

Avaliação da potencialidade dos modelos da missão GOCE no Equador

RESUMO

Vários modelos globais do geopotencial baseados nos dados da missão do satélite GOCE têm sido disponibilizados desde 2010. Alguns deles utilizam diferentes combinações de missões satelitais, enquanto outros utilizam somente solução do satélite GOCE. Este artigo apresenta uma avaliação e análise dos modelos mais recentes utilizando dados do GOCE no Equador. Duas avaliações foram realizadas, sendo a primeira uma comparação absoluta e a segunda relativa. Na primeira, a anomalia de altura derivada dos modelos do GOCE foi comparada com a ondulação geoidal de 60 estações GNSS sobre nivelamento. Os modelos foram avaliados até grau e ordem 200 e também para o grau máximo. Os resultados mostram consistência dos modelos EIGEN 6C4 (0,59 m) e EIGEN 6c3 STAT (0,60 m) para o grau máximo, em termos de desvio padrão, em comparação com o EGM2008 (0,67 m) e o geoide sul-americano (0,69 m). Para os outros modelos o resultado na excedeu 0,97 m. Os resultados da comparação relativa mostram que os modelos EIGEN 6C4, EIGEN 6c3 STAT e GOCO 05C são consistentes com o EGM2008 e o geoide da América do Sul.

PALAVRAS-CHAVE: GOCE. GNSS. Nivelamento.

Luís Antônio Soares e Sousa

luisantonio@ufu.br

orcid.org/0000-0003-4494-8808

Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Monte Carmelo, Minas Gerais, Brasil.

Gabriel do Nascimento

Guimarães

gabriel@ufu.br

orcid.org/0000-0003-4380-4650

Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Monte Carmelo, Minas Gerais, Brasil.

INTRODUÇÃO

A determinação precisa da forma do planeta Terra e, conseqüentemente, a modelagem de sua superfície tem sido objetivo de estudo de pesquisadores da área de geociências há certo tempo. A ciência que trata deste objeto de estudo é a Geodésia, que etimologicamente é de origem grega *Geo* - Terra e *Daisia* - medição, significando medição da Terra. É plausível então dizer que a Geodésia se preocupa com três objetos: o estudo da forma e das dimensões da Terra, os parâmetros de orientação da Terra no espaço e o campo de gravidade. A determinação da forma da Terra é realizada por meio do conhecimento do campo de gravidade envolvendo a distribuição de massa e o efeito rotacional do planeta. Para se determinar a função potencial do referido campo é necessário envolver o que se denomina de **Problema de Valor de Contorno da Geodésia** (PVCG) (GUIMARÃES; BLITZKOW, 2011).

Hoje, devido ao crescente interesse na área, torna-se difícil delimitar os campos de aplicação da Geodésia, mas pode-se enumerar diversas utilidades como: monitoramento das marés, controle do movimento de placas tectônicas, detecção de movimentos verticais da crosta, controle de grandes obras de engenharia, estudos voltados para hidrologia e variações do nível do mar.

Por meio de suas diversas ferramentas, a Geodésia visa ao estabelecimento, cada vez mais realista, da figura do geoide. O modelo geoidal é limitado por uma superfície equipotencial do campo de gravidade da Terra que coincide com o nível médio não perturbado dos mares, podendo imaginar a superfície geoidal prolongada através dos continentes. Ela tem um formato ondulatório levemente irregular que acompanha as variações da estrutura de distribuição de massa da Terra (GEMAEL, 1999).

Os modelos de ondulações geoidais são necessários, tendo em vista que a altitude determinada por meio do GNSS (*Global Navigation Satellite System*) não está relacionada ao nível médio do mar, mas sim a um elipsoide de referência. Este é uma figura geométrica que melhor representa a forma da Terra. Logo, torna-se essencial conhecer a ondulação geoidal (diferença entre as superfícies geoidal e elipsoidal).

A altitude oficialmente adotada no Brasil é a normal-ortométrica, a qual representa a diferença entre a superfície física terrestre e uma dada superfície de referência, no caso o geoide. No ajustamento da rede altimétrica que o IBGE realiza sistematicamente, os desníveis são corrigidos do efeito sistemático do não paralelismo das equipotenciais, acarretado pela falta de combinação de observações de gravidade (IBGE, 2011). Uma outra grandeza utilizada nos cálculos e que permite comparações com a ondulação geoidal é a anomalia de altura (ζ). Esta quantidade é derivada dos modelos geopotenciais.

Dentre os diversos modelos geopotenciais, os mais recentes derivam da missão espacial GOCE (*Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer*), o qual será utilizado para o desenvolvimento deste trabalho. O satélite GOCE foi desenvolvido pela ESA (*European Space Agency*). Ele é composto por seis acelerômetros ultrasensíveis, que possibilita medir as variações da ordem de dez mil milionésimos do campo gravitacional terrestre e, logo, traçar um mapa com alta resolução da forma do globo terrestre (ESA, 2006). Além disso, ele se utiliza de uma junção das técnicas SST (*Satellite-to-Satellite Tracking*) e gradiometria.

Este trabalho tem como objetivo verificar a potencialidade dos mais recentes modelos geopotenciais advindos da missão do satélite GOCE. A partir do cálculo das anomalias de altura dos modelos realizar comparações com a ondulação geoidal advinda de observações GNSS conduzidas em referências de nível no Equador, a fim de verificar a consistência de 6 modelos geopotenciais. Por último, efetuar uma comparação com o modelo geoidal sul-americano - GEOID2015.

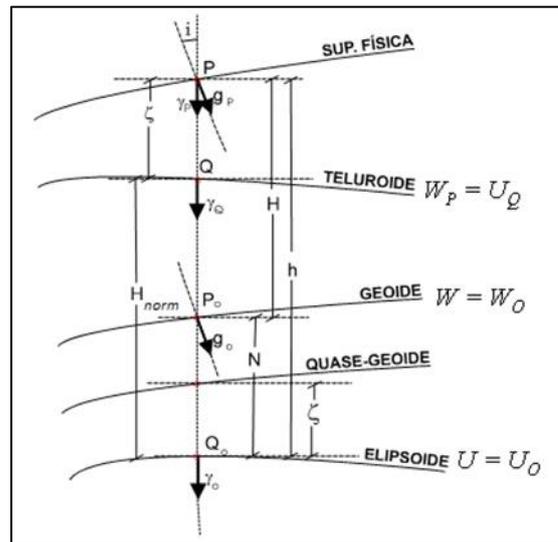
O PROBLEMA DE VALOR DE CONTORNO

O conhecimento de valores de uma determinada variável sobre uma superfície limitante e a partir daí a determinação de uma função que se relacione àquela variável conduz ao que é chamado de **problema de valor de contorno** (BLITZKOW, 1996). Em suma, no PVC o que se busca determinar é a função potencial que se relacione com um dado corpo.

O problema de valor de contorno é determinar o campo de gravidade externo às massas sendo que a superfície limitante é desconhecida. Stokes propôs uma formulação para obter o potencial perturbador em função da anomalia de gravidade sobre a superfície geoidal. Entretanto, essa proposição implica em algumas dificuldades, pois se trata de um problema interno às massas. Uma nova formulação do problema fundamental da Geodésia foi proposta por Molodenskii. Trata-se de um problema externo às massas que utiliza a superfície física como limite. Com isso não é necessário o conhecimento, mesmo que aproximado, de um modelo de distribuição de densidade no interior da crosta entre a superfície física e o geóide. Entretanto, essa superfície não tem o mesmo significado físico que a superfície geoidal, pois não é uma superfície equipotencial (GUIMARÃES; BLITZKOW, 2011).

O desconhecimento de um modelo de distribuição de densidade no interior das massas topográficas levou Molodenskii, em 1945, a propor a superfície física como superfície limitante. Neste caso, substitui-se o conceito de geóide pelo quase-geóide. A anomalia de gravidade e as deflexões da vertical referem-se à superfície física e não mais à superfície geoidal. Além disso, as anomalias de altura tomam lugar antes ocupado pelas ondulações geoidais e a superfície limitante agora não possui um sentido físico, não sendo equipotencial. A fórmula de Gauss, bem como as identidades de Green estão entre as equações básicas da teoria do potencial e integram a fundamentação matemática para a formulação moderna do PVCG. Detalhes sobre o PVCG podem ser encontrados em GUIMARÃES e BLITZKOW (2011). Para a compreensão dos problemas, alguns elementos devem ser enfatizados. A Fig. 1 ilustra as quantidades envolvidas no problema de Molodenskii.

Figura 1 – Quantidades envolvidas no problema de Molodenskii



Fonte: Blitzkow (1996).

A anomalia de altura ζ considerada a partir da superfície física é a distância entre a superfície referida e a superfície do teluroide. Ela é obtida por meio da seguinte equação (Eq.1):

$$\zeta = \frac{T}{\gamma} \quad (1)$$

SISTEMAS DE ALTITUDES

A distância que separa duas superfícies equipotenciais ou não segundo uma determinada direção pode ser definida como altitude. O PVCG possui uma estreita ligação com o estabelecimento de um sistema de altitudes e também com a obtenção da mesma (FREITAS; BLITZKOW, 1999). Existem vários tipos de altitudes, a maioria está relacionada com o campo de gravidade da Terra. Por outro lado, a definição e o uso do termo **altitude** necessita de esclarecimento.

Essencialmente, existem duas classes de altitudes: a primeira que ignora o campo de gravidade da Terra e por isso não envolve quantidade física, somente matemática (altitudes geométricas); e a segunda, vinculada à superfície equipotencial do campo de gravidade da Terra possuindo um sentido físico, além da possibilidade de uma interpretação geométrica associada (altitudes físicas). Vale ressaltar que na maioria das aplicações de levantamentos, a altitude de um ponto deve estar referida ao NMM (Nível Médio dos Mares) ou mais precisamente a uma referência de origem vertical (JEKELI, 2000).

Nos trabalhos de Engenharia que envolve água, o conhecimento de tal assunto é fundamental. Em geral, nesses projetos, trabalha-se com as diferenças de altitudes (niveladas). Entretanto, quem governa o sentido da água é a força de gravidade e não o sistema de altitude. Por consequência, selecionar um sistema que negligencia a gravidade ou então que não a considere com certo rigor, pode possibilitar que o fluxo da água não obedeça ao caminho planejado ou, então, que

a quantidade de água não seja aquela programada. Neste trabalho será abordado somente a altitude geodésica e a altitude ortométrica.

ALTITUDE GEODÉSICA

A altitude geodésica não envolve uma grandeza física em sua determinação e é definida independentemente do campo de gravidade da Terra. A altitude geodésica, também conhecida como elipsoidal, é definida como a distância entre a superfície física e a superfície elipsoidal contada ao longo da normal. Esta pode ser obtida a partir de coordenadas cartesianas, provenientes de observações GNSS, transformadas no terno geodésico, referido a um elipsoide de referência, já que a mesma se trata de uma quantidade matemática e é facilmente determinada com o auxílio de modernas técnicas. Por não estar vinculado com o campo de gravidade da Terra, esse tipo de altitude não possui relação com o fluxo da água. Logo, valores iguais para pontos situados em diferentes níveis, ou vice-versa, podem ocorrer. Assim sendo, esta altitude deve ser empregada com certas ressalvas na área de Engenharia (GUIMARÃES, 2010).

ALTITUDE ORTOMÉTRICA

A altitude ortométrica está vinculada à classe denominada de altitudes físicas ou científicas, no qual estão vinculadas a uma grandeza física. As altitudes físicas são obtidas pela combinação de valores da aceleração de gravidade e da diferença de altitude dos pontos nivelados.

Tendo como base a fórmula do número geopotencial, se a variável g corresponde à gravidade real média entre o ponto observado e a superfície geoidal, a altitude será a ortométrica. Esta se trata da distância entre a superfície geoidal até o ponto de interesse na superfície física da Terra, medida ao longo da vertical (HOFMANN-WELLENHOF; MORITZ, 2005).

$$H_{ort} = \frac{C}{\bar{g}} \quad (2)$$

sendo \bar{g} dado por:

$$\bar{g} = \frac{1}{H_{ort}} \int_0^{H_{ort}} g dH \quad (3)$$

A altitude ortométrica é obtida dividindo o número geopotencial pelo valor médio de gravidade entre o ponto de interesse e a superfície de referência correspondente (geoidal). Para o cálculo exato da altitude ortométrica seria necessário conhecer as variações de gravidade ou a distribuição de densidade das massas no interior da crosta, porém isto não é possível. Outra alternativa é calculá-la, de modo aproximado, através da diferença entre a altitude geodésica e a ondulação geoidal, no qual para a determinação de N também é necessário a hipótese do conhecimento de um modelo de densidades das massas no interior da crosta.

A MISSÃO GOCE

Lançado em março de 2009, o satélite GOCE foi uma missão da ESA (*European Space Agency*) voltada para mensurar o campo gravitacional do planeta e modelar o geóide, obedecendo a altos padrões de acurácia e resolução. O resultado obtido pela missão, bem como um conhecimento mais apurado das anomalias de gravidade, se faz importante para melhorar a compreensão acerca dos fenômenos que ocorrem no interior da Terra, tais como a física e a dinâmica associadas ao vulcanismo e aos terremotos (ESA, 2006). Desde então, os pesquisadores têm acesso aos mais acurados modelos do geopotencial, o que tem possibilitado um melhor entendimento da geodinâmica da Terra. Seu principal objetivo foi obter um modelo do campo gravitacional com nível de acurácia de ~1- 2 cm para as alturas geoidais e de nível 1-2 mGal para distúrbios de gravidade, além de alcançar uma resolução espacial melhor que 100 Km (VISSER et al., 2001; RUMMEL, 2005).

O principal instrumento embarcado no GOCE foi o Gradiômetro Eletrostático de Gravidade (*Electrostatic Gravity Gradiometer – EGG*). Este equipamento consistiu em três pares de acelerômetros capacitivos montados em uma estrutura estável. Cada acelerômetro possuía uma massa de prova que flutuava em uma pequena caixa e era mantida no centro desta por forças eletrostáticas (por meio da aplicação de tensão entre a caixa e os diferentes lados da massa de prova em formato paralelepípedo). Esta é a informação de entrada para a investigação que, posteriormente determina onde a água nos oceanos flui (DRINKWATER et al., 2007; FEHRINGER et al., 2008). O *Satellite-to-Satellite Tracking Instrument (SSTI)* foi outro importante componente da carga útil do GOCE. Foi um receptor desenvolvido para operar a baixas órbitas, com o objetivo de fornecer apoio à recuperação do campo gravitacional terrestre através do rastreamento simultâneo de 12 sinais de satélites GPS, trabalhando em dupla frequência (L1/ L2). O equipamento também fornecia dados científicos e informações em tempo real sobre posição espacial e velocidade para uma precisa determinação de órbitas (DRINKWATER et al., 2007; FEHRINGER et al., 2008; GUIMARÃES, 2013).

MODELOS DO GEOPOTENCIAL ADVINDOS DA MISSÃO GOCE

Três soluções, baseadas somente nas informações dos satélites GOCE, foram concebidas e são descritas a seguir:

- a) DIR (*DIRect solution*): Modelo da gravidade combinado (dados do GRACE + terrestre + altimetria); usa também, dados de órbitas dinâmicas de GOCE e gradiometria como dados de observação definidos;
- b) TIM (*TIME-wise solution*): Modelo que usa órbitas cinemáticas de GOCE e gradiometria como dados de observação definidos;
- c) SPW (*Space-Wise solution*): Modelo que utiliza um conhecimento a priori de longos comprimentos de onda e órbitas cinemáticas de GOCE e gradiometria como dados de observação definidos.

Em linhas gerais, a aproximação DIR utiliza o método de colocação por mínimos quadrados do problema inverso e todos os modelos são estabelecidos para até um grau e ordem 240. No que tange o processo de redução dos dados

tem-se uma combinação das equações normais obtidas das observações do GPS SSTI e outras de observações por *Satellite Gravity Gradiometry* (SGG) (PAIL et al., 2011). Já em relação à solução TIM tem-se uma solução única, no qual é baseada apenas em dados do GOCE e considera o gradiente gravitacional e observações de órbitas como medidas de séries temporais ao longo do rastreamento dos satélites. Tal situação é especialmente benéfica considerando-se as observações do gradiente gravitacional (PAIL et al., 2011).

Além destes, outras soluções baseadas na missão GOCE estão disponíveis. Os modelos EIGEN (FORSTE et al., 2015), por exemplo, utilizam informações da missão GRACE e LAGEOS. Já os modelos GOCO (FECHER, et al., 2016), empregam dados terrestres e altimétricos na composição das soluções.

Outro modelo que contribui para os estudos dos aspectos físicos da Geodésia é o EGM2008 (PAVLIS et al., 2008). Tal modelo foi concluído antes do lançamento da missão GOCE e teve por objetivo produzir mapas geoidais com um erro médio quadrático da ordem de 15 cm, em escala global. Este combina informações extraídas das missões CHAMP (REIGBER et al., 1996) e GRACE (GRACE, 1998), com informações da anomalia de gravidade global em uma grade de 5' x 5'. Tal modelo é o melhor resultado obtido no que tange à combinação de dados gravimétricos e altimétricos originários de diferentes fontes, fato confirmado já que este tem sido apontado como uma das melhores estruturas de dados para a formação de um Sistema Global de Altitudes (SGA) (MELO; FREITAS, 2012). Porém, deve-se levar em consideração as inconsistências do geopotencial associada a cada *Datum* vertical e particularidades das redes de nivelamento. O modelo EGM2008 está completo até o grau 2190 e ordem 2159 em termos dos coeficientes do geopotencial, apresentando resolução espacial de cerca de 9 km em todo o globo.

MATERIAL E MÉTODOS

Para a avaliação dos modelos derivados da missão GOCE, na região do Equador, foram selecionadas as soluções mais recentes (Tabela 1). Além disso, o modelo EGM2008 também foi empregado nas avaliações.

Tabela 1 – Modelos do geopotencial

Modelo	Ano	Grau	Dados
GOCO05c	2016	720	S(GOCE, GRACE), G, A
EIGEN-6S4	2016	300	S(GOCE, GRACE, LAGEOS)
EIGEN-6C4	2014	2190	S(GOCE, GRACE, LAGEOS), G,A
GO_CONS_GCF_2_ TIM_R5	2014	280	S(GOCE)
GO_CONS_GCF_2_ DIR_R5	2014	300	S(GOCE, GRACE, LAGEOS)
EIGEN-6C3STAT	2014	1949	S(GOCE, GRACE, LAGEOS), G, A
EGM2008	2008	2190	S(GRACE, CHAMP), G, A

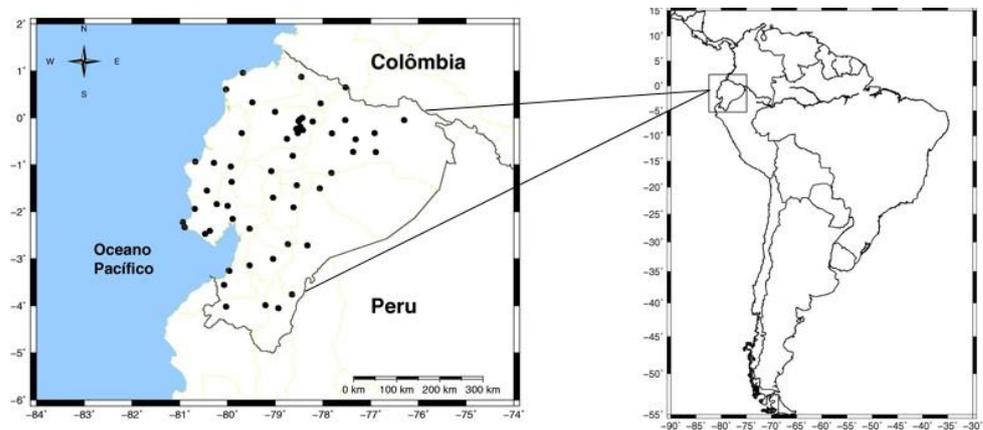
S = dados de satélite; G = dados gravimétricos; A = dados altimétricos

Fonte: Autoria própria (2017).

As informações foram adquiridas a partir do acesso ao Centro Global de Modelos Globais da Terra (ICGEM) disponível no endereço eletrônico <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/ICGEM.html>. O site possui um serviço de cálculo que foi utilizado para estimar as anomalias de altura. Estas foram obtidas para grau e ordem 200 e também para o grau máximo de cada modelo. Para tanto, foi escolhido uma resolução de 5' x 5', além do sistema de referência WGS84 (*World Geodetic System 1984*) e o sistema livre de marés (*tide free*). A área de estudo dos modelos do geopotencial está compreendida entre as latitudes 2° a -6° e longitudes -75° a -82°.

A anomalia de altura advinda dos modelos do geopotencial foi comparada com 60 estações GNSS/nivelamento (Fig. 2). As informações foram disponibilizadas pelo Instituto Geográfico Militar (IGM) do Equador e estão distribuídas na área costeira e montanhosa do país. Verifica-se que na região leste do país não há estações, uma vez que se trata da região Amazônica e de difícil acesso para implantação dos pontos.

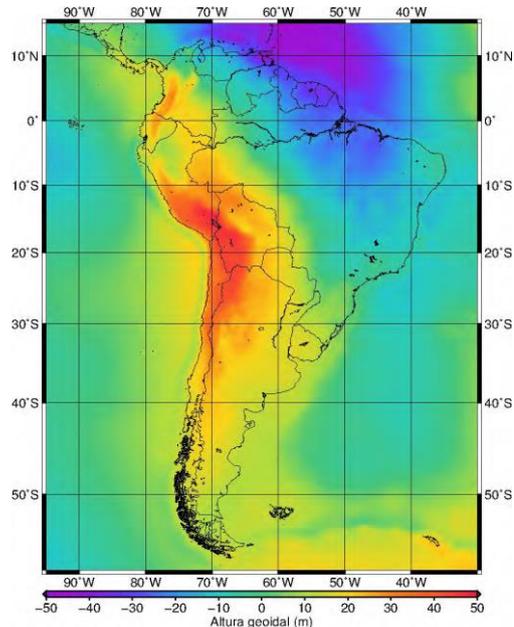
Figura 2 – Distribuição das estações GPS sobre nivelamento



Fonte: Autoria própria (2017).

A ondulação geoidal advinda do modelo geoidal da América do Sul – GEOIDE_AS2015 (BLITZKOW, et al. 2015) foi utilizada na comparação com as estações GNSS/nivelamento. O GEOIDE_AS 2015 (Fig. 3) foi calculado com base no modelo do geopotencial EIGEN-6C4, grau e ordem 200. O modelo foi calculado com auxílio do pacote de software canadense SHGEO (ELLMAN, 2005a; 2005b). Na área terrestre utilizou-se as anomalias de gravidade completa de Bouguer e Helmert, além do efeito topográfico indireto primário. Na área oceânica foi utilizada a anomalia média ar livre, derivada do modelo DTU10 (ANDERSEN, 2010). A componente de curto comprimento de onda foi estimada via FFT (*Fast Fourier Transform*) com o *kernel* modificado de Stokes.

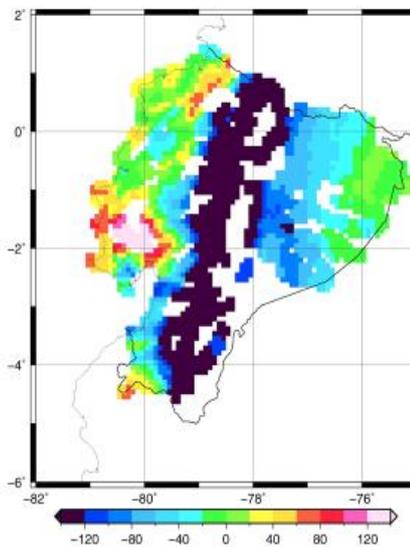
Figura 3 – Modelo geoidal da América do Sul



Fonte: Bliztkow et al. (2015).

A Fig. 4 ilustra a anomalia de Bouguer no Equador utilizada no cálculo do modelo geoidal sul-americano.

Figura 4 – Anomalia completa de Bouguer (mgal) para uma grade de 5'



Fonte: Bliztkow et al. (2015).

A comparação entre a ondulação geoidal derivada do GNSS/nivelamento com a anomalia de altura advinda dos modelos do geopotencial foi realizada em termos de diferença média quadrática (*root mean square difference*), uma vez que nenhuma das variáveis pode ser considerada verdadeira ou estimada. Na estatística utiliza-se a terminologia erro médio quadrático (*root mean square error*) quando se compara uma grandeza considerada verdadeira com outra observada. No caso do desvio médio quadrático (*root mean square deviation*) a comparação é realizada a partir de valores estimados ou preditos por um modelo e a grandeza observada.

A primeira análise (Eq. 4) compara pontualmente a ondulação geoidal derivada do GNSS/nivelamento com a anomalia de altura oriunda dos modelos do geopotencial, além da comparação com a ondulação geoidal do geóide da América do Sul.

$$\text{Diferença Padrão} = N_{\text{GNSS/nivelamento}} - \zeta_{\text{MG}} \quad (4)$$

A segunda análise compara pares de pontos a partir da diferença de ΔN das estações GNSS/nivelamento e dos modelos do geopotencial, além do modelo geoidal, relacionados à distância que separa as estações. Nesse caso utilizou-se a expressão **diferença relativa**. A partir da (Eq. 5) e (Eq.6) é possível calcular a diferença relativa (Eq. 7):

$$N_{\text{GNSS/NIV1}} - N_{\text{GNSS/NIV2}} = \Delta N_{\text{GNSS/NIV}} \quad (5)$$

$$\zeta_{\text{MG1}} - \zeta_{\text{MG2}} = \Delta \zeta_{\text{MG}} \quad (6)$$

$$\text{difrel} = (\Delta \zeta_{\text{MG}} - \Delta N_{\text{GNSS/NIV}}) / \text{Distância} \quad (7)$$

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Duas análises foram realizadas: a primeira compara pontualmente a ondulação geoidal obtida pelo GNSS/Nivelamento com a anomalia de altura fornecida pelos modelos do geopotencial, além da ondulação geoidal derivada do modelo geoidal sul americano (GEOIDE_AS 2015). Para esse caso utilizou-se o termo **comparação absoluta** descrito na próxima seção. A segunda compara pares de pontos a partir da diferença de ΔN do GNSS/Nivelamento e dos modelos do geopotencial, além do modelo geoidal sul americano relacionados à distância que separa as estações. Nesse caso utilizou-se a expressão **comparação relativa**.

COMPARAÇÃO NA FORMA ABSOLUTA

A comparação absoluta foi realizada utilizando 6 modelos derivados da missão GOCE, além do modelo EGM2008 e o modelo geoidal GEOIDE_AS 2015. No cálculo dos modelos do geopotencial foi utilizado grau e ordem 200, além do grau máximo de cada modelo. A escolha de truncar os modelos até o grau 200 é que a partir desse valor os modelos perdem acurácia e não apresentam a mesma performance espectral, em termos das funções harmônicas esféricas (GRUBER et al., 2011; GUIMARÃES et al., 2012). A Tab. 2 mostra os resultados da comparação absoluta em termos de média, desvio padrão, máximo e mínimo.

Tabela 2 – Resultados da comparação absoluta (metros)

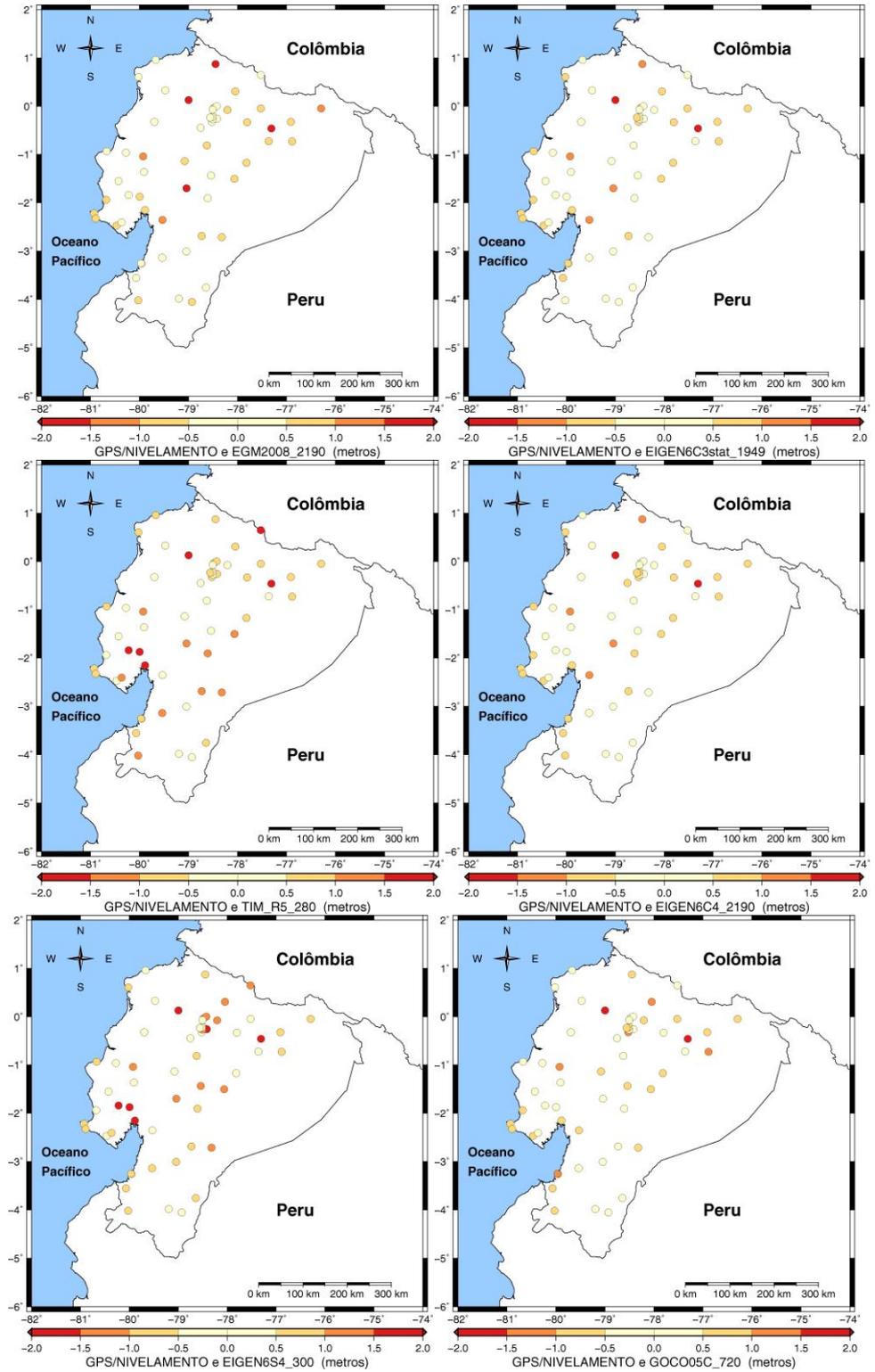
Modelos	Grau e Ordem	Média	Desvio padrão	Máximo	Mínimo
GOCO 05c	200	0,10	1,24	2,98	-2,72
	Máx	0,22	0,64	1,25	-1,98
EIGEN 6S4	200	0,11	1,25	2,98	-2,71
	Máx	0,04	0,97	2,61	-2,28
EIGEN 6C4	200	0,27	1,20	2,88	-2,68
	Máx	0,32	0,59	1,25	-1,95
TIM R5	200	0,29	1,19	2,98	-2,65
	Máx	0,25	0,93	2,79	-2,21
DIR R5	200	0,29	1,20	2,98	-2,65
	Máx	0,22	0,92	2,61	-2,28
EIGEN 6c3 STAT	200	0,26	1,20	2,90	-2,70
	Máx	0,30	0,60	1,30	-1,94
EGM 2008	200	0,25	1,26	3,18	-2,81
	Máx	0,31	0,67	1,56	-1,95
GEOIDE_AS 2015 (EIGEN 6C4)		1,02	0,69	2,28	-1,75

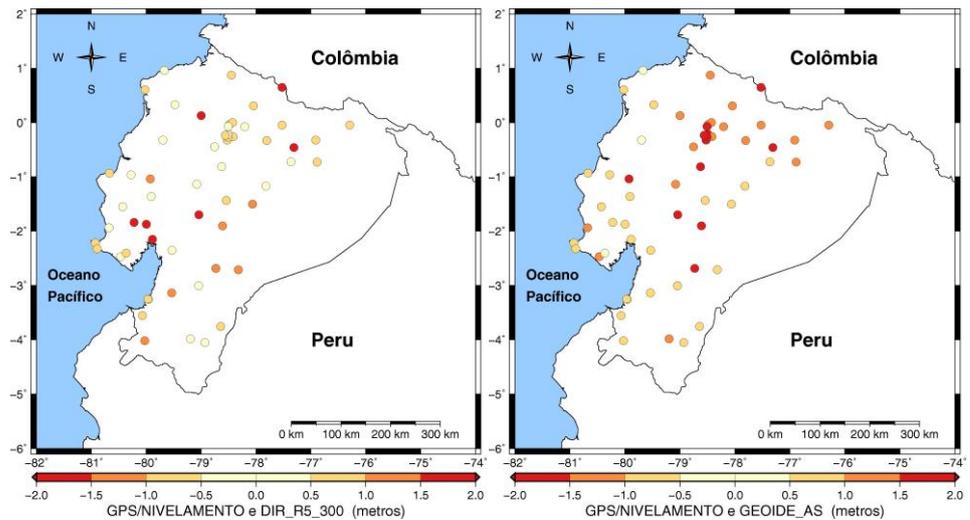
Fonte: Autoria própria (2017).

Verifica-se na Tab. 2 que para o grau e ordem 200 os modelos EIGEN 6C4, TIM R5, DIR R5 e EIGEN-6C3 STAT tiveram desvio padrão entre 1,19 a 1,20 m, mostrando consistências entre eles. Para o grau e ordem máximo de cada modelo, o EIGEN 6C4 apresentou diferença de 0,59 m e o modelo EIGEN-6C3STAT 0,60 m. O primeiro apresenta grau e ordem 2190, enquanto o segundo 1949. Os modelos GOCO05c e EGM2008 também apresentaram consistência em relação aos outros modelos com valores de desvio padrão de 0,64 e 0,67 m. Os 3 primeiros modelos mencionados são baseados em dados da missão GOCE, enquanto o EGM2008 utilizou somente dados do GRACE. O modelo geoidal para a América do Sul apresentou desvio padrão de 0,69 m.

Para melhor visualização dos resultados foram gerados mapas (Fig. 5) contendo a comparação das 60 estações GNSS/nivelamento com cada modelo do geopotencial.

Figura 5 – Comparação dos resultados advindos do levantamento GNSS/nivelamento e dos modelos do geopotencial





Fonte: Autoria própria (2017).

COMPARAÇÃO NA FORMA RELATIVA

Para a análise da diferença relativa, um programa foi desenvolvido para selecionar pares de pontos espaçados entre 20 – 50 km. Um total de 18 pares foi selecionado, totalizando 36 pontos das 60 estações disponíveis. A Tab. 3 mostra os resultados em termos de média, desvio padrão, máximo e mínimos. Nesta comparação, utilizou-se o grau e a ordem máxima de cada modelo. Verifica-se pela tabela que os modelos GOCO05c, EIGEN6C4, EIGEN6c3STAT, EGM2008, GEOIDEAS2015 apresentaram resultados consistentes em termos de desvio padrão.

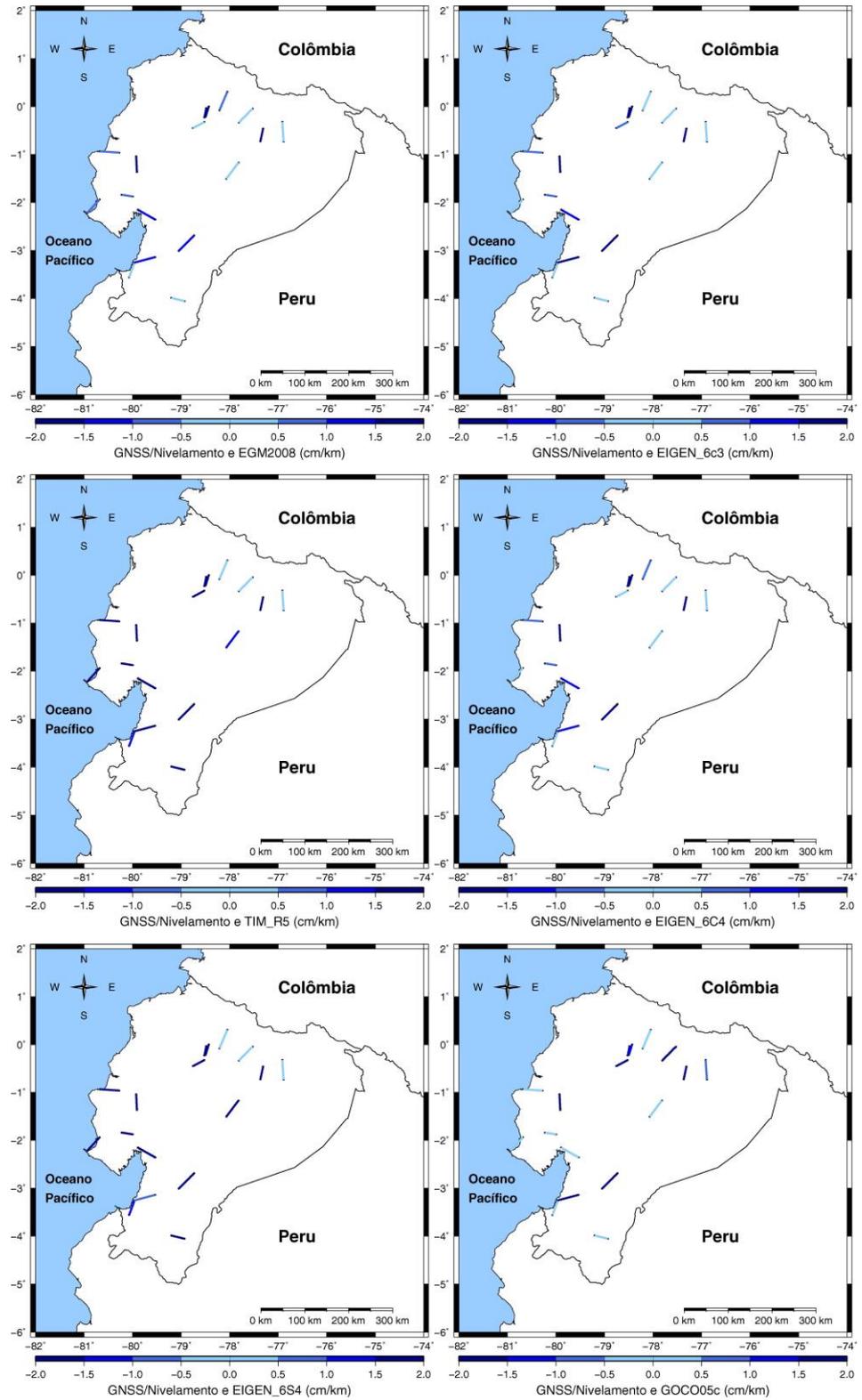
Tabela 3 – Resultados da comparação relativa

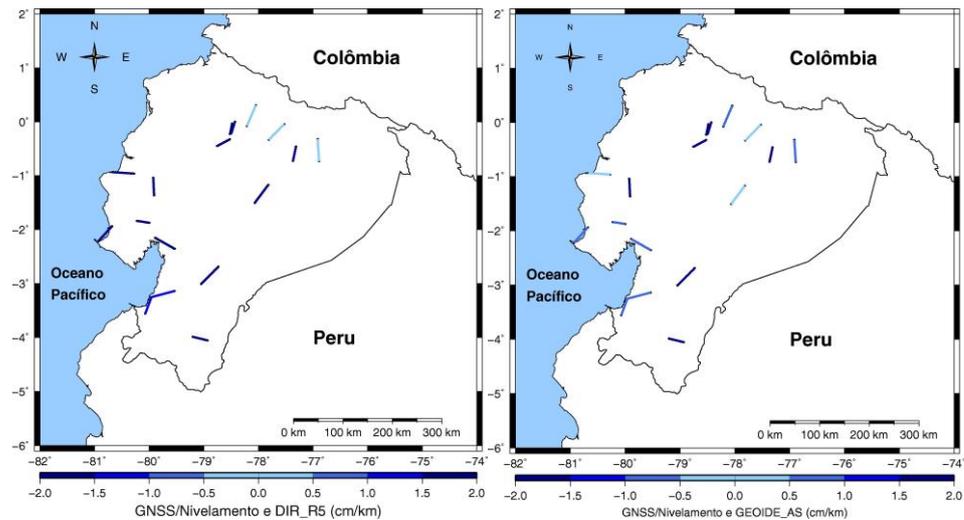
Modelos	Média (cm)	Desvio Padrão (cm/km)	Máximo (cm)	Mínimo (cm)
GOCO05c	0,13	2,52	3,66	8,06
EIGEN-6S4	0,28	3,17	4,70	8,69
EIGEN-6C4	0,03	2,56	4,90	8,06
TIM R5	0,43	3,18	4,77	8,49
DIR R5	0,36	3,23	4,70	8,69
EIGEN 6c3 STAT	0,01	2,53	4,71	8,06
EGM2008	-0,04	2,56	5,04	8,23
GEOIDE_AS 2015 (EIGEN-6C4)	0,22	2,56	4,30	8,26

Fonte: Autoria própria (2017).

A Fig. 6 ilustra os resultados para os modelos EIGEN-6C4 e GOCO05c. Verifica-se que as estações GNSS/nivelamento selecionadas pelo programa encontram-se no norte, sul e sudoeste do país.

Figura 6 – Comparação relativa das estações GNSS/nivelamento





Fonte: Autoria própria (2017).

CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi avaliar a potencialidade dos modelos mais recentes derivados da missão GOCE no Equador.

Na primeira avaliação, a ondulação geoidal derivada de 60 estações GNSS/nivelamento foi comparada à anomalia de altura de 6 modelos do geopotencial derivado da missão GOCE, além do modelo EGM2008 e do modelo geoidal da América do Sul. As comparações foram realizadas utilizando o grau e ordem 200, além do grau máximo de cada modelo. Constatou-se que o modelo EIGEN6C4 apresentou diferença de 0,59 m e o modelo EIGEN6C3STAT 0,60 m. O primeiro, apresenta grau e ordem 2190, enquanto o segundo 1949. Os modelos GOCO05c e EGM2008 também apresentaram consistência em relação aos outros modelos com valores de desvio padrão de 0,64 e 0,67 m. Tais modelos, além dos dados derivados das missões satelitais, também utilizam em sua composição, dados de altimetria e de gravimetria. Tal fato explica uma melhor consistência desses modelos com as estações GNSS/nivelamento, em relação aos modelos que só utilizam dados de satélites (EIGEN 6S4, TIM R5 e DIR R5).

A segunda avaliação comparou as estações GNSS/nivelamento com os modelos do geopotencial de maneira relativa. Um total de 18 pares foi selecionado, totalizando 36 pontos das 60 estações disponíveis. Novamente, os modelos EIGEN6C4, EIGEN6C3STAT, GOCO05c e EGM2008 apresentaram maior consistência na comparação.

Os resultados obtidos apontaram a potencialidade dos modelos derivados da missão GOCE quando comparados com os modelos do geopotencial e também com o GEOIDEAS2015 sendo factíveis para aplicações que requerem precisão sub-métrica.

Evaluation of potentially GOCE mission models in Ecuador

ABSTRACT

Several Global Geopotential Models based on GOCE data have been available since 2010. Some of them use combinations of different satellite missions, while others only use GOCE solution. This paper presents the evaluation and analyzes of recent approach using GOCE data in Ecuador. Two assessments have been made, an absolute comparison and a relative comparison. The first one we compared the anomaly height derived from GOCE-based models with the geoidal heights from 60 GNSS stations on levelling Bench Marks. The models were evaluated up to degree and order 200 and with maximum degree. The findings show an improvement for GOCE-based models EIGEN 6C4 (0.59 m) and EIGEN 6c3 STAT (0.60 m) for maximum degree and order in terms of RMS in comparison with EGM2008 (0.67 m) and the geoid of South America (0.69 m), For the others models the results did not exceed 0.97 m. The results of relative comparison show that EIGEN 6C4, EIGEN 6c3 STAT and GOCO 05C are very consistent with EGM2008 and the geoid of South America.

KEYWORDS: GOCE. GNSS. Levelling.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao Instituto Geográfico Militar do Equador por ceder os dados GNSS/nivelamento e ao CNPq pela concessão da bolsa.

REFERÊNCIAS

ANDERSEN, O.B. The DTU10 Gravity field and Mean sea surface. **Second International Symposium of the Gravity Field Service – IGFS2010**. Poster Presentation 20 – 22 September 2010 Fairbanks, Alaska, 2010. 17 p.

BLITZKOW, D. **O problema do valor de contorno da geodésia: resultados práticos para a América do Sul**. 1996. 81p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

BLITZKOW, D.; MATOS, A.C.O.C; COSTA, D.S.; GUIMARÃES, G.N.; PACINO, LAURÍA, E.A.; CASTRO JUNIOR, NUNES M.; CASTRO JUNRIO, C.A.C.; FLORES, F.; ECHALAR, A.; GUEVARA, N.H.; ALVARES, R. Gravity surveys and quasi-geoid model for South America. Presented in 3rd International Gravity Field Service (IGFS) General Assembly, Xangai, June 30 – July 06, 2014.

DRINKWATER, M.R.; et al. The GOCE gravity mission: ESA's first core earth explorer, **Proceedings...** of 3rd International GOCE User Workshop, 6-8 November, 2006, Frascati, Italy, ESA SP-627, ISBN 92-9092-938-3, p.1-8, 2007.

ELLMANN, A. SHGEO software packages-An UNB Application to Stokes- Helmert Approach for Precise Geoid Computation, **reference manual I** , 36 p. 2005a. Disponível em: http://gge.unb.ca/Research/GRL/GeodesyGroup/SHGeo_package/Manual/SHGeo_manual_I_v2.pdf Acesso: em 29 de abril de 2015

ELLMANN A. SHGEO software packages-An UNB Application to Stokes-Helmert Approach for Precise Geoid Computation, **reference manual II**, 43 p. 2005b. Disponível em: http://gge.unb.ca/Research/GRL/GeodesyGroup/SHGeo_package. Acesso em: 29 de abril de 2015

ESA – ESA's gravity mission – GOCE. Revised June 2006. ESA Publications Division. ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 2006.

FECHER, T.; PAIL, R.; GRUBER, T.; The combined gravity field model GOCO05C. Disponível em: http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/documents/GOCO05c-egu16_fecheretal.pdf Acesso em: 31/08/2016

FEHRINGER, M.; et al. GOCE and its gravity measurements systems, **ESA Bulletin** **133**, p. 14-23, February 2008.

FÖRSTE, C.; BRUINSMA, S.L.; ABRIKOSOV, O.; LEMOINE, J.-M.; SCHALLER, T.; GÖTZE, H.-J.; EBBING, J.; MARTY, J.C.; FLECHTNER, F.; BALMINO, G.; BIANCALE, R.; EIGEN-6C4 The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse. Disponível em: <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/documents/Foerste-et-al-EIGEN-6C4.pdf>
Acesso em: 31 de agosto de 2016.

FREITAS, S.R.C.; BLITZKOW, D. Altitudes e Geopotencial. **IGeS Bulletin N.9** International Geoid Service. Junho 1999, Milão, p. 47-62, 1999.

GEMAEL, C. **Introdução a Geodésia Física**. Curitiba: Editora UFPR, 304 p. 1999.

GOLDANI, D.; MAGRO, F.H.S.; GENRO, R.S.; SALOMONI, R. Determinação de um modelo geoidal local para o município de Porto Alegre. **Anais do I Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Informação**. Recife 1-4 Setembro, 2004. Disponível em: <http://www.ufpe.br/cgtg/ISIMGEO/CD/html/geodesia/Artigos/G016.pdf>
Acessado em 29 de abril de 2014.

GUIMARÃES, G. N.. **A altimetria e o modelo geoidal no estado de São Paulo**. 2010 119 f. Dissertação (Mestrado em Informações Espaciais) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). São Paulo. 2010. Disponível em <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-20102010-170156/en.php> Acesso em: 14 de Janeiro de 2015.

GUIMARÃES, G. N.. **A geoid model in the state of São Paulo: an attempt to evaluation of different methodologies**. 2013 144 f. Tese de Doutorado (Doutorado em Informações Espaciais) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). São Paulo. 2013. Disponível em <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-30072013-234021/pt-br.php> Acesso em: 14 de Janeiro de 2015.

GUIMARÃES, G. N.; BLITZKOW, D. Problema de valor de contorno da Geodésia: uma abordagem conceitual. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 17, n. 4, dez. 2011.

GUIMARÃES, G. N.; MATOS, A.C.O.C.; BLITZKOW, D. An evaluation of recent GOCE geopotential models in Brazil. **Journal of Geodetic Science**, v. 2, p 144-155, 2012.

GRACE – Gravity recovery and climate experiment: Science and mission. Requirements document, revision A, JPLD-15928, NASA’s Earth System Science Pathfinder Program, 1998. 84 p.

GRUBER T.; VISSER P.N.A.M.; ACKERMANN C.; HOSSE M. Validation of GOCE gravity field models by means orbit residuals and geoid comparisons, **Journal of Geodesy**. 2011. DOI:10.1007/s00190-011-0486-7.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; MORITZ, H. **Physical geodesy**. 2nd Edition, New York: Springer. 2005.

IBGE. Relatório de Ajustamento Simultâneo da Rede Altimétrica de Alta Precisão do Sistema Geodésico Brasileiro. Disponível em: ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rede_altimetrica/relatorio/relatorioajustamento.pdf Acesso em: 14 de Janeiro de 2016.

JEKELI, C. Heights, the geopotential, and vertical datums. The Ohio State University, Columbus, USA: Department of Geodetic Science, (Report 459). 34 p. 2001.

MAYER-GUERR T, et al. The combined satellite gravity field model GOCO05s. Presentation at EGU 2015, **Geophysical Research Abstracts** Vol. 17, EGU2015-12364, Vienna, 2015.

MELO, L. F. S.; FREITAS, S. R. C. Avaliação de Modelos Globais do Geopotencial para os estados do Maranhão e Piauí. Universidade Federal do Paraná (UFPR). In: **Bol. Ciênc. Geod.**, sec. Artigos, Curitiba, v. 18, no 2, p.203-224, abr-jun, 2012. Disponível em http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1982-21702012000200003&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt. Acesso em 20 de janeiro de 2015.

PAIL, R.; et al. GOCE gravity field model derived from orbit and gradiometry data applying the time-wise method Proceedings... of the ESA Living Planet Symposium, 28 June - 2 July 2010, Bergen, Norway, See also: earth.esa.int/GOCE. 2010.

PAVLIS, N.K.; HOLMES, S.A.; KENYON, S.C.; FACTOR, J.K. An Earth gravitational model to degree 2160: EGM2008. Presented at the 2008 General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, April 13-18, 2008. 38 p.

REIGBER, C.; et al. CHAMP phase-B executive summary. GFZ, STR96/13, 1996.

RUMMEL, R. Geoid and gravity in earth sciences—an overview. Workshop on Enabling Observation Techniques for Future Solid Earth Missions, Jan 30–Feb 01, 2003, Int. Space Sci. Inst. Bern Switzerland, Earth Moon and Planets n. 94, p. 3-11, 2005.

VISSER, P.N.A.M.; VAN DEN IJSSEL, J; KOOP, R.; KLEES, R. Exploring gravity field determination from orbit perturbations of the European Gravity Mission GOCE. **Journal of Geodesy**, v. 75, p. 89-98, 2001.

Recebido: 27 out. 2016

Aprovado: 28 ago. 2017

DOI: 10.3895/rbgeo.v5n4.5513

Como citar: SOUSA, L. A. S.; GUIMARÃES, G. N. Avaliação da potencialidade dos modelos da missão GOCE no Equador. **R. bras. Geom.**, Curitiba, v. 5, n. 4, p. 504-523, out/dez. 2017. Disponível em: <<https://periodicos.utfr.edu.br/rbgeo>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Luís Antônio Soares e Sousa

Rua Miguel Caluf, 27, Apto 104, CEP 82900-270, Curitiba, Paraná, Brasil.

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

