

ESTUDO COMPARATIVO DOS MODELOS GRAVIMÉTRICOS GLOBAIS EIGEN-GL04C, EIGEN-CG03C E EIGEN-05C UTILIZANDO UM MODELO REGIONAL E DADOS GPS/NIV PARA O ESTADO DO PARANÁ¹.

KAROLINE PAES JAMUR
SILVIO ROGÉRIO CORREIA DE FREITAS

Universidade Federal do Paraná - UFPR
Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas - CPGCG
Jardim das Américas – C. Politécnico - Curitiba-PR
Caixa Postal 19001 – CEP 81.531-990
{karol.mestrado, sfreitas}@ufpr.br

RESUMO

Apresenta-se análise qualitativa das alturas geoidais associadas aos modelos geopotenciais globais combinados: EIGEN-GL04C advindo da missão gravimétrica GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) e da missão laser (LAGEOS - *Laser Geodynamics Satellites*); EIGEN-CG03C que utiliza dados da missão CHAMP (*Challenging Minisatellite Payload*) e GRACE; e o modelo EIGEN-05C advindo das missões laser (LAGEOS) e gravimétrico (GRACE). São utilizados, para a avaliação destes modelos, dados de observações GPS sobre RN's e um modelo local de geóide gravimétrico onde foi empregada a técnica *remove-restore*, que consiste na decomposição das diferentes contribuições espectrais da altura geoidal determinada por Transformada Rápida Fourier (FFT). Nesse modelo, foi utilizado o *Preliminary Geopotential Model 2000A* (PGM2000A), desenvolvido até o grau 360, como referência para os longos e médios comprimentos de onda, bem como um modelo digital gravimétrico obtido a partir da combinação de dados gravimétricos e topográficos para melhorar a resolução para os comprimentos de onda mais curtos. A avaliação foi feita em uma região de estudo compreendida entre

¹ Uma versão Prévia desse trabalho foi apresentada no II Simpósio Brasileiro de Geomática e V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas sendo complementado no II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

os paralelos 22°S e 27°S, e os meridianos 48°W e 55°W que envolve todo o Estado do Paraná.

Palavras-chaves: Modelos Geopotenciais; Modelos geoidais; Missão CHAMP; Missão GRACE.

ABSTRACT

A qualitative analysis of geoid height associated to the of combined global gravity models EIGEN- GL04C obtained from the new gravimetric missions GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) and the laser mission (LAGEOS - Laser Geodynamics Satellites); the global gravity model EIGEN-CG03C coming from CHAMP (Challenging Minisatellite Payload) and GRACE missions; and the new model EIGEN-05C obtained from the missions laser (LAGEOS) and gravimetric (GRACE) are presented. For evaluating these models were used geoid heights derivates from GPS observation on bench-marks and a local gravity geoid model based on the remove-restore technique trough Fast Fourier Transform (FFT) for decomposing the different contributions of the height. The Preliminary Geopotential Model 2000 (PGM2000A) developed up to degree 360 was used as reference for long and regional wavelengths; a gravimetric digital model obtained from the combination of gravimetric and topographic data and terrestrial data was used to improve the resolution for the modeling short wavelengths. The evaluation was made in a region of study understood between the parallels 22°S and 27°S, and the meridians 48°W and 55°W. Inside this region is the Paraná State.

Keywords: Geopotential Models; Geoidal Models; CHAMP Mission; GRACE Missions.

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento do campo da gravidade terrestre é fundamental como instrumento para a determinação das dimensões e forma da Terra, assim como os elementos para investigações acerca de seu comportamento dinâmico (IAG, 2008).

O geóide, superfície equipotencial (ou geope) do campo da gravidade da Terra, que coincide com o nível médio dos mares não perturbados, é a referência para as altitudes ortométricas. Especificamente, com a definição mais aceita na atualidade, a de Gauss – Listing, (Heck, 2004), é o geope com geopotencial W_0 que pode ser obtido por ajustamento à superfície média dos oceanos com superfície S , onde cada elemento de superfície d_s tendo geopotencial W de forma tal que:

$$\int_S (W - W_0)^2 ds = \min \quad (1)$$

A superfície do mar não perturbada, ou seja, aquela da qual se abstraiu os efeitos dinâmicos e físico-químicos, está sujeita à ação da gravidade terrestre e, portanto, atingindo um estado de equilíbrio tal que é assumida como superfície

equipotencial. Essa superfície fechada, apesar de ser contínua e suave, não é analítica em virtude da variação na densidade das massas terrestres, o que implica em ondulações na superfície geoidal. Assim, não é adequada para referência no posicionamento horizontal. Sendo uma superfície de nível, é ideal como referencial altimétrico, para a representação da topografia terrestre e do mar.

Existem evidências de melhorias alcançadas nos últimos anos na obtenção dos valores da gravidade a partir de levantamentos gravimétricos terrestres, aéreos e nos oceanos com altimetria por satélite. Mas, mesmo com estes avanços, existem ainda grandes vazios gravimétricos na região continental, onde a obtenção dos dados terrestres é praticamente impossível (ICGEM, 2008). Outro problema nos dados terrestres é a heterogeneidade em relação à precisão, à acurácia e ao sistema de redução adotado. Além disso, dados oceânicos não são corrigidos da topografia da superfície do mar, fazendo com que apenas os longos comprimentos de onda sejam conhecidos.

Desde o início da era espacial, as investigações sobre o campo gravitacional da Terra têm usado perturbações das órbitas dos satélites, induzidas pelo efeito gravitacional de massas heterogêneas, gerando informações associadas a feições de longo comprimento de onda desse campo. Essas informações, associados ao campo centrífugo, possibilitam a determinação de modelos do campo da gravidade.

Os modelos desenvolvidos até o princípio da presente década resolviam feições espaciais do campo da gravidade com meio comprimento de onda maior do que 500 km sobre a superfície da Terra (REIGBER et al., 2002). A partir das novas missões gravimétricas CHAMP (*Challenging Minisatellite Payload*) e GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) existe a disponibilidade de um geóide com acurácia centimétrica, para comprimentos de onda de 270 km o que corresponde um desenvolvimento do geopotencial até o grau e ordem 75 (FLURY, 2005).

Existem diversos modelos geopotenciais globais obtidos a partir das novas missões gravimétricas, CHAMP e GRACE, considerados de alta resolução (JAMUR, 2007). Neste trabalho, serão utilizados os modelos EIGEN-CG03C, EIGEN-GL04C e EIGEN-05C numa análise qualitativa desses modelos, utilizando coordenadas geodésicas resultantes do posicionamento por GPS de Referências de Nível (RN's), pertencentes à rede altimétrica fundamental, e um modelo geoidal local já calculado para o Estado do Paraná.

1.1 Novas Missões Gravimétricas

Atualmente, uma grande quantidade de dados deve ser combinada para produzir um modelo adequado do campo da gravidade da Terra. Esses modelos possibilitam a representação de muitas características do campo da gravidade relacionadas com resoluções espectrais com comprimentos de onda de cerca de 100 km do campo de gravidade da Terra; no entanto, não conseguem solucionar características de pequena escala, principalmente em grandes corpos de água.

Featherstone (2002), concluiu que os modelos geopotenciais atuais do campo da gravidade da Terra podem ser divididos entre três classes primárias:

- Modelos geopotenciais globais, obtidos com dados somente de satélites (*satellite-only GGMs*) que, em geral são modelos derivados da análise do movimento orbital de satélites artificiais explorando o rastreo a partir de posições conhecidas na Terra.

- Modelos geopotenciais globais combinados (*combined GGMs*), que são derivados da combinação de dados de satélite (dinâmica orbital e altimetria), dados gravimétricos terrestres e oceânicos e dados de levantamentos aerogravimétricos (RAPP, 1998), o que permite a expansão para maiores graus e ordem dos harmônicos esféricos de modelos geopotenciais.

- Modelos geopotenciais globais adaptados (*tailored GGMs*), que adaptam geopotenciais gerados apenas com dados de satélites com modelos combinados ou com novos dados gravimétricos disponíveis. Em geral, o processo é efetuado por fórmulas integrais para derivar correções aos coeficientes de geopotencial existentes, ao contrário das combinações por equações normais que são utilizadas para construir modelos geopotenciais combinados (FEATHERSTONE, 2002).

Das missões CHAMP e GRACE foram obtidas melhorias de algumas ordens de magnitude nos dados e na modelagem do campo da gravidade. Permitiram uma resolução muito melhor do campo tanto na terra como no mar. Os dados das missões combinados com outras fontes de dados existentes permitiram aprimorar nossa compreensão diversos aspectos da Geodésia, Glaciologia, Hidrologia, Oceanografia, etc...

Existem diversos modelos gravimétricos globais obtidos a partir das missões CHAMP e GRACE, considerados de alta resolução. Neste trabalho foram utilizados os modelos da série EIGEN (*European Improved Gravity model of the Earth by New techniques*) EIGEN-GL04C, EIGEN-CG03C, e o novo EIGEN-05C, na análise qualitativa desses modelos, a partir de dados resultantes do posicionamento GPS sobre 104 RN's e um modelo geoidal regional obtido por FFT, chamado de PR2006-FFT.

Nos tópicos 1.2 e 1.3 são descritas as missões CHAMP e GRACE, cujos dados foram empregados para a obtenção dos modelos digitais estudados no trabalho.

1.2 CHAMP (*Challenging Minisatellite Payload*)

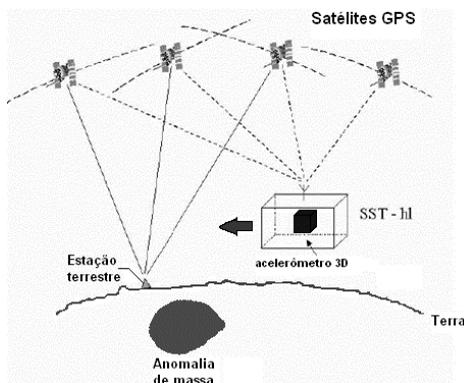
O satélite alemão CHAMP do *GeoForschungsZentrum–Potsdam* (GFZ) foi lançado em 15 de julho de 2000 na Rússia. A uma altitude de 454 km, com órbita circular e inclinação de 87° em relação ao plano do equador, possibilitando maior duração da missão, mesmo sob condições de grande atividade solar.

Pela primeira vez, um satélite de baixa altitude foi equipado com um receptor GPS, de modo que sua órbita fosse determinada com incerteza de centímetros (REIGBER, 2003a). A missão CHAMP emprega o rastreo de satélites de órbita alta

(Figura 1), relativo a uma rede de estações terrestres, principalmente as do *International GNSS Service* (IGS, 2008).

O benefício de usar essa técnica, que consiste em rastrear satélite baixo por satélite alto (*High-low inter-satellite tracking* - hl-SST), no CHAMP está em rastrear o satélite baixo por diversos satélites GPS e com boa geometria da constelação para órbitas inteiras, possibilitando avaliar as frequências mais altas no campo da gravidade da Terra. Além disso, são utilizados acelerômetros 3D a bordo do satélite CHAMP para calcular as perturbações não-gravitacionais de sua órbita (RUMMEL ET AL. 2002).

Figura 1 - O conceito do CHAMP, técnica de rastreo hl-SST.



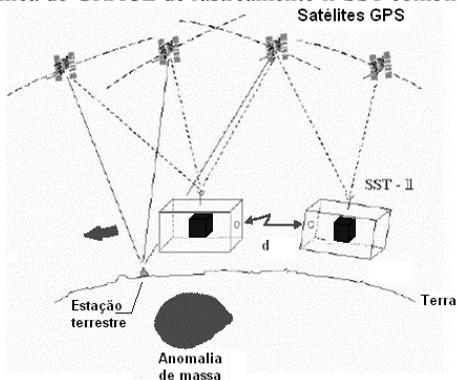
Fonte adaptada de Rummel et al., 2002.

1.3 GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment)

A missão GRACE faz parte do programa *Solid Earth and Natural Hazards* (SENH) da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), em parceria com o centro alemão de pesquisa aérea e astronáutica (DLR - *Deutsche Forschungsanstalt für Luft und Raumfahrt*). Essa missão tem como objetivo fornecer melhores informações sobre o campo da gravidade terrestre com duração de aproximadamente cinco anos, mas que ainda está ativa. Nessa missão, programada em maio de 1997 e os satélites lançados em março de 2002, consta de duas astronaves idênticas que percorrem a mesma órbita, separadas por uma distancia de cerca de 220 quilômetros em órbita aproximadamente polar, a 500 quilômetros da Terra. O movimento relativo entre dois satélites é medido por processos interferométricos sobre feixe de microondas. A quantidade de interesse é o movimento relativo dos centros de massa dos dois satélites, cujas variações da distancia são associadas com heterogeneidades laterais das massas terrestres que geram anomalias no campo da gravidade.

A missão GRACE fornece informações da estrutura do campo de gravidade da Terra a partir de medidas precisas da distância entre os dois satélites, em associação a determinação adequada de sua órbita usando GPS e feixes de microondas que percorrem o sistema conforme a Figura 2. O rastreamento utilizado é o chamado rastreamento de satélite baixo por satélite baixo, *low-low inter-satellite* (ll-SST) associado ao feixe de microondas entre os satélites, junto com a técnica de rastreamento *High-low inter-satellite* (hl-SST), com o satélite e órbita alta, GPS, rastreando ambos os satélites de órbita baixa (RUMMEL ET AL., 2002).

Figura 2 - A técnica do GRACE de rastreamento ll-SST combinado com hl-SST.



Fonte adaptada de Rummel et al., 2002.

2 DESENVOLVIMENTO

Primeiramente foi produzido o Modelo Geoidal Regional GPS/Niv, obtido com dados de posicionamento GPS sobre 104 RN's (SÁ, 2007) na região de estudo, que foi gerado em função das diferenças entre a altitude elipsóidica (hGPS) e a ortométrica (HRN), resultando na altura geoidal na RN (NGPS):

$$NGPS \approx hGPS - HRN \quad (2)$$

O modelo geoidal local utilizado neste trabalho foi criado por Goldani (2006), a partir de anomalias gravimétricas, usando a integral de Stokes através da FFT (*Fast Fourier Transform*). Nesse modelo geoidal, foi usado o PGM2000A (*Preliminary Gravitational Model 2000A*), desenvolvido até o grau 360 como referência para longos comprimentos de onda, bem como um modelo gravimétrico digital obtido a partir de dados gravimétricos e topográficos.

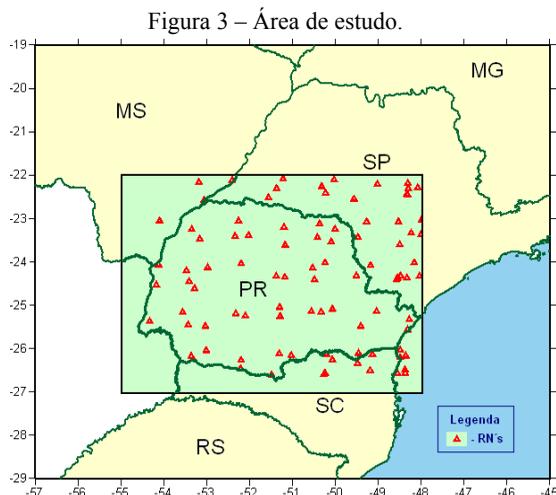
Para este trabalho foram também selecionados os modelos geopotenciais globais de alta resolução EIGEN-GL04C que combina dados da missão GRACE, da missão LAGEOS (*Laser Geodynamics Satellites*) e terrestres (gravimetria e

altimetria), o modelo EIGEN-CG03C, que combina dados das missões CHAMP, GRACE e dados terrestres (gravimetria e altimetria), e o novo modelo EIGEN-05C que foi obtido de dados laser e gravimétricos. Esses modelos foram obtidos do campo de gravidade anômalo desenvolvido em harmônicos esféricos. Seus coeficientes foram calculados a partir da análise de órbitas de satélites e de suas perturbações associadas ao campo gravitacional terrestre. A partir desses modelos, efetuando a devida transformação, obtêm-se as coordenadas geodésicas e principalmente a altura geoidal. Para isso foi utilizado um aplicativo disponível na página do ICGEM (*International Centre for Global Earth Models*) da GFZ (ICGEM, 2008) e efetuado um recorte para a área de estudo.

Todos os modelos utilizados neste trabalho foram igualmente plotados com resolução espacial de 5' de arco, empregando a interpolação por meio da krigagem, no *software Surfer™*.

2.1 Área de Estudo

A área (Figura 3) estudada situa-se entre os paralelos 22°S e 27°S, e os meridianos 48°W e 55°W, contendo todo o Estado do Paraná.



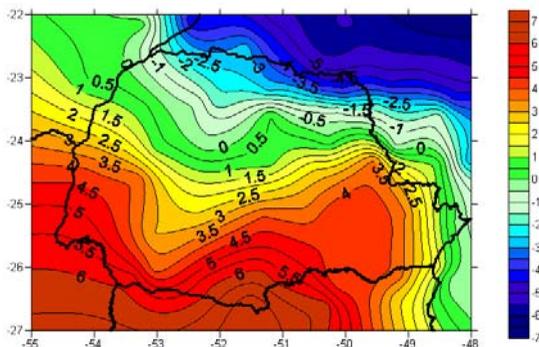
Fonte: Autora (2009).

2.2 Modelos Regionais de Base para Análise

O Modelo Geoidal Regional GPS/Niv (Figura 4) foi produzido com dados de posicionamento por GPS sobre 104 RN's na região de estudo e foi gerada em função das alturas geoidais.

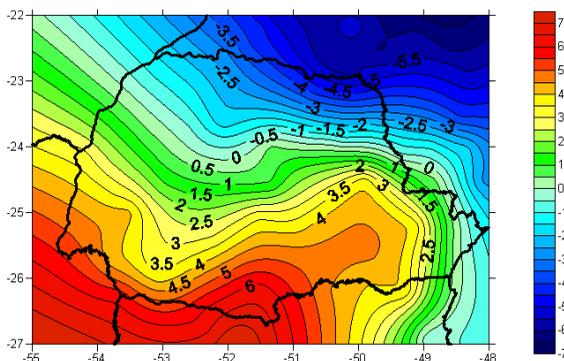
Foi efetuada uma validação do modelo geoidal regional GPS/Niv retirando 10 valores de GPS/Niv do total de 104, utilizando estes como pontos para validação. A avaliação foi realizada a partir da comparação das alturas geoidais advindas do modelo, produzido pelos pontos restantes e adotado como base de análise do RMS (*Root Mean Square*), que foram interpolados, por meio de krigagem, as alturas geoidais provindas dos pontos de validação, obtendo-se como resultado um RMS do modelo geoidal regional GPS/Niv de 5,27 cm com desvio médio de 3,40 cm.

Figura 4 - Modelo Geoidal Regional GPS/Niv;



O modelo PR2006 – FFT (Figura 5) foi criado por Goldani (2006), onde foi empregada a técnica *Remove-Restore*, para decomposição das diferentes contribuições espectrais da altura geoidal, por meio da FFT. Para isso, foi utilizado o PGM2000A, desenvolvido até o grau 360, como modelo geopotencial global, um modelo gravimétrico digital, obtido a partir da combinação de dados gravimétricos e topográficos.

Figura 5 - Modelo regional PR2006-FFT.



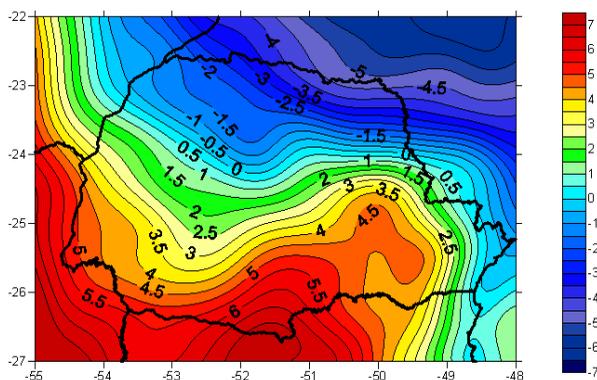
2.3 MODELOS GRAVIMÉTRICOS GLOBAIS COMBINADOS

O EIGEN-CG03C, EIGEN-GL04C e EIGEN-05C são modelos completos até o grau e a ordem 360 em termos de coeficientes harmônicos esféricos, e resolução espacial de 110 km.

O modelo geopotencial global EIGEN-CG03C (Figura 6) consiste na atualização do EIGEN-CG01C. Baseado em dados da missão CHAMP, dados de superfície (gravimetria e altimetria), e dados da missão GRACE (376 nos períodos de fevereiro a maio de 2003, julho a dezembro de 2003 e fevereiro a julho de 2004, FÖRSTE, 2005).

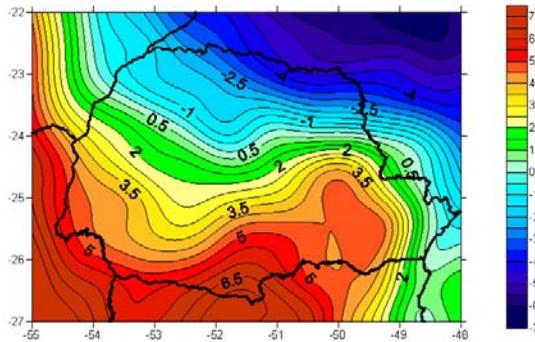
A precisão dos modelos globais preliminares obtidos com dados combinados das missões CHAMP e GRACE apresentam precisões de aproximadamente 30 cm e 8 mGal, respectivamente, para alturas geoidais e anomalias gravimétricas para a resolução espacial de cerca de 400 km. A precisão atual dos modelos combinados está em torno de 3 cm e 0,4 mGal para a mesma resolução espacial e de cerca de 30 cm e 8 mGal para resolução espacial de 100 km. (FÖRSTE, 2005).

Figura 6 – Recorte dos modelo global combinado EIGEN-CG03C



O EIGEN-GL04C (Figura 7), disponibilizado em março de 2006, é uma atualização do EIGEN-CG03C e a combinação da missão GRACE e LAGEOS, dados gravimétricos e altimétricos em forma de modelo digital com resolução de 0.5° x 0.5°. Os dados de superfície usados foram os mesmos do EIGEN-CG03C, excluindo as ondulações geoidais sobre os oceanos, que foram derivadas de alguns modelos de topografia da superfície do mar, o MSSH (*Mean Sea Surface Height*), ECCO (*Estimating The Circulation & Climate of the Ocean*) e CLS01 do CLS (*Collecte Localisation Satellites da França*).

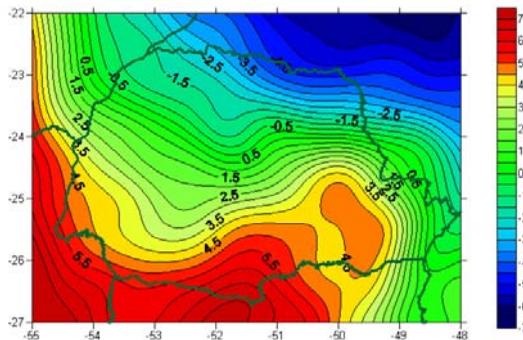
Figura 7 – Recorte do modelo global combinado EIGEN-GL04C



O EIGEN-05C (Figura 8) é um modelo obtido através da combinação dos dados das missões de satélite laser (LAGEOS) e gravimétrico (GRACE), resultante da cooperação entre as equipes do GFZ Postdam e GRGS Toulouse (FÖRSTE et al, 2007).

A base para as componentes de longos comprimentos de onda desse modelo combinado foi obtida com os últimos resultados do processamento de dados do satélite de ambas as equipes, ou seja, uma atualização dos modelos de dados somente de satélite EIGEN-GL04S da GRGS Toulouse e do novo modelo EIGEN-GRACE05S da GFZ Potsdam. Este último foi obtido a partir de um novo processamento dos dados GRACE. Esses modelos foram baseados somente em dados de satélites combinados com vários conjuntos de dados de gravidade, alguns deles novos. Por exemplo, a última média de dados da superfície do mar gerados no GFZ Potsdam a partir de missões altimétricas globais foi incluída.

Figura 8 – Recorte do modelo global combinado EIGEN-05C



A combinação com os dados de satélite foi realizada com base nas equações normais completas para obter um modelo do campo gravitacional global que combina a alta precisão e homogeneidade dos dados de satélite, em longos a médios comprimentos de onda com a resolução de curtos comprimentos de onda de dados da superfície. Uma técnica de combinação especial foi aplicada para obtenção de uma transição suave do comprimento de onda na banda inferida a partir de dados somente por satélite para aqueles inferidos a partir de dados de superfície. Comparado com os outros modelos EIGEN, a extensão das equações normais completas a partir de dados da gravidade foi aumentada para grau e a ordem máximos até 240.

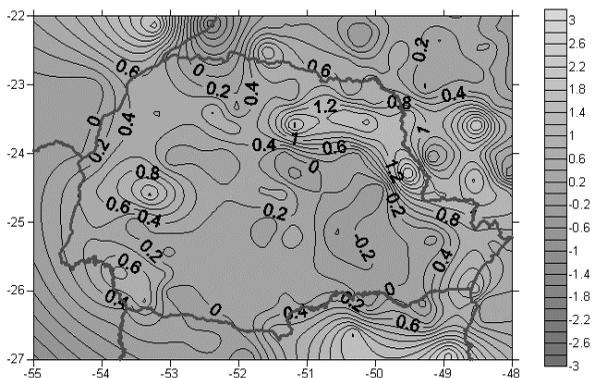
3. RESULTADOS OBTIDOS

Para analisar o comportamento estatístico dos modelos digitais, foram utilizadas as diferenças na forma digital entre dois modelos, armazenando em arquivos de diferenças. As análises estatísticas dos modelos gravimétricos globais estão apresentadas em gráficos com o desvio sistemático e resíduo dos modelos em questão.

3.1 Avaliação do Geóide Pr2006-FFT Utilizando o Modelo Geoidal Regional GPS/NIV

Neste tópico, foi avaliado primeiramente o modelo PR2006-FFT, em relação ao modelo GPS/Niv, através de modelo análogo constituído pelas diferenças. O modelo digital obtido das diferenças, que apresenta média da ordem de 0,51m e desvio padrão de 0,29m, está representado graficamente na Figura 9.

Figura 9 – Diferenças entre os modelos GPS/Niv e PR2006 – FFT.



3.2 Avaliações dos Modelos do Campo da Gravidade Globais em Relação ao Modelo PR2006-FFT

Neste tópico, foram comparados os modelos globais EIGEN-CG03C, EIGEN-GL04C e EIGEN-05C com o modelo regional PR2006-FFT. As estatísticas das diferenças forma apresentados nos gráficos 1 e 2.

Gráfico 1 - Diferenças em RMS (m) obtidas na comparação dos modelos globais com o PR2006 – FFT.

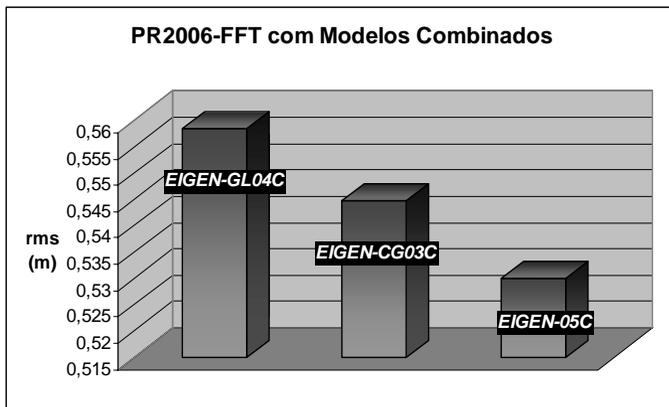
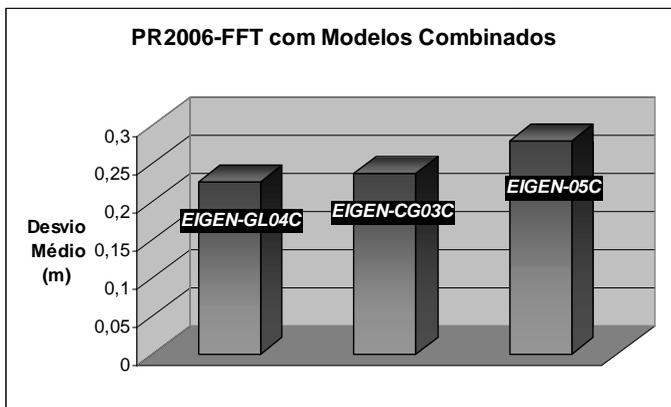


Gráfico 2 - Diferenças médias em metros entre os modelos globais e o PR2006-FFT



O Gráfico 1 mostra as discrepâncias em torno de 0,55 m (EIGEN-CG03C), 0,56 m (EIGEN-GL04C) e 0,53 m (EIGEN-05C). O Gráfico 2 apresenta as diferenças médias, que representam componentes sistemáticas, em torno de 0,24 m (EIGEN- CG03C), 0,23 m (EIGEN-GL04C) e 0,29 m (EIGEN-05C).

3.3 Avaliação dos Modelos do Campo da Gravidade Globais em Relação ao Modelo GPS/NIV

Neste tópico, os modelos globais foram comparados com o modelo determinado a partir GPS/Niv, envolvendo os dados resultantes do posicionamento por GPS e do nivelamento geométrico. As discrepâncias e as diferenças médias são apresentadas graficamente nas Figuras 3 e 4 respectivamente.

Gráfico 3 - Diferenças em RMS entre o modelo GPS/Niv e os modelos globais

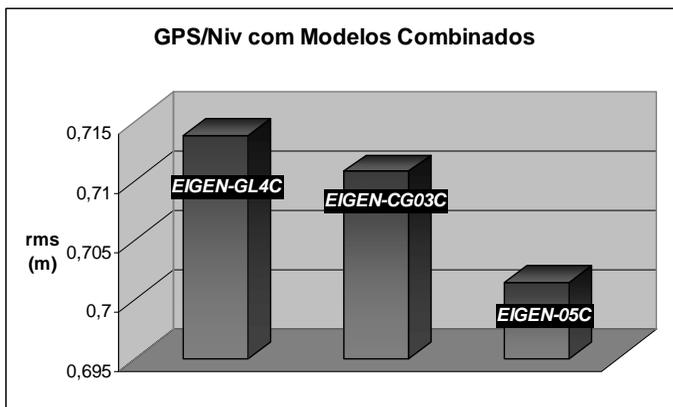
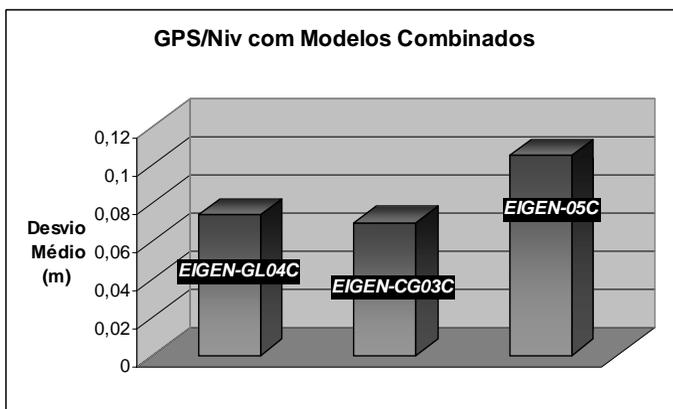


Gráfico 4 - Diferenças médias entre o modelo GPS/Niv e os modelos globais



No Gráfico 3, pode-se notar as discrepâncias em torno de 0,71 m (EIGEN-CG03C, EIGEN-GL04C) e 0,70 m (EIGEN-05C). No Gráfico 4, observa-se as diferenças médias em torno de 0,07 m (EIGEN-CG03C e EIGEN-GL04C) e 0,11 m (EIGEN-05C).

3.4 ANÁLISES RELATIVAS E ABSOLUTAS DOS MODELOS GEOPOTENCIAIS GLOBAIS APRESENTADOS

Para uma avaliação mais objetiva dos modelos geopotenciais que vem sendo determinados através de novas missões de satélites orientadas nesse foco, foram efetuadas análises relativas e absolutas dos modelos globais utilizando alturas geoidais resultantes do posicionamento por satélite combinado com o nivelamento geométrico e o modelo regional PR2006-FFT, cujos resultados conduziram às estatísticas mostradas nas Tabelas 1 e 2.

A avaliação relativa consiste na comparação das alturas geoidais obtidas por meio de técnicas diferentes nos mesmos pontos. A primeira foi feita a partir das diferenças entre as alturas geoidais dos modelos globais com as alturas geoidais resultantes do GPS/Niv em RN's (Tabela 1). A avaliação absoluta consiste na comparação das diferenças entre as alturas geoidais dos modelos globais e o modelo PR2006-FFT (Tabela 2).

Tabela 1 – Estatísticas da avaliação relativa dos modelos combinados com dados GPS/Niv.

Modelo	RMS (m)	Desvio Médio (m)
EIGEN-CG03C	0,6820	0,2121
EIGEN-GL04C	0,6809	0,2090
EIGEN-05C	0,6936	0,2461

Tabela 2 – Estatísticas da avaliação relativa dos modelos combinados com dados do modelo PR2006-FFT.

Modelo	RMS (m)	Desvio Médio (m)
EIGEN-CG03C	0,6416	0,3321
EIGEN-GL04C	0,6541	0,3333
EIGEN-05C	0,6119	0,2888

Os mesmos modelos geopotenciais foram avaliados na forma absoluta usando os desníveis das alturas geoidais obtidas com os modelos geopotenciais e as determinadas por GPS/Niv cujos resultados em cm/km são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Avaliação absoluta dos modelos combinados com os dados GPS/Niv.

Modelo	Erro Relativo (cm/km)
EIGEN-CG03C	0,1185
EIGEN-GL04C	0,1206
EIGEN-05C	0,1400

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foram avaliados três modelos geopotenciais globais da série EIGEN, denominados EIGEN-CG03C, EIGEN-GL04C, EIGEN-05C.

Os resultados da análise entre os modelos geoidais na forma digital obtidos por GPS/Niv e pelos modelos EIGEN são apresentados na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4 – Estatísticas das discrepâncias entre os geóides obtidos pelos modelos combinados e por GPS/Niv.

Modelo	RMS (m)	Desvio Médio (m)
EIGEN-CG03C	0,7108	0,0697
EIGEN-GL04C	0,7138	0,0735
EIGEN-05C	0,7014	0,1049

Foi avaliado também o geóide obtido através da transformada rápida de Fourier denominado PR2006-FFT, em relação ao mesmo modelo GPS/Niv, obtendo resíduo na ordem de 0,51m e desvio sistemático de 0,29m. O modelo PR2006-FFT foi comparado com os modelos globais, obtendo as discrepâncias mostradas na Tabela 5.

Tabela 5 – Estatísticas das discrepâncias entre os modelos combinados e pelo PR2006-FFT.

Modelo	RMS (m)	Desvio Médio (m)
EIGEN-CG03C	0,5448	0,2371
EIGEN-GL04C	0,5585	0,2261
EIGEN-05C	0,5348	0,2865

A partir das análises, pode-se concluir que os modelos da série EIGEN atendem às expectativas, fornecendo resultados na ordem do centímetro para resolução espacial de 270 km tanto na comparação entre modelos digitais, como na avaliação pontual.

Na avaliação absoluta dos modelos geopotenciais globais apresentados, os valores ficaram próximos, mas o modelo EIGEN-CG03C apresentou o menor erro relativo (0,12 cm) na região de estudos.

Esses modelos estão contribuindo para o avanço das pesquisas geodésicas nos últimos anos e, após o lançamento dos satélites das missões CHAMP e GRACE, estão proporcionando alta resolução e alta precisão na modelagem do campo gravitacional da Terra, especialmente tendo em vista a futura missão GOCE e o desenvolvimento contínuo do *Global Geodetic Observing System* (GGOS).

AGRADECIMENTOS

À Profa. Dra. Márcia Cristina Lopes Quintas (in memoriam) com gratidão e admiração. Ao Daniel Goldani por ter disponibilizado os dados do modelo gravimétrico regional e ao Prof. Dr. Nelsi Cogo de Sá por ter disponibilizado os dados de RN's. Ao CNPq, processo nº 479838/2006-2, bolsa nº 303942/2005-2 do projeto conexão de Redes Verticais – Parte 2 e PROF-CAPES via bolsa de mestrado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CRS, Center for Space Research. Disponível em: < <http://www.csr.utexas.edu/grace/>>. Acessado em 2007.
- FEATHERSTONE, W. E. *Expected contributions of dedicated satellite gravity field missions to regional geoid determination with some examples from Australia*. Journal of Geospatial Engineering, 4, 2-19p. 2002.
- FLURY, J. RUMMEL, R. *Future Satellite Gravimetry for Geodesy*. Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, TU. Earth, Moon, and Planets, 94: 13-29p. March 2005.
- FÖRSTE, C. FLECHTNER, F. SCHMIDT, R. MEYER, U. STUBENVOLL, R. BARTHELMES, F. KÖNIG, R. NEUMAYER, K. ROTHACHER, M. REIGBER, C. BIANCALE, R. BRUINSMA, S. LEMOINE, J. RAIMONDO. J. A New High Resolution Global. *Gravity Field Model Derived From Combination of GRACE and CHAMP Mission and Altimetry/Gravimetry Surface Gravity Data*. Pôster apresentado na EGU General Assembly 2005, Vienna, Austria, 24-29, Abril 2005. Disponível em: http://www.gfz-potsdam.de/pd1/op/grace/results/grav/g004_EGU05-A-04561.pdf. Acessado em 2007.
- FÖRSTE. CH, FLECHTNER. F, SCHMIDT. R, STUBENVOLL. R, ROTHACHER. M, KUSCHE. J, NEUMAYER. H, BIANCALE. R, LEMOINE. J.-M, LOYER.S, BARTHELMES. F, BRUINSMA. S, KÖNIG. R, MEYER. U1. *EIGEN-05C - A new global mean Gravity Field Model from Combination of Satellite Mission and Altimetry/Gravimetry Surface data*. Geophysical Research Abstracts, Vol. 9, 04148, 2007 SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2007-A-04148 © European Geosciences Union 2007.
- GOLDANI, D. *Modelo geoidal de alta resolução para o Estado do Paraná: Aplicação da Transformada Rápida de Fourier-Stokes e do valor do potencial do géide na definição da superfície de referência vertical*. 2006. 129p. Dissertação mestrado – Universidade Federal do Paraná, Curitiba,
- HECK, B. *Problems in the Definition of Vertical Reference Frames*. In: Sansò F (ed) V Hotine-Marussi Synposium on Mathematical Geodesy (IAG Symposia, vol.127). Springer, Berlin, pp. 164-173. 2004.
- IAG. *International Association of Geodesy, 2008*. Disponível em: <http://www.iag-aig.org/>. Acessado em 2008.

- ICGEM. *International Centre for Global Earth Models (ICGEM)*, 2008. Disponível em: <http://icgem.gfz-potsdam.de/icgem/>. Acessado em 2008.
- IGS. *International GNSS Service, 2008*. Disponível em: <http://igsceb.jpl.nasa.gov/>. Acessado em 2007.
- JAMUR, K. P. *Estimativa da Resolução de Modelos Geoidais Globais Obtidos de Missões Satelitais e Gravimétricos Regionais Para o Estado do Paraná com Base em Observações Gravimétricas*. Dissertação de mestrado. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 116p. 2007.
- RAPP, R.H. *Past and future developments in geopotential modeling*. Springer-Verlag, Berlin New York, 58-78p, 1998.
- REIGBER, C.; SCHWINTZER, P.; CHAMP – *Gravity Field Recovery*. 2002. Disponível em: http://op.gfz-potsdam.de/champ/science/gravity_SCIENCE.html. Acessado em: 11 fevereiro 2007.
- REIGBER, C. *Global gravity field recovery using solely GPS tracking and accelerometer data from CHAMP*. Space Science Reviews, n.29, p.55-66, 2003a.
- REIGBER, C. SCHWINTZER, P. STUBENVOLL, R. SCHMIDT, R. FLECHTNER, F. MEYER, U. KÖNIG, R. NEUMAYER, H. FÖRSTE, C. BARTHELMES, F. ZHU, S. BALMINO, G. BIANCALE, R. LEMOINE, J. MEIXNER, H. RAIMONDO, J. *A High Resolution Global Gravity Field Model Combining CHAMP and GRACE Satellite Mission and Surface Gravity Data: EIGEN-CG01C*. Journal of Geodesy, disponível em CHAMP/GRACE Science Meeting, GFZ, 5-7, Julho, 2004. http://www.gfz-potsdam.de/pd1/JCG/jcg_index.html. E na página 16, n°. 24, em Solid Earth Abstracts (pdf file) disponível em: http://www.gfz-potsdam.de/pd1/JCG/solid_earth_abstracts.pdf. Acessado em 11 fevereiro 2007.
- RUMMEL, R. BALMINO G. JOHANNESSEN J. VISSER P. WOODWORTH P. *Dedicated gravity field missions – principles and aims*. Journal of Geodynamics, v.33, p.3-20, 2002.
- CRS, *Center for Space Research*. Disponível em: < <http://www.csr.utexas.edu/grace/> >. Acessado em 2007.
- SÁ, N. C. de *Comunicação pessoal, dados GPS sobre RNs*. 2007.

(Recebido em fevereiro / 2009. Aceito em junho / 2009).