

**O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística,** Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia,

Em parceria com

**A Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, Departamento de Engenharia de Transportes, Laboratório de Topografia e Geodésia,

Apresentam:

# O novo modelo de ondulação geoidal do Brasil MAPGEO2015

Rio de Janeiro, 30 de Novembro 2015.



Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística Diretoria de Geociências – DGC Coordenação de Geodésia – CGED

## Sumário

Ι.	Introdução	3
II.	Cálculo do Modelo	5
III.	Validação do Modelo	9
IV.	Conclusão	
V.	Referências Bibliográficas	14

## Lista de Figuras

Figura 1: Relação entre altitude elipsoidal (h), altitude ortométrica (H) e altura geoidal (N)	۱ 3
Figura 2: Novo modelo de ondulação geoidal do Brasil	4
Figura 3: Distribuição dos novos dados gravimétricos terrestres	6
Figura 4: Regiões onde foi utilizada a metodologia RNA	8
Figura 5: Mapa das diferenças entre GNSS/RN e o MAPGEO2015	.10
Figura 6: Mapa das diferenças entre o MAPGEO2015 e o MAPGEO2010	.11
Figura 7: Histograma representativo das diferenças entre o MAPGEO2015 e	0
MAPGEO2010	. 12

## Lista de Tabelas

Tabela	1: Análise	estatística en	tre os modelos	s de ondulação	geoidal	9
Tabela	2: Valores	estatísticos p	or região	-	-	12



#### I. Introdução

Em função de sua rapidez e precisão na obtenção de coordenadas, os Sistemas Globais de Navegação por Satélite – GNSS (na sigla em inglês) revolucionaram as atividades que necessitam de posicionamento. Entretanto, a altitude determinada utilizando um receptor GNSS não está relacionada ao nível médio do mar (ou, de forma mais rigorosa, ao geoide), mas a um elipsoide de referência com dimensões específicas. Portanto, torna-se necessário conhecer a diferença entre as superfícies do geoide e do elipsoide, isto é, a altura (ou ondulação) geoidal, para que se possa obter a altitude acima do nível médio do mar (denominada ortométrica). Desta forma, existe um grande interesse por um modelo de ondulação geoidal brasileiro cada vez mais preciso para aplicações nas áreas de mapeamento e engenharia.

Para converter a altitude elipsoidal (h), obtida através de receptores GNSS, em altitude ortométrica (H), é necessário utilizar o valor da altura geoidal (N) fornecida por um modelo de ondulação geoidal, utilizando a expressão mostrada na Figura 1:



Figura 1: Relação entre altitude elipsoidal (h), altitude ortométrica (H) e altura geoidal (N)



O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, através da Coordenação de Geodésia – CGED, e a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP vêm trabalhando em conjunto nas últimas décadas visando determinar modelos geoidais para o Brasil, atualmente denominados MAPGEO, cada vez mais precisos. Com o sistema de interpolação, disponibilizado juntamente com o modelo de ondulação geoidal, os usuários podem obter a altura geoidal em um ponto ou conjunto de pontos do território nacional a partir das suas coordenadas planimétricas.

Esse documento apresenta e analisa o novo modelo de ondulação geoidal do Brasil denominado MAPGEO2015, abrangendo a área compreendida pelas latitudes de 6°N e 35°S e pelas longitudes de 75°W e 30°W referenciadas ao SIRGAS2000 (Figura 2).





Figura 2: Novo modelo de ondulação geoidal do Brasil

#### II. Cálculo do Modelo

A obtenção de um modelo geoidal para o Brasil exige a disponibilidade de informações, sobretudo gravimétricas, não só no território brasileiro, mas também em sua vizinhança. Nos últimos anos, na maioria dos países sulamericanos, ocorreu uma melhoria nas informações necessárias para o cálculo das ondulações 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



Geoide da América do Sul (SCGGSA) tem contribuído para dinamizar este esforço contando, para isso, com o apoio da Associação Internacional de Geodésia (IAG) através do Serviço Internacional do Geoide (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.

No final da década de 80, houve o South American Gravity Project (SAGP), mas foi a partir do Anglo-Brazilian Gravity Project (ABGP), realizado no início da década de 90, que foi possível ampliar a cobertura gravimétrica dos vazios existentes no Brasil. Ao final da mesma, outra colaboração foi estabelecida, denominada South American Gravity Studies (SAGS), que está em atividade até os dias de hoje, que estende as observações gravimétricas aos países vizinhos do Brasil. Ambos os projetos são resultantes de parceria da EPUSP com o IBGE e várias instituições civis e militares da América do Sul, além do GETECH (Geophysical Exploration Technology), contando ainda com o apoio do National Geospatial-Intelligence Agency (NGA). O banco de dados gravimétricos da América do Sul pertencente à EPUSP tem 947.953 pontos, sendo aproximadamente 45.000 provenientes de levantamentos realizados pelo IBGE (Blitzkow et al., 2015)

Para este novo modelo, foram utilizados dados de novos levantamentos ocorridos desde a última versão, no país e vizinhos de fronteira, como a Argentina, Equador, Paraguai e Venezuela. Somente no Brasil, são 18.485 novos pontos que podem ser visualizados em azul na Figura 3.



#### Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística Diretoria de Geociências – DGC Coordenação de Geodésia – CGED



Figura 3: Distribuição dos novos dados gravimétricos terrestres

Todas essas novas informações foram validadas utilizando o programa denominado DIVA, desenvolvido por Michel Sarrailh no *Bureau Gravimétrique International (BGI)* que tem sede na cidade de Toulouse, França. O Modelo Digital de Terreno (MDT) utilizado continua sendo o SAM3s\_v2, o qual baseia-se no SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission* (Farr et al., 2007). O mesmo contribui com os valores de altitude utilizados para o cálculo da anomalia de gravidade de Bouguer completa; do efeito topográfico direto, do efeito topográfico indireto primário e do efeito topográfico indireto secundário e do efeito atmosférico direto, realizado através do pacote computacional canadense



SHGEO - Stokes-Helmert Geoid Software (Vaníček e Kleusberg, 1987; Ellmann, 2005a; 2005b). A grade de 5' das anomalias ar livre médias foi completada na região oceânica com as anomalias derivadas do modelo de altimetria por satélite do Danish National Space Center, denominado DTU10 (Andersen et al. 2010). A componente de curto comprimento de onda foi estimada através do uso da transformada rápida de Fourier (FFT - Fast Fourier Transform) usando a modificação do núcleo de Stokes proposta por Featherstone (2003). O modelo geopotencial utilizado como referência para remover as componentes de longos e médios comprimentos de onda da anomalia de Helmert e para repor no final as mesmas componentes na altura geoidal, técnica esta denominada "removercalcular-repor", foi elaborado pelo GFZ/Potsdam e GRGS/Toulouse com o nome de European Improved Gravity model of the Earth by New techniques - EIGEN-6C4 até o grau e ordem 200. Esse modelo é considerado completo com grau e ordem até 2190, tendo sido determinado com a contribuição das informações gravimétricas dos satélites: LAGEOS, GRACE e GOCE, e dos modelos DTU12 e EGM2008 (Förste et al., 2014).

Além dessas novidades, nas regiões que dispunham de cobertura gravimétrica suficiente (Figura 4), foi utilizada a metodologia de Redes Neurais Artificiais (RNA) para a obtenção das anomalias de Helmert em pequenas áreas sem informação gravimétrica. Para esta finalidade, foi utilizado o programa NBN\_LTG, adaptado do programa de mesmo nome desenvolvido por Machado (2012) e que permite treinar RNA com arquitetura *Multilayer Perceptrons* (MLP) com uma única camada de neurônios ocultos (Haykin, 1999). As entradas foram definidas como sendo a latitude, a longitude, a altitude ortométrica e a gravidade normal, enquanto que a saída é a anomalia da gravidade (Machado, W. C.; Blitzkow, D. ; Matos, A. C. O. C.; 2013).





Figura 4: Regiões onde foi utilizada a metodologia RNA

A metodologia geral de obtenção das anomalias segue a linha canadense e, como citado anteriormente, utiliza o pacote computacional SHGEO para a sua determinação através do uso do método de condensação de Helmert, que considera as massas topográficas substituídas por uma lâmina infinitesimal condensada sobre a superfície do geoide (Ellmann, A., 2005a). Com o uso desta metodologia, a determinação do modelo geoidal pode ser resumida em basicamente cinco etapas (Blitzkow et al., 2008):

- 1. Cálculo das anomalias ar livre pontuais através de dados gravimétricos terrestres (coordenadas, altitude ortométrica e aceleração de gravidade);
- Cálculo das anomalias de Bouguer completa, para posterior obtenção das anomalias ar livre médias em quadrículas de 5'. Para esses cálculos são necessárias as anomalias ar livre pontuais e um modelo digital de terreno;
- Cálculo das anomalias de gravidade de Helmert na superfície da Terra que são obtidas adicionando a anomalia ar livre média, o efeito direto topográfico, o efeito atmosférico direto e o efeito topográfico indireto secundário;



- Integração de Stokes com a utilização da técnica "remover-calcularrepor";
- Adição do efeito indireto topográfico primário nas alturas geoidais referidas a um "geoide fictício", denominado cogeoide, para obtenção das alturas geoidais finais.

#### III. Validação do Modelo

O MAPGEO2015 foi avaliado utilizando como referência as alturas geoidais obtidas pela diferença entre as altitudes ortométricas oriundas do nivelamento geométrico de 592 referências de nível (RRNN) em conexão com pontos SAT e as respectivas altitudes elipsoidais referidas ao SIRGAS2000 obtidas por técnica GNSS. Tais pontos foram selecionados através de criterioso estudo realizado na Rede Altimétrica Brasileira, onde foram identificadas as conexões que faziam parte de linhas de nivelamento fechadas, consequentemente com valores de altitude ajustados.

O MAPGEO2010 - modelo de ondulação geoidal do Brasil oficial desde 2010 - também foi comparado com os mesmos 592 pontos para que as mudanças ocorridas entre as versões do modelo de 2010 e de 2015 pudessem ser analisadas. Para ambos os modelos foi aplicado o termo de ordem zero (N<sub>0</sub>) de -0,41m. Como esperado, o MAPGEO2015 apresentou melhorias significativas, aproximadamente 20%, ao se comparar a consistência entre as alturas geoidais dos pontos supracitados e os valores obtidos na interpolação com o programa gerado. Os valores estatísticos podem ser visualizados na Tabela 1:

GNSS/RN	Média	RMS	Dif. Máx	Dif. Mín
MAPGEO2015	0,00	0,17	0,49	-0,49
MAPGEO2010	-0,03	0,21	0,90	-0,75

Tabela 1: Análise estatística entre os modelos de ondulação geoidal (valores em metros)



O método de interpolação Vizinhos Naturais – NN (*Natural Neighbor*) do software ArcGIS10.2.2 foi utilizado para a obtenção das superfícies representativas da qualidade dos modelos de ondulação geoidal citados anteriormente. Tal algoritmo considera um subconjunto de amostras de áreas proporcionais e próximas ao ponto a ser calculado e lhe atribui pesos para então interpolar o valor considerado (*How Natural Neighbor works*, ArcMap10.2.2). Sendo assim, foi gerado o mapa de discrepâncias (Figura 5), que utiliza os valores de altura geoidal dos pontos em conexão GNSS/RRNN gerados pelo novo modelo, e a superfície demonstrativa da diferença entre o antigo modelo MAPGEO2010 e o atual (Figura 6).





Figura 5: Mapa das diferenças entre GNSS/RN e o MAPGEO2015. Os pontos pretos representam as 592 RRNN com conexão GNSS





Figura 6: Mapa das diferenças entre o MAPGEO2015 e o MAPGEO2010.

A figura 7 apresenta o histograma da frequência de ocorrência dos valores de discrepância em intervalos de 0,50 metro.





Figura 7: Histograma representativo das diferenças entre o MAPGEO2015 e o MAPGEO2010.

O MAPGEO2015 também foi avaliado separadamente em cada uma das cinco grandes regiões geográficas do país, a fim de se observar aquelas que apresentam maior compatibilidade com os valores de referência oriundos das conexões (Tabela 2):

	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul		
Nº CONEXÕES	21	229	94	188	60		
MÉDIA	-0,14	-0,04	-0,08	0,06	0,11		
RMS	0,25	0,17	0,16	0,15	0,18		
MÁX.	0,39	0,47	0,49	0,46	0,33		
MÍN.	-0,48	-0,49	-0,34	-0,28	-0,41		

Tabela 2: Valores estatísticos por região (em metros).



#### VI. Conclusão

O novo modelo de ondulação geoidal representa uma melhora da qualidade das alturas geoidais. Isso ocorre devido ao trabalho intensivo do IBGE nos últimos cinco anos em colaboração com a EPUSP-PTR e de várias instituições de pesquisa no Brasil, como a ANP – Agência Nacional de Petróleo, ON – Observatório Nacional e UFPR – Universidade Federal do Paraná, bem como de outros países da América do Sul para suprir com informações gravimétricas as regiões carentes. Além disso, as chamadas missões espaciais modernas, notadamente dos satélites LAGEOS, GRACE e GOCE, introduziram uma grande melhoria nos modelos globais do geopotencial. Em particular, o último satélite incorporou um gradiômetro, equipamento que permite a observação do tensor do campo gravitacional através de três pares de acelerômetros em eixos perpendiculares entre si, o que significou uma melhor resolução dos longos e médios comprimentos de onda das alturas geoidais. Tal evolução fica comprovada na observação do histograma das diferenças entre os modelos (Figura 7), cabendo ressaltar a diminuição de 0,05 metro no espectro dos valores das alturas geoidais.

É importante enfatizar que as alturas geoidais derivadas das observações GNSS sobre RN não representam valores isentos de erro. Contudo ainda constituem a única referência que se dispõe para avaliar os resultados e balizar as próximas ações da comunidade científica a fim de se chegar a uma solução em termos gravimétricos cada vez melhor para os usuários de geociências.



### V. Referências Bibliográficas

Andersen, O.B. (2010). The DTU10 Gravity field and Mean sea surface.
 Second International Symposium of the Gravity Field Service – IGFS2 20
 – 22 September 2010 Fairbanks, Alaska.

ArcMap 10.2.2, *How Natural Neighbor works*. http://www.esri.com/software/arcgis/

- Blitzkow, D.; Pacino, M.C.; Matos, A.C.O.C. (2008). Activities in south America: Gravity and Geoid Projects. Disponível em: http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol13/34\_Activities\_in\_Sou th\_America\_Gravity\_and\_Geoid\_Pacino\_Blitzkow.pdf
- Blitzkow,, D.; Matos, A.C.O.C.; Guimarães,G. N.; Pacino, M.C.; Lauría,E.A.; Nunes, M.; Flores,F.; Echalar, A.; Guevara, N. O.; Alvarez, R.; Hernandez, J.N. (2015). *Estudios de gravedad y del modelo de cuasi-geoide para la América del Sur*. Simposio Sirgas 2015. Santo Domingos, República Dominicana, de 18 a 20 de Novembro de 2015.
- Ellmann, A. (2005a). SHGEO software packages An UNB Application to Stokes-Helmert Approach for Precise Geoid Computation, reference manual I, 36 p. Disponivel em: http://gge.unb.ca/Research/GRL/GeodesyGroup/SHGeo\_package/Manual /SHGeo\_manual\_I\_v2.pdf.
- Ellmann, A. (2005b). SHGEO software packages An UNB Application to Stokes-Helmert Approach for Precise Geoid Computation, reference manual II, 43 p. Disponivel em: http://gge.unb.ca/Research/GRL/GeodesyGroup/SHGeo\_package/Manual /SHGeo\_manual\_II\_v2.pdf.
- Farr, T. G., P. A. Rosen, E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick,
  M. Paller, E. Rodriguez, L. Roth, D. Seal, S. Shaffer, J. Shimada, J.
  Umland, M. Werner, M. Oskin, D. Burbank, D. Alsdorf (2007), *The Shuttle Radar Topography Mission*, Reviews of Geophysics, 45, RG2004,



 doi:10.1029/2005RG000183.
 Disponivel
 em:

 http://www.agu.org/journals/rg/rg0702/2005RG000183/

.Featherstone, W. E. (2003). Software for computing five existing types of deterministically modified integration kernel for gravimetric geoid determination, Computer & Geosciences, 29, 183-193. Disponivel em: http://www.iamg.org/CGEditor/index.html.

- Förste et al., 2014. EIGEN-6C4 The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190. Disponível em http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/documents/Foerste-et-al-EIGEN-6C4.pdf
- Haykin, S. *Redes neurais: princípios e prática*. 2<sup>a</sup> ed. São Paulo: Prentice Hall, 1999. 900 p.
- Machado, W. C. Utilização de redes neurais artificiais na previsão do VTEC visando a geração de estações de referência virtuais em tempo-real.
  2012. 184 p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- Machado, W. C., Blitzkow, D., Matos, A. C. O. C., 2013. Interpolação de anomalias de gravidade através de Redes Neurais visando o cálculo do modelo geoidal de Santa Catarina. VIII Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, Curitiba, 2013.
- Vaníček, P.; Kleusberg, A. (1987). *The Canadian geoid-Stokesian approach.* Manuscripta Geodaetica, 12(2), pp. 86-98.