



## Análise de feições anômalas do modelo EGM96 na América do Sul utilizando dados da missão GRACE

Marcelo Augusto de V. Lopes\* (mlopes@iag.usp.br) e Eder Cassola Molina (eder@iag.usp.br), IAG-USP, Brasil.

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Abstract

This work investigates some possible anomalous features of the Earth's gravity field obtained by the EGM96 geopotential model in the Brazilian territory, in order to evaluate if these features reveal the reality of the gravity field in the region or if they are result of the imprecision of the models used to elaborate the EGM96 model. To calculate the EGM96 coefficients, several types of data were used, such as satellite altimetry, land gravity observations, and the JGP95E topographic model. The fact that the gravity data in some regions of Brazil were not available when the coefficients of EGM96 were calculated, and that the topographic model over these regions were unavailable in that occasion, led to the possibility that the detected structures of the gravity field in such regions may be generated by the lack of data. These features were investigated by the analysis of the topographic model JGP95E compared with the topographic data obtained of the new highly precise model of SRTM, and the gravity anomaly of the EGM96 in comparison with a recent gravity field model calculated by GRACE mission and land gravity data.

This analysis showed that there is no evidence that the investigated features have been originated by the filling up process of the areas where no gravity data was available to calculate the EGM96.

### Introdução

O modelo EGM96 (Lemoine et al., 1998) representou um grande avanço em termos de modelos geopotenciais, trazendo valiosas informações adicionais sobre o campo de gravidade terrestre. Em algumas regiões, porém, o modelo mostrou feições do campo que apresentavam um padrão inesperado, a julgar pela falta de dados da região (Molina, 1999). Estas feições anômalas mostradas pelo EGM96 poderiam ter sido geradas pelo procedimento utilizado para lidar com áreas desprovidas de informações gravimétricas no processo de cálculo dos coeficientes do modelo, e esta possibilidade torna importante a análise destas feições para oferecer subsídios ao cálculo dos futuros modelos geopotenciais.

A comprovação da existência destas feições mostradas pelo EGM96 pode ser realizada a partir de novos dados gravimétricos coletados na região de interesse, ou, na falta destes, com a comparação com outros modelos

geopotenciais independentes que apresentem características similares ao EGM96. A análise da topografia da região pode auxiliar na investigação, pois esta grandeza foi empregada para calcular os valores utilizados para o preenchimento de áreas onde não se dispunha de informação gravimétrica quando da elaboração do modelo geopotencial (Lemoine et al., 1998).

O presente trabalho analisa os dados dos modelos topográficos JGP95E (Lemoine et al., 1998) e SRTM (Rabus et al., 2003) e as informações do modelo EIGEN-GRACE01S para estudar algumas feições mostradas pelo EGM96 no território brasileiro que podem ser caracterizadas como anômalas, por apresentarem-se como estruturas localizadas bem delineadas, apesar da falta de dados que pudessem originá-las.

### Dados utilizados

#### O modelo topográfico JGP95E

Sentindo a necessidade de um modelo topográfico global com precisão suficiente para desenvolver o modelo de gravidade EGM96, a DMA (*Defense Mapping Agency*) junto com a NASA e o GSFC (Goddard Space Flight Center), elaboraram para este fim o modelo JGP95E, que apresenta precisão nominal de 5'. Esse modelo combina diversos tipos de informações, como dados dos modelos GGTOPO (resolução nominal de 1<sup>o</sup>), TUG87 (resolução nominal de 5') e ETOPO5 (resolução nominal de 5'), e dados de altitude ortométrica. Segundo o relatório de elaboração do modelo (Lemoine et al., 1998), em áreas desprovidas de informações topográficas confiáveis, o modelo JGP95E pode apresentar erros significativos.

#### O modelo topográfico SRTM

Um dos modelos topográficos mais recentes e promissores foi gerado pela missão americana SRTM - Shuttle Radar Topography Mission (Rabus et al., 2003), calculado com dados de interferometria obtidos pela Space Shuttle, que apresenta resolução espacial horizontal estimada de 90 metros para a América do Sul. Os dados da SRTM foram adquiridos e processados, gerando um modelo topográfico digital que foi utilizado para auxiliar na análise das feições estudadas neste trabalho.

#### O modelo geopotencial EGM96

O modelo geopotencial EGM96 foi calculado por meio de um trabalho realizado através da colaboração de três instituições: Ohio State University (OSU), National Imagery and Mapping Agency (NIMA) e NASA. É um modelo geopotencial completo até grau e ordem 360, consistindo de uma solução composta pela combinação

de informações de modelos anteriores, dados terrestres e de altimetria por satélite.

Na elaboração do modelo foram utilizados, além dos dados usados pelo modelo OSU91A, que era o melhor modelo geopotencial existente antes do EGM96, novos dados gravimétricos terrestres, principalmente da Europa Oriental e Ásia, bem como novos dados de altimetria por satélite das missões TOPEX/POSEIDON e ERS-1.

### O modelo geopotencial EIGEN-GRACE01S

O Projeto GRACE - Gravity Recovery And Climate Experiment (Adam, 2002; Levi, 2003) permitiu a realização de medições do campo de gravidade terrestre com o objetivo de observar como a massa da Terra varia no decorrer do tempo, por meio de medidas de aceleração da gravidade que um conjunto de dois satélites adquire ao sobrevoar regiões continentais e oceânicas.

A massa é uma quantidade correlata da gravidade, e também está relacionada à densidade. A massa da Terra é distribuída desigualmente, fazendo com que o campo de gravidade terrestre não seja homogêneo e apresente características que podem ser mapeadas pelos satélites GRACE com precisão sem precedente.

Um recente modelo gerado a partir dos dados da missão GRACE é o EIGEN-GRACE01S, representado em harmônicos esféricos até grau e ordem 110. O relatório do modelo sugere, porém, que os melhores resultados são obtidos com sua expansão até o grau 110, que foi utilizado neste trabalho. Este modelo utiliza apenas dados dos satélites da missão GRACE, sendo independente dos demais modelos e dados associados ao campo de gravidade, constituindo-se em um ótimo referencial de comparação.

### Método e Resultados

#### Feições do campo de gravidade estudadas

A figura 1 mostra a representação da anomalia ar-livre calculada com os coeficientes do modelo EGM96 expandido até grau e ordem 360. Nota-se a presença de diversas anomalias distribuídas na direção N-S na altura dos meridianos  $-58^\circ$  e  $-59^\circ$ , região esta desprovida de dados gravimétricos quando do cálculo dos coeficientes do EGM96.

No cálculo desses coeficientes, as regiões onde não se dispunha de dados gravimétricos foram preenchidas por meio de uma formulação que utilizava os dados de topografia (Lemoine *et al.*, 1998). Como a região também carecia de dados topográficos naquela oportunidade, existe a possibilidade de que eventuais feições topográficas errôneas presentes no modelo topográfico utilizado possam ter gerado informações incorretas que foram utilizadas para o cálculo dos coeficientes do EGM96, originando as feições anômalas investigadas nesse estudo.

Para investigar esta possibilidade, analisou-se o modelo topográfico JGP95E, o melhor disponível na época do cálculo do EGM96, com o intuito de verificar se havia uma relação direta entre feições topográficas localizadas

e as feições anômalas na região, o que não foi comprovado, como se pode notar na análise da figura 2.

Ainda com o intuito de investigar a possível relação entre a topografia e as feições anômalas do campo representadas no EGM96, utilizou-se os dados topográficos da missão SRTM (figura 3). Estes dados, muito mais precisos do que os dados dos modelos predecessores, também não mostram nenhuma feição topográfica que pudesse ser associada a uma eventual anomalia localizada presente no EGM96 na região de estudo (figura 1). Pode-se concluir desta análise que não existe evidência direta de que as feições do campo de gravidade investigadas neste trabalho sejam provenientes do uso de dados errôneos de topografia para seu cálculo.

### Comparação entre o EGM96 e o EIGEN-GRACE01S

Sabendo que o modelo do EIGEN-GRACE01S representa o campo gravitacional de maneira independente do que fazem os modelos anteriores, pois os satélites da missão GRACE fazem medidas diretas do campo de gravidade e este modelo não utiliza nenhuma informação adicional do campo proveniente de outra fonte, é conveniente fazer uma comparação entre os dois modelos para verificar a consistência dos dados.

Os coeficientes do EIGEN-GRACE01S foram calculados até grau e ordem 110, portanto a comparação entre este modelo e o EGM96 só pode ser feita até este grau e ordem. Para esta análise foram calculados ambos os modelos até grau e ordem 110 para anomalia ar-livre e depois calculada a diferença entre os dois na região em estudo.

Para agilizar os cálculos e para melhorar a visualização das estruturas, foi selecionada apenas uma pequena região ( $-59,1/-57,7$  e  $-14,9/-12,3$ ) onde as feições têm um comportamento mais atípico (figuras 4, 5 e 6).

Nota-se uma grande concordância entre os dois modelos expandidos até grau e ordem 110, o que mostra que, para feições até o comprimento de onda representado, o modelo EGM96 não apresenta estruturas criadas por artifícios de processamento em regiões desprovidas de dados gravimétricos.

### Dados terrestres

Adicionalmente, foi feita a comparação dos dados terrestres existentes na região investigada com dados dos modelos geopotenciais nas mesmas posições das estações gravimétricas, e em seguida foi feita uma análise estatística dessa comparação para verificar se existe alguma diferença sistemática entre os dois modelos (figura 7).

Nessa análise foi estudada apenas uma parte da anomalia ( $-59,1/-57,7$  e  $-14,9/-12,3$ ) usando os modelos EGM96 e EIGEN-GRACE01S expandidos até grau e ordem 110.

Os parâmetros estatísticos da distribuição das diferenças obtidas encontram-se na Tabela 1. Pode-se perceber que as médias e os desvios padrão mantêm-se praticamente iguais para ambos os gráficos, mostrando a concordância

dos dois modelos até o grau e ordem em que foram desenvolvidos neste trabalho.

	Nº de pontos	Extremos	Média	Desvio padrão
Dados da Figura 7 (EGM96)	55	Máximo = 22 Mínimo = -61	-11,46	19,31
Dados da Figura 8 (GRACE)	55	Máximo = 20 Mínimo = -62	-12,64	19,10

Tabela 1: Parâmetros estatísticos das diferenças entre os pontos de gravimetria terrestre e os calculados a partir dos dois modelos geopotenciais (representadas na Figura 7).

Deve-se notar que, pelo grau e ordem em que os modelos geopotenciais foram calculados (120), não é possível definir claramente as feições investigadas, que apresentam um comprimento de onda inferior ao limite de resolução dos modelos para o grau calculado. A concordância de ambos os modelos até este grau e ordem, porém, e a coerência entre as diferenças de ambos em relação aos dados gravimétricos terrestres, são indicativos de que as feições representadas pelo EGM96, mesmo em regiões desprovidas de dados gravimétricos quando de sua elaboração, representam adequadamente o campo de gravidade terrestre.

### Conclusões

A hipótese de que as feições potencialmente anômalas do campo de gravidade observadas na região de estudo poderiam estar sendo geradas pela baixa resolução do modelo topográfico utilizado no cálculo do modelo EGM96 foi descartada, pois, como foi verificado, o modelo topográfico utilizado nos cálculos não apresenta nenhuma correlação com as anomalias investigadas.

A anomalia ar-livre calculada com os modelos EGM96 e EIGEN-GRACE01S para uma pequena região selecionada mostra-se similar para ambos, diferenciando-se de apenas um pequeno deslocamento horizontal das curvas de contorno na direção E-W.

### Agradecimentos

Os autores agradecem a Afonso E. de V. Lopes pelas indispensáveis ajudas, a Victor Sacek pelas preciosas discussões e à incrível paciência de Bernadete de V. Lopes e Ana S. M. Mendes.

### Referências

Adam, D., 2002, Gravity measurement: Amazing grace, *Nature*, 416, 10-11.

Lemoine, F.G., Kenyon, S. C., Factor, J.K., Trimmer, R. G., Pavlis, N. K., Chinn, D. S., Cox, C. M., Klosko, S. M., Luthcke, S. B., Torrence, M.H., Wang, Y. M., Williamson, R.G., Pavlis, E.C., Rapp, R. H. and Olson, T. R., The Development of the joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96, 1998.

Levi, B. G., 2003, GRACE Satellites Start to Map Earth's Gravity Field, *Physics Today*, 56, 18.

Molina, E.C., 1999. Avaliação preliminar do modelo geopotencial EGM96 no território brasileiro. *IGes Bulletin Special Number for South America*, 9, 63-71.

Rabus, B., Eineder, M., Roth, A., Bamler, R., 2003, The shuttle radar topography mission – a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *Photogrammetry and Remote Sensing*, 57, 241-262.

Smith, W. H. F. and Sandwell, D.T., 1997, Global Sea Floor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Soundings. *Science*, 277 (5334), 1956-1962.

### Figuras

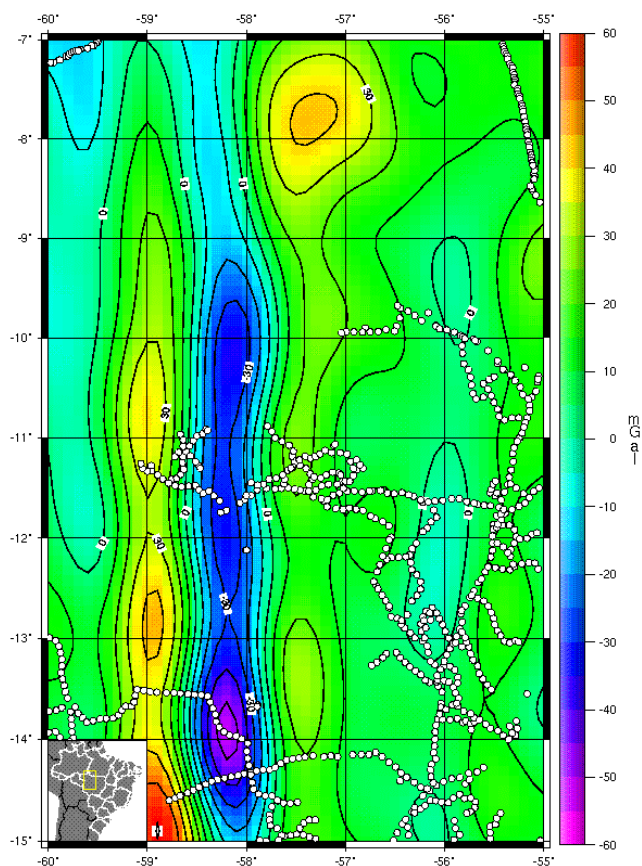


Figura 1: Representação da anomalia ar-livre (EGM96/360) na região de estudo. As estações gravimétricas disponíveis na região encontram-se representadas em branco, os pontos brancos no mapa referem-se às localizações das estações gravimétricas.



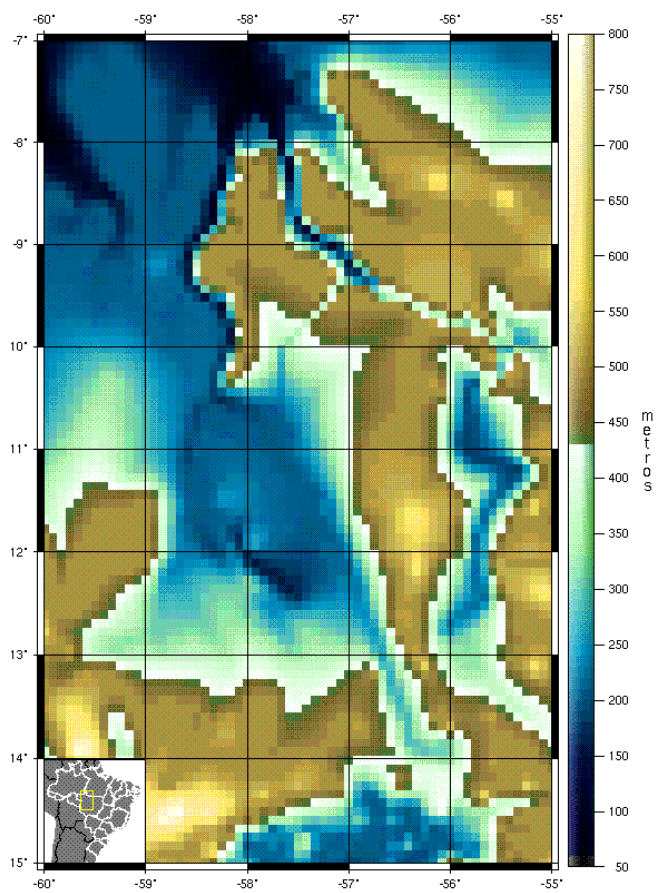


Figura 2: Modelo Topográfico Global JGP95E, com resolução nominal de 5'.

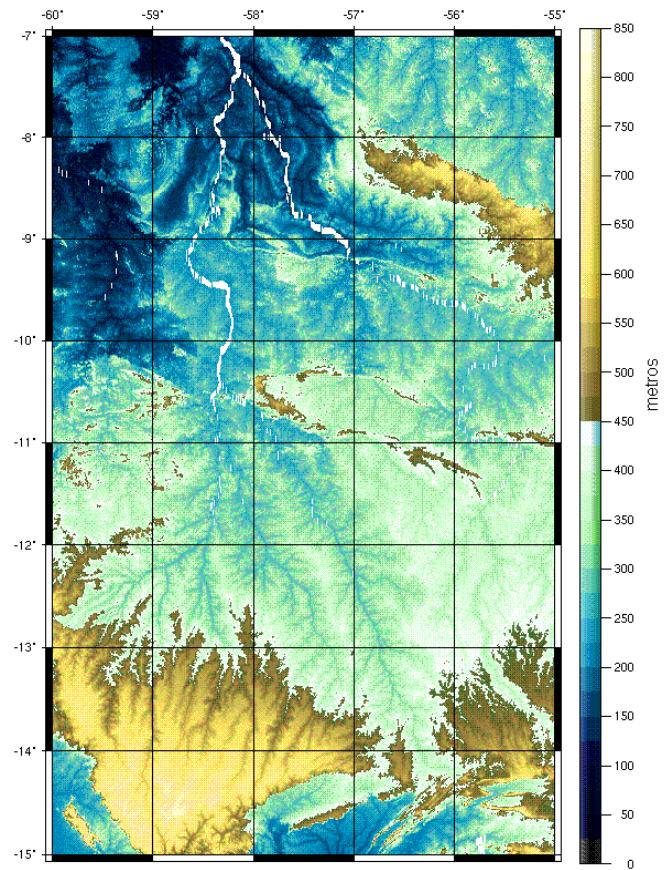


Figura 3: Modelo topográfico digital calculado com os dados da *SRTM*.

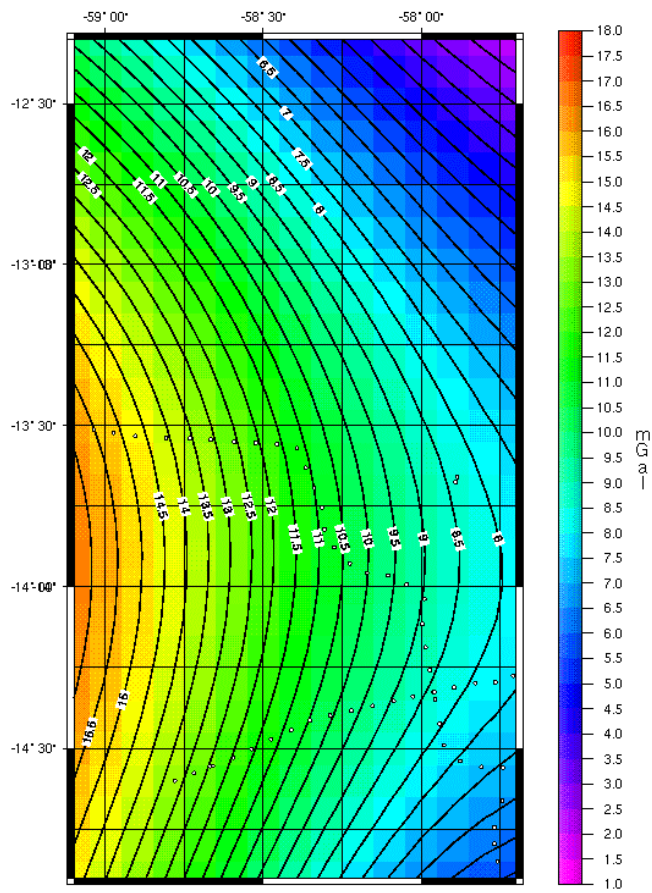


Figura 4: Anomalia ar-livre calculada com o modelo EGM96 até grau e ordem 110. Os pontos no mapa referem-se às localizações das estações gravimétricas.

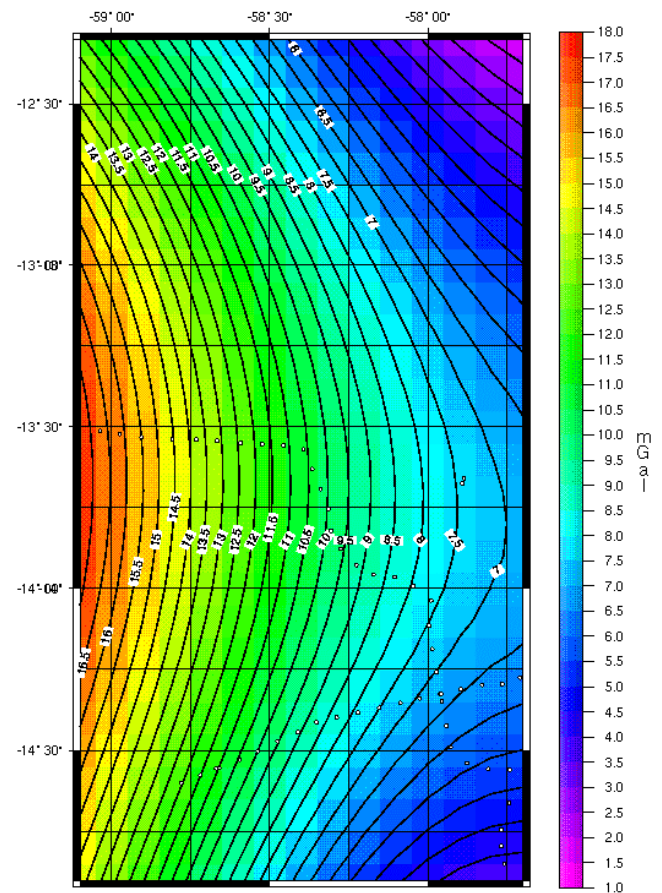


Figura 5: Anomalia ar-livre calculada com o modelo EIGEN-GRACE01S até grau e ordem 110. Os pontos no mapa referem-se às localizações das estações gravimétricas.

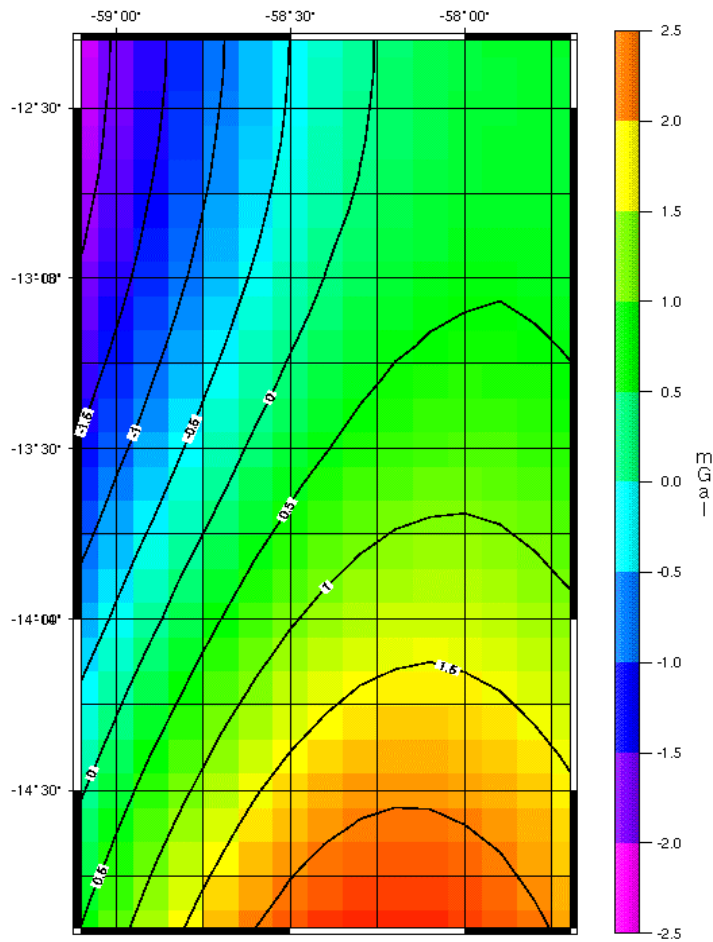


Figura 6: Diferença entre os dois modelos (EGM96 – EIGEN-GRACE01S) calculados até grau e ordem 110.

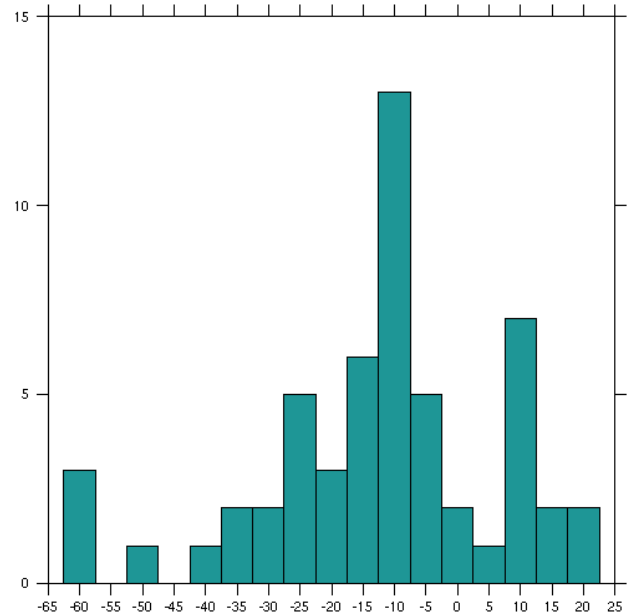
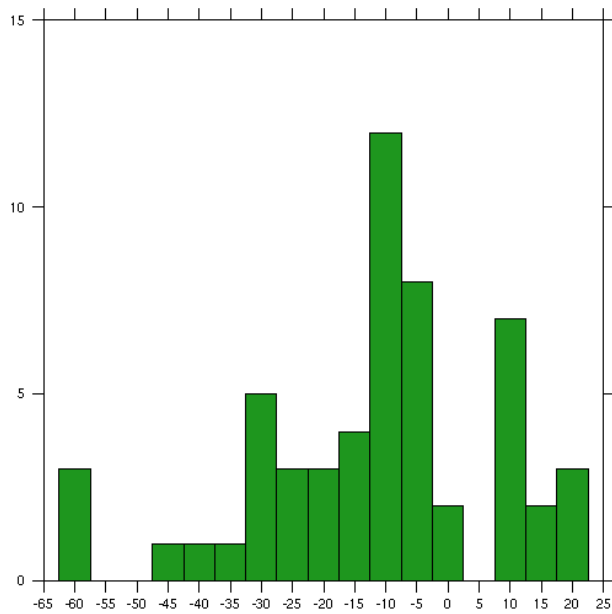


Figura 7: O histograma à esquerda representa a diferença entre os dados do modelo EGM96 (grau e ordem 110) e os dados gravimétricos terrestres, o histograma à direita representa a diferença entre os dados do modelo EIGEN-GRACE01S (grau e ordem 110) e os dados gravimétricos terrestres. Valores em mGal.