

GEÓIDE 2000 – UMA RESOLUÇÃO DE 10'

**Denizar Blitzkow
Maria Cristina B. Lobianco
Cláudia Lellis Callado Anciães**

Escola Politécnica da universidade de São Paulo
Caixa postal 61548
05424-970 São Paulo - SP - Brazil
E-mail: dblitzko@usp.br

IBGE/DEGED
Av. Brasil, 15671 – Parada de Lucas
Rio de Janeiro - Br

I Seminário sobre Referencial Geocêntrico no Brasil

**Outubro de 2000
Rio de Janeiro - Brasil**

ABSTRACT

Since the creation of the Sub-Commission for the Geoid in South America (SCGSA) in 1993, many efforts have been carried out in the different countries in order to improve the geoid computations. The validation of the gravity data in Brazil, Uruguay, Argentina and Chile has improved many of the gravity surveys in those countries. GPS observations carried out on benchmarks of the geometric levelling have been facilitated by the SIRGAS (Geocentric Reference System for South America) project and can contribute for testing the gravimetric determination of the geoid. Several countries made available GPS data for SCGSA like Brazil, Argentina, Venezuela and Chile. The Digital Terrain Model (DTM) has been improved considerably in Brazil and Argentina. A great number of topographic maps has been digitized to generate a DTM grid of 3' resolution (DTM3). New gravity surveys in the Amazonas region have been in progress along Rio Negro and its tributaries. Many different organizations in most of the countries in South America have been involved with local or national geoid computations. This fact has brought attention to the data in several countries facilitating the efforts for a continental geoid. All these activities are strongly supported by Geophysical Exploration Technology (GETECH) - University of Leeds. The objective envisaged at the moment is to produce a 10' resolution geoid for South America using FFT and to compare the result with that of the numerical integration of the modified Stokes integral.

1 - INTRODUÇÃO

O interesse pelo conhecimento das alturas geoidais tem aumentado nos últimos anos em função da nova tecnologia do sistema GPS que permitiu o posicionamento geodésico com maior rapidez e precisão. Diversos tipos de informações contribuem para o conhecimento das alturas geoidais: um modelo do geopotencial, levantamentos gravimétricos, um modelo digital do terreno, entre outras. Por outro lado, a obtenção de um modelo geoidal para o Brasil, por exemplo, exige a disponibilidade de informações, sobretudo gravimétricas, não só no território brasileiro, mas também em suas vizinhanças. Na maioria dos países sulamericanos ocorreu, nos últimos anos uma melhoria nas informações necessárias para o cálculo das alturas geoidais. Os dados gravimétricos experimentaram uma melhoria na qualidade devido a cuidadosos processos de validação e a uma melhor cobertura através de novos levantamentos. A Sub-Comissão da Gravidade e do Geóide da América do Sul (SCGGSA) tem contribuído para dinamizar este esforço contando, para isso, com o apoio da Associação Internacional de Geodésia através do Serviço Internacional do Geóide (IGeS). Com isso, algumas dezenas de milhares de novas estações gravimétricas têm sido coletadas na Argentina, no Brasil, no Chile, no Paraguai e no Uruguai. O Modelo Digital do Terreno (MDT) foi igualmente melhorado no Brasil e na Argentina com a digitalização de novos mapas topográficos. A disponibilidade de diferentes softwares foi possível através da Segunda Escola do Geóide organizada logo após a Assembléia Científica da Associação Internacional de Geodésia (IAG) em 1997 no Rio de Janeiro. O novo modelo de geopotencial, EGM96, uma importante iniciativa conjunta da NASA(GSFC)/NIMA (National Agency and Space Administration (Goddard Space Flight Center)/National Imagery and Mapping Agency) melhorou o conhecimento das componentes de longo e médio comprimentos de onda do geóide em todo o mundo e, em particular, na América do Sul. Todas as melhorias visam a determinação de um geóide com resolução de 10' no continente. Um grande ponto de partida no empreendimento de

um modelo geoidal para a América do Sul foi o projeto SAGP (South American Gravity Project) levado a efeito pela Universidade de Leeds – GETECH no final da década de 80.

2 - MELHORIA NOS DADOS

Com o término do SAGP em 1991, os esforços em termos do conhecimento do campo de gravidade foram concentrados na avaliação dos dados existentes assim como na melhoria de sua distribuição através de novos levantamentos. No Brasil, o Projeto Anglo-Brasileiro de Gravidade (PABG), um programa de cooperação entre a EPUSP (Escola Politécnica da Universidade de São Paulo), IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e o GETECH, resultou num aumento de 19 653 estações gravimétricas com levantamentos nas regiões norte, centro-oeste e nordeste do país. Entre eles, saliente-se as medições realizadas ao longo do Rio Negro e seus afluentes, assim como nos aeroportos das cidades e vilas em meio à Floresta Amazônica. Tendo em vista a inexistência de referências de nível com altitudes ortométricas nessa área, as mesmas foram derivadas a partir de observações GPS corrigindo a altura geoidal com o modelo EGM96 até grau e ordem 72, de acordo com a seguinte expressão:

$$H = h - N_{\text{EGM96}} \quad (1)$$

Por outro lado, no Brasil há um total de 403 tercetos de coordenadas geodésicas sobre referências de nível de nivelamento geométrico, a maioria delas estabelecida pelo IBGE. Muitas dessas estações foram derivadas a partir do antigo sistema Doppler processado com efemérides precisas. Nos últimos anos, também foram estabelecidas coordenadas GPS. As coordenadas das estações Doppler foram transformada para WGS-84 (World Geodetic System-1984) utilizando-se os seguintes parâmetros: [BOUCHER and ALTAMINI, 1985]

$$TZ = 4,5 \text{ m} \quad (2a)$$

$$\alpha_3 = -0,814'' \quad (2b)$$

$$K = -0,6 \text{ PPM} \quad (2c)$$

Diversas organizações no Brasil estão contribuindo com dados gravimétricos para o geóide como, por exemplo: ON, CPRM, IAG/USP e várias universidades.

No Chile, há, também, duas organizações envolvidas com os dados de interesse para o geóide: IGM (Instituto Geografico Militar) e a Universidade do Chile. A universidade executou muitos levantamentos gravimétricos no sul do país nos últimos anos. Entretanto, os dados ainda não encontram-se disponíveis. O IGM envolveu-se com determinações GPS sobre o nivelamento geométrico e está trabalhando no MDT, que é muito deficiente nos Andes Chilenos. Foram utilizadas nesse trabalho 11 estações GPS sobre o nivelamento geométrico, além dos dados gravimétricos.

3. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

O cálculo foi efetuado utilizando-se a integral modificada de Stokes de acordo com as seguintes fórmulas:

$$\delta N_l(\theta, \lambda) = \frac{R}{4\pi\gamma} \int_{\psi=0}^{\psi_0} \int_{\alpha=0}^{360} \Delta g(\alpha, \psi) \delta S_l^m(\psi) \sin \psi d\psi d\alpha \quad (4)$$

sendo δS_l^m a função modificada de Stokes [VANICEK et al., 1987] [BLITZKOW et al., 1991]. Sem derivação, as fórmulas para o cálculo da mesma são:

$$\delta S_l^m(\psi) = \delta S_l(\psi) - \overline{\delta S_l(\psi)} \quad (5)$$

com

$$\delta S_l(\psi) = S(\psi) - S_l(\psi) \quad (6)$$

$$S_l(\psi) = \sum_{n=2}^l \frac{2n+1}{n-1} P_n(\psi) \quad (7)$$

$$\overline{\delta S_l(\psi)} = \sum_{i=0}^l \frac{2i+1}{2} t_i P_i(\cos \psi) \quad (8)$$

A anomalia de gravidade presente em (4), para este trabalho, foi a anomalia de Helmert [MARTINEC et al., 1993], com as componentes de longo comprimento de onda removidas utilizando-se o modelo de geopotencial EGM96 até grau e ordem 50. Como uma consequência, foi adotado um limite de integração de 4,0°.

A técnica de Fourier conhecida pela sigla FFT (Fast Fourier Transform) foi extensamente empregada até agora devido à suas bem conhecidas vantagens computacionais. Se uma calota esférica (ψ_0) for utilizada como limite de integração, a superfície esférica pode ser aproximada por um plano tangente no ponto de cálculo. Utilizando a distância plana no lugar da distância esférica ψ , $\psi = s/R$, R o raio da Terra, a função de Stokes, numa aproximação plana, se escreve: [Schwarz et al., 1990]

$$S(s) = \frac{2R}{s} \quad (9)$$

e o elemento de área $d\sigma = \sin \psi d\psi d\alpha$ torna-se:

$$d\sigma = \frac{1}{R^2} s ds d\alpha \quad (10)$$

Assim, a integral de Stokes toma a seguinte forma:

$$N(x_p, y_p) = \frac{1}{2\pi\gamma} \int_{s=0}^{s_{max}} \int_{\alpha=0}^{2\pi} \frac{\Delta g(s, \alpha)}{s} s ds d\alpha \quad (11)$$

ou, se coordenadas cartesianas forem utilizadas com a origem no ponto de cálculo:

$$N(x_p, y_p) = \frac{1}{2\pi\gamma_E} \iint \Delta g(x, y) \frac{1}{[x_p - x]^2 + [y_p - y]^2} dx dy \quad (12)$$

Esta última expressão tem a forma de uma integral de convolução e, como tal, pode ser expressa do seguinte modo:

$$N(x, y) = \frac{1}{2\pi\gamma} \Delta g(x, y) * d_N(x, y) \quad (13)$$

com $d_N = (x^2 + y^2)^{-1/2}$ sendo a função peso (kernel). Utilizando o espectro das duas funções, a altura geoidal toma a forma:

$$N(x, y) = \frac{1}{2\pi\gamma} F^{-1}[\Delta G(u, v) \cdot D_N(u, v)] \quad (14)$$

Como consequência da aproximação plana, uma correção pode ser adicionada de modo a considerar a curvatura da Terra [SCHWARZ et al., 1990]:

$$C_N = \frac{\psi}{2} \cos ec \frac{\psi}{2} \quad (15)$$

C_N é o fator a ser multiplicado pela altura geoidal. Para a distância de $4,0^\circ$, a correção pode ser negligenciada.

No lugar da aproximação plana, pode ser utilizada a aproximação esférica (4) na integral de Stokes. A integral pode ser desenvolvida em duas (2D FFT) ou uma (1D FFT) dimensões [STRANG VAN HEES, 1990].

A opção de 1D FFT tem como vantagem o fato do kernel poder ser definido exatamente sem qualquer aproximação [HAAGMANS et al., 1993].

4 - RESULTADOS

Um arquivo tem sido mantido desde 1993 com valores médios para blocos de $5' \times 5'$. O arquivo inclui valores médios para anomalias ar livre e Bouguer, altitude média (profundidade no caso de água) e correção de terreno média. O arquivo estende-se de 25° N a 60° S em latitude e 100° W a 25° W em longitude. No caso de não haver dados disponíveis, o respectivo campo possui 999. Na parte marítima, o arquivo contém apenas a anomalia ar livre derivada do modelo SEASAT Sandwell. O arquivo tem sido atualizado com novos dados disponíveis na América do Sul.

Como a resolução de $5'$ no continente não é confiável devido a muitos blocos sem informação, um novo arquivo foi gerado com valores médios de $10'$, derivado do arquivo de $5'$.

Diversas experiências têm sido realizadas. Dois modelos geoidais foram calculados: o primeiro utilizando FFT em um grid de 10' (Fig. 1). O segundo utilizando integração numérica em um grid de 20' (Fig. 2), mas ainda a partir de anomalias médias de 10'. A razão para a diminuição do intervalo dos pontos de cálculo no caso de integração numérica é a óbvia natureza de demora no cálculo do método, comparado à FFT.

As 486 estações DOP/GPS têm sido utilizadas para fazer algumas comparações e estimativa de erro (diferença). As alturas geoidais DOP/GPS têm sido comparadas com o modelo de geopotencial EGM96. Quatro diferentes estratégias foram selecionadas: grau e ordem 50 e 360, referência à WGS-84 e ITRF-90. Os termos de ordem zero (valores médios de referência) e as diferenças de RMS são apresentadas na Tabela 1. As figuras 3 e 4 apresentam histogramas das diferenças para a ordem 360, referindo os DOP/GPS a WGS-84 e ITRF-90, respectivamente. Finalmente, uma comparação foi feita com as alturas geoidais derivadas da gravidade (grav-geóide), calculadas nas mesmas estações DOP/GPS utilizando valores médios de anomalias de gravidade de 10'. Duas comparações diferentes foram feitas: com as alturas geoidais DOP/GPS e com o EGM96 completo até grau e ordem 360 (Tabela 2). Os histogramas das diferenças são mostrados nas figuras 5 e 6.

Modelo	Grau/ordem	N _o (m)	Diferença RMS (m)
EGM96 (WGS-84)	180	-0.89	1.47
EGM96 (ITRF90)	360	-0.82	1.38
Grav geóide		-1.08	1.76
Grav geóide (SAM)		0.01	1.27

Tabela 1 – Comparação entre GPS (conexões) e EGM96.

Modelo	N _o (m)	Diferença RMS (m)	Número de pontos
Δg (10') (WGS-84)	-0.18	1.64	486
Δg (10')x EGM96	0.00	1.09	486

Tabela 2 – Comparação entre Grav-geóide, DOP/GPS e EGM96.

Foi estimado um erro (diferença) relativa a partir de 8 pares de estações DOP/GPS. A comparação entre a altura geoidal DOP/GPS e o geóide gravimétrico fornece um erro relativo de 2 cm/km (20 PPM). A distância entre os pares variam de 6 km até um máximo de 553 km.

5 – CONCLUSÕES

As diferenças RMS na Tabela 1 mostram que a concordância do EGM96 com as alturas geoidais DOP/GPS é melhor quando a referência é o WGS-84 que com o ITRF-90.

Também, como esperado, o grau e ordem 360 é um pouco melhor que 50. Observando a Tabela 2, o DOP/GPS, em comparação com o grav-geóide, mostra uma diferença RMS (1.64 m) maior que a mesma comparação com o EGM96 (n=360) (1.50 m) na Tabela 1. Pelo menos duas razões podem ser apontadas para este resultado inesperado. Primeiramente, o fato que a integral foi interrompida em uma distância de $3,6^\circ$ pode ser a razão para a perda de componentes de médio comprimento de onda dos dados gravimétricos, que são, entretanto, apresentadas no modelo. may be a reason for losing medium wavelength components from the gravity data, which are however present in the model. Segundo, muitas estações Doppler na Região Amazônica, com altitudes com prováveis problemas, podem ter uma melhor concordância com o EGM96, com uma informação gravimétrica confiável, que com as atuais melhorias de gravidade na área. Análises e cálculos posteriores são necessários para uma conclusão final. A comparação com um grav-geóide e EGM96 mostram um RMS menor (1.09 m) entre as comparações mostradas. Em particular, não é apresentado um termo de ordem zero.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente ao Prof. J. Derek Fairhead do GETECH por seu apoio nas atividades relacionadas à gravidade e ao geóide na América do Sul. Agradeço, também, o apoio da FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) por financiar parcialmente esses esforços. Muitas organizações em diversos países da América do Sul têm cooperado com os esforços para o geóide na SCGGSA. Finalmente, o IBGE é a instituição brasileira de fundamental importância nos esforços para a determinação do geóide e a cooperação do Departamento de Geodésia é imensamente apreciada.

REFERÊNCIAS

- BLITZKOW D. (1995). O Problema de Valor de Contorno da Geodésia - Resultados práticos para a América do Sul. Tese de Livre Docência apresentada à Escola Politécnica da USP, Dept. de Engenharia de Transportes. São Paulo.
- BOUCHER C. and ALTAMINI Z. (1985). Towards an improved realization of the BIH Terrestrial Frame. Proceedings of the International Conference on Earth Rotation and the Terrestrial Reference Frame. Columbus.
- FONSECA E. S. Jr. (1996). Estudo e Avaliação Metodológica da Rede GPS do Estado de São Paulo. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo.
- HAAGMANS R. E., DE MIN E. & VAN GELDEREN M. (1993). Fast evaluation of convolution integral on the sphere using 1D FFT, and a comparison with existing methods for Stokes integral. Manuscripta Geodaetica, vol. 18, pp. 227-241.
- MARTINEC Z., MATYSKA C., GRAFAREND E. W. AND VANICEK P. (1993). OnHelmert's 2nd. Condensation method. Manuscripta Geodaetica, vol 18, n° 6, pp. 417-421.
- McCARTHY D. D. (1992). IERS Standards. Technical Notes 13. Paris.

- STRANG VAN HEES G. (1990) Stokes's formula using fast Fourier techniques. *Manuscripta Geodaetica*, vol. 15, pp. 235-239.
- VANICEK P., KLEUSBERG A., CHANG R. G., FASHIR H., CHRISTOU N., HOFMAN M., KLING T., ARSENAULT T. (1987). *The Canadian Geoid*. Technical Report n° 129, Dept. of Surveying Engineering - UNB. Fredericton.
- SCHWARZ K. P., SIDERIS M. G. & FORSBERG R. (1990). The use of FFT technique in physical geodesy. *Geophys. J. Int.*, 100, pp. 485-514.

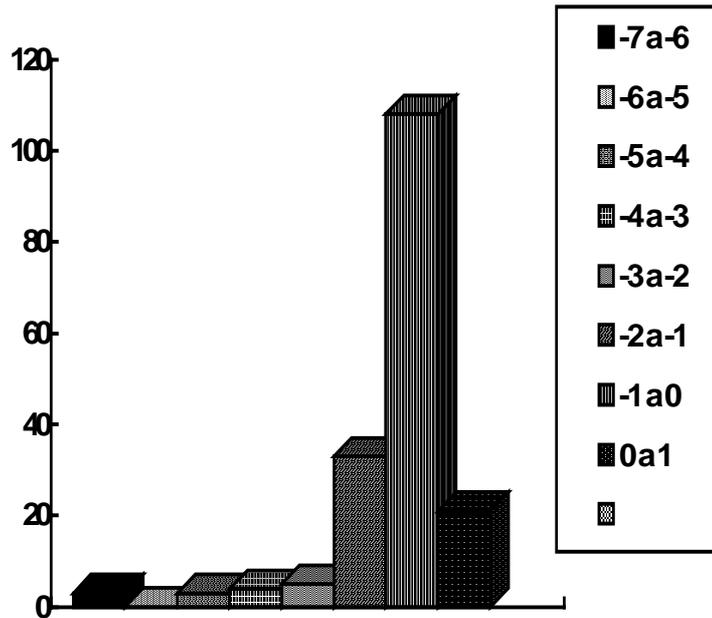


Fig. 3 - Histogram of the differences between EGM96 (n=360) and GPS points (WGS84).

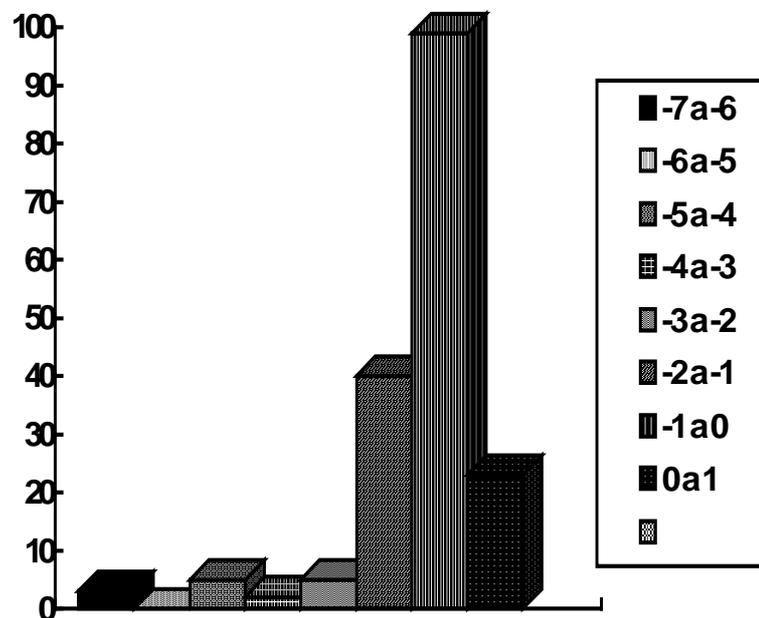


Fig. 4 – Histograma das diferenças entre o EGM96 (n=180) e as estações GPS.

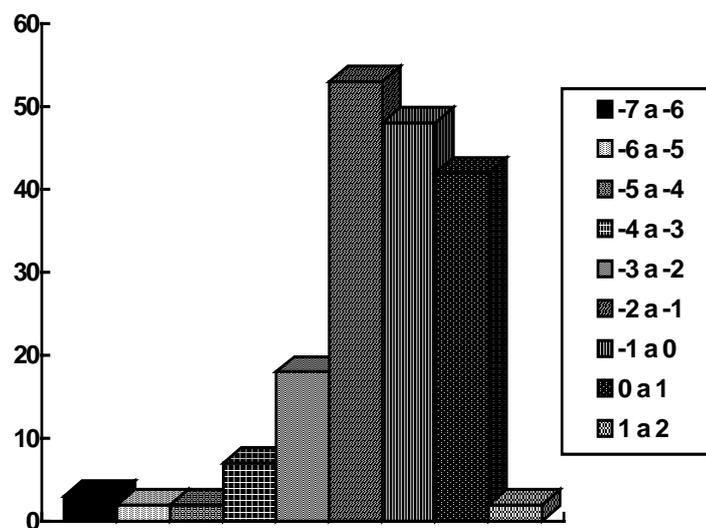


Fig. 5 – Histograma das diferenças entre o grav-geóide e os pontos GPS (WGS-84).

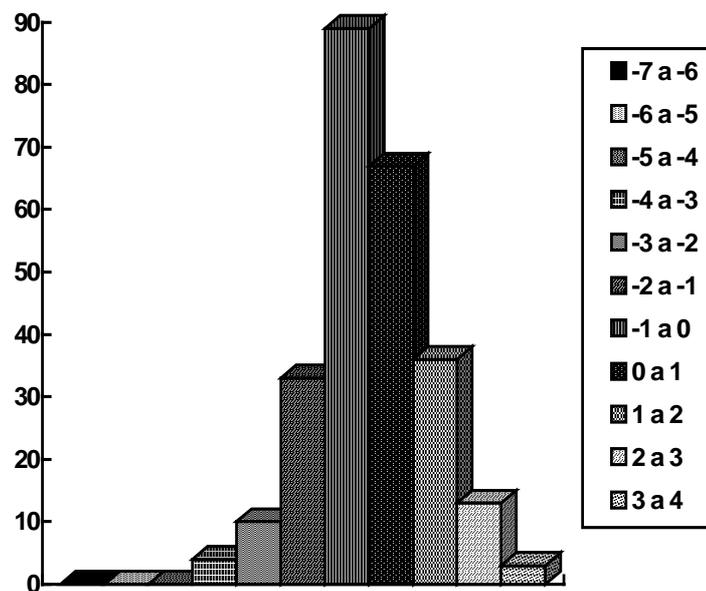


Fig. 6 – Histograma das diferenças entre o grav-geóide e os pontos GPS (SAM).