Passado e Presente dos Modelos Globais do Geopotencial: Uma Abordagem Conceitual Sobre sua Evolução



Eurico Nicacio[1]; Regiane Dalazoana[1]
[1] *Universidade Federal do Paraná*

RESUMO

O presente artigo tem por objetivo apresentar um breve histórico, o estado-da-arte e as perspectivas futuras do desenvolvimento e do uso dos Modelos Globais do Geopotencial (MGGs). Estes modelos, constituídos por um conjunto de parâmetros terrestres e coeficientes do potencial anômalo expresso em harmônicos esféricos determinados a partir de técnicas espaciais, são, na atualidade, a forma mais fidedigna e matematicamente bem-comportada para representar o potencial gravitacional terrestre de modo global, donde se derivam valores da gravidade e de suas funcionais – tais como altitude geoidal, anomalia de altitude, distúrbio de gravidade, entre outros. Desde o início de sua obtenção, em meados do século XVII, passando por sua grande evolução com o início da era espacial, e tomadas suas aplicações e propriedades atuais, bem como suas possibilidades futuras, os MGGs têm representado ferramenta crucial da Geodesia para modelagem de corpos celestes – em especial, do planeta Terra. Considerando-se tais aspectos e os benefícios deles advindos, é realizada uma abordagem conceitual, trazendo os principais tópicos atinentes à fundamentação teórica necessária para seu entendimento, e é feita uma análise da evolução supramencionada, trazendo-a para os dias atuais e para as expectativas nos próximos anos nessa área de conhecimento. Ao final, é conduzida uma mostra de principais aplicações desta técnica para representação da forma e das dimensões terrestres, bem como de seu campo da gravidade.

Palavras chave: Modelos Globais do Geopotencial, Abordagem Conceitual, Evolução.

ABSTRACT

The present paper intends to present a brief history, the state-of-art and the future perspectives of the development and usage of Global Geopotential Models (GGMs). These models, formed by a set of terrestrial parameters and anomalous potential coefficients expressed in spherical harmonics and determined through spatial techniques are, nowadays, the most reliable and mathematically well-behaved form for representing Earth's gravitational potential globally, from which are derived gravity itself and its functional values, such as geoid height, height anomaly, gravity disturbance, and others. Since the beginning of its attainment, in the middle of the seventeenth century, passing through their great evolution with the beginning of the space age, and taking their current applications and properties, as well as their future possibilities, the GGMs have played a key role on Geodesy for modeling of celestial bodies – in particular, the planet Earth. Considering these aspects and their benefits, a conceptual approach is carried out, bringing the main items related to the theoretical basis necessary for their understanding, and an analysis of the aforementioned evolution is made, bringing it to the present day and to the expectations in the next years in this area of knowledge. At the end, a sample of main applications of this technique is presented for representation of terrestrial shape and dimensions, likewise of its field of gravity.

Key Words: Global Geopotential Models, Conceptual Approach, Evolution.

1. INTRODUÇÃO

Conforme já discorrido por renomados geodesistas, tais como HOFMANN-WELLENHOF e MORITZ (2006), TORGE e MÜLLER (2012) e GEMAEL (2012), o objetivo primordial da Geodésia é determinar a forma e a dimensão da Terra, bem como do campo da gravidade em seu exterior e suas variações temporais. Entretanto, ao longo das últimas décadas este objetivo tem passado por drásticas mudanças, principalmente devido à evolução das técnicas aplicadas em observações e dos métodos computacionais empregados em seu processamento. Concomitantemente a estes avanços, os problemas clássicos da Geodésia foram expandidos, e sua função primária de medição da superfície terrestre foi ampliada para a detecção dos efeitos de mudanças globais e da geodinâmica (DREWES, 2006).

No que diz respeito a importantes marcos da referida evolução, pode-se mencionar a forma diferenciada com que os estudiosos, ao longo dos anos, passaram a observar e analisar dados provenientes do campo da gravidade terrestre. Em espacial, a popularização do sistema GPS (*Global Positioning System*) nas últimas duas décadas, e mais recentemente do sistema GNSS (*Global Navigation Satellite System*), revolucionou as atividades que necessitam de posicionamento em função de sua rapidez e precisão na obtenção de coordenadas. Este fato impulsionou interesse e necessidade por modelos globais adequados e fidedignos para, por exemplo, proporcionar a determinação de um geoide – uma superfície equipotencial do campo da gravidade terrestre – mais acurado e preciso para aplicações nas áreas de mapeamento e engenharia. Além disso, novas técnicas para obtenção de informações do campo da gravidade a partir de missões satelitais foram desenvolvidas, popularizando o conhecimento e o uso dos Modelos Globais do Geopotencial (MGGs).

De um modo geral, conforme SANSÒ e SIDERIS (2013), um MGG consiste de um conjunto de valores numéricos para certos parâmetros, as estatísticas dos erros a eles associados (expressos, por exemplo, por meio de uma matriz variância-covariância) e uma coleção de expressões matemáticas, valores numéricos e algoritmos particulares. Estes dados devem possibilitar ao usuário a realização de duas atividades básicas, a saber: síntese, isto é, cálculo dos valores numéricos de grandezas relacionadas ao potencial da gravidade – as denominadas funcionais do geopotencial – dada a posição do ponto de cálculo; e propagação de erros, isto é, cálculo dos erros esperados para a funcional calculada, inferidos a partir dos erros dos parâmetros definidores do MGG.

Ainda segundo a referência citada, um MGG deve ser capaz de suportar tais cálculos em quaisquer pontos arbitrários, localizados sobre ou acima da superfície terrestre, de maneira precisa e eficiente, caracterizando sua globalidade. Estes aspectos,

aliados à consistência interna de informações e à modelagem física precisa, propiciam exatidão e confiabilidade aos resultados fornecidos.

2. EVOLUÇÃO DOS MODELOS GLOBAIS DO GEOPOTENCIAL

Apesar de parecerem relativamente recentes, os primeiros estudos voltados a modelagem do campo da gravidade em nível global ocorreram há longa data. Consonante Rapp (1998), o primeiro modelo gravitacional para a Terra foi o modelo da Terra Normal, expresso a partir de estudos teóricos realizados por diversos pesquisadores, tais como Clairaut, Pizzetti, Helmert, Somigliana, entre outros, entre os séculos XVII e XIX. Destes estudos, observou-se que as variações da gravidade na superfície limitante de um elipsoide – um modelo matematicamente bem comportado e aproximado para a superfície terrestre – poderiam ser expressas em função de sua latitude. Um exemplo de tal formulação matemática é o Teorema de Clairaut, expresso na equação 1, onde γ é a gravidade normal na latitude φ, γ_e é a gravidade normal equatorial e $\beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_n$ são constantes que dependem de características do elipsoide adotado, como seu eixo maior e seu achatamento, e do valor da gravidade no polo, por exemplo.

$$\gamma = \gamma_e(1 + \beta_1 \sin^2 \varphi + \beta_2 \sin^2 2\varphi + \cdots) \quad (1)$$

Ainda segundo a referência citada, a partir deste ponto, um passo importante foi buscar determinar os parâmetros da fórmula da gravidade usando medições de gravidade distribuídas tão largamente quanto possível. Uma das primeiras determinações no século 20 foi realizada por Helmert em 1901, que utilizou medições referentes a 1603 estações. Conforme novas medições de gravidades eram adquiridas, diversas estimativas dos parâmetros foram executadas por Bowie (em 1917), Heiskanen (em 1928 e 1957), Jeffreys (em 1937, 1941 e 1948), Zhongolovich (em 1952), Uotila (em 1957), Kaula (em 1958), entre outros.

Na sequência histórica, uma importante evolução na modelagem do campo gravitacional foi utilizar o desenvolvimento do geopotencial em harmônicos esféricos de grandezas a ele associadas. O geopotencial, por sua vez, nada mais é do que a soma entre o potencial do campo da gravidade devida à atração das massas e o potencial centrífugo. Em suma, o desenvolvimento do geopotencial em harmônicos esféricos se dá pela visualização do potencial de atração gravitacional como função harmônica – entenda-se, seu atendimento à equação de Laplace – nos termos da equação 2 (HOFMANN-WELLENHOF e MORITZ, 2006).

$$V_P = -\frac{1}{4\pi}\int_s \frac{1}{r}\frac{\partial V}{\partial n}\, dS \quad \Rightarrow \quad \nabla^2 V(r,\varphi,\lambda) = 0 \tag{2}$$

De forma abreviada, após manipulação matemática adequada, pode-se chegar à equação 3, que representa o geopotencial discretizado e expandido em termos de harmônicos esféricos. Nesta equação, a é o semieixo maior do elipsoide associado ao modelo, ω é a velocidade angular de rotação do modelo, C_{nm} e S_{nm} são os coeficientes do desenvolvimento em séries, GM é a constante gravitacional geocêntrica associada ao modelo, coordenadas geocêntricas (r, φ, λ), a saber: r é a distância do ponto de cálculo ao geocentro do modelo adotado, φ é a latitude geodésica do ponto de cálculo e λ é a longitude geodésica do ponto de cálculo e P_{nm} representa as funções de Legendre associadas com grau n e ordem m.

$$W(r,\varphi,\lambda) = \frac{GM}{r}\left[1 + \sum_{n=2}^{\infty}\sum_{m=0}^{n}\left(\frac{a}{r}\right)^n (C_{nm}\cos m\lambda + S_{nm}\sin m\lambda)\right] P_{nm}(\sin\varphi) + \frac{1}{3}\omega^2 r^2[1 - P_{20}(\sin\varphi)] \tag{2}$$

Ainda de acordo com Rapp (1998), em 1937 Dobovskii realizou as duas primeiras expansões da anomalia da gravidade – uma funcional do campo da gravidade que relaciona a gravidade real observada e a gravidade normal teórica – até o grau 6. Com o passar do tempo, diferentes estudiosos realizaram novas expansões de funcionais do campo da gravidade sobre ópticas similares a esta, porém ainda com grau de desenvolvimento baixo – Zhongolovich, em 1952 desenvolveu anomalias estimadas a partir de 26000 pontos de medição até grau 8 em um *grid* de 10° x 10°; Uotila, em 1962, descreveu a análise de um *grid* de anomalias de 1° x 1° desenvolvidas até grau 4 utilizando ajustamento pelo método dos mínimos quadrados; e assim por diante. Todavia, os maiores avanços foram conseguidos com o início da era espacial e com o advento de missões de cujos resultados poderiam ser derivadas informações para melhoria dos modelos.

Entretanto, com o advento do emprego das técnicas espaciais na Geodésia, desde meados da década de 70, os ganhos em resolução e em qualidade dos MGGs foram altamente impulsionados. Através da contribuição de diversos autores para seus desenvolvimentos, os modelos atuais constituem a mais utilizada técnica de representação do campo da gravidade terrestre (GEMAEL, 2012).

Alguns dos principais modelos da atualidade encontram-se na tabela 1, adaptada de Barthelmes & Köhler (2016), juntamente com seu ano de disponibilização, o grau/ordem máximo de seu desenvolvimento em harmônicos esféricos, as fontes de dados utilizadas para sua elaboração e a citação de seus idealizadores. A versão completa da tabela em questão pode ser encontrada na referência mencionada.

TABELA 1 – PRINCIPAIS MODELOS GLOBAIS DO GEOPOTENCIAL DA ATUALIDADE

Modelo	Ano	Grau/Ordem	Fontes de dados
EIGEN-6S4v2	2016	300	S (GOCE, GRACE, LAGEOS)
GOCO05c	2016	720	S, G, A
EIGEN-6C4	2014	2190	S (GOCE, GRACE, LAGEOS), G, A
GO_CONS_GCF_2_TIM_R5	2014	280	S (GOCE)
EGM2008	2008	2190	S (GRACE), G, A

FONTE: Adaptado de Barthelmes & Köhler (2016).

Com efeito, como pode ser observado na tabela 1, mais precisamente na coluna “Fonte de dados”, há diferentes indicações com as letras S, G e A. Estas significam que um referido modelo tem em sua formação dados oriundos de satélites, gravimetria e altimetria (quer seja proveniente de modelos digitais de elevação, em continentes e regiões costeiras, quer seja proveniente de altimetria por satélites, nos oceanos) respectivamente (SEEBER, 2003).

Tal como descrito por Pavlis et al. (2012), o primeiro modelo baseado não apenas na solução de estimativas de um conjunto de anomalias de gravidade provenientes de observações de órbitas satelitais, mas também providos de observações gravimétricas, observações sobre a topografia do terreno e de altimetria por satélite foi o EGM2008. Este modelo foi considerado revolucionário à época de sua elaboração e lançamento, devido à grande quantidade de informações utilizadas para geração dos coeficientes de seu desenvolvimento em harmônicos esféricos e, consequentemente, de seu possível desenvolvimento até grau 2190 – sendo equivalente a uma resolução espacial de 9,13 quilômetros.

Na atualidade, em virtude da complexidade de obtenção e manutenção destes modelos, bem como da necessidade de controle e normatização de todas as variáveis relacionadas, tendo em mente o benefício de usuários ao redor do planeta, sua gestão é realizada globalmente pelo ICGEM – *International Centre for Global Earth Models*, Centro Internacional para Modelos Globais Terrestres. Este é um dos cinco serviços coordenados pelo IGFS – *International Gravity Field Service*, Serviço Internacional do Campo da Gravidade – subordinados à IAG – *International Association of Geodesy*, Associação Internacional de Geodésia (BARTHELMES e KÖHLER, 2016). Dentre suas atribuições está

justamente a obrigatoriedade para disponibilizar os modelos na web em um formato padronizado e autoexplicativo, bem como disponibilizar uma interface *web* para calcular funcionais do campo da gravidade em *grids* selecionáveis livremente.

No contexto deste trabalho, são abordados os principais modelos globais do geopotencial combinados da atualidade – ou seja, aqueles que conjugam fontes de dados em sua elaboração.

3. PRINCIPAIS MODELOS GLOBAIS DO GEOPOTENCIAL DA ATUALIDADE

3.1 EGM2008

O MGG EGM2008, acrônimo para Earth Gravitational Model 2008, foi considerado um marco na evolução histórica do desenvolvimento de modelos globais do geopotencial em harmônicos esféricos (PAVLIS et al., 2012). Isto não apenas porque foi o primeiro modelo em que é possível desenvolvimento em harmônicos até grau superior a 2000, mas também devido à considerável melhoria em acurácia apresentada ante aos demais modelos existentes à época e, até mesmo, a seu antecessor – o EGM96 – ao qual imprimiu uma melhoria de seis vezes em resolução e de três a seis vezes em acurácia, dependendo da quantidade de informações gravitacionais e da localização da área.

Ainda conforme a referência, seu desenvolvimento teve início no ano 2000, quando a NGA – *National Geospatial-Intelligence Agency* – idealizou desenvolver um novo e mais completo modelo gravitacional para substituir o já obsoleto EGM96 e aportar uma esperada grande quantidade de dados gravitacionais precisos da então vindoura missão gravitacional GRACE, a ser lançada em março de 2002. Sua meta de precisão era de um erro quadrático médio global de 15 centímetros na determinação da altitude geoidal.

Para tanto, o EGM2008 foi desenvolvido em um ajustamento pelos mínimos quadrados em termos de harmônicos elipsoidais que combinou o modelo ITG-GRACE03S, o qual estava disponível até grau e ordem 180 juntamente com sua matriz variância-covariância, com informações gravitacionais extraídas de um *grid* global 5' x 5' de anomalias da gravidade. Este conjunto global foi formado com a união de dados terrestres, aerotransportados e valores derivados de altimetria por satélite. Em certas áreas os dados de anomalia de gravidade disponíveis só podiam ser utilizados em baixa resolução, seu conteúdo espectral era suplementado com informações gravitacionais obtidas de um banco de dados topográfico detalhado global. (PAVLIS et al., 2012). Neste contexto, a figura 1 apresenta as fontes de dados utilizadas para elaboração do EGM2008, conforme disposição geográfica no planeta.

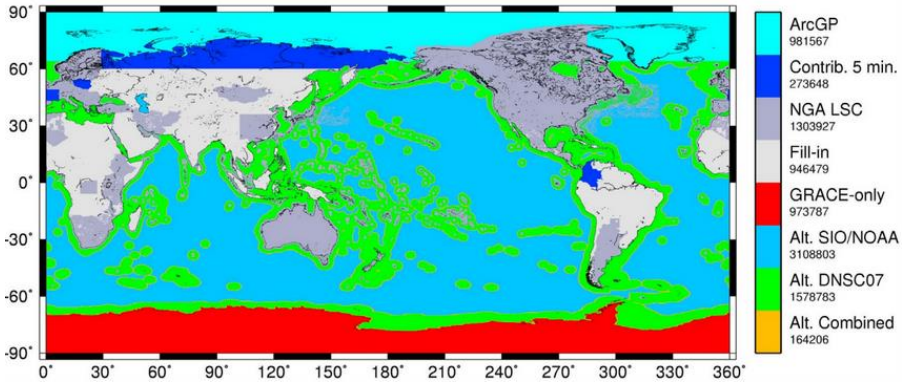


FIGURA 1: FONTES DE DADOS DE ANOMALIA DA GRAVIDADE EM NÍVEL GLOBAL UTILIZADOS PARA ELABORAÇÃO DO MGG EGM2008.
FONTE: PAVLIS et al. (2012)

Após a realização de cálculos, lançamentos e avaliações intermediárias, em 2008 foi lançada a versão final do EGM2008, desenvolvida até grau e ordem 2159 e completada até 2190 em harmônicos zonais. Ainda segundo a referência, em áreas cobertas com dados gravimétricos de alta qualidade, as discrepâncias entre altitudes geoidais calculadas com o EGM2008 e calculadas por meio de dados GNSS/Nivelamento independentes são da ordem de ± 5 a ±10 cm. Estes resultados são comparáveis, e em certas ocasiões até melhores que, resultados obtidos utilizando modelos geoidais regionais detalhados.

Para fins de mensuração e comparação em nível global, a figura 2 apresenta os resultados obtidos a partir da propagação de erros para anomalia de altitudes sobre a superfície terrestre, bem como um histograma da ocorrência dos erros em questão.

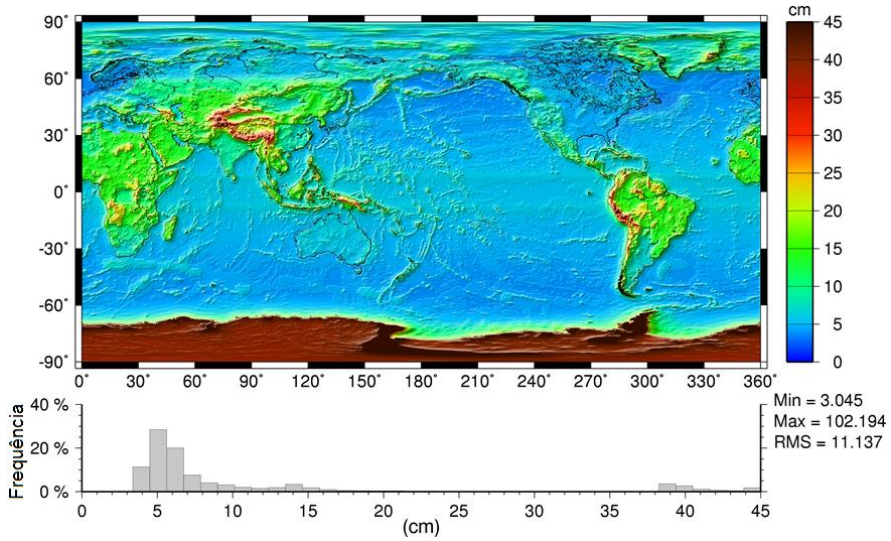


FIGURA 2: DISPOSIÇÃO DO ERRO OBTIDOS PELO EGM2008 ENTRE GRAUS 2 E 2159 PARA A FUNCIONAL ANOMALIA DE ALTITUDE SOBRE A SUPERFÍCIE TERRESTRE; E HISTOGRAMA DE OCORRÊNCIA DOS REFERIDOS ERROS.
FONTE: ADAPTADO DE PAVLIS et al. (2012)

Consonante Pavlis et al. (2012), a estimativa de erro em questão implica em erros na funcional que variam de ±3 cm a ±102 cm, com um valor de erro quadrático médio global para erros propagados de aproximadamente ±11 cm.

3.2 EIGEN-6C4

Conforme abordado por Förste et al. (2014), o EIGEN-6C4 é um modelo global estático combinado do campo da gravidade terrestre datado do ano de 2014 que pode ser desenvolvido até grau e ordem 2190. Ele foi elaborado conjuntamente pelo *GFZ Potsdam* (Centro de Pesquisa Alemão de Geociências, em Potsdam, Alemanha) e pelo *GRGS Toulouse* (Grupo de Pesquisa de Geodésia Espacial, em Toulouse, França).

Sua nomenclatura é um acrônimo para "*European Improved Gravity model of the Earth by New techniques*", ou seja, um modelo europeu de gravidade terrestre melhorado por novas técnicas. O índice 4 ao final de seu nome justifica-se por ele ser a quarta e mais recente versão de uma família de modelos EIGEN combinados – também existindo uma família equivalente de modelos somente satélite – cuja evolução histórica conta com diferentes técnicas, dados históricos de missões satelitais gravimétricas e possibilidades de desenvolvimento em harmônicos esféricos. Ainda segundo Förste et al. (2014), o EIGEN-6C4 é composto por:

- Dados SLR das missões LAGEOS-1 e 2 entre 1985 e 2010, possibilitando desenvolvimento até grau e ordem 2 a 30;
- Dados GPS-SST da missão GRACE entre fevereiro de 2003 e dezembro de 2012, possibilitando desenvolvimento até grau e ordem 175;
- Dados GOCE tridimensionais sobre o gradiente da gravidade do satélite, entre 1º de novembro de 2009 e 20 de outubro de 2013, com seus respectivos pesos baseados em erro quadrático médio dos resíduos e filtrados, permitindo desenvolvimento até grau e ordem 300;
- Dados terrestres, compostos por um grid global de anomalias da gravidade de 2'×2' DTU, oriundo de informações de altimetria satelital sobre os oceanos, e dados do EGM2008 sobre os continentes, possibilitando desenvolvimento inicial até grau e ordem 370 e a utilização de uma solução bloco diagonal similar à descrita por PAVLIS et al. (2012) que viabiliza desenvolvimento até grau e ordem 2190.

Uma representação visual dos dados listados anteriormente e sua contribuição para o desenvolvimento do modelo EIGEN-6C4 é apresentada na figura 3. Ainda consonante à referência, ressalta-se que dado sua forma de obtenção sobre os continentes, este modelo apresenta em geral resultados bastante coerentes e compatíveis com o modelo EGM2008 nestas regiões.

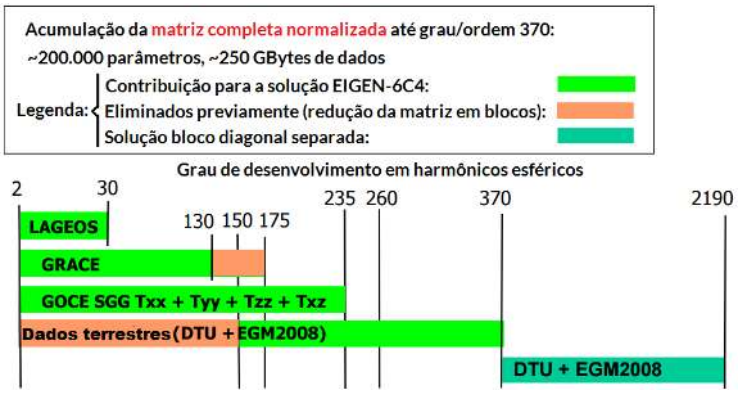


FIGURA 3: INTEGRAÇÃO DE DIFERENTES FONTES DE DADOS PARA COMPOSIÇÃO DO MGG EIGEN-6C4.
FONTE: ADAPTADO DE FÖRSTE et al. (2014)

3.3 GOCO05C

Dentre todos os MGGs desenvolvidos desde o lançamento do EGM2008, o GOCO05C integra um seleto grupo de modelos diferenciados e mais recentes. Acrônimo para "*Gravity Observation Combination*", este MGG também combina informações de modelos gravimétricos somente-satélite e um *set* global de dados de anomalia da gravidade, desenvolvível até grau e ordem 720. No entanto, diferentemente dos anteriores, este apresenta algumas características que o tornam único (FECHER et al., 2017):

- Trata-se do primeiro modelo combinado totalmente independente do EGM2008, ou seja, que não compartilha tampouco usa soluções do modelo EGM2008 em sua elaboração e formação; além disso, este é o primeiro modelo combinado que contém dados de todo o período da missão GOCE, adicionalmente a aproximadamente 10 anos de dados da missão GRACE e informações orbitais adicionais de satélites de órbitas baixas e soluções SLR;
- Trata-se, novamente, do primeiro modelo que faz uso de ponderação por localização durante a utilização de soluções de missões gravimétricas, aerotransportadas e terrestres, ou seja, utiliza pesos maiores para os dados de maior qualidade em determinadas regiões em detrimento de

dados de qualidade inferior, caracterizando uma modelagem estocástica realística e um esquema de ponderação sob medida para os melhores casos;

- Em decorrência da ponderação, o modelo lida com alta correlação entre todos os parâmetros gravitacionais, sendo seu sistema de equações normais completo de tamanho aproximado de 2 terabytes, demandando rigor em solução por aplicação de meios computacionais de alta-performance.

Ainda segundo a referência supracitada e em decorrência dos fatores mencionados, resultados mostram que as informações adicionais da missão GOCE são altamente benéficas em áreas observadas de maneira insuficiente, e que seu esquema de ponderação de dados individuais proporciona melhoria significativa na consistência espacial e espectral do modelo.

Fecher et al. (2017) ressaltam, ainda, que atenção especial deve ser dada aos resultados gerados para a América do Sul, onde dados de anomalia de gravidade providos pela NGA foram utilizados com resolução espacial mínima de 150 × 150. Esta é uma abordagem deveras diferenciada e que tornou desnecessário o preenchimento posterior de anomalias da gravidade nesta região, tal como realizado nos modelos EGM2008 e EIGEN-6C4, e consequentes melhores resultados na mesma.

Na figura 4, são exibidos os gráficos que demonstram ganhos do modelo GOCO05C no que diz respeito ao erro quadrático médio entre suas soluções de altitude geoidal e aquelas provenientes de GNSS/nivelamento, comparativamente com os MGGs EGM2008 e EIGEN-6C4, para as regiões da Austrália, da Alemanha, do Brasil e dos Estados Unidos.

3.4 XGM2016

O último modelo global do geopotencial a ser abordado é o XGM2016 - acrônimo para *Experimental Gravity Field Model* 2016. De acordo com a Pail et al. (2016), em dezembro de 2015 a NGA anunciou publicamente que deu início aos trabalhos para substituição do EGM2008. Este novo modelo, o EGM2020, está com lançamento previsto para final de 2019 e, tal qual seu antecessor EGM2008, será uma expansão do geopotencial e de suas funcionais em harmônicos esféricos até grau 2190 e ordem 2159, por intermédio de parcerias nacionais e internacionais da agência citada, principalmente

com a Universidade Técnica de Munique (TUM, do alemão *Technische Universität München*), fazendo uso otimizado de novas fontes de dados e metodologias.

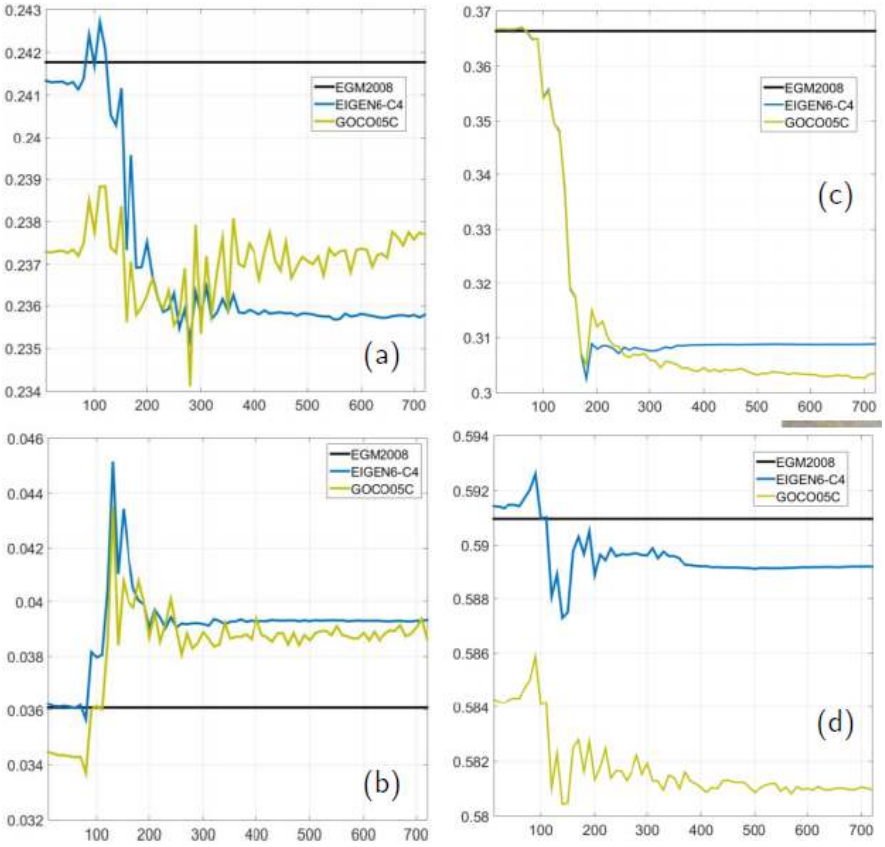


FIGURA 4: DIFERENÇAS ENTRE RMS [EIXO Y] POR GRAU DE DESENVOLVIMENTO [EIXO X], EM METROS, ENTRE AS SOLUÇÕES DA FUNCIONAL ALTITUDE GEOIDAL DO MGG GOCO05C E SOLUÇÕES GNSS/NIVELAMENTO, COMPARATIVAMENTE AOS MGGS EIGEN-6C4 E EGM2008, PARA AS REGIÕES DE (A) AUSTRÁLIA, (B) ALEMANHA, (C) BRASIL E (D) ESTADOS UNIDOS.
FONTE: ADAPTADO DE FECHER et al. (2016)

Para esta finalidade, Pail et al. (2016) relatam que a NGA forneceu à Universidade um novo *grid* global 15' × 15' de anomalias de gravidade "terrestres", conforme nomenclatura do próprio autor, o qual incorpora a maioria dos novos dados altimétricos e terrestres levantados pela agência, bem como beneficiando a Universidade com novos procedimentos para processar estes dados. Neste estágio intermediário, a TUM forneceu à NGA uma avaliação independente deste novo grid de dados, em termos de adequação para suportar um EGM melhorado. Um resultado desse esforço é, justamente, a disponibilização do modelo XGM2016, que é passível de desenvolvimento até grau 719, relacionado à máxima resolução suportada pelo grid 15' × 15'.

Tal como o GOCO05C, dois pontos significantes do XGM2016 devem ser destacados: o primeiro é a combinação otimizada dos novos dados terrestres com

plenitude de informações das últimas missões gravitacionais - a saber, 11 anos de dados da missão gravitacional GRACE (2002-2013) e o período completo da missão gravitacional GOCE (2009-2013) - oriundas do MGG GOCO05S; esta combinação é baseada em um sistema de equações completamente normalizadas até o grau máximo da expansão (n = 719); a segunda é uma estratégia de ponderação regionalmente dependente, permitindo consideração de acurácia individual em cada célula de dados altimétricos e terrestres, de tal forma que a transição entre dados inferidos de satélite para dados terrestres e altimétricos possa ser modelada individualmente em cada célula. Além disso, os modelos estocásticos para a base de dados terrestres e altimétricos são formados por comparações com soluções somente satélite no intervalo de comprimento de onda longo a médio.

A figura 5 apresenta as diferentes fontes de dados de anomalia da gravidade, em nível global, utilizados para elaboração do XGM2016. Comparativamente com a figura 2, que descreve mesmo atributo do MGG EGM2008, claramente verifica-se os ganhos em densidade e qualidade de pontos utilizados no modelo mais recente em detrimento do mais antigo, principalmente no que diz respeito à diminuição de uso de preenchimento (“Fill-in”), em um intervalo inferior a 10 anos.

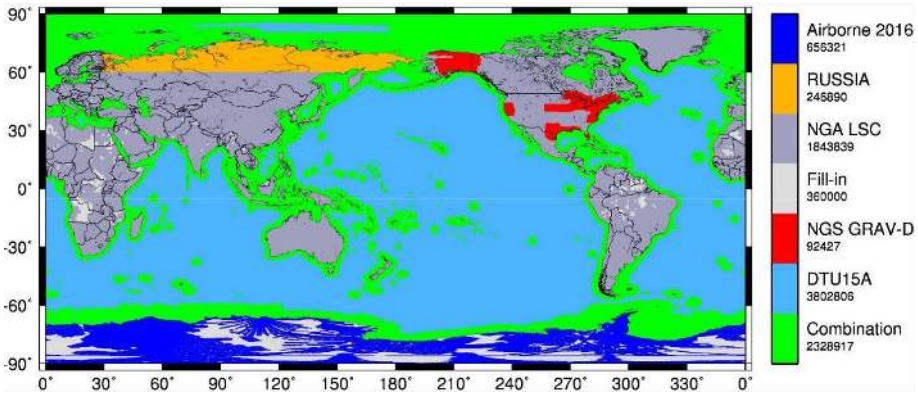


FIGURA 5: FONTES DE DADOS DE ANOMALIA DA GRAVIDADE EM NÍVEL GLOBAL UTILIZADOS PARA ELABORAÇÃO DO MGG XGM2016.
FONTE: PAIL et al. (2016)

Analogamente ao apresentado para o MGG GOCO05C, a figura 6 mostra os ganhos do modelo XGM2016 no que diz respeito ao erro quadrático médio entre suas soluções de altitude geoidal e aquelas oriundas de GNSS/nivelamento, comparativamente com os MGGs EGM2008, EIGEN-6C4 e GOCO05C, para as regiões de Brasil, Austrália, Canadá, Estados Unidos e Japão.

Nos gráficos do MGG XGM2016, observa-se que para o caso do Brasil [a] e para grau de desenvolvimento próximo a 700, tem-se resultados do XGM2016 levemente melhores que os resultados do GOCO05C e do EIGEN-6C4, ambos melhores que os

resultados do EGM2008 em seu grau máximo - ganhos superiores a 6 centímetros. Os resultados para este modelo também são favoráveis nas áreas de Canadá, Estados Unidos e Japão. Entretanto, uma análise sobre a Austrália [b] indica que o MGG ainda é deficiente nesta região.

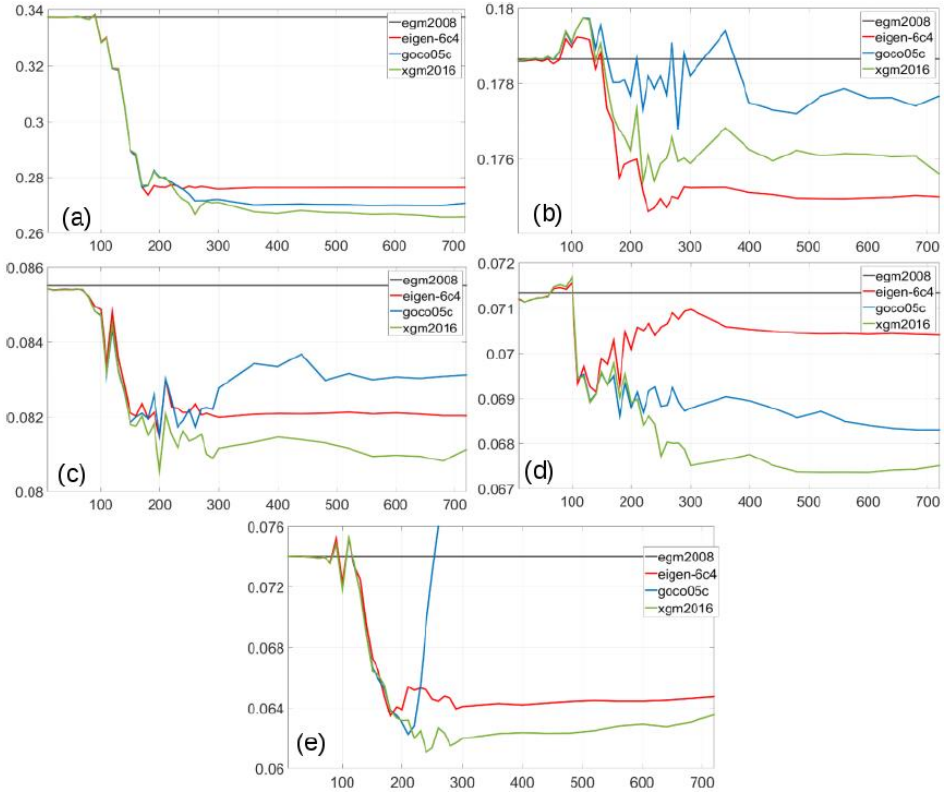


FIGURA 6: DIFERENÇAS ENTRE RMS [EIXO Y] POR GRAU DE DESENVOLVIMENTO [EIXO X], EM METROS, ENTRE AS SOLUÇÕES DA FUNCIONAL ALTITUDE GEOIDAL DO MGG XGM2016 E SOLUÇÕES GNSS/NIVELAMENTO, COMPARATIVAMENTE AOS MGGS EIGEN-6C4, EGM2008 E GOCO05C, PARA AS REGIÕES DE (A) BRASIL, (B) AUSTRÁLIA, (C) CANADÁ, (D) ESTADOS UNIDOS E (E) JAPÃO.
FONTE: ADAPTADO DE PAIL et al. (2016)

4. APLICAÇÕES ATUAIS PARA MODELOS GLOBAIS DO GEOPOTENCIAL

Sansò e Sideris (2013) enumeram, ainda, alguns possíveis usos para os MGGs, tanto operacionais quanto científicos, como segue:

- Aplicações na determinação de órbita, necessárias para levantamentos espaciais, como a detecção, o rastreamento e a predição posicional de objetos que orbitam a Terra;
- Aplicações de navegação inercial, utilizadas para determinação de trajetórias de aviões e mísseis;
- Aplicações oceanográficas que requerem a estimativa da Topografia Dinâmica do Oceano (do inglês, *Dynamic Ocean Topography* – DOT) e

sua variação, grandezas estas diretamente relacionadas à circulação de correntes oceânicas;

- Cálculos de altitude geoidal, necessários para transformar a altitude elipsoidal em uma elevação referenciada a uma superfície equipotencial;
- Aplicações de prospecção geofísica, nas quais um MGG combinado com informações cabíveis, como dados sísmicos, pode trazer importantes restrições a serem empregadas na determinação de distribuições de massas abaixo da superfície;
- Um único MGG preciso e de alta resolução pode ser utilizado para prover uma superfície de referência para realização de um *Datum* Vertical Global.

No que diz respeito à última alternativa levantada, dado o atual estado de evolução dos MGGs, espera-se que esta seja atendida em plenitude pelo vindouro modelo EGM2020. Isto porque as melhorias impostas por seu antecessor, o XGM2016, impactam positivamente no histórico de evolução dos MGGs combinados, tanto quanto no seleto grupo ora apresentado; adicionalmente, sua obtenção em conjugação de esforços entre NGA e TUM representa o ápice de esforços intelectuais para obtenção de um MGG.

5. CONCLUSÃO

Os modelos globais do geopotencial representam uma ferramenta de extrema utilidade nos dias atuais, principalmente sob a óptica de modelagem do campo da gravidade terrestre ou de suas funcionais.

Conjugando uma evolução conceitual do uso e desenvolvimento dos MGGs com uma exposição dos mais modernos e amplamente conhecidos exemplares combinados, o presente trabalho teve como intuito primordial compilar os principais aspectos de relevância histórica em aproximadamente quatro séculos em que estudiosos têm buscado entender, interpretar e aplicar de maneira eficaz e eficiente os fundamentos de Geodesia Física intimamente atrelados ao campo da gravidade terrestre. Adicionalmente, buscou-se divulgar amplamente os principais modelos disponíveis para utilização nas mais variadas atividades, tendo em vista a carência de publicações em nível nacional sobre a temática apresentada.

Ao final, é apresentado ainda um olhar para o futuro, através da expectativa de desenvolvimento de um futuro MGG, capaz de suprir em completude necessidades atuais ligas a sistemas e redes de referência – a saber, o vindouro MGG EGM2020.

4. REFERÊNCIAS

BARTHELMES, F. & KÖHLER, W. *International Centre for Global Earth Models (ICGEM)*. In: Drewes, H., Kuglitsch, F. Adám, J. et al., *The Geodesists Handbook 2016*, **Journal of Geodesy** (2016), 90(10), 907–1205. DOI: 10.1007/s00190-016-0948-z. 2016.

DREWES, H. *The changing objectives in geodetic research*. **Zeitschrift für Geodäsie, Geo-Information und Landmanagement**, v. 131, n. 5, p. 1–7, 2006.

FECHER, T., PAIL, R., GRUBER, T. *The combined gravity field model GOCO05c*. Abstracts, **EGU General Assembly**. Vienna, Austria. 2016.

FECHER, T., PAIL, R., GRUBER, T. *GOCO05c: A New Combined Gravity Field Model Based on Full Normal Equations and Regionally Varying Weighting*. **Surveys in Geophysics**, 38, pp. 571-590, Springer-Verlag, DOI: 10.1007/s10712-016-9406-y. 2017.

FÖRSTE, C. et al. **EIGEN-6C4 The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse**. GFZ Data Services. 2014. DOI: 10.5880/icgem.2015.1.

GEMAEL, C. **Introdução à Geodésia Física**. Ed. Atualizada. Curitiba: Editora UFPR, 2012.

HOFMANN-WELLENHOF, B., MORITZ, H. **Physical Geodesy**. 2nd Ed. Graz, Austria: Spring-Verlag Wien, 2006.

PAIL, R. et al. *The Experimental Gravity Field Model XGM2016*. In: **1st Joint Comission 2 and International Symposium on Gravity, Geoid and Height Systems 2016**.Thessaloniki, Grécia, 2016.

PAVLIS, N. K. et al. *The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)*. **Journal of Geophysical Research**, v. 117, n. B04406, p. 1–38, 2012.

RAPP, R. H. *Past and future developments in Geopotential Modeling*. *In*: **Geodesy on the Move**, Forsberg, Feissel, Dietrich (Eds), p. 58-78, Springer-Verlag, Berlin New York, 1998.

SANSÒ, F., SIDERIS, M. G. S. *Geoid Determination – Theory and Methods*. **Lecture Notes in Earth System Sciences**. V. 110. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 734 pp, 2013.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: foundations, methods and applications**. 2nd Ed. Berlin, New-York: Walter de Gruyter, 589 pp, 2003.

TORGE, W., MÜLLER, J. **Geodesy**. 4th Ed. Berlin-Boston: Walter de Gruyter, 2012.