

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 PARANÁ.

KAROLINE PAES JAMUR
SILVIO ROGÉRIO CORREIA DE FREITAS

Universidade Federal do Paraná - UFPR
Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas - CPGCG
Curitiba-PR
{karol.mestrado, sfreitas}@ufpr.br

RESUMO - Apresenta-se neste artigo um estudo da resolução espacial dos modelos gravimétricos globais combinados: EIGEN-GL04C advindo da missão gravimétrica GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*); EIGEN-CG03C que utiliza dados da missão CHAMP (*Challenging Minisatellite Payload*) e GRACE; e o novo modelo EIGEN-05C advindo das missões laser (LAGEOS) e gravimétrica (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*, fazendo uma decomposição das diferentes contribuições espectrais da altura geoidal via a Transformada Rápida Fourier (FFT). Neste modelo foi utilizado o *Preliminary Geopotential Model 2000* (PGM2000A) desenvolvido até o grau 360 como referência para comprimentos de onda longos e regionais, bem como um modelo digital gravimétrico obtido a partir da combinação de dados gravimétricos e topográficos para modelar os comprimentos de onda mais curtos. A avaliação foi feita em uma região de estudo compreendida entre os paralelos 22°S e 27°S, e os meridianos 48°W e 55°W que envolve todo o Estado do Paraná.

ABSTRACT - It is presented in this paper a study of the space resolution of global gravity combined models: EIGEN- GL04C obtain from the new gravimetric missions GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*); the global gravity model EIGEN-CG03C coming from CHAMP (*Challenging Minisatellite Payload*) and GRACE missions; and the new model EIGEN-05C derivated from the missions laser (LAGEOS) and gravimetric (GRACE). For evaluating these models they were used, geoid heights derivated from GPS observation on bench-marks and a local gravity geoid model based on the *Remove-Restore* technique and Fast Fourier Transform (FFT) for decomposing the different contributions of the height. The *Preliminary Geopotential Model 2000* (PGM2000A) developed until degree 360 was used as reference for long and regional wavelengths; a gravimetric digital model obtained from the combination of gravimetric and topographical data and terrestrial data was used to 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.

1 INTRODUÇÃO

Em trabalho de revisão, Lambeck e Coleman (1983) criticam os modelos de geopotencial globais gerados de 1958 até 1982 fazendo uma observação contundente com relação a todos: “*Existem vários modelos que não são tão bons quanto é dito que eles são. Se eles fossem, as diferenças entre eles não deveria ser tão grande como realmente é.*” Diversos estudos levam a crer que esta afirmação ainda é atual, tanto que existe uma busca permanente quanto à provisão de estimativas de precisão para a maioria dos modelos geopotenciais globais subsequentes.

Uma melhoria no modelo do campo de gravidade da Terra, em termos da exatidão, servirá a diversas aplicações:

- Unificação dos sistemas de altitudes:

Hoje há ainda um grande número de sistemas diferentes de altitudes em toda Terra. Em geral, cada sistema de referência é fixado a um único ponto origem (*Datum*), o qual é definido pelo nível médio do mar local obtido pelos marégrafos. Para unificar os sistemas de altitudes, um geóide global precisamente determinado é essencial. (FREITAS et al. 2002).

- Nivelamento por GPS:

O sucesso do posicionamento por satélites do sistema GPS está possibilitando a substituição, em determinadas aplicações, dos métodos clássicos de levantamentos geodésicos e topográficos.

Para a transformação da altitude elipsoidal h (que é a distância, contada sobre a normal, da superfície do elipsóide de referência ao ponto), obtida no rastreamento, em altitude ortométrica H (que é a distância, contada sobre a vertical, do geóide ao ponto), faz-se necessário o conhecimento da altura geoidal (distância, contada ao longo da normal, da superfície do elipsóide ao geóide). Na grande maioria do posicionamento de obras de engenharia, levantamento geodésico e topográfico é necessário a determinação da altitude ortométrica (altitude referenciada ao geóide). Surge então a necessidade de transformar a altitude elipsóidica em altitude ortométrica (JAMUR, 2007).

A determinação da altitude ortométrica, imprescindível em várias atividades cotidianas (mapeamento, distribuição de água, saneamento, planejamento urbano, etc.), praticamente não evoluiu durante os dois últimos séculos e, até bem pouco tempo não havia alternativa para se evitar os inconvenientes da morosidade e do custo elevado do nivelamento clássico. Isto é particularmente problemático para os países com dimensões continentais, como é o caso do Brasil. Além das dificuldades geográficas naturais, a implantação de uma rede de nivelamento, que se estenda por todas as regiões do País, de maneira a possibilitar uma distribuição geográfica adequada às necessidades dos usuários, é inviável economicamente.

Atualmente já é possível substituir os métodos tradicionais pelo uso do GPS combinado com alturas geoidais obtidas a partir de modelos de alta resolução. Neste caso, dois requisitos são fundamentais: um geóide de alta precisão compatível com o sistema altimétrico, e uma rede GPS suficientemente densa que permita a aplicação desta metodologia de forma eficiente. Cabe ser destacado que o denominado geóide global é em muitos casos práticos, substituído por geóides locais ou regionais, onde possam ser determinados a partir de bases de dados homogêneas e com alta resolução. Tem-se a expectativa que tal resolução para aplicações de GPS em nivelamento deva ser na ordem do centímetro (JAMUR, 2007).

É evidente a melhoria alcançada nos últimos anos na obtenção dos valores da gravidade a partir de levantamentos gravimétricos terrestres e 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 com resolução adequada é praticamente impossível. Um outro problema nos dados terrestres é a heterogeneidade em relação à precisão, à acurácia e sistema de redução (geométrico e físico) adotado.

Além disso, dados nos oceanos 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, no final da década de 1950, as investigações sobre o campo gravitacional da Terra têm sido efetivadas a partir de observações das perturbações das órbitas dos satélites, induzidas pelo efeito gravitacional de massas heterogêneas, gerando informações associadas a feições de longo comprimento de onda deste campo. Estas informações associados ao campo centrífugo, que é bem determinado do ponto de vista geométrico e físico, possibilitam o estabelecimento 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; SCHWINTZER, 2002). A partir das novas missões gravimétricas (CHAMP e GRACE), existe a disponibilidade de um geóide com acurácia centimétrica com resolução espacial em torno de 270 km (meio comprimento de onda) o que corresponde um desenvolvimento do geopotencial até o grau e ordem 75 (CSR, 2007). As frequências mais elevadas para modelos disponíveis, são entendidas como de resolução mais baixa.

A nova missão gravimétrica GOCE (*Gravity Field and Steady State Ocean Circulation Explorer*) com lançamento do segmento espacial previsto para setembro de 2008, deverá possibilitar o conhecimento das componentes, em termos de comprimentos de onda do campo gravitacional da Terra, com melhoria em acurácia de até dez vezes em relação ao usual Earth Gravity Model 1996 (EGM96, LEMOINE et al., 1998). Esta missão deverá ser extremamente útil para trabalhos em associação com o novo EGM2008, o qual contempla resoluções espaciais elevadas de cerca de 10 km em regiões com informações gravimétricas consistentes.

1.1 Novas missões gravimétricas

Atualmente, dezenas de dados devem ser combinadas de satélites para produzir um bom modelo do campo de gravidade da Terra. Estes modelos fazem um bom trabalho a simular as amplas características do campo gravitacional da Terra, mas não podem solucionar características de pequena escala, principalmente em grandes corpos de água.

Featherstone (2002) definiu em seus trabalhos que os modelos geopotenciais atuais do campo da gravidade da Terra podem ser divididos entre três classes primárias:

- Modelos geopotenciais globais com dados somente de satélites (*satellite-only GGMs*) que, em geral são modelos derivados da análise do movimento orbital de satélites artificiais via rastreamento sobre posições conhecidas na Terra.
- Modelos geopotenciais globais combinados (*combined GGMs*) que são derivados de uma combinação de dados de satélite, observações de gravidade terrestres e

oceânicas, anomalias de gravidade marinhas derivadas de altimetria por radar, bem como dados de levantamentos por aerogravimetria (RAPP, 1998), o que permite a expansão para maiores graus e ordem dos harmônicos esféricos dos modelos geopotenciais.

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

Das novas missões CHAMP, GRACE e GOCE são esperados que se conduza uma melhoria de várias ordens de magnitude nas medidas de gravidade e permitam uma resolução muito melhor do campo gravitacional da Terra, tanto na terra como no mar. Os dados das novas missões combinadas com outras fontes de dados existentes irão aprimorar nossa compreensão de: Geodésia, Glaciologia, Hidrologia, Oceanografia, Ciências da Terra, etc...

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

Nos tópicos 1.2 e 1.3 são definidas as missões CHAMP e GRACE, cujos dados foram empregados para a produção dos modelos 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 (Plesetsk - 62,5° N ; 40,3° E). A altitude da órbita é de 454 km (baixa em relação ao GPS, por exemplo, que é um satélite de órbita alta ~20.000 km de altitude), sendo ela circular e polar, com inclinação de 87° em relação ao plano do equador, possibilitando uma maior duração da missão, mesmo sob condições severas de atividade solar.

Entretanto, para estudos do campo da Terra, seria preferível uma altitude inicial mais baixa, mesmo tendo essa lentamente diminuída até 300 km. Com vida útil prevista de cinco anos, é ainda operacional.

Pela primeira vez, um satélite com tão baixa altitude foi equipado com um receptor GPS, de modo que sua órbita fosse precisamente determinada com incerteza de poucos centímetros (REIGBER, 2003a). A missão

CHAMP emprega o rastreamento de satélites de órbita alta (Figura 1), relativo a uma rede de estações em terra, principalmente as estações do *International GPS Service network* (<http://igsb.jpl.nasa.gov/>). O benefício de usar essa técnica, o *High-low inter-satellite tracking* (hl-SST) no CHAMP é que o satélite de órbita baixa será rastreado por diversos Satélites GPS e com uma geometria de constelação boa para uma órbita inteira, enquanto também sendo baixo o bastante para avaliar as frequências mais altas no campo da gravidade da Terra. São utilizados, além disso, acelerômetros 3D a bordo do satélite CHAMP para calcular as perturbações não-gravitacionais de sua órbita.

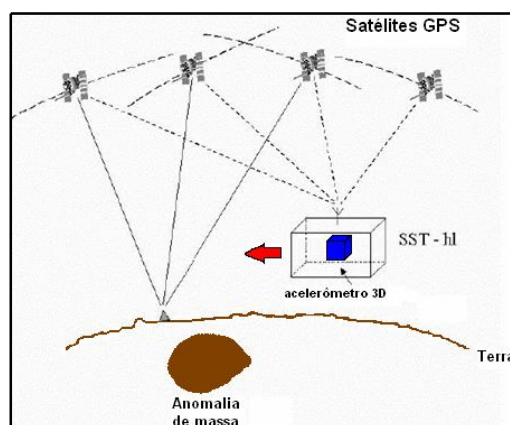


Figura 1 - O conceito do CHAMP, técnica de rastreamento *High-low inter-satellite tracking* (hl-SST). Fonte adaptada de Rummel et al. (2002).

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*), tendo como objetivo o fornecimento de observações aprimoradas sobre o campo gravitacional terrestre.

Programada em maio de 1997 e lançada em março de 2002, observa variações com precisão no campo de gravidade da Terra com vida útil prevista de cinco anos, é ainda operacional.

A missão GRACE consta de duas aeronaves idênticas que voam aproximadamente 220 quilômetros separadamente em uma órbita polar, equivalente a 500 quilômetros sobre a Terra. O movimento relativo entre dois satélites é medido com alta precisão. A quantidade de interesse é o movimento relativo dos centros de massa dos dois satélites, que devem ser derivado da conexão entre os mesmos juntamente com os dados de aceleração e altitude medidos.

A missão GRACE pode delinear os campos de gravidade da Terra fazendo medidas precisas da distância

entre os dois satélites, enquanto usando GPS e feixes de microondas que percorrem o sistema conforme a Figura 2. O rastreamento utilizado é o chamado *low-low inter-satellite* (ll-SST) que é feito usando feixes de microondas comunicando um satélite ao outro, 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.

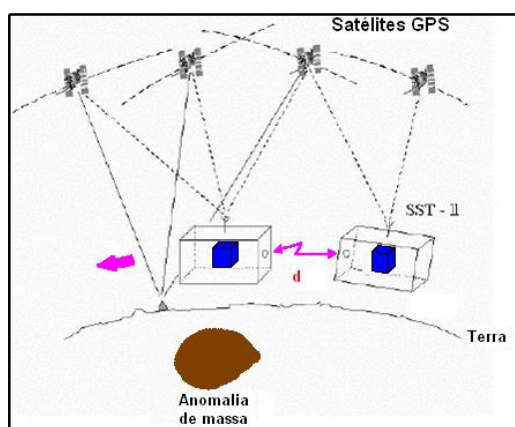


Figura 2 - A técnica do GRACE de rastreamento *low-low inter-satellite* (ll-SST) combinado com *High-low inter-satellite* (hl-SST). Fonte adaptada de Rummel et al. (2002).

2 DESENVOLVIMENTO

Primeiramente foi produzido o Modelo Geoidal Regional GPS/Niv que foi obtido com dados de posicionamento GPS sobre RN's (no total de 104 RN's; SÁ, 2007) na região de estudo e foi gerada em função das diferenças de altitude elipsóidica com ortométrica resultando na altura geoidal da RN.:

$$NGPS = hGPS - HRN \quad (1)$$

Um modelo local a ser considerado também foi criado por Goldani (2006) onde foi empregada a técnica de predição de anomalias utilizando FFT, para uso no cálculo do geóide gravimétrico usando o PGM2000A desenvolvido até o grau 360 como referência para comprimentos de onda longos e regionais, bem como um modelo digital gravimétrico obtido a partir da combinação de dados gravimétricos e topográficos e dados terrestres para modelar os comprimentos de onda curtos.

Para este trabalho foram também selecionados os modelos geopotenciais globais de alta resolução EIGEN-GLO4C, GGM02C que combinam dados da missão GRACE e dados 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 altimétricos e gravimétricos.

Estes modelos foram obtidos do potencial anômalo da gravidade desenvolvido em harmônicos esféricos. Seus

coeficientes são calculados a partir das análises de órbitas de satélites e de suas perturbações devido ao campo gravitacional terrestre. A partir disso, tem-se então, que efetuar a devida transformação para se obter as coordenadas geodésicas e principalmente a altura geoidal.

Para a transformação, foi utilizado um software, ICGEM (*International Centre for Global Earth Models*) da GFZ (IAG/GFZ, 2007) e efetuado um corte para a área de estudo.

Todos os modelos utilizados neste trabalho foram igualmente plotados com espaçamento da malha em 5' de arco, empregando a interpolação por meio da *krigagem*, no software Surfer™ para verificar as suas respectivas resoluções espaciais.

2.1 Área de estudo

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

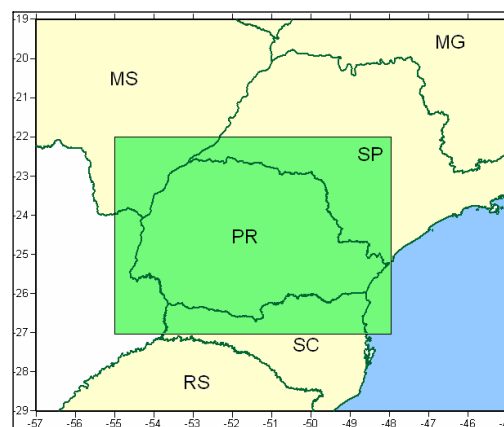


Figura 3 – Área de estudo.

2.2 Modelo Geoidal Regional GPS/Niv

O Modelo Geoidal Regional GPS/Niv (Figura 5) foi produzido com dados de posicionamento GPS sobre RN's (a Figura 4 mostra a distribuição das 104 RN's) na região de estudo e foi gerada em função das alturas geoidais.

O modelo então foi plotado com grid de 5' utilizando o interpolador *krigagem* no software Surfer™.

Foi efetuada uma validação do modelo geoidal regional GPS/Niv retirando 10 valores de GPS/Niv do modelo, utilizando estes como pontos para validação.

A avaliação foi realizada a partir da comparação entre as alturas geoidais advindas do modelo geométrico, produzido pelos pontos restantes, que foram interpolados por meio de *krigagem* e as alturas geoidais providas dos pontos de validação obtendo como resultado um RMS do modelo geoidal regional GPS/Niv de 5,27 cm com desvio sistemático de 3,40 cm.

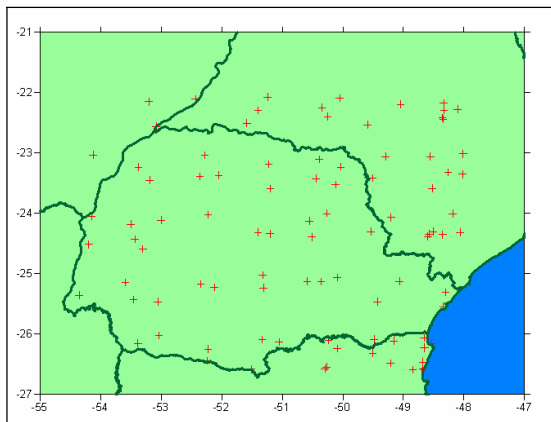


Figura 4 – Posicionamento dos pontos GPS sobre RN's na região de estudos

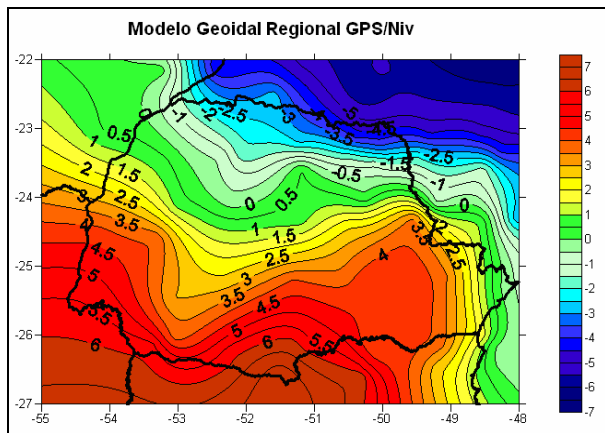


Figura 5 – Modelo Geoidal Regional GPS/Niv

2.3 Modelo regional GeóidePR2006 – FFT

O modelo regional (Figura 6) utilizado neste trabalho foi determinado por Goldani (2006).

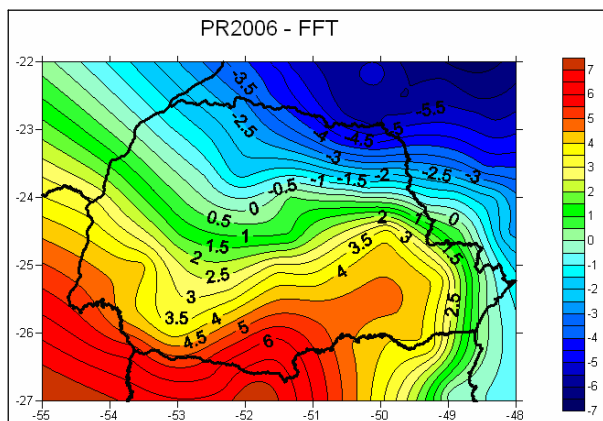


Figura 6 – Modelo regional GeóidePR2006 – FFT

Obtido com base na técnica de *Remove-Restore*, para o cálculo do geóide com o método de predição de anomalias por FFT, tendo por base o PGM2000A como modelo geopotencial global adotando uma combinação de dados gravimétricos e topográficos e dados terrestres.

2.4 Modelo gravimétrico global – EIGEN-CG03C

O modelo global EIGEN-CG03C é uma atualização do modelo geopotencial global combinado EIGEN-CG01C que foi apresentado em 2004 pela GFZ, onde se combinam dados gravimétricos e altimétricos, 860 dias do satélite CHAMP e 200 dias dos satélites GRACE tendo como resultado o potencial gravitacional da Terra em termos de 130.317 coeficientes harmônicos esféricos com grau e ordem 360 e uma resolução espacial de 100 km (REIGBER, 2004). O modelo EIGEN-CG03C também está baseado em dados da missão CHAMP e dados de superfície (gravimetria e altimetria), mas a diferença são os dados da missão GRACE. Em vez de 200 dias, são utilizadas 376 dias de fevereiro a maio de 2003, julho a dezembro de 2003 e fevereiro a julho de 2004 (FÖRSTE, 2005).

O EIGEN-CG03C está completo a grau e ordem 360 em termos de coeficientes harmônicos esféricos e resolução espacial predita de 110 km. Comparado aos pré-modelos globais de alta resolução com dados CHAMP/GRACE, a precisão de 400 km comprimento de onda foi melhorada por uma ordem de grandeza resultando 3 cm e 0.4 mGal respectivamente em termos de alturas geoidais e anomalias de gravidade. A precisão global do modelo desenvolvido até o grau 360 apresenta resolução espacial em 100 km de apenas 30 cm e 8 mGal (FÖRSTE, 2005). A Figura 7 apresenta o Modelo EIGEN-CG03C para o estado do Paraná.

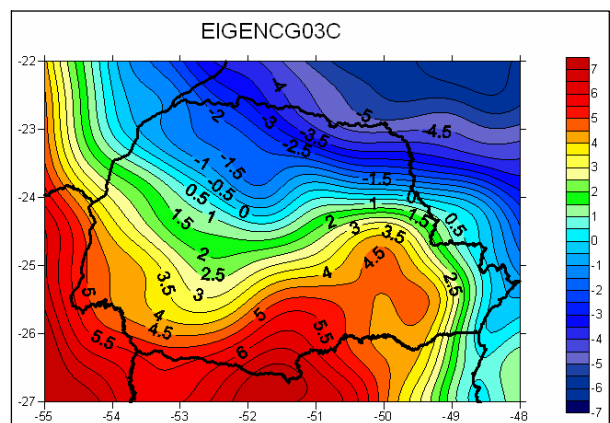


Figura 7 – Recorte do modelo global EIGEN-CG03C para a área de trabalho.

2.5 Modelo gravimétrico global – EIGEN-GL04C

O modelo EIGEN-GL04C é um modelo de alta resolução, disponibilizado em março de 2006. É uma atualização do EIGEN-CG03C e a combinação da missão GRACE e LAGEOS, dados gravimétricos e altimétricos em uma grade de 0.5° x 0.5°. Os dados de superfície usados são idênticos ao 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). Alguns dados do EIGEN-CG03C foram substituídos por dados de anomalia de gravidade.

O EIGEN-GL04C está completo ao grau e ordem 360 em termos de coeficientes harmônicos esféricos e assim soluciona geóides e comprimentos de onda de anomalia de gravidade a 110 km. A Figura 8 mostra o recorte do modelo EIGEN-GL04C para a área do trabalho.

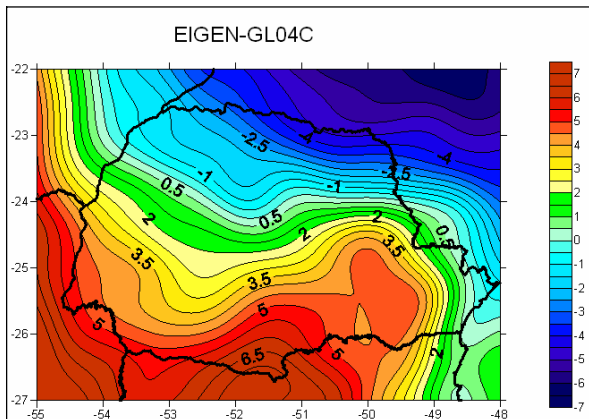


Figura 8 – Recorte do modelo global EIGEN-GL04C para a área de trabalho.

2.5 Novo modelo gravimétrico global – EIGEN-05C

O EIGEN-05C é um novo modelo de alta resolução do campo da gravidade global obtido pela combinação dos dados das missões de satélite laser (LAGEOS) e gravimétrico (GRACE), sendo uma cooperação entre as equipes do GFZ Postdam e GRGS Toulouse (FÖRSTE et al, 2007).

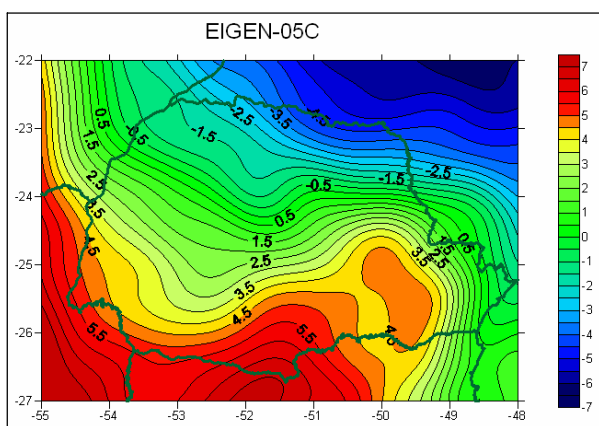


Figura 10 – Recorte do modelo global EIGEN-05C para a área de trabalho.

A base para os componentes de longos comprimentos de onda deste modelo combinado é obtida dos 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 obtido a partir de um novo processamento dos dados GRACE. Estes dados foram baseados em dados somente 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.

A combinação com os dados do satélite foi realizada com base de equações normais completas para obter um modelo do campo gravitacional global que combina a alta precisão e homogeneidade dos dados via satélite, em longos a médios comprimentos de onda com a resolução de curtos comprimentos de onda de dados da superfície. Além disso, uma técnica de combinação especial foi aplicada para obtenção de uma transição suave do comprimento de onda na banda inferida a partir de dados via satélite-somente 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 até um máximo de grau / ordem 240. Estima-se que os parâmetros do campo gravitacional da Terra no EIGEN-05C resultam em uma resolução que corresponde a um meio comprimento de onda de 55 km e grau / ordem 360.

3 RESULTADOS OBTIDOS

Fazendo uma análise visual, as Figuras 7, 8, 9 e 10 já sugerem uma noção das diferenças entre as malhas dos modelos, tanto regionais, como os recortes dos modelos gravimétricos globais EIGEN-GL04C, EIGEN-CG03C e EIGEN-05C.

Para uma análise estatística dos comportamentos das malhas, foram utilizadas na seqüência as diferenças de grid entre dois modelos a cada passo, combinando a malha de pontos do primeiro modelo com a malha de pontos do segundo, realizando a subtração e gerando um arquivo 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 regional, combinando a malha de pontos do geóide obtido pela técnica FFT, o PR2006-FFT, com a malha de pontos do Modelo Geoidal Regional GPS/Niv.

O resíduo resultou na ordem de 0,51m e desvio de 0,29m, a diferença entre as malhas do PR2006-FFT e o Modelo Geoidal Regional GPS/Niv está apresentada na Figura 11.

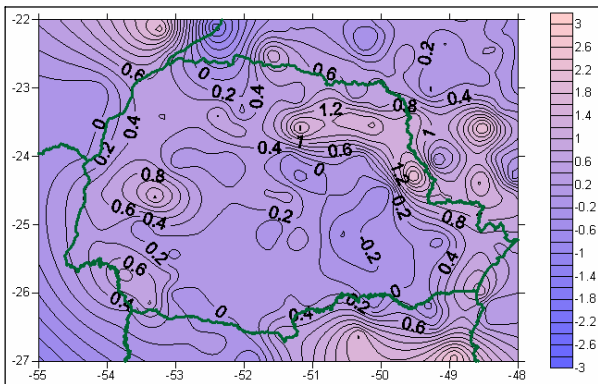


Figura 11 – Diferenças entre o Modelo Gravimétrico Regional GPS/Niv e o Geóide PR2006 – FFT.

3.2 Avaliação dos modelos gravimétricos globais utilizando o Geóide PR2006-FFT

Neste tópico, foi combinada a malha de pontos do geóide obtido pela técnica FFT, o PR2006-FFT, com a malha de pontos dos modelos gravimétricos globais EIGEN-CG03C, EIGEN-GL04C e EIGEN-05C, realizando a subtração e gerando um arquivo de diferenças. Os resultados obtidos estão nos gráficos 1 e 2.

Gráfico 1 - Diferenças em RMS (m) entre o PR2006 – FFT e os modelos gravimétricos globais.

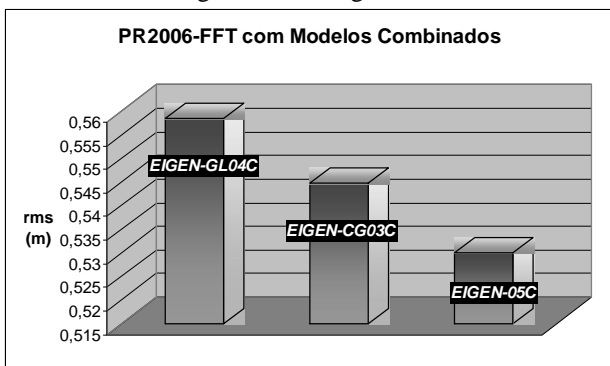
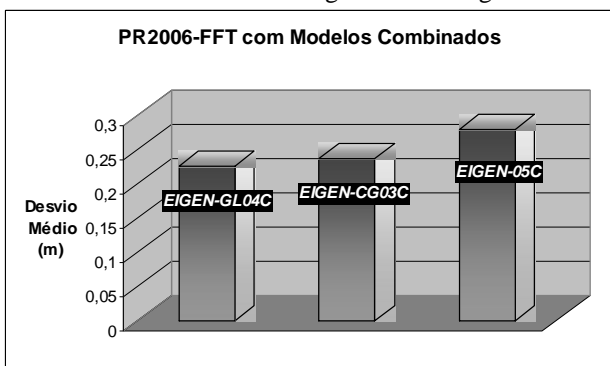


Gráfico 2 - Diferenças em desvios sistemáticos (m) entre o PR2006 - FFT e os modelos gravimétricos globais



No Gráfico 1 pode-se notar os resíduos em torno de 0,55 m (EIGEN-CG03C), 0,56 m (EIGEN-GL04C) e 0,53 m (EIGEN-05C). No Gráfico 2 os desvios

sistemáticos em torno de 0,24 m (EIGEN- CG03C), 0,23 m (EIGEN-GL04C) e 0,29 m (EIGEN-05C).

3.3 Avaliação dos modelos gravimétricos globais utilizando o Modelo Geoidal Regional GPS/Niv

Neste tópico, foi combinada a malha de pontos do geóide obtido pelos pontos GPS/Niv com a malha de pontos dos modelos gravimétricos globais, realizando a subtração e gerando um arquivo de diferenças.

Gráfico 3 - Diferenças em RMS entre o Modelo Geoidal Regional GPS/Niv e os modelos gravimétricos globais

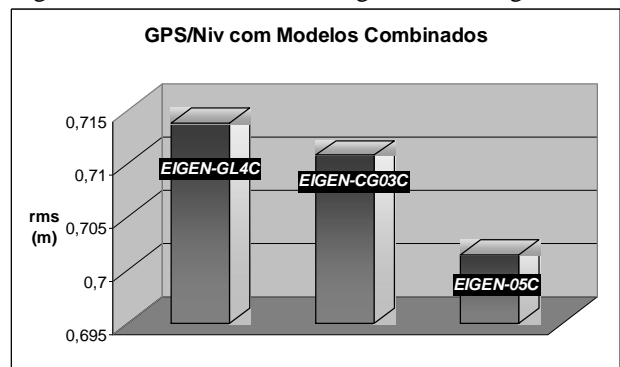
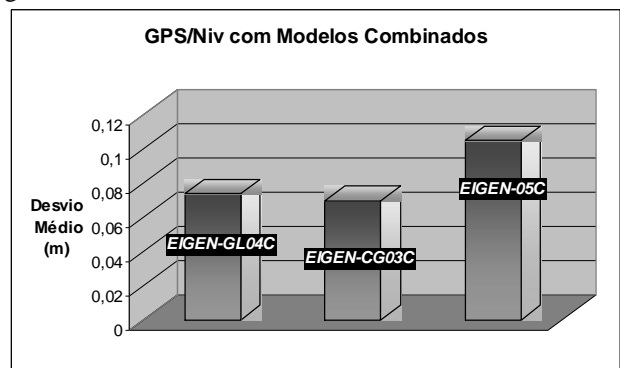


Gráfico 4 - Diferenças sistemáticas entre o Modelo Geoidal Regional GPS/Niv e os modelos gravimétricos globais



No Gráfico 3 pode-se notar os resíduos em torno de 0,71 m (EIGEN-CG03C, EIGEN-GL04C) e 0,70 m (EIGEN-05C). No Gráfico 4 os desvios sistemáticos em torno de 0,07 m (EIGEN-CG03C e EIGEN-GL04C) e 0,11 m (EIGEN-05C).

3.4 Análise absoluta e relativa dos Modelos Geopotenciais Globais apresentados

Com o intuito de obter testes estatísticos mais aprofundados sobre os modelos, foram efetuadas análises absolutas dos modelos gravimétricos globais utilizando os dados GPS/Nivelamento em RN's e o modelo regional PR2006-FFT obtendo como resultado os valores mostrados na Tabela 1 e 2.

A avaliação absoluta consiste na comparação das alturas geoidais obtidas de duas técnicas diferentes. A primeira foi feita a partir das diferenças entre as alturas geoidais dos modelos gravimétricos globais com as alturas geoidais obtidas dos dados GPS/Nivelamento em RN's e a segunda, pelas diferenças das alturas geoidais dos modelos gravimétricos globais com o modelo PR2006-FFT.

Tabela 1 – Análise absoluta dos modelos combinados utilizando dados GPS/Nivelamento sobre RN's.

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 – Análise absoluta dos modelos combinados utilizando os dados do geóide 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 modelos geopotenciais foram analisados estatisticamente de forma relativa, usando os desníveis das alturas geoidais do modelo geopotencial (*grid*) e dados GPS/Nivelamento sobre RN's obtendo os resultados em cm/km apresentados na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 – Análise relativa dos modelos combinados utilizando os dados GPS/Nivelamento sobre RN's.

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

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho faz um estudo sobre três modelos gravimétricos globais, sendo estes os modelos da série EIGEN: EIGEN-CG03C, EIGEN-GL04C, EIGEN-05C.

Os resultados da análise entre o *grid* do Modelo Geoidal Regional GPS/Niv e *grid* dos modelos EIGEN está apresentada na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4 – Análise entre *grids* dos modelos combinados e Modelo Geoidal Regional 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 um geóide obtido pela técnica da Transformada Rápida de Fourier, o PR2006 – FFT utilizando o mesmo modelo GPS/Niv obtendo resíduo na ordem de 0,51m e desvio sistemático de 0,29m. O *grid* do modelo PR2006-FFT foi comparado com os *grids* dos modelos gravimétricos globais, obtendo os resíduos que estão mostrados da Tabela 5.

Tabela 5 – Análise entre *grids* dos modelos combinados e geóide 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, concluiu-se que os modelos da série EIGEN obedecem às expectativas, obtendo resultados na ordem do centímetro tanto na comparação entre *grids* como na avaliação absoluta.

Na avaliação relativa dos modelos geopotenciais globais apresentados, os valores ficaram próximos, sendo o modelo EIGEN-CG03C o que apresentou o menor erro por km (0,12 cm) na região de estudos.

Esses modelos contribuem para o avanço das pesquisas da comunidade geodésica nos últimos anos (e após o lançamento dos satélites das missões CHAMP e GRACE) encaminhando para uma alta resolução e alta precisão do modelo do campo gravitacional da Terra, especialmente tendo em conta a futura missão GOCE (prevista para lançamento em setembro de 2008) e os desenvolvimentos contínuos do *Global Geodetic Observing System* (GGOS).

AGRADECIMENTOS

À Prof. Dra. Márcia Cristina Lopes Quintas (in memoriam) com gratidão e admiração. Ao Daniel Goldani por ter disponibilizado os dados do modelo gravimétrico regional. Ao CNPq, processo n° 479838/2006-2, bolsa n° 303942/2005-2 do projeto conexão de Redes Verticais – Parte 2 e PROF-CAPES via bolsa de mestrado.

REFERÊNCIAS

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.

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: 11 fevereiro 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, U. **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.
- FREITAS, S.R.C.de; MEDINA, A.S; LIMA, S.R.S.de. **Associated Problems to Link South American Vertical Networks and Possible Approaches to face Them.** VeRes, Springer, Berlin, 318-323p. 2002.
- 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 geóide na definição da superfície de referência vertical.** 2006. 129p. Dissertação mestrado – Universidade Federal do Paraná, Curitiba,
- IAG/GFZ. **International Centre for Global Earth Models (ICGEM),** 2007. Disponível em: <http://icgem.gfz-potsdam.de/icgem/>. Acessado em: 15 março 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.
- LAMBECK, K. COLEMAN, R. **The Earth's shape and gravity field: a report of progress from 1958 to 1982,** Geophysic Journal, Vol 74, 25-54p, 1983.
- LEIMOINE, F. KENYON, S. FACTOR, J. TRIMMER, R. PAVLIS, N. CHINN, D. COX, C. KLOSKO, S. LUTHCKE, S. TORRENCE, M. WANG, Y. WILLIAMSON, R. PAVLIS, E. RAPP, R. OLSON, T. **The development of the joint NASA – GSFC and the NIMA Geopotential Model EGM 96.** NASA/TP – 1998 – 206861. 1998.
- 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.º. 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.
- SÁ, N. C. de **Comunicação pessoal, dados GPS sobre RNs.** 2007.
- TAPLEY, B. RIES, J. BETTADPUR, S. CHAMBERS, D. CHENG, CONDI, F., GUNTER, B. KANG, Z. NAGEL, P. PASTOR, R. PEKKER, T. POOLE, S. WANG, F. **GGM02 – An improved Earth gravity field model from GRACE,** Journal of Geodesy Volume 79, Number 8, 467-478p. November, 2005.