

Comissão Técnica: Geodésia, Astronomia, Topografia e Agrimensura
**SITUAÇÃO ATUAL DO AJUSTAMENTO DA REDE ALTIMÉTRICA DE
ALTA PRECISÃO – RAAP DO SGB, UTILIZANDO O SISTEMA GHOST**

Eng.º Renato Rodrigues Pinheiro¹
Eng.º Daniel Goldani¹
Eng.ª Claudia Cristina Cunha Santos¹
Eng.ª Nívia Régis Di Maio Pereira¹
Eng.º Walter Humberto Subiza Pina²

Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE

Diretoria de Geociências – DGC
Coordenação de Geodésia – CGED¹
Coordenação de Cartografia – CCAR²

Av. Brasil, 15.671, Bloco III-A, Parada de Lucas, Rio de Janeiro – RJ. CEP: 21.241-051
e-mail: {renato.rodrigues, daniel.goldani, claudia.santos, nivia.maio, walter.pina}@ibge.gov.br

RESUMO

O último ajustamento global da Rede Altimétrica de Alta Precisão – RAAP do Sistema Geodésico Brasileiro - SGB, ocorreu no início da década de 90. Passados mais de 15 anos, novas observações foram inseridas na rede, provenientes de nivelamentos geométricos espalhados no território nacional. Por esse motivo, já se justificaria um novo ajustamento das observações. Outro fato importante é que esse último ajustamento não aconteceu de forma simultânea, ou seja, com todas as estações da rede, o que impossibilitou a disponibilidade do desvio-padrão das altitudes das mesmas. Entre 1945 e 1975, foram realizados oito ajustamentos parciais da RAAP. 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 macrocircuitos, com a finalidade de evitar distorções excessivas. Essa divisão resultou no Ajustamento Altimétrico Global Preliminar – AAGP.

No ano de 2005, o Projeto de Densificação Altimétrica - DALTI do SGB, iniciou um novo ajustamento da RAAP, desta vez simultâneo, englobando todas as estações da rede ao mesmo tempo. Para tanto, está sendo utilizado o sistema *GHOST – Geodetic adjustment using Helmert blocking Of Space and Terrestrial Date*. A primeira etapa deste novo ajustamento abrangeu apenas as estações pertencentes às linhas principais dos 20 macrocircuitos que formam a RAAP, as quais serviram de partida para a segunda etapa realizada em junho de 2006, contendo, também, as linhas internas dos mesmos, totalizando mais de 36.000 referências de nível - RRNN ajustadas.

Atualmente, encontra-se em execução a terceira etapa do ajustamento, com a inclusão de todas as RRNN medidas e não calculadas, antes e depois do AAGP, e as RRNN que fazem parte de “ramais” das linhas de nivelamento. Ao final deste ajustamento, serão disponibilizadas aproximadamente 60.000 estações com altitudes ajustadas e o seu respectivo desvio-padrão. É importante ressaltar que tanto a introdução de novas observações, como a metodologia usada ocasionarão mudanças nas altitudes das antigas estações, as quais se pretende avaliar de forma global e regional.

Este trabalho tem como objetivo apresentar a situação atual do ajustamento da RAAP em GHOST, bem como uma comparação com as altitudes do AAGP.

PALAVRAS CHAVES: GHOST, Ajustamento, Simultâneo, Rede Altimétrica, SGB

ABSTRACT

The last global adjustment of the High Precision Vertical Network – HPVN of Brazilian Geodetic System – SGB was carried out in the beginning of the 1990s. More than 15 years after that, new observations were included in the network, coming from spirit levelings spread all over the Brazilian national territory. This reason justifies a new adjustment of the leveling observations. Another important fact to be mentioned, is that this last adjustment mentioned was a non simultaneous one, so it did not involve all the network stations. For this reason, it was impossible to provide their individual standard deviation of heights. From 1945 to 1975, eight partial adjustments of the HPVN were done. After the fourth adjustment, the network was split into blocks, using the heights calculated in the previous blocks, which means that the network was not readjusted in a global level. In 1991, another network division was done, this time in the form of big loopings, in order to avoid excessive distortions. This last division resulted in the Preliminary Global Vertical Adjustment - PGVA.

In 2005, the Project of Vertical Network Densification – DALTI of the SGB, started a new adjustment of the HPVN, this time in a simultaneous way, involving all stations of the network at the same time. To achieve this goal, *GHOST – Geodetic Adjustment using Helmet blocking Of Space and Terrestrial Data* is being used. The first stage of this new adjustment included not only the stations belonging to the main lines of the 20 loopings that form RAAP. The main lines were the starting point for the second step, which was concluded in June 2006 and contained the macro-circuits' internal lines as well, more than 36000 bench marks were adjusted.

Presently, the third stage of the adjustment is in progress. It includes all bench marks measured but not calculated, before and after AAGP, and the bench marks that are part of the branches of levelling lines. Once this adjustment is finished, nearly 60000 stations will have adjusted heights and their respective standard deviation.

It is important to point out that due to the inclusion of new observations and to the methodology that was used, there will be changes in the heights of old stations, which will be evaluated globally and regionally.

The purpose of this work is to present the actual status of the HPVN adjustment in GHOST and also to compare its heights with the ones of PGVA.

KEY-WORDS: GHOST, Adjustment, Simultaneous, Vertical Network, SGB

1 INTRODUÇÃO

Desde o início da década de 90 que a Rede Altimétrica de Alta Precisão – RAAP do Sistema Geodésico Brasileiro – SGB não passa por um processo de ajustamento global. Mais de 10 anos se passaram e novos levantamentos foram realizados introduzindo novas observações à Rede justificando o reajustamento da mesma. Este último ajustamento global denominado Ajustamento Altimétrico Global Preliminar – AAGP, em virtude da limitação dos programas de cálculo, foi realizado de forma a particionar a RAAP em vários macrocircuitos com as respectivas linhas internas e ajustamentos independentes. Por esse motivo, também, desde 2005 o Projeto Densificação Altimétrica – DALTI do SGB, vem trabalhando no reajustamento da RAAP, mas desta vez de forma simultânea, com todas as informações processadas ao mesmo tempo num único arquivo. Para tanto, está sendo utilizado o software canadense denominado GHOST (*Geodetic adjustment using Helmet blocking Of Space and Terrestrial data*).

Em outubro de 1945, iniciaram os levantamentos por Nivelamento Geométrico de Alta Precisão do IBGE, realizados pela Seção de Nivelamento – SNI da Divisão de Cartografia – DC,

culminando no surgimento da RAAP do SGB, onde no município de Urussanga, Santa Catarina, localiza-se a Referência de Nível RN 1 A.

Em dezembro de 1946, a rede altimétrica foi conectada com a Estação Maregráfica de Torres no Rio Grande do Sul, permitindo, então, o cálculo das altitudes das RRNN já implantadas, dotando o Brasil de uma estrutura altimétrica fundamental destinada ao apoio de mapeamento e suporte às grandes obras de engenharia, como: construções de barragens, pontes, viadutos, rodovias, projetos de saneamento básico, etc.

Em 1958, quando a Rede Altimétrica contava com aproximadamente 30.000 km de linhas de nivelamento, houve a substituição do *Datum* Torres pelo *Datum* de Imbituba, definido pela Estação Maregráfica, no município de mesmo nome, em Santa Catarina. Tal substituição implicou na melhora considerável da Rede Altimétrica, pois o marégrafo de Imbituba contava com 9 anos de observações de variação do nível do mar, enquanto Torres contava apenas com um ano de observação (IBGE, 2005a).

Outro fato marcante foi o início da Operação da Estação Maregráfica de Copacabana em 1993, como uma estação experimental para fins geodésicos, esse experimento deu subsídios para o surgimento da

Rede Maregráfica Permanente para Geodésia – RMPG, que atualmente conta com 4 estações em operação (Imbituba – SC, Macaé – RJ, Salvador – BA e Santana – AP), com a possibilidade recente da instalação de pelo menos mais uma estação em Fortaleza - CE.

Com relação aos ajustamentos da RAAP, entre 1945 e 1975 foram realizados 8 ajustamentos (1948, 1952, 1959, 1962, 1963, 1966, 1970, e 1975), sendo apenas os 3 primeiros utilizando todas as estações da rede. A partir do 4º ajustamento, devido a grande quantidade de dados, a rede foi dividida em blocos nos quais algumas estações fixas foram calculadas nos blocos anteriores, ou seja, a rede não foi ajustada simultaneamente. 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, o qual usou 38 estações de conexão com altitude fixa, incluindo a estação 4X, conectada ao mareógrafo de Imbituba.

Desde 2005, o Projeto de Densificação Altimétrica - DALTI do Sistema Geodésico Brasileiro – SGB, vem trabalhando o Reajustamento da RAAP utilizando o Sistema **GHOST** (*Geodetic adjustment using Helmert blocking Of Space and Terrestrial Data*) que permite o ajustamento simultâneo de grandes redes geodésicas. Em 2005, foram ajustadas as Linhas Principais dos 20 macrocircuitos da RAAP, totalizando aproximadamente 14600 estações. Em 2006, foram ajustadas as Linhas Internas para cada macrocircuito, totalizando entorno de 36000 estações. E, até o mês de julho de 2007, já foram ajustadas mais de 41.000 estações, com o término previsto para o final do corrente ano.

Este trabalho visa apresentar os resultados deste ajustamento até o momento e as ações futuras.

2 AJUSTAMENTO DA RAAP.

2.1 Metodologia

Para este ajustamento utilizou-se o software **GHOST** (*Geodetic adjustment using Helmert blocking Of Space and Terrestrial Data*), que consiste numa série de programas na linguagem FORTRAN, construídos na década de 80 pelo *Geodetic Survey Division of* Canadá, com a finalidade de realizar ajustamento paramétrico pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) (Gemael, 1994), que tem o modelo matemático 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 Sistema de Posicionamento Global (GPS).

Para o ajustamento de dados altimétricos, é necessário a construção de um arquivo com basicamente dois registros, um composto de coordenadas iniciais (latitude, longitude e altitude) para cada estação 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 de leitura dos dados, em seguida prepara uma minimização da matriz de equações normais, faz o cálculo do ajuste, lista os resíduos e gera os resultados obtidos para análise, com as coordenadas ajustadas e os respectivos 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 o erro relativo entre duas estações quaisquer da rede.

2.2 Preparação dos dados

Cada linha de nivelamento foi submetida aos programas: CRITICOOR (CRÍTICA de COORdenadas), AVALIANIV (AVALIAÇÃO de dados de NIVelamento), que realiza a crítica dos dados de nivelamento observados e o NIV2GHOST (Conversão de dados de nivelamento e coordenadas para o formato de entrada no Software GHOST), com arquivo de saída para o ajustamento e arquivo contendo os desníveis sem correção ortométrica (Desnível Bruto) para posterior cálculo do Número Geopotencial.

A variância do peso a priori foi de 2,5 mm \sqrt{k} para o desvio padrão individual dos valores observados para as linhas principais e linhas internas dos macrocircuitos e, em algumas seções esse peso a priori foi fixado em 4 e 8 mm respectivamente. 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):

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

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

$C_2 = -0,0000059$.

O software GHOST possibilita o ajustamento de redes geodésicas através de duas diferentes aproximações; uma padrão, para redes de porte médio e menores, onde não é necessária 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 estações internas são determinadas na retrosolução.

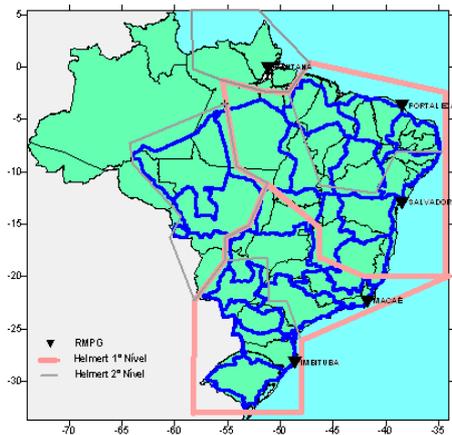


Figura 01: Ajustamento dos Macrocircuitos da RAAP em 2006 com a divisão de blocos de Helmert.

O software GHOST foi utilizado no Ajustamento de grandes redes geodésicas tridimensionais como foi o caso do NAD83 e a rede geodésica brasileira (IBGE, 2005b). Redes unidimensionais também foram ajustadas no GHOST (Subiza e Souza, 2001). No Anexo I, está o diagrama de operações desse ajustamento e no Anexo II a divisão dos macrocircuitos e linhas internas em blocos de Helmert.

Até o momento a estatística da RAAP é a seguinte:

Estações Fixas:	1
Total de Estações:	41.149
Desníveis:	41.922
Graus de liberdade:	807

A estação fixa no ajustamento é a RN 4X, vinculada ao marégrafo de Imbituba – SC.

2.2 Resultados

O fator de variância a posteriori, calculado para o ajustamento foi de 1,407, indicando que a variância do peso a priori foi apropriada. Fazendo-se a análise da variância através da distribuição χ^2 , o valor encontrando para $\alpha=95\%$ não passa no teste de hipótese básico, isso ocorre pela existência de alguns resíduos não terem sido pesados corretamente. Esses resíduos continuam em análise no projeto de ajustamento.

Na Figura 02, observa-se a distribuição das estações ajustadas até julho de 2007 e na Figura 03 é apresentada a superfície do desvio-padrão da altitude ajustada.

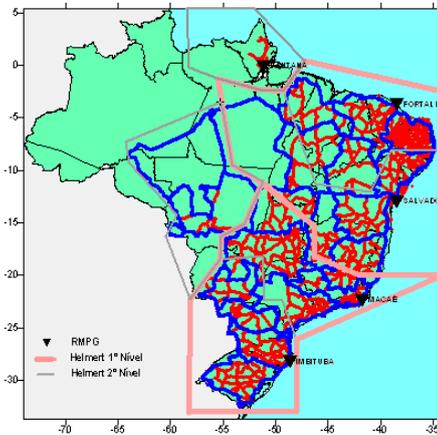


Figura 02: Distribuição espacial das Estações Ajustadas até o julho de 2007.

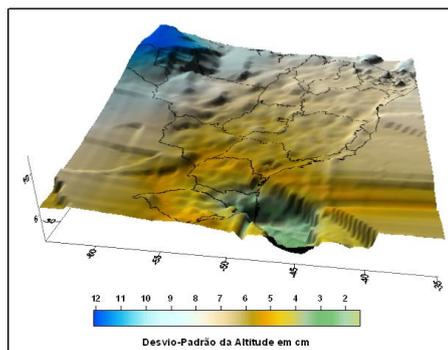


Figura 03: Superfície do desvio-padrão da altitude ajustada das estações.

A seguir, são exibidas duas tabelas que indicam as estatísticas do desvio-padrão das altitudes ajustadas e os resíduos dos desníveis ajustados.

TABELA1: ESTATÍSTICA DO DESVIO-PADRÃO

Estatística do Desvio-Padrão da Altitude em 2007	cm
Mínimo	0
Máximo	12,1
Média	6,5
Intervalo	12,1
Desvio-Padrão da Média	0,8

TABELA2: ESTATÍSTICA DO RESÍDUO

Estatística do Resíduo em 2007	mm
Mínimo	0,297
Máximo	12,985
Média	5,056
Intervalo	11,788
Desvio-Padrão da Média	0,307

3 CONCLUSÕES E AÇÕES FUTURAS

Desde 2005 que o IBGE vem realizando o ajustamento simultâneo da RAAP, integrando todas as observações disponíveis ao nível de linhas principais e internas dos macrocircuitos. A falta de observações gravimétricas, 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 em 2,5mm \sqrt{km} nos desníveis ajustados, com desvios padrão máximos de 12 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 25.000. A futura vinculação de estações maregráficas adicionais, permitirão exercer um controle maior na transmissão e detecção de erros na rede e, também, contribuir para o cálculo dos números geopotenciais e das altitudes científicas, num futuro próximo.

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 em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/altimetrica.shtm>, 31/07/2007.

IBGE 2005b. Relatório do Ajustamento da Rede Planimétrica do IBGE, em:

http://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/REL_sad_69.pdf, 31/07/2007.

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.

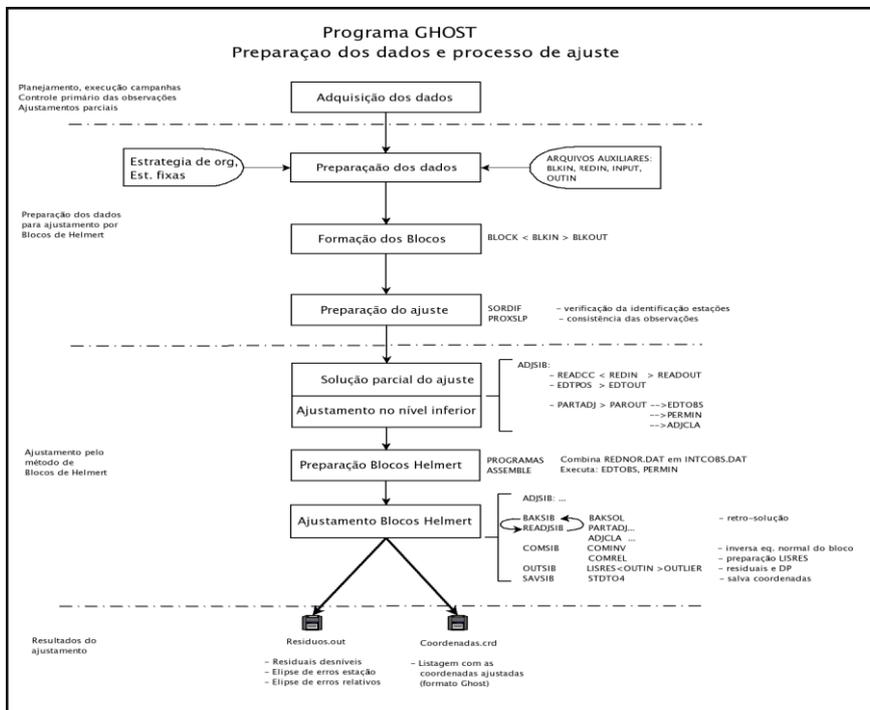
Steeves, R. 1983. Mathematical models for use in the readjustment of the North American geodetic networks, Technical Report 1, GSD, Canada, 33 páginas.

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.

Subiza Pinã, W. H., Pinheiro, R. R., Santos, C. C. C., Pereira, N. R. M. e Goldani, D.. Reajustamento Global da Rede Altimétrica de Alta Precisão do Brasil – RAAP. Apresentado na CONFEGE, Rio de Janeiro – RJ, 2006.

Formatado: Inglês (Estados Unidos)

Anexo I



Anexo II

