

REAJUSTAMENTO GLOBAL DA REDE ALTIMÉTRICA DE ALTA PRECISÃO DO BRASIL - RAAP

Eng.º Walter Humberto Subiza Piña
Eng.º Renato Rodrigues Pinheiro
Eng.ª Cláudia Cristina Cunha Santos
Eng.ª Nívia Régis Di Maio Pereira
Eng.º Daniel Goldani

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
endereço eletrônico: humbertopina@ibge.gov.br

RESUMO

Entre 1945 e 1975, foram realizados oito ajustamentos parciais da Rede Altimétrica de Alta Precisão – RAAP do Brasil, sendo que apenas os três primeiros utilizaram todas as observações disponíveis. A partir do quarto ajustamento, e devido à quantidade de observações, a rede foi particionada em blocos, tendo algumas estações suas altitudes fixas e calculadas nos blocos anteriores, completando-se uma série de ajustamentos parciais. 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, o qual ainda não teve o caráter de ajustamento simultâneo de todas as observações. Após o último ajustamento, divulgado em 1992, muitas observações foram inseridas, provenientes de novos nivelamentos no território brasileiro. Este fato, e a disponibilidade de um software de ajustamento global, levou a dar início a um novo projeto, visando o ajustamento simultâneo de toda a rede altimétrica do Brasil. O software GHOST – *Geodetic adjustment using Helmert blocking Of Space and Terrestrial Data* realiza ajustamentos tridimensionais em redes de grande porte, através da técnica de “*Helmert Blocking*” e o método das equações de observações (método paramétrico). A primeira etapa, concluída em 2005, consistiu no reajustamento das estações pertencentes aos 20 macrocircuitos que formam a RAAP. Numa segunda instância, incluíram-se as linhas internas dos macrocircuitos, com um total de aproximadamente 36600 estações ajustadas.

Este trabalho tem como objetivo apresentar os resultados do reajustamento global da rede altimétrica usando o software GHOST, finalizado em março de 2006, o seu comportamento e os futuros trabalhos a executar.

PALAVRAS CHAVES: Rede Altimétrica Brasileira, Ajustamento simultâneo, Ghost, RAAP, IBGE.

ABSTRACT

Between 1945 and 1975, eight partial adjustments of the Brazilian High Precision Vertical Network (in Portuguese, RAAP), were carried out. Among them, only the first three ones used all the available observations. Starting from the fourth adjustment, the network was sliced in several blocks, having some stations a fixed altitude coming from previous blocks, so, it was carried out in several partial adjustments. In 1991, a new division of the network was performed, including sub-networks containing the main leveling lines. This division resulted in the Preliminary Global Vertical Adjustment – AAGP, still performed as partial adjustments. After the last adjustment, published in 1992, many observations were introduced, coming from new spirit leveling lines in the Brazilian territory. This fact, and the availability of a global adjustment software, lead us to star a new project, aiming to readjust simultaneously the Brazilian vertical net. GHOST software (*Geodetic Adjustment using Helmert blocking of space and Terrestrial Data*) perform three-dimension adjustments on regional or continental nets, through the “*Helmert Blocking*” technique using the method of the equations of observations (parametric method). The first stage, including the adjustment of stations belonging to the 20 macrocircuits of RAAP, finished in 2005.

This paper, shows the results of the global readjustment of the vertical net in the second stage, finished March 2006, including now the internal leveling lines with about 36,600 stations, the evaluation of its results and our plans for the future .

KEYWORDS: Brazilian Vertical Network, global adjustment, Ghost, RAAP, IBGE

INTRODUÇÃO

Em Outubro de 1945, a Seção de Nivelamento (SNI) da Divisão de Cartografia (DC) do IBGE, iniciava os trabalhos de Nivelamento Geométrico de Alta Precisão, dando partida ao estabelecimento da Rede Altimétrica de Alta Precisão - RAAP do Sistema Geodésico Brasileiro - SGB.

Em Dezembro de 1946, foi efetuada a conexão com a Estação Maregráfica de Torres, Rio Grande do Sul, permitindo, assim, o cálculo de altitudes nas Referências de Nível já implantadas, vinculadas ao que foi chamado de *Datum* Torres.

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).

No final da década de 70, as 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 (Fortaleza - CE, Salvador - BA, Macaé - RJ e Imbituba - SC) formando a Rede Maregráfica Permanente para Geodésia - RMPG, sendo que mais duas novas estações maregráficas vai entrar em operação proximamente.

Em relação ao ajustamento das observações, entre 1945 e 1975 foram realizados oito ajustamentos parciais da Rede Altimétrica de Alta Precisão - RAAP do Brasil, sendo que apenas os três primeiros utilizaram todas as observações disponíveis. A partir do quarto ajustamento, e devido à quantidade de observações, a rede foi particionada em blocos, tendo algumas estações suas altitudes fixas e 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 de macrocircuitos, com a finalidade de evitar distorções excessivas. Essa divisão resultou no Ajustamento Altimétrico Global Preliminar - AAGP, a qual usou 38 estações de conexão com altitude fixa, incluindo a estação 4X, conectada ao marégrafo Imbituba.

Em 2005 começou um projeto de ajustamento global da RAAP, usando o software GHOST (*Geodetic adjustment using Helmert blocking Of Space and Terrestrial data*). Assim sendo, em 2005 foram ajustados inicialmente os 20 macrocircuitos, contendo 57 linhas principais de nivelamento e umas 14600 estações. Em 2006, continuo-se o projeto com a introdução das linhas internas dos macrocircuitos, ajustando-se umas 36600 estações. Este trabalho

apresenta a metodologia usada e os resultados obtidos, assim como os trabalhos futuros a executar.

2 AJUSTAMENTO DA REDE ALTIMÉTRICA DE ALTA PRECISÃO

2.1 Metodologia

O software de ajustamento geodésico GHOST (*Geodetic adjustment using Helmert blocking Of Space and Terrestrial 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 observações tridimensionais provenientes do sistemas de posicionamento global (GPS).

Basicamente, os arquivos de entrada são dois, um composto de um registro de coordenadas iniciais para cada estação, em termos de latitude, longitude e altitude, e um segundo com os desníveis observados e 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. A grande vantagem deste método é a produção de um único jogo de coordenadas para toda a rede, incluindo a matriz de variâncias e covariâncias completa, permitindo a recuperação do desvio padrão da estação ajustada, assim como do desvio padrão relativo entre duas estações qualquer da rede.

2.2 Preparação dos dados

Cada linha de nivelamento foi submetida ao programa Critcoor (Crítica de Coordenadas), realizando uma crítica dos dados de nivelamento observados. Posteriormente, um outro programa transformou as observações para o formato de entrada do programa Ghost. A variância de peso inicialmente escolhida foi de 2,5 mm \sqrt{K} para o desvio padrão individual dos valores observados. Em algumas linhas a variância foi aumentada até 8 mm. Esta fórmula levou em consideração tanto a dependência do erro com a distância nivelada, assim como um valor aproximado do erro esperado por km de seção e mostrou-se adequada na maioria dos casos.

Todos os desníveis foram corrigidos do efeito de não paralelismo das equipotenciais, usando a fórmula (Ribeiro, 1989):

$$C_o = -\frac{H_m (C_1 \sin 2\phi_m + 2C_2 \sin 4\phi_m) \Delta\phi}{(1 + C_1 \sin^2\phi_m + C_2 \sin^2 2\phi_m)} \quad (1)$$

onde:

H_m = altitude média da seção de nivelamento considerada

ϕ_m = latitude média da seção

$\Delta\phi$ = diferença de latitudes entre os extremos da seção
 C_1 e C_2 = coeficientes do campo de gravidade normal, sendo os valores:
 $C_1 = 0,0053023655$
 $C_2 = -0,0000059$.

O software GHOST possibilita o ajustamento de redes geodésicas através de dois diferentes aproximações; uma padrão, para redes de porte médio e menores, onde não é necessário a decomposição em blocos e uma outra denominada de *Helmert Blocking* para grandes redes. No ajustamento por Helmert, usado no presente projeto, a rede é dividida em blocos. Cada bloco de nível superior, é dividido em dois sub-blocos de nível inferior de acordo com as coordenadas de um polígono previamente definido, e assim sucessivamente até chegar no último nível (Figura 1). Em cada bloco são estabelecidas estações de junção, que permitem vincular os diferentes blocos e estações chamadas de internas. Uma vez calculadas as estações de junção numa solução direta (método de Cholesky), as internas são determinadas na retrosolução.

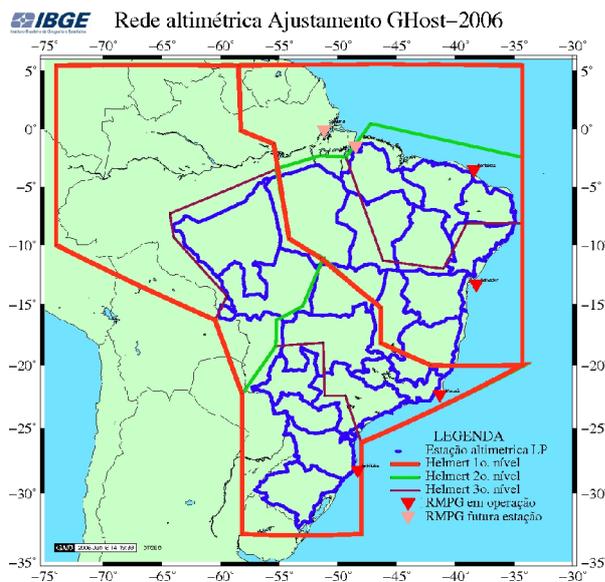


Figura 1

Este software já foi usado para o ajustamento de grandes redes geodésicas tridimensionais como a rede norte-americana NAD83 e a rede geodésica brasileira (IBGE, 2005b), até redes unidimensionais (Subiza e Sousa, 2001). O processo completo é mostrado no diagrama do Anexo I e a divisão dos macro-circuitos em blocos no Anexo II.

As estatísticas do arquivo de entrada são:

Estações participantes	36584
Estações fixas	1
Diferenças de nivelamento	36935
Graus de liberdade do ajuste	352

A estação fixa foi a 4X, vinculada ao marégrafo de Imituba.

2. Resultados

O fator de variância calculada no ajustamento foi de 1,092, 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 $\alpha=95\%$. O valor obtido foi comparado com aqueles fornecidos pela tabela da distribuição, sendo os resultados:

$285,80 < 384,25 < 403,65$ para $S=352$. 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 apresentada na figura 2 e o desvio padrão ajustado na figura 3.

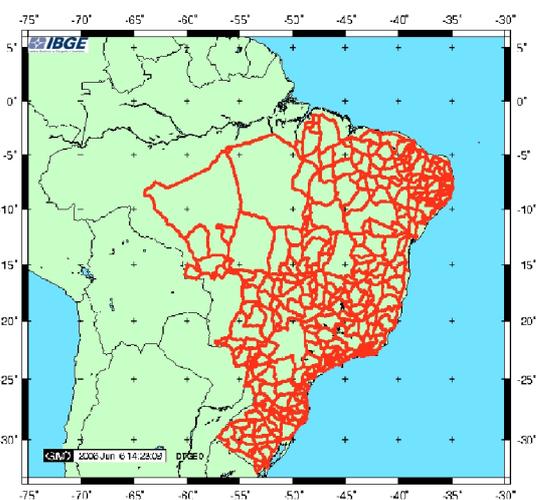


Figura 2-RAAP-Brazil

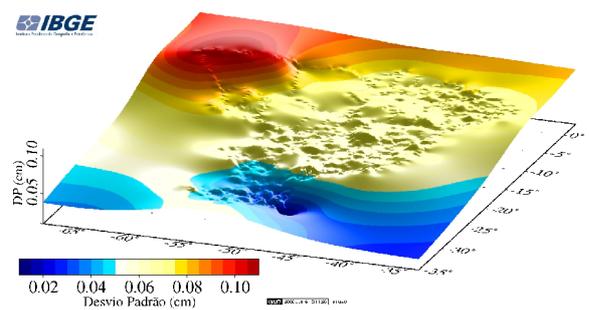


Figura 3-Desvio Padrão das estações

Na seqüência, apresentam-se duas tabelas com dados estatísticos que mostram a qualidade do ajustamento. A 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).

Estatísticas do DP (cm)	2006
Número de estações	36584
Mínimo	0,282
Máximo	10,900
Rango	10,618
Média	6,063
Desvio Padrão média	1,27

Tabela 1 –Desvios padrão da altitude ajustada

Estatísticas residuais (mm)	2006
Número de desníveis	36935
Mínimo	-5,860
Máximo	6,960
Rango	12,820
Médio	0,014

Tabela 2 – Desvios padrão dos resíduos

No Gráfico 1 mostram-se os dados das Tabelas anteriormente apresentadas.

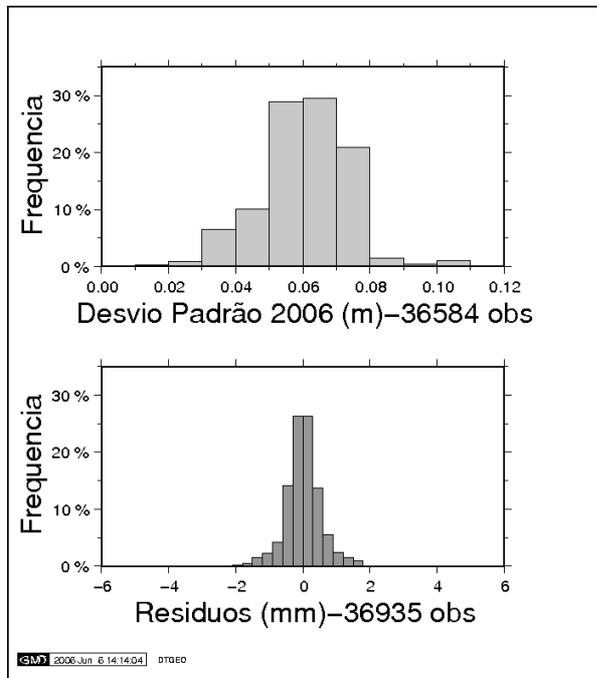


Gráfico 1

2.4 Comparações das altitudes

Foi feita uma comparação geral das altitudes geradas com os resultados obtidos do ajustamento AAGP. As diferenças encontradas foram de -15 cm até +20 cm. Essas diferenças são devidas principalmente, ao ajustamento simultâneo com injeção mínima que foi usado, assim como a introdução de novas observações nas linhas internas.

3 CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS

Pela primeira vez realizou-se um ajuste simultâneo da rede vertical de alta precisão brasileira, integrando todas as observações disponíveis, ao nível de linhas principais e internas dos macrocircuitos

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

Os resultados gerais concordam com os desvios padrão estimados de $2,5\text{mm}\sqrt{\text{Km}}$ nos desníveis ajustados, desvios padrão máximos de 11 cm nas altitudes obtidas e inferior a 1cm nos desníveis relativos entre duas estações..

O projeto dará continuidade a introdução do resto das estações observadas, aproximadamente 30.000.

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

Este trabalho contribui para o cálculo dos números geopotenciais e das altitudes científicas, num futuro próximo.

4 AGRADECIMENTOS

O CNPq possibilitou através de um Auxílio de Curta Duração AVG, a apresentação deste trabalho no presente simpósio. O projeto foi executado e apresentado na sua totalidade com software de fonte livre (Ghost, GMT, Gimp, Dia, OpenOffice 2.0).

5 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 em: http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/Rede_altimetrica, 06/06/2006.

IBGE 2005b. Relatório do Ajustamento da Rede Planimétrica do IBGE, em: http://www.ibge.gov.br/geociencias/geodesia/REL_sad69.pdf, 06/06/2006.

Gemael, C. 1994. Introdução ao ajustamento de observações, Editora UFPr, Curitiba – PR, Brasil, 319 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, Technical 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 - Sociedade Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro Vol.19, N. 3, p. 325-328.

