onde:

$RMS_{\text{médio}}$ = resíduo 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 .

Tabela 2 – Valores das coordenadas transformadas, dos erros residuais e de RMS

Ponto	Técnica	X	Y	V_{x_i}	V_{y_i}	RMS (m)
1	PR	196.909,222	7.566.594,784	0,043	-0,267	0,270
2	PR	198.229,741	7.565.060,203	-0,047	0,135	0,143
3	FO	199.123,626	7.564.214,420	-1,709	0,245	1,726
4	PR	200.863,530	7.566.393,761	-0,485	0,289	0,564
5	PR	200.776,755	7.564.611,963	-0,125	0,905	0,914
6	IM	202.547,148	7.564.694,120	2,973	-0,901	3,107
7	IM	200.137,883	7.564.391,878	0,817	4,020	4,102
8	FO	200.534,270	7.563.403,918	-2,035	0,263	2,051
9	PR	202.089,242	7.563.449,028	-0,386	0,241	0,455
10	IM	203.637,409	7.563.666,998	-0,619	3,072	3,134
11	FO	204.802,855	7.564.797,410	0,126	-0,794	0,804
12	IM	201.286,220	7.562.924,239	0,329	1,037	1,088
13	PR	199.113,339	7.562.097,343	0,221	-0,001	0,221
14	IM	201.621,159	7.562.425,062	4,635	1,323	4,820
15	PR	203.429,673	7.562.590,514	-0,198	0,729	0,755
16	PR	205.120,660	7.563.208,397	0,440	-0,114	0,455
17	IM	199.631,294	7.561.434,116	0,335	1,333	1,375
18	FO	199.919,430	7.560.368,666	5,127	-1,097	5,243
19	FO	200.660,717	7.561.129,052	-1,166	-4,983	5,118
20	FO	201.521,496	7.561.795,887	-3,156	-5,944	6,730
21	IM	203.104,432	7.561.189,920	-2,021	-1,971	2,823
22	FO	201.679,883	7.560.955,266	-1,094	-1,356	1,742
23	IM	204.288,526	7.560.515,916	-0,055	-0,687	0,689
24	FO	201.302,785	7.560.730,029	1,257	-0,003	1,257

Pela Tabela 2, analisando os valores de RMS das coordenadas de cada ponto de controle transformado foi constatado que, os pontos que apresentaram menores valores foram os pontos determinados, no mapa, 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 RMS, que foi de 0,143m. Já o ponto 5 foi o que apresentou o maior valor de RMS, 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 do RMS 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 RMS 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 RMS 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, no mapa, 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 uma boa exatidão no mapa. A Tabela 3 apresenta estas coordenadas

transformadas para o sistema de referência, e os valores de RMS calculados a partir dos erros residuais entre estas coordenadas e as coordenadas homólogas de referência.

Tabela 3 – Valores das coordenadas transformadas e de RMS

Ponto	X	Y	RMS (m)
1	200.491,362	7.561.007,941	0,471
2	200.748,694	7.565.166,44	0,522
3	200.727,641	7.561.961,611	0,122
4	201.421,238	7.559.929,261	0,461
5	200.452,868	7.562.994,745	0,162
6	201.183,722	7.564.322,465	0,362
7	201.457,691	7.563.532,401	1,241
8	201.896,687	7.562.841,37	1,098
9	201.954,256	7.564.134,465	0,960
10	205.717,971	7.562.595,89	0,967

Pela Tabela 3, foi verificado que os valores de RMS variam do mínimo de 0,122m ao máximo de 1,292m. Era esperado que todos os pontos de verificação apresentassem valores de RMS 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 no mapa, 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 possuíssem a mesma exatidão no mapa. É esperado que o desempenho da transformação de coordenadas seja inferior nesta situação. Desse modo, se os 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 RMS médio das coordenadas dos pontos de controle transformados foi de 2,084m. Este valor foi próximo do RMS médio obtido quando foram atribuídos pesos as coordenadas dos pontos de controle em função da sua exatidão no mapa, cujo valor foi de 2,066m e é procedente da Tabela 2. Esta ocorrência foi contrária ao esperado. A diferença entre os valores de RMS médio 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 RMS médio 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 RMS médios 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, no mapa, 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 do mapa em questão não ser satisfatória, como também porque algumas regiões do mapa estavam desatualizadas e outras mal desenhadas. Tais circunstâncias prejudicaram a correta determinação dos pontos no mapa. 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 do mapa a ser georreferenciado foi verificada uma maneira de atenuar o problema a partir de iterações do georreferenciamento realizado no item 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 no item 4.

5.1 Avaliação do georreferenciamento – 1º iteração

A partir dos valores de RMS 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 RMS dos n pontos determinados pela mesma técnica, foi selecionado o maior valor de RMS dentre estes pontos. Este valor foi dividido pelo valor de RMS 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 4, 5 e 6 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.

$$\text{Peso}_{(i)} = \frac{\text{RMS}_{\text{máximo}}}{\text{RMS}_{\text{ponto}_{(i)}}} \times 5,50 \quad (4)$$

$$\text{Peso}_{(i)} = \frac{\text{RMS}_{\text{máximo}}}{\text{RMS}_{\text{ponto}_{(i)}}} \times 1,30 \quad (5)$$

$$\text{Peso}_{(i)} = \frac{\text{RMS}_{\text{máximo}}}{\text{RMS}_{\text{ponto}_{(i)}}} \times 1,00 \quad (6)$$

Onde:

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

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

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

A Tabela 3 apresenta os valores das coordenadas dos pontos de controle transformados referentes à transformação de coordenadas realizada no item 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 3, comparando os valores dos pesos com os valores de RMS, que os geraram, é notório que: dentre as coordenadas dos pontos de controle criadas pela mesma técnica, aquela que apresentou o maior valor de RMS 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 RMS foi a que recebeu o maior peso. Isto torna evidente que, existe uma proporcionalidade entre os valores de RMS 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.

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

Ponto	Técnica	X	Y	RMS	Peso
1	PR	196.909,222	7.566.594,784	0,270	18,61
2	PR	198.229,741	7.565.060,203	0,143	35,15
3	FO	199.123,626	7.564.214,420	1,726	5,07
4	PR	200.863,530	7.566.393,761	0,564	8,91
5	PR	200.776,755	7.564.611,963	0,914	5,50
6	IM	202.547,148	7.564.694,120	3,107	1,55
7	IM	200.137,883	7.564.391,878	4,102	1,17
8	FO	200.534,270	7.563.403,918	2,051	4,26
9	PR	202.089,242	7.563.449,028	0,455	11,05
10	IM	203.637,409	7.563.666,998	3,134	1,54
11	FO	204.802,855	7.564.797,410	0,804	10,88
12	IM	201.286,220	7.562.924,239	1,088	4,43
13	PR	199.113,339	7.562.097,343	0,221	22,75
14	IM	201.621,159	7.562.425,062	4,820	1,00
15	PR	203.429,673	7.562.590,514	0,755	6,66
16	PR	205.120,660	7.563.208,397	0,455	11,05
17	IM	199.631,294	7.561.434,116	1,375	3,51
18	FO	199.919,430	7.560.368,666	5,243	1,67
19	FO	200.660,717	7.561.129,052	5,118	1,71
20	FO	201.521,496	7.561.795,887	6,730	1,30
21	IM	203.104,432	7.561.189,920	2,823	1,71
22	FO	201.679,883	7.560.955,266	1,742	5,02
23	IM	204.288,526	7.560.515,916	0,689	6,99
24	FO	201.302,785	7.560.730,029	1,257	6,96

Realizada a transformação de coordenadas, o valor obtido do RMS médio 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 RMS médio igual a 2,066m. O valor do RMS médio dos pontos de verificação transformados apresentou um valor de 0,613m, que é um valor inferior quando comparado com aquele obtido no item 4, cujo valor foi de 0,623m. Esta constatação está de acordo com o previsto, isto é, que o valor de RMS médio 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 – 2° iteração

A partir dos valores de RMS 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 do item 5.1 e de seus respectivos pesos normalizados foi realizada a transformação de coordenadas.

O valor de RMS médio dos pontos de controle provenientes desta nova transformação é de 2,059m. Este valor foi inferior ao da transformação realizada no item 5.1, cujo valor de RMS médio 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 1° iteração do georreferenciamento, a fim de verificar se os valores de RMS procedentes desta transformação aumentariam ou não.

Foi verificado que na 2° iteração do georreferenciamento o valor do RMS médio das coordenadas dos pontos de verificação transformados foi de 0,559m, que é um valor 10,27% inferior daquele obtido no item 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 3° iteração do georreferenciamento.

5.2 Avaliação do georreferenciamento – 3° iteração

O valor de RMS médio dos pontos de controle transformados nesta iteração é de 2,172m. Este valor é superior ao obtido na transformação realizada no item 5.2, cujo valor de RMS médio foi igual a 2,059m.

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

6 CONCLUSÕES

Este artigo teve como principal objetivo apresentar um método para georreferenciar mapas urbanos 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 no mapa. Foi demonstrado que o georreferenciamento se torna melhor quando esta consideração é levada em conta.

Através das avaliações feitas foi constatado que, quando foram atribuídos pesos adequados aos pontos de controle em função da sua exatidão no mapa, 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 no mapa, há uma melhoria de 27,73%.

Sendo assim, concluí-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 mapas das mais variadas qualidades posicionais.

Finalmente, espera-se que as considerações expostas neste trabalho sejam usufruídas por todos os profissionais que almejam extrair informações concisas dos mapas georreferenciados.

7 BIBLIOGRAFIA

Dammalage, T. L., Samarakoon, L., Susaki, J. (2005) 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: mar. 2008

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

Katiyar, S. K., Dikshit, O. Kumar, K. (2003) Ground control for the geometric correction of PAN imagery from Indian Remote Sensing (IRS) satellites. **International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)**, v. 6, p. 4041-4043.

Levine, D. M., Berenson, M. L., Stephan, D. (2000) **Estatística: Teoria e Aplicações**. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro.

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

Patrocínio, R. B. (2004) **Análise quantitativa de pontos de controle para a correção geométrica de imagens orbitais**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

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

Tavares, P. E. M.; Fagundes, P. M. (1992) **Fotogrametria**, Sociedade Brasileira de Cartografia, Rio de Janeiro.

Wolf, P., R. (1983) **Elements of Photogrammetry**, MacGraw-Hill, São Paulo.

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