A CARTOGRAFIA E O PROBLEMA DOS REFERENCIAIS GEODÉSICOS: COMISSÃO DA CARTA GERAL DO BRASIL

ANDREA LOPES IESCHECK[1]
RONALDO DOS SANTOS DA ROCHA[1]
MARIO LUIZ LOPES REISS[1]
MANUELLA ANAÍS RODRIGUES FAGUNDES[2]

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS
Instituto de Geociências
[1]Departamento de Geodésia, Porto Alegre, RS
[2]Curso de Engenharia Cartográfica, Porto Alegre, RS
andrea.iescheck@ufrgs.br, ronaldo.rocha@ ufrgs.br, mario.reiss@ ufrgs.br, manuellafagundes@hotmail.com

RESUMO - O município de Porto Alegre e a maioria dos municípios da sua Região Metropolitana têm seus mapas, e produtos cartográficos derivados, associados ao Sistema Geodésico da Comissão da Carta Geral do Brasil (CCGB). Os diferentes setores da administração municipal produziram, ao longo dos anos, uma série de produtos cartográficos digitais com informações específicas, as quais não são facilmente mapeáveis por processos aerofotogramétricos. A compatibilização desses produtos, referenciados ao sistema CCGB, com a nova base cartográfica do município, referenciada ao Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000), é fundamental para a manutenção das atividades destes órgãos e representa grande economia de tempo e de recursos financeiros. O presente trabalho apresenta os parâmetros de transformação entre esses sistemas para o município de Porto Alegre. A metodologia adotada envolve a seleção de pontos homogeneamente distribuídos no município com coordenadas conhecidas no sistema CCGB, o levantamento de campo de 200 pontos e o processamento dos dados para determinação das coordenadas cartesianas tridimensionais em SIRGAS 2000, a análise dos modelos matemáticos para determinação dos parâmetros de transformação, e a avaliação da qualidade dos parâmetros obtidos para validação da metodologia. Os resultados obtidos possibilitam a conversão dos produtos cartográficos com um erro máximo de 41,72 cm.

ABSTRACT – Maps and cartographic products of the city of Porto Alegre, and most of the municipalities within its Metropolitan Area, are associated to the Comissão da Carta Geral do Brasil (CCGB) geodetic system. The different sectors of the municipal government produced specific digital cartographic information over the years. These information are not easy to generate by aerophotogrammetric techniques. The compatibility of such products, referenced to CCGB system, with the new city base map, referenced to the Geocentric Reference System for the Americas (SIRGAS 2000), is essential for maintaining the activities of these sectors and to avoid duplication of effort and expense. This work presents the parameters for the transformation between these reference systems for the city of Porto Alegre. The methodology entails the selection of 200 points homogeneously distributed in the city with known coordinates in CCGB reference system, the surveying and processing to define the three dimensional coordinates of these points referenced to SIRGAS 2000, the analysis of mathematical models to compute the transformation parameters, and the quality assessment quality of the estimated parameters to validate the methodology. The resulting transformation parameters allow the conversion of cartographic products with a maximum error of 41.72 cm.

1 INTRODUÇÃO

O crescente uso dos Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS) demandou o estabelecimento de um referencial geocêntrico, que permita a compatibilidade e o intercâmbio de informações em nível global. Desenvolveu-se, portanto, o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000) e, em 2005, o Brasil iniciou oficialmente o período de transição para esse novo sistema. A adoção do SIRGAS 2000 para o Sistema Geodésico

Brasileiro (SGB) e para o Sistema Cartográfico Nacional (SCN) foi oficializada em 25/02/2005, por meio da Resolução da Presidência do IBGE nº 1/2005.

O processo de migração para o SIRGAS 2000 implica na adoção deste sistema geodésico para os novos projetos de mapeamento e na transformação do acervo cartográfico existente para este novo sistema até 01 de janeiro de 2015. A transformação entre sistemas de referência é uma das atividades mais utilizadas nas ciências geodésicas e, para tanto, é necessário conhecer os respectivos parâmetros de transformação.

O Município de Porto Alegre, bem como a maioria dos municípios da sua Região Metropolitana, têm seus mapas, e produtos cartográficos derivados, associados ao Sistema Geodésico da Comissão da Carta Geral do Brasil (CCGB). Este fato ocasiona uma série de problemas de compatibilização, os quais são majorados pela inexistência de parâmetros oficiais de conversão entre estes sistemas.

Com o novo mapeamento de Porto Alegre, processo iniciado em 2010 e em fase de conclusão, o Decreto Municipal n° 8.353 de 1983, o qual estabelecia que todas as atividades de topografia e cartografia deveriam ser amarradas à rede de referência planialtimétrica municipal, foi substituído pelo Decreto Municipal n° 18.315, de 11 de junho de 2013 (PMPA, 2013), que institui e define o Sistema Cartográfico de Referência de Porto Alegre. Esta atualização implica na adoção do sistema geodésico de referência SIRGAS 2000, em substituição ao sistema CCGB. Os parâmetros do sistema CCGB para o *datum* planimétrico não estão documentados e, com relação ao referencial altimétrico, adotava-se, inicialmente, o marégrafo de Torres – RS e, posteriormente, o marégrafo de Imbituba - SC.

Além disso, os diversos órgãos da administração municipal produziram, ao longo dos anos, uma série de produtos cartográficos digitais com informações específicas, como redes de água e de esgoto, sinalização de vias, dentre outras, as quais não são facilmente mapeáveis por processos aerofotogramétricos. A compatibilização desses produtos, referenciados ao sistema CCGB, com a nova base cartográfica do município, referenciada ao SIRGAS 2000, é fundamental para a manutenção das atividades destes setores e representa grande economia de tempo e de recursos financeiros.

Neste contexto, as questões relacionadas à determinação dos parâmetros de transformação entre os sistemas geodésicos CCGB e SIRGAS 2000, são fundamentais para compatibilizar os produtos cartográficos do município com o sistema geodésico brasileiro atualmente em vigor. O presente trabalho apresenta a metodologia e os resultados obtidos na determinação dos parâmetros de transformação entre esses sistemas para o município de Porto Alegre.

2 COMISSÃO DA CARTA GERAL DO BRASIL E A CARTOGRAFIA DE PORTO ALEGRE

Sob a incumbência do preparo de um mapa para o Brasil, o Estado Maior produziu o projeto intitulado "A Carta do Brasil" publicado em 1901 pelo Estado Maior (BERNARDINO, 2012). Este projeto estabeleceu os processos de levantamento, os sistemas de projeção, as escalas e os formatos das folhas para a Carta Geral do Brasil. Foi adotado o método de triangulação geodésica, para o levantamento dos estados litorâneos, e a determinação de coordenadas dos pontos fundamentais pelo método astronômico, para a parte central do país, tida então como despovoada (BERNARDINO, 2012).

A Carta Geral foi organizada em três séries de operações distintas abrangendo operações geodésicas e astronômicas; operações topográficas; e operações cartográficas. As operações geodésicas determinariam a figura geométrica da Terra pelos métodos geodésico e astronômico. As operações topográficas envolveriam, dentre outras atividades, o treinamento de pessoal em topografia e, para os trabalhos de levantamento, foram recomendados os processos expedito e taqueométrico. Adotou-se a escala 1:100.000, com a divisão da carta em uma série de folhas com dimensões de 0,65 x 0,60 metros, e cada folha compreendendo uma área de 30' x 30'. E, as operações cartográficas compreenderam a escolha da projeção poliédrica e a construção da carta topográfica ou fundamental, e a projeção zenital equivalente sobre o horizonte (Lambert) para a elaboração das cartas na escala 1:100.000.

A produtividade da Comissão da Carta Geral foi destacada pela excelência dos trabalhos realizados, sendo que a rede de 1º ordem do RS, uma das mais extensas da América do Sul, cobre uma área de mais de 170 mil Km^2, aproximadamente 2/3 da superfície do Estado. Porém, os sucessivos problemas ocorridos a partir de 1922, impediram que os últimos anos de atividade da Comissão se processassem com normalidade e, em 1930, praticamente todos os trabalhos foram encerrados.

A Comissão da Carta Geral do Brasil (CCGB), primeira comissão de levantamentos executados em território brasileiro, foi apresentada ao General de Divisão Augusto Tasso Fragoso, Chefe do Estado Maior do Exército, em 24 de maio de 1932. Neste mesmo ano, através do Decreto 21.883 de 29 de setembro de 1932, o Serviço Geográfico Militar passou a se chamar Serviço Geográfico do Exército e a Comissão da Carta Geral deu origem à atual 1ª Divisão de Levantamentos, com sede em Porto Alegre (DSG, 2014).

Em 1936 foi criada a Diretoria de Cadastro do Município de Porto Alegre, que iniciou a implantação da Rede Geodésica apoiada na triangulação medida pelo Serviço da Comissão da Carta Geral do Brasil. Esta rede compreendia 18 vértices, tendo como base o vértice Observatório, *datum* planimétrico da CCGB. Os levantamentos topográficos

eram vinculados a esta rede, mas devido a dificuldades de trabalho e ao reduzido número de marcos existente, após 1940 estas diretrizes não foram mais seguidas. Os diversos órgãos e secretarias passaram, então, a adotar sistemas arbitrários, o que ocasionou uma superposição de trabalhos, sem possibilidade de vinculação por métodos analíticos.

O primeiro levantamento aerofotogramétrico de Porto Alegre foi realizado em 1941, a partir do qual o perímetro urbano foi restituído na escala 1:1.000 e as demais áreas na escala 1:2.000. Por processo de redução, todo o município foi mapeado na escala 1:10.000 (BRESSAN *et al*., 2006).

Em 1956, foi realizado um novo levantamento aerofotogramétrico. A restituição foi feita na escala 1:2.000 e, pelo processo de redução, todo o município foi mapeado na escala 1:5.000. A figura 12 apresenta uma folha da carta gerada por este mapeamento.

Em 1973, houve uma nova cobertura aerofotogramétrica, na escala 1:8.000, que deu origem às ortofotocartas nas escalas 1:2.000 e 1:5.000. Estas ortofotocartas serviram de base para elaboração do plano diretor da época.

Em dezembro de 1981, foi firmado um convênio entre o Município de Porto Alegre e a Fundação Metropolitana de Planejamento, objetivando a implantação de uma rede de referência planialtimétrica e a execução do mapa cadastral pelo processo aerofotogramétrico. A rede de referência do município de Porto Alegre consiste de um conjunto de pinos metálicos, materializados ao longo de vias públicas, e que possuem coordenadas referidas ao sistema geodésico de referências CCGB e coordenadas na projeção Gauss-Kruger. Até dezembro de 1984 foram medidos e implantados 1250 pontos, totalizando 240 km de poligonal.

O último mapeamento em meio analógico do município de Porto Alegre foi realizado em 1982. O levantamento aerofotogramétrico foi realizado na escala 1:5.000, cobrindo uma área aproximada de 500 km^2, e a restituição foi executada na escala 1:1.000. Como resultado deste projeto, foram gerados dois conjuntos de 2065 folhas originais, sendo um planimétrico e o outro planialtimétrico. Este mapeamento foi concluído em 1986 e, em 1988, foi feita a atualização parcial deste mapeamento para a área central do município. Houve, desde então, um processo de atualização cartográfica não sistemática, com a utilização de técnicas topográficas, o que não foi suficiente para manter as cartas atualizadas nestes últimos 20 anos.

A partir de 2010, iniciou-se o processo para o novo mapeamento do município, a partir de cobertura aérea digital, com resolução de 12,5 cm, e de cobertura com perfilamento LASER de densidade mínima de 2 pontos/m^2. A restituição digital, na escala 1:1.000, bem como os demais produtos cartográficos estão referenciados ao SGB.

3 METODOLOGIA

Os procedimentos realizados para determinação dos parâmetros de transformação estão esquematizados na Figura 1. A primeira etapa do trabalho trata da seleção dos pontos e do planejamento das atividades de campo. Em seguida, faz-se o levantamento de campo e o processamento dos dados para determinação das coordenadas cartesianas tridimensionais nos dois sistemas. Após, são definidos os modelos matemáticos para determinação dos parâmetros de transformação. E, por fim, é feita a análise da qualidade dos modelos utilizados e dos parâmetros obtidos para validação da metodologia.

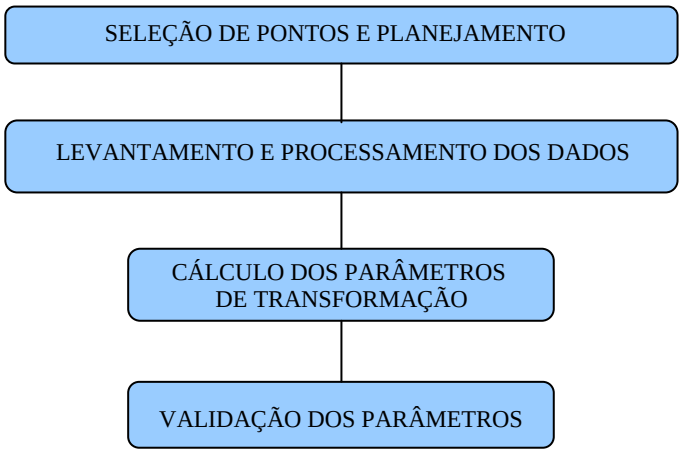

Figura 1 – Etapas da metodologia

3.1 Seleção dos pontos e planejamento das atividades de campo

Com o objetivo de identificar os pontos da Rede de Referência Cadastral Municipal e eleger aqueles estrategicamente distribuídos no município de Porto Alegre e com possibilidade de serem reocupados e rastreados com tecnologia GNSS, foram analisados os pontos da rede de referência cadastral municipal e da rede de apoio básico. A partir desta análise foi escolhido um conjunto representativo de pontos, considerando a uniformidade de distribuição e a viabilidade de ocupação, tendo em vista as recomendações técnicas inerentes ao posicionamento por satélites. Foram realizadas visitas aos locais para verificar as condições de ocupação de cada ponto. Deste procedimento foram selecionados 150 pontos para determinação dos parâmetros e 50 pontos de controle para validação dos parâmetros calculados.

Fez-se, então, o planejamento detalhado de ocupação dos 200 pontos pré-selecionados. Com base na localização e na distribuição destes pontos no município, que abrange uma área de aproximadamente 500 km^2, considerou-se o tempo mínimo de rastreio, os horários do dia e o tempo de deslocamento entre os pontos. Com este procedimento, foi possível orientar as equipes de forma a otimizar as atividades de coleta de dados em campo.

3.2 Levantamento de campo e processamento dos dados

O levantamento de campo envolveu a ocupação de 150 pontos da rede de referência cadastral do Município de Porto Alegre, incluindo os remanescentes dos 36 marcos da rede de apoio básico, com receptor GNSS de dupla frequência, marca Spectra Precision EPOCH 25 L1/L2, durante um período mínimo de 3 horas para cada ponto. Após coleta, procedeu-se ao pós-processamento dos dados por meio do programa Topcon Tools, versão 8.2.3, tendo por base as estações POAL da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) e da Rede Estadual GPS/RS.

As coordenadas cartesianas tridimensionais dos pontos referenciadas ao sistema SIRGAS 2000 foram obtidas no processamento dos dados GNSS. E as coordenadas tridimensionais dos pontos referenciados ao sistema CCGB foram obtidas diretamente da monografia dos marcos da rede de referência cadastral municipal e da rede de apoio básico. Como as coordenadas dos pontos da rede de referência cadastral do município são planimétricas, adotou-se as altitudes obtidas do rastreamento em campo referenciadas ao SIRGAS 2000. A altitude ortométrica de cada ponto foi definida considerando a altitude geométrica medida, corrigida da ondulação geoidal do marco mais próximo da rede de referência cadastral municipal. Esta rede é composta por 94 marcos geodésicos, sendo 50 pilares com dispositivo de centragem forçada, conforme padrão RBMC estabelecido pelo IBGE, e 44 marcos de azimute, também construídos conforme padrão do IBGE.

3.3 Cálculo dos parâmetros de transformação

A partir da análise dos valores das coordenadas dos pontos obtidos nos dois sistemas de referência, foi possível conhecer os vetores tridimensionais para cada ponto. Estudos foram realizados para estabelecimento do modelo matemático mais adequado ao cálculo dos parâmetros.

A estimativa dos parâmetros de transformação foi feita por ajustamento de observações, utilizando o método paramétrico com injunções de peso para as coordenadas cartesianas conhecidas. As rotinas de programação para processamento dos dados e para estimativa dos 7 parâmetros foram implementadas na linguagem C/C++.

3.4 Análise da qualidade dos modelos utilizados e dos parâmetros obtidos

A análise dos resultados obtidos no processo para validação dos parâmetros de transformação CCGB-SIRGAS 2000 se deu a partir da medição dos 50 pontos de controle previamente definidos, distintos dos utilizados para a determinação dos parâmetros. O levantamento destes pontos foi realizado com o mesmo equipamento, durante um período de 20 a 40 minutos para cada ponto. Estes pontos, cujas coordenadas eram conhecidas no sistema CCGB, foram transformados para o sistema SIRGAS 2000 utilizando-se os parâmetros calculados.

Tendo por base as coordenadas transformadas e as coordenadas medidas dos pontos, procedeu-se à comparação das discrepâncias entre elas para teste e validação dos parâmetros calculados. Na análise foram realizados testes de tendência (T-Student) e de exatidão (Q-Quadrado).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o processo de estimativa de parâmetros, observou-se que alguns dos pontos conhecidos no sistema CCGB estavam com degradação no valor das suas coordenadas e foram retirados do processo. Portanto, foram considerados 124 pontos para determinação dos parâmetros. Também, não foi possível determinar a qualidade

posicional das coordenadas desses pontos, o que levou a considerar os pesos das injunções destas coordenadas como unitários e de mesma precisão.

O Quadro 1 apresenta os resultados obtidos tendo como premissa a consideração dos 7 parâmetros como incógnitos, ou seja, o peso da injunção é nulo. Ao analisar estes resultados, verifica-se que as rotações entre os sistemas de referência CCGB e SIRGAS 2000 apresentam valores inferiores a 1". Observa-se, também, que o fator de escala é próximo do valor unitário.

Quadro 1 – Parâmetros de transformação CCGB - SIRGAS 2000 considerando 7 parâmetros

```
                    RESUMO DO CÁLCULO DA TRANSFORMAÇÃO ISOGONAL

Fator de escala      =    1.0000039561 unidade +- 2.093E-06

Translações:
Xo                   = -250.1299890990 unidade +- 0.017
Yo                   =  196.3392596860 unidade +- 0.017
Zo                   =  -40.5195719703 unidade +- 0.017

Direção das rotações =    HORÁRIA

Ângulos de rotação - Graus radianos (rad):
Omega                =    0.00001457 rad       +- 0.0000025 rad
Phi                  =   -0.00002432 rad       +- 0.0000027 rad
Kappa                =   -0.00000420 rad       +- 0.0000035 rad

Ângulos de rotação - Graus decimais (°):
Omega                =    0.00083468 °         +- 0.0001422 °
Phi                  =   -0.00139355 °         +- 0.0001528 °
Kappa                =   -0.00024041 °         +- 0.0001984 °

Ângulos de rotação - GMS:
Omega                =  +00°00'03.004"         +-  +00°00'00.511"
Phi                  =  -00°00'05.016"         +-  +00°00'00.549"
Kappa                =  -00°00'00.865"         +-  +00°00'00.714"
```

O processo de validação dos parâmetros de transformação se deu a partir da comparação entre as coordenadas transformadas e as coordenadas medidas dos pontos de controle. Foram considerados 42 pontos nesta avaliação, uma vez que alguns pontos apresentaram degradação nos valores das suas coordenadas no sistema CCGB e foram excluídos do processamento. Dessa forma, testes de tendência e de exatidão foram realizados, para um nível de significância de 5% e 41 graus de liberdade. O Quadro 2 apresenta os resultados obtidos na análise de tendência e o Quadro 3 mostra a análise de exatidão para os 7 parâmetros de transformação CCGB – SIRGAS 2000.

Quadro 2 – Análise de tendência

```
                    ANÁLISE DE TENDÊNCIA DAS DISCREPÂNCIAS

                           T-STUDENT TEÓRICO:
-------------------------------------------------------------------
                    T-Student( 41, 0.05):   1.812
                         T-STUDENT AMOSTRAIS:
-------------------------------------------------------------------
 X:                         Y:                    Z:
 0.598                      0.335                 0.292
 não-tendencioso            não-tendencioso       não-tendencioso
 P: 72.329%                 P: 63.021%            P: 61.400%
```

Quadro 3 – Análise da exatidão

```
                    ANÁLISE DE EXATIDÃO:

        Exatidão a priori esperada para as coordenadas: 0.360 m

                    Q-QUADRADO TEÓRICO
-----------------------------------------------------------------
                Q-Quadrado( 41, 0.05):  18.307


                   Q-QUADRADOS AMOSTRAIS:
-----------------------------------------------------------------
 X:                         Y:                         Z:
 17.859                     7.225                      8.076
 Aprovado                   Aprovado                   Aprovado


            EXATIDÃO ALCANÇADA PARA AS COORDENADAS:
  ---------------------------------------------------------------
 X:                         Y:                         Z:
 0.306 m                    0.195 m                    0.206 m


            EXATIDÃO ALCANÇADA PARA A RESULTANTE: 41,72 cm
```

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos, a partir dos procedimentos adotados, demonstram que o objetivo de determinar os parâmetros de transformação entre o Sistema Geodésico de Referência da Comissão da Carta Geral do Brasil (CCGB) e o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000) foi atingido. A exatidão desta transformação, para a resultante das coordenadas, foi de 41,72 cm, considerando os 7 parâmetros de transformação como livres.

Vale ressaltar que a transformação não proporciona resultados de saída melhores que os dados de entrada, pelo contrário, os dados de saída sempre serão piores que os dados de entrada aos níveis de exatidão apresentados no Quadro 3. Portanto, os parâmetros de transformação obtidos para o município de Porto Alegre possibilitam a conversão dos produtos cartográficos, compatíveis com escalas menores que 1:1.500, do sistema CCGB para o sistema SIRGAS 2000.

REFERÊNCIAS

BERNARDINO, M. G. A. **O "Serviço da Carta": uma análise institucional da Comissão da Carta Geral do Brasil (1903-1932)**. 2012. Disponível em: <http://www.sbhc.org.br/resources/anais/10/1344729753_ARQUIVO_SBHC-2012MariaGabriela.pdf>. Acesso: 18 junho 2014.

BRESSAN, E.I.; THUM, A.B.; VERONEZ, M.R.; SILVA, R.M.; SOUZA, G.C. **Cartografia no município de Porto Alegre.** Anais: COBRAC · Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. UFSC. Florianópolis. 2006

DSG. Diretoria de Serviço Geográfico. **Histórico.** Disponível em: <http://www.dsg.eb.mil.br/index.php/institucional/histórico>. Acesso: 18 junho 2014.

PMPA. Prefeitura Municipal de Porto Alegre. **Decreto nº 18.315, de 11 de junho de 2013. Institui o Sistema Cartográfico de Referência de Porto Alegre (SCR-POA)**. 2013. Disponível em: <http://www2.portoalegre.rs.gov.br>. Acesso: 10 julho 2013.