REAJUSTAMENTO GLOBAL DA REDE ALTIMÉTRICA DE ALTA PRECISÃO - RAAP DO SGB, UTILIZANDO O SISTEMA GHOST

Eng.º Renato Rodrigues Pinheiro
Eng.ª Valéria Guimarães Carvalho
Eng.ª Claudia Cristina Cunha Santos
Eng.ª Nívia Régis Di Maio Pereira
Eng.º Walter Humberto Subiza Pina
Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE
Diretoria de Geociências – DGC
Coordenação de Geodésia - CGED
Av. Brasil, 15.671, Bloco III-A, Parada de Lucas, Rio de Janeiro – RJ. CEP: 21.241-051
e-mail: renatopinheiro, valeriamg, cccunha, nivia, humbertopina@ibge.gov.br

RESUMO

Entre 1945 e 1975, foram realizados oito ajustamentos parciais da RAAP, sendo que apenas os três primeiros utilizaram todas as observações disponíveis. A partir do quarto ajustamento, a rede foi particionada em blocos, tendo as altitudes fixas calculadas nos blocos anteriores, ou seja, a rede não foi reajustada globalmente. Em 1991 realizou-se uma nova divisão da rede, desta vez em forma de sub-redes iniciais de macrocircuitos, com a finalidade de evitar distorções excessivas. Essa divisão resultou no Ajustamento Altimétrico Global Preliminar – AAGP, que manteve uma diferença básica com relação aos ajustamentos anteriores na ordem de 25 cm em áreas que existiam RRNN e 80 cm nas áreas em que não havia RRNN correspondentes aos ajustamentos anteriores.

Após o último ajustamento da Rede Altimétrica de Alta Precisão - RAAP, divulgado em 1992, muitas observações foram inseridas, provenientes de novos nivelamentos no território brasileiro. Este fato nos levou a dar início ao novo reajustamento, agora utilizando o sistema GHOST – *Geodetic adjustment using Helmert blocking Of Space and Terrestrial Data*. A primeira etapa consiste no reajustamento das estações pertencentes aos 20 macrocircuitos que formam a RAAP, as quais servirão de partida para o reajustamento das linhas internas dos mesmos, previsto para o ano de 2006.

O sistema GHOST realiza ajustamentos tridimensionais através da técnica de "*Helmert Blocking*" (IBGE, 1991) e adota o método das equações de observações (método paramétrico).

Este trabalho tem como objetivo apresentar os resultados do reajustamento global da rede altimétrica e o seu comportamento, propiciando uma comparação com os resultados anteriores.

PALAVRAS CHAVES: Rede Altimétrica, Ajustamento, GHOST, RAAP, IBGE.

ABSTRACT

Between 1945 and 1975, eight partial adjustment of the observations of RAAP were realized. Nevertheless, only the first three have used all available observations. Starting from the fourth adjustment, the network was shared in blocks, had the fixed altitude calculated in the previous blocks, in other words, the network wasn't readjusted globally. In 1991, a new division of the network was realized, this time in form of initial sub-networks of macrocircuits, with the purpose of avoiding excessive distortions. This division resulted in the Preliminary Global Vertical Adjustment – AAGP that maintained a basic difference related to the previous adjustments in order of 25 cm in areas that had RRNN and 80 cm in the areas there weren't RRNN corresponding to the previous adjustments.

After the last adjustment of Vertical Network of High Precision – RAAP, published in 1992, many observations were introduced, coming from new spirit leveling in the Brazilian territory. This fact lead us to star the new readjustment, now using the system GHOST – Geodetic Adjustment using Helmert blocking of space and Terrestrial Data. The first stage consists in readjusting the stations belonging to the 20 macrocircuits with form the RAAP, this will served as the beginning for the readjustment of internal lines of the same ones, foreseen for 2006.

The system GHOST realizes three-dimension adjustments through the "Helmert Blocking" technique (IBGE, 1991) and it adopts the method of the equations of observations (parametric method).

This work has as objective to show the results of the global readjustment of the altimetric net, its behavior and it proprieties a comparison with the previous results.

KEYWORDS: Vertical Network, adjustment, Ghost, RAAP, and IBGE

1 INTRODUÇÃO

O último ajustamento global da RAAP foi feito no início da década de 90. E, passados mais de dez anos, foram inseridas novas observações através de nivelamento geométrico sendo necessário portanto um novo ajustamento global, agora simultâneo, de toda a rede. Ressalta-se que, no último ajustamento, a mesma foi dividida em macrocircuitos, sendo realizados ajustamentos individuais para cada macrocircuito, devido a capacidade limitada de cálculo do programa utilizado, o que não ocorre com a utilização do GHOST.

1.1 Breve histórico da RAAP

Em Outubro de 1945, a Seção de Nivelamento (SNi) da Divisão de Cartografia (DC) iniciava os trabalhos de Nivelamento Geométrico de Alta Precisão, dando partida ao estabelecimento da RAAP do Sistema Geodésico Brasileiro - SGB. No Distrito de Cocal, Município de Urussanga, Santa Catarina, onde está localizada a Referência de Nível RN 1-A, a equipe integrada pelos Engenheiros Honório Beserra - Chefe da SNi, José Clóvis Mota de Alencar, Péricles Sales Freire e Guarany Cabral de Lavôr, efetuaram a operação inicial de nivelamento geométrico no IBGE.

Em Dezembro de 1946, foi efetuada a conexão com a Estação Maregráfica de Torres, Rio Grande do Sul, permitindo, então, o cálculo das altitudes das Referências de Nível já implantadas. Concretizava-se, assim, o objetivo do Professor Allyrio de Mattos, de dotar o Brasil de uma estrutura altimétrica fundamental destinada a apoiar o mapeamento e servir de suporte às grandes obras de engenharia, como: projetos de saneamento básico, irrigação, estradas e telecomunicações, etc. .

Em 1958, quando a Rede Altimétrica contava com mais de 30.000 quilômetros de linhas de nivelamento, o *Datum* de Torres foi substituído pelo *Datum* de Imbituba, definido pela estação maregráfica do porto da cidade de mesmo nome, em Santa Catarina. Tal substituição ensejou uma sensível melhoria de definição do sistema de altitudes, uma vez que a estação de Imbituba contava na época com nove anos de observações, bem mais que o alcançado pela estação de Torres, com apenas um ano de observações (IBGE, 2005a).

O final da década de 70 marcou a conclusão de uma grande etapa do estabelecimento da Rede Altimétrica. Naquele momento, linhas de nivelamento geométrico chegaram aos pontos mais distantes do território brasileiro, nos estados do Acre e de Roraima.

Fato também marcante foi o início das operações de monitoramento do nível do mar, em 1993. Com o objetivo de aprimorar o referencial da Rede Altimétrica, o IBGE passou a operar a estação maregráfica de Copacabana, transformando-a em uma estação experimental para finalidades geodésicas. Hoje o IBGE opera 4 estações (Santana - AP, Salvador - BA, Macaé - RJ e Imbituba – SC) formando a Rede Maregráfica Permanente para Geodésia – RMPG.

Com o objetivo de homogeneizar as altitudes da RAAP, é executado periodicamente o ajustamento das observações altimétricas oriundas das diversas campanhas de nivelamento. Por ser um trabalho dinâmico, toda vez que se faz um ajustamento da rede pode-se dizer que o seu resultado é preliminar, já que à cada ajustamento a tendência é melhorar o seu resultado considerando um número maior de estações e fazendo uma melhor distribuição de erro.

2 AJUSTAMENTO DA REDE ALTIMÉTRICA DE ALTA PRECISÃO

2.1 Metodologia

O software de ajustamento geodésico GHOST (***G****eodetic adjustment using* ***H****elmert blocking* ***O****f* ***S****pace and* ***T****errestrial data*), consiste de uma série de programas escritos na linguagem Fortran na década de 1980 pelo *Geodetic Survey Division* do Canadá, com a finalidade de realizar um ajustamento paramétrico pelo método de mínimos quadrados (MMQ) (Gemael, 1994). O modelo matemático é descrito em (Steeves, 1983) e permite a combinação de dados observados em forma convencional como direções, distâncias, azimutes e diferenças de nível, assim como as observações da tecnologia por satélites. O ajustamento requer uma definição inicial de coordenadas em termos de latitude, longitude e altitude. O sistema GHOST possibilita o ajustamento de redes geodésicas através de dois métodos diferentes, um método padrão para redes de porte médio e menores, onde não é necessário a decomposição em blocos e um ajustamento por *Helmert Blocking* para grandes redes. No ajustamento por Helmert, a rede é dividida em blocos usando um esquema previamente definido. Em cada bloco são estabelecidas estações de junção, que permitem vincular os diferentes blocos e estações denominadas de internas. Uma vez calculadas as estações de junção numa solução direta (método de Cholesky), as internas são determinadas na retrosolução. Este sistema já foi usado para o ajustamento desde grandes redes geodésicas tridimensionais (IBGE,2005b) até unidimensionais (Subiza e Sousa, 2001).

Neste estágio do projeto, a separação dos dados em blocos não foi necessária, processando-se os dados no método padrão. Basicamente, o arquivo de entrada com dados do nivelamento, está composto de um registro de coordenadas iniciais para cada estação e os desníveis observados com o seu desvio padrão *a*

priori. Uma vez completo o arquivo de entrada, o software usa uma série de programas seqüenciais para ler os dados, preparar e minimizar a matriz de equações normais, ajustar, listar os resíduos e analisar os resultados obtidos, em termos de coordenadas ajustadas e desvios padrão.

2.2 Preparação dos dados

Cada linha de nivelamento foi submetida previamente ao programa Critcoor (Crítica de Coordenadas). Este programa realiza uma crítica dos dados de nivelamento observados, verificando principalmente a integridade das coordenadas das estações comparando seus valores calculados e observados, além de supostos conflitos na identificação das estações, descontinuidades na seqüência de estações e oferecendo alguns dados estatísticos do nivelamento. Posteriormente, um outro programa lê os arquivos das linhas de nivelamento e transforma as observações para o formato de entrada do programa Ghost de ajustamento. Uma vez que a escolha da variância de peso é uma questão arbitrária e não influi no vetor das incógnitas (veja Gemael, 1994 7.6), foi escolhido o valor 2,5 mm $\sqrt{k}$ como valor *a priori* para o desvio padrão individual dos valores observados. Esta fórmula levou em consideração tanto a dependência da distância dos erros no nivelamento, assim como um valor aproximado do erro esperado por km de seção e mostrou-se adequada na maioria dos casos.

Uma vez preparada as linhas, montaram-se os macrocircuitos num único arquivo, incorporando um de cada vez e verificando em cada etapa a inexistência de erros. O arquivo preparado continha como observáveis os desníveis, os quais careciam da correção de não paralelismo das equipotenciais, um efeito sistemático ocasionado pela falta de combinação de observações de gravidade com nivelamento e o uso de altitudes denominadas científicas (Heiskanen, 1985). Todos os desníveis foram corrigidos deste efeito, usando a fórmula simplificada mencionada em (Ribeiro, 1989), a saber:

$$C_o = -\frac{H_m(C_1 \operatorname{sen} 2\varphi_m + 2C_2 \operatorname{sen} 4\varphi_m)\Delta\varphi}{(1 + C_1 \operatorname{sen}^2 \varphi_m + C_2 \operatorname{sen}^2 2\varphi_m)} \qquad (1)$$

onde:
H_m= altitude média da seção de nivelamento considerada
φ_m = latitude média da seção
$\Delta\varphi$ = diferença de latitudes entre os extremos da seção
C_1 e C_2= coeficientes do campo de gravidade normal, sendo os valores:
C_1 = 0,0053023655 e
C_2= -0,0000059.

A correção de não paralelismo das eqüipotenciais permitiu reduzir em aproximadamente em 2 cm o desvio padrão final das estações.

Estatísticas do arquivo de entrada.

Estações de ajustamento	14569
Estações fixas	38
Diferenças de nivelamento	14588
Equações normais	14530
Graus de liberdade do ajuste	58

2.3 Resultados

O fator de variância calculada no ajustamento foi de 0,8546, indicando que a variância de peso inicial foi adequada. Na seqüência foi analisada a discrepância entre os valores *a priori* e *a posteriori* da variância das observações. Para isso foi executado um teste de hipótese baseado na distribuição χ^2 para constatar se a discrepância era significativa ao nível de confiança de α=95%. Isto se baseia no fato de que a forma quadrática dos resíduos num ajustamento tem esse tipo de distribuição com *S* graus de liberdade. A hipótese básica de que as variâncias mencionadas são iguais não pode ser rejeitada se

$$\chi^2_{S,1-\frac{\alpha}{2}} < \chi^{*2} < \chi^2_{S,\frac{\alpha}{2}} \qquad (2)$$

sendo χ^{*2}, calculado através de $\frac{V^T PV}{S}$.

Na fórmula 2, *V* é a matriz dos resíduos e *P* a matriz dos pesos. O valor obtido de 49,566, foi logo comparado com aqueles fornecidos pela tabela da distribuição χ^2, sendo os resultados:

31,877<49,566<79,156 para *S*=58

Desta forma, a hipótese básica não foi rejeitada ao nível de significância de 95%, indicando a possível ausência de erros grosseiros nas observações. A distribuição espacial das estações é apresentado na figura 1 e o desvio padrão na figura 2.

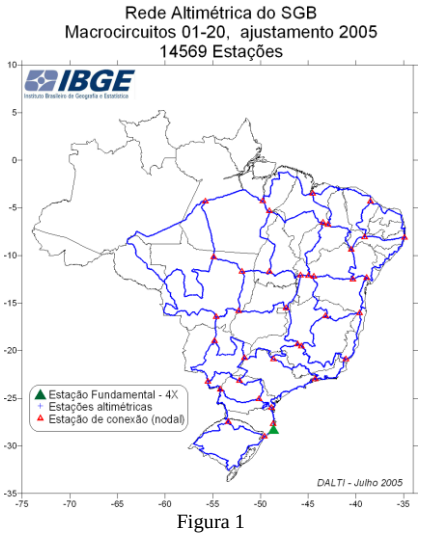

Figura 1

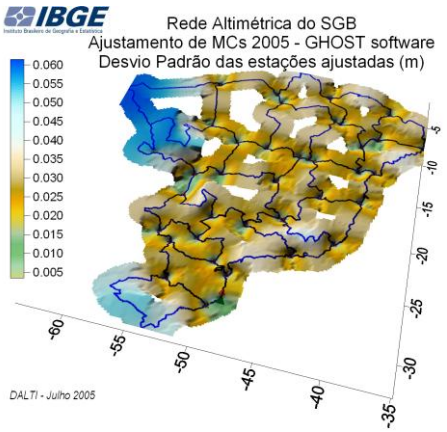

Figura 2

Na seqüência, apresentam-se duas tabelas com dados estatísticos que mostram a qualidade do ajustamento. A primeira Tabela 1, refere-se aos desvios padrão da altitude ajustada para cada estação; na Tabela 2, apresentam-se os resíduos das observações (desníveis, em mm) e os seus desvios padrões, a *priori* e a *posteriori*.

TABELA 1 –DESVIOS PADRÕES DA ALTITUDE AJUSTADA

Desvio Pad (cm)	
Média	0,0288
DP	0,0128
Mín	0,0002
Máx	0,0616

TABELA 2 – RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES

	Resíduos	**DPapriori**	**DPapost**
Média	-0,027	4,126	3,807
DP	0,246	0,675	0,622
Mínima	-0,857	0,250	0,231
Máxima	1,687	7,788	7,091

No Gráfico 1 mostram-se os dados da Tabela 1 e no Gráfico 2, os resíduos normalizados da Tabela 2, junto com a função de distribuição normal experimental.

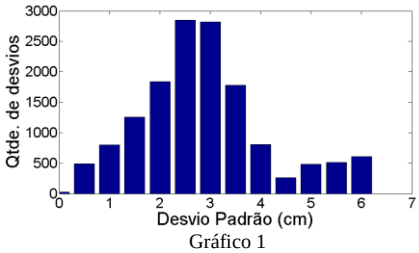

Gráfico 1

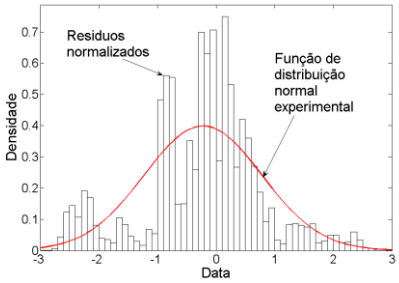

Gráfico 2

2.4 Comparações das altitudes

Foi feita uma comparação geral das altitudes geradas com os resultados obtidos do ajustamento AAGP. Diferenças superiores a 1 cm entre as duas altitudes são apresentadas em vermelho na figura 3. A linha principal 57 já tinha sido rejeitada no ajustamento AAGP, porém verificou-se com a integração de todas as observações num único ajuste, que o problema pode realmente encontrar-se na linha principal 54.

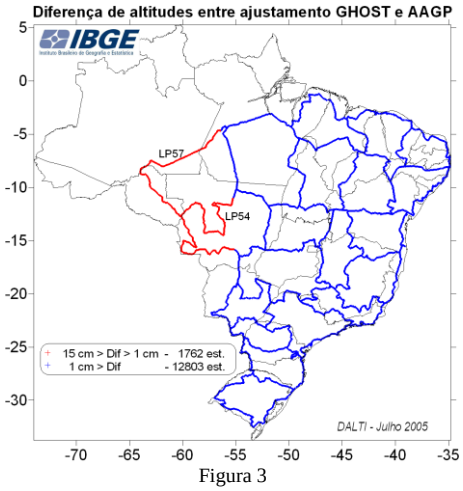

Figura 3

Pretende-se aprofundar este estudo, assim como comparar as altitudes com a base de dados geodésicos de público acesso. A inclusão no ajustamento das linhas internas dos macrocircuitos, deve ser outra das linhas de trabalho a serem executadas na seqüência por este projeto.

3 CONCLUSÕES

Pela primeira vez realizou-se no IBGE, um ajuste simultâneo da rede vertical de alta precisão, integrando todas as observações disponíveis.

A falta de observações de controle externo, assim como a dependência da escala de uma única estação maregráfica, limitam seriamente o ajustamento.

A futura vinculação de estações adicionais maregráficas, permitirão exercer um controle maior na transmissão e detecção de erros na rede.

Os resultados gerais concordam com os desvios padrão estimados de $2{,}5mm\sqrt{Km}$ nos desníveis ajustados e desvios padrões máximos de 6 cm nas altitudes obtidas.

A utilização do software GHOST permitiu um conhecimento inicial e o uso de uma ferramenta de ajustamento de grandes redes geodésicas.

O projeto continuará com a integração das linhas de adensamento interno dos macrocircuitos.

Estão em execução estudos para determinar o possível erro presente nas linhas 54 e 57.

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

IBGE, 1991. Relatório Técnico nº1: Resultados preliminares do ajustamento global da Rede Altimétrica de Alta Precisão do Sistema Geodésico Brasileiro, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 31 páginas.

IBGE 2005a. Breve histórico da RAAP do IBGE, em: http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/altimetrica.shtm?c=3, 08/08/2005.

IBGE 2005b. Relatório do Ajustamento da Rede Planimétrica do IBGE, em: http://www.ibge.gov.br/home/ geociencias/geodesia/REL_sad69.pdf, 08/08/2005.

Gemael, C. 1994. Introdução ao ajustamento de observações, Editora UFPr, Curitiba – PR, Brasil, 319 páginas.

Heiskanen, W,; Moritz, H. 1985. Geodesia Física, Instituto Geográfico Nacional, Espanha, 371 páginas.

Ribeiro, G.P. 1989. Ajustamento altimétrico desenvolvido através do método das equações de observação e com análise estatística dos resultados, Editora UFPr, Curitiba – PR, Brasil, 245 páginas.

Steeves, R. 1983. Mathematical models for use in the readjustment of the North American geodetic networks, Thecnical Report 1, GSD, Canada, 33 páginas.

Subiza Piña, W. H. e M. A. Sousa, 2001. O Estado da Base de Dados Gravimétricos do Observatório Nacional (BDG-ON) Situação em junho, 2001. Brazilian Journal of Geophysics (Soc. Bras. Geofísica, Rio de Janeiro Vol.19, N. 3, p. 325-328.

Código de campo alterado

Formatado: Português (Brasil)

Formatado: Português (Brasil)