5 CÁLCULO DO GEÓIDE NO BRASIL

Foram gerados modelos de ondulação geoidal utilizando a técnica "remover-calcular-repor" (Seção 3.8), em conjunto com a modificação de Featherstone, Evans e Olliver (1998), no caso do cálculo por FFT (Seção 3.3.2), e de Vanicek e Kleusberg (1987), no caso do cálculo por meio da integração numérica (Seção 3.3.1), do núcleo da integral de Stokes (Seção 2.4.1.4). Foi chamado de GEOIDE2005 o modelo geoidal determinado por FFT pelo programa FFTMOD [1] (LI, 1993; LI; SIDERIS, 1993b), em FORTRAN77, com a opção de modificação do núcleo de Stokes implementada como opção de cálculo. Foi denominado de STOKES2005 o modelo calculado por integração numérica com o programa STOKESMOD.FOR, desenvolvido pelo Prof. Blitzkow da EPUSP, com a modificação de Vanicek e Kleusberg (1987) do núcleo de Stokes. Nos dois casos, o raio de integração escolhido foi de ($\psi_0 = 1°$) e a área de cálculo foi limitada pelas latitudes $7°$ e $-36°$ e pelas longitudes $-34°$ e $-75°$, e mais $5°$ além da área de interesse, de modo a evitar os efeitos de borda. Os modelos calculados foram corrigidos do termo de ordem zero, $N_0 = -0,5m$, para compatibilização com o elipsóide GRS80, usado pelo SIRGAS2000.

Na construção da malha de anomalias médias de $5' \times 5'$ utilizada (Figura 31), que depois foi transformada para $10' \times 10'$, foi empregada a média aritmética para a determinação do valor médio da anomalia das quadrículas com dados. Para as quadrículas sem informação, o valor médio foi obtido a partir da interpolação das quadrículas adjacentes que continham dados. Quando as quadrículas adjacentes também não possuíam informações, era atribuído um valor nulo para a anomalia média. No mesmo arquivo foram introduzidos os valores médios de altitude e de correção de terreno, ambos gerados a partir do MDT SAM2004_1MV1. Foi ignorado o valor médio de altitude relativo às estações gravimétricas por não serem representativos das quadrículas, uma vez que tais estações geralmente foram determinadas ao longo de vales e estradas.

Com base no modelo digital de gravidade de $10' \times 10'$, a anomalia Helmert foi

[1] Programa desenvolvido por Li e Sideris (1993) do *Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Calgary, Canada*

reconstituída a partir da anomalia de Bouguer. A componente de curto comprimento de onda da altura geoidal foi calculada no centro de cada quadrícula. Finalmente a componente de longo comprimento de onda da altura geoidal foi reintroduzida por meio do MG. Para isso, os MGs (Tabela 5) EGM96 (até grau e ordem 180 e 360), EIGEN-1 e EIGEN-GRACE01S, os dois últimos com dados das missões CHAMP e GRACE, respectivamente, foram comparados com as alturas geoidais provenientes da diferença entre a altitude elipsoidal derivada das observações GPS e a altitude ortométrica determinadas por meio de nivelamento geométrico (desse ponto em diante chamada "GPS/niv"). Em virtude da distribuição não homogênea de estações GPS/niv no país (Seção 4.2), a avaliação dos modelos foi concentrada nas áreas onde estes encontravam-se disponíveis para identificar que modelo forneceria um melhor ajuste com a RAB (Figuras 43, 44, 45 e 46 e Tabela 9).

As comparações com o modelo EGM96, nas opções até grau e ordem 180 e até grau e ordem 360, apresentaram melhores resultados. Porém, apesar da diferença entre eles não ser acentuada, optou-se pela utilização do EGM96 até grau e ordem 180 pois sabe-se que a distribuição das informações de gravidade no Brasil, utilizadas em seu cálculo, não era suficiente para atender àquele grau. Após a divulgação do EGM96, a distribuição de gravidade no país sofreu uma considerável melhoria.

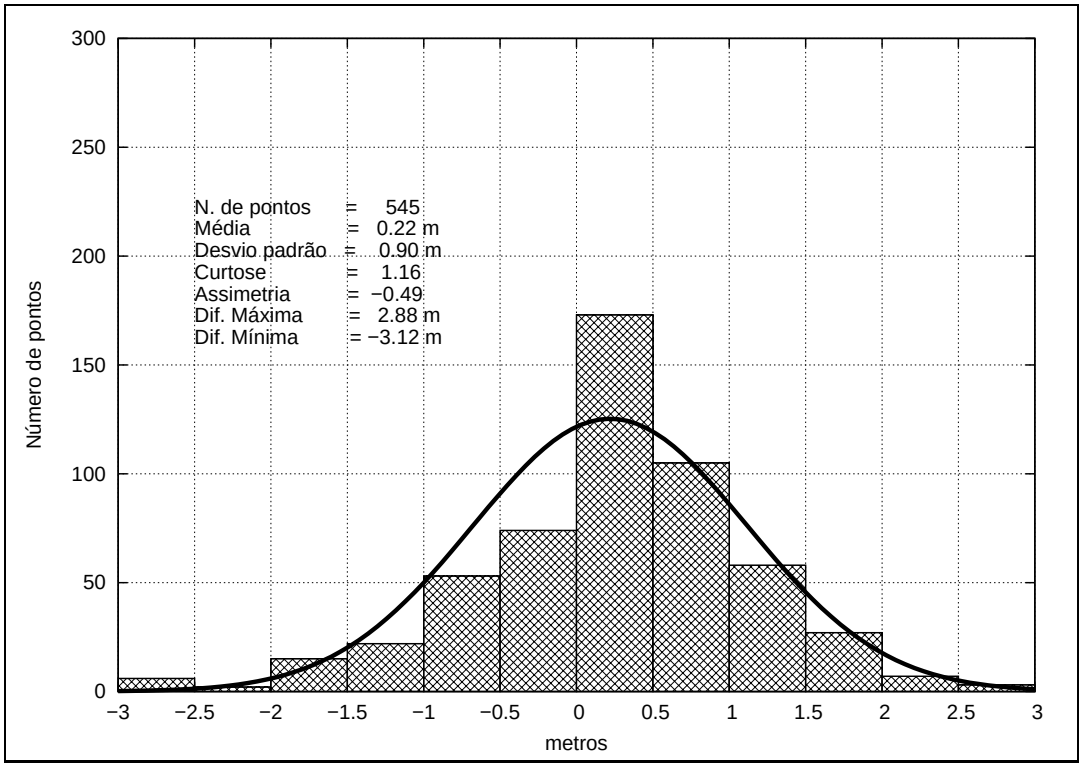

Figura 43: Comparação GPS/niv com EIGEN-1 até grau e ordem 119

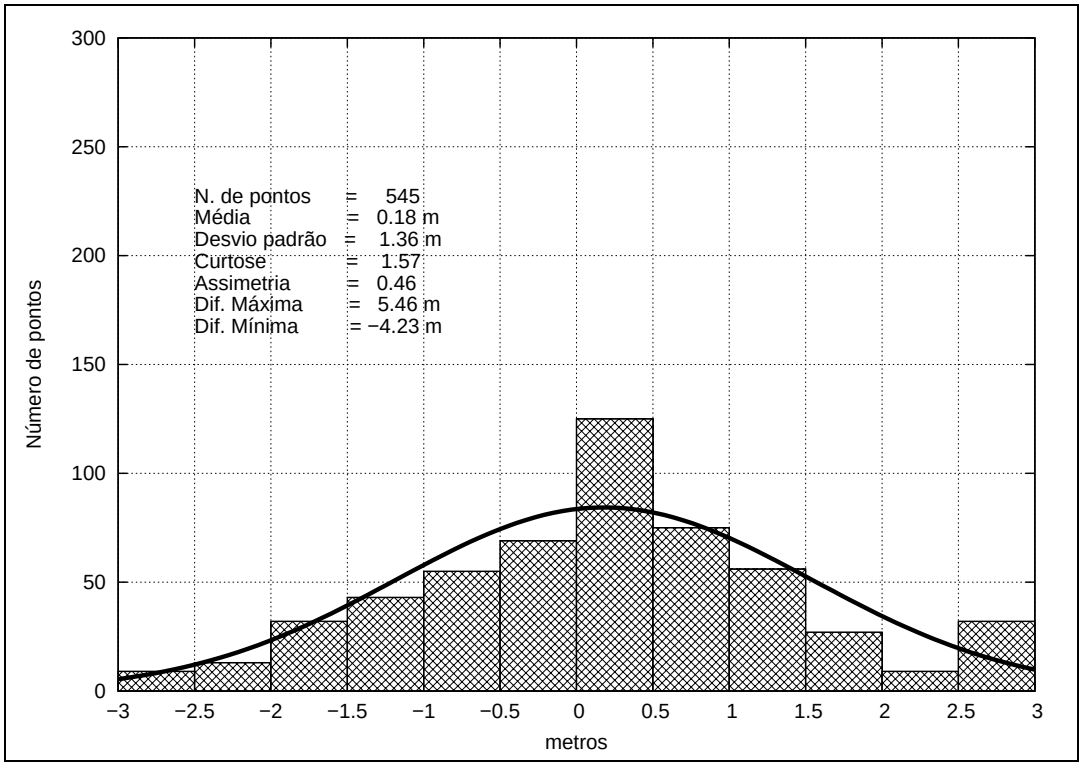

Figura 44: Comparação GPS/niv com EIGEN-GRACE01S até grau e ordem 140

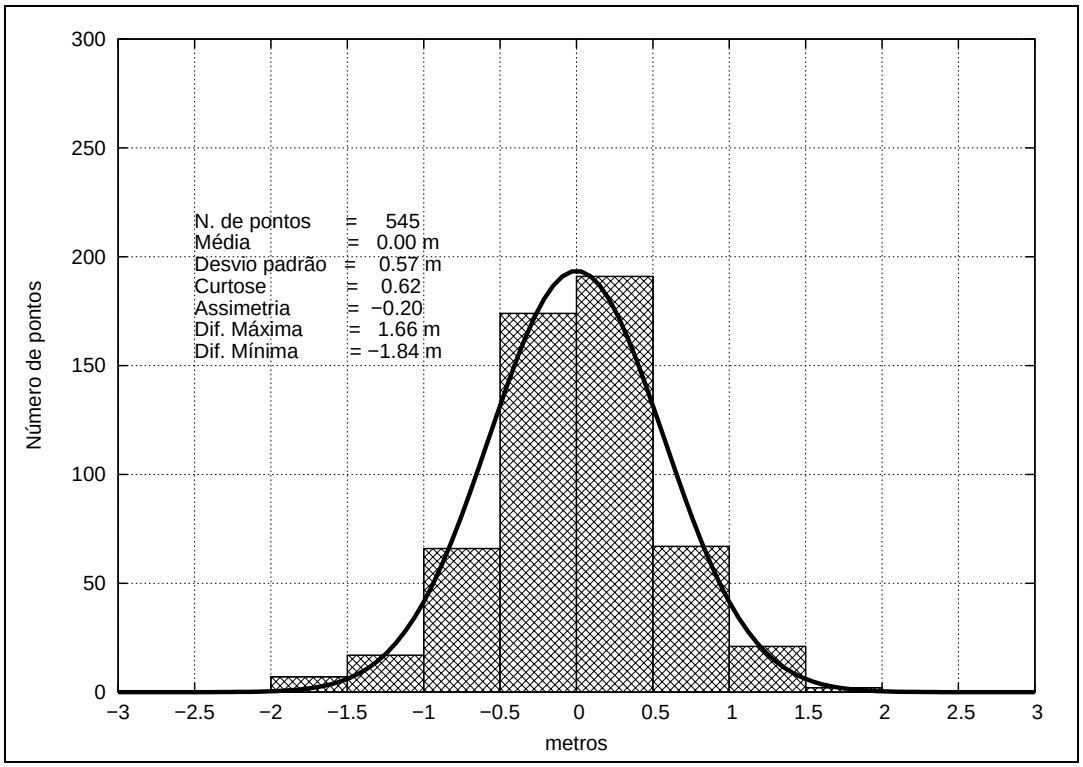

Figura 45: Comparação GPS/niv com EGM96 até grau e ordem 180

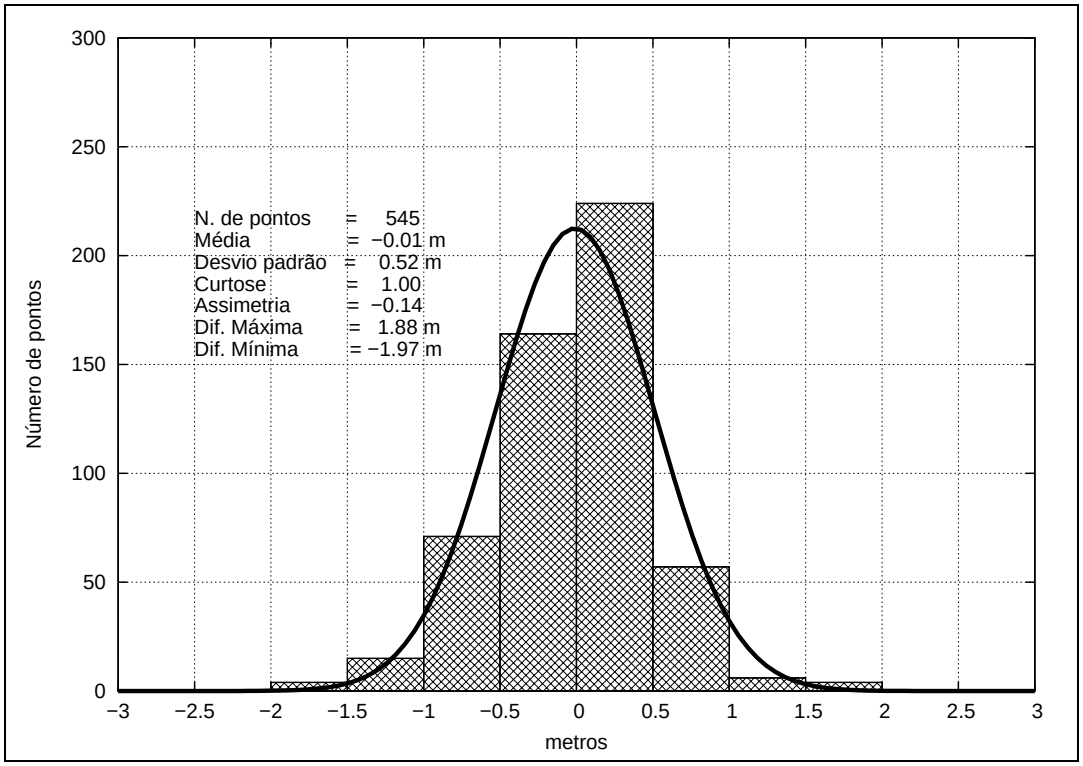

Figura 46: Comparação GPS/niv com EGM96 até grau e ordem 360

Tabela 9: Estatísticas das comparações dos modelos de geopotencial

Modelo	Média (m)	Desvio Padrão (m)	Variância (m)	Assimetria	Curtose	Valor Máximo (m)	Valor Mínimo (m)
EIGEN-1	0,22	0,90	0,82	-0,49	1,16	2,88	-3.12
EIGEN-GRACE01S	0,18	1,36	1,84	0,46	1,57	5,46	-4,23
EGM96 (180)	0,00	0,57	0,32	-0,20	0,62	1,66	-1,84
EGM96 (360)	-0,01	0,52	0,26	-0,14	1,00	1,88	-1,97

5.1 Resultados

Os modelos GEOIDE2005 (Figura 48) e MAPGEO2004, (LOBIANCO; BLITZKOW; MATOS, 2005) (Figura 47), última versão divulgada pelo IBGE, e STOKES2005, que utilizou a integração numérica, são comparados com as estações GPS/niv e seus resultados apresentados nas Tabelas 10 e 11. A diferença entre o GEOIDE2005 e o MAPGEO2004, que utilizaram a FFT, está relacionada aos MDTs utilizados nos dois casos (SAM2004_1mv2 e SAM2004_1mv1, respectivamente) e à correção de terreno calculada

a partir destes, uma vez que a malha de anomalias média Helmert, organizada para esse trabalho, foi a mesma usada no cálculo do MAPGEO2004.

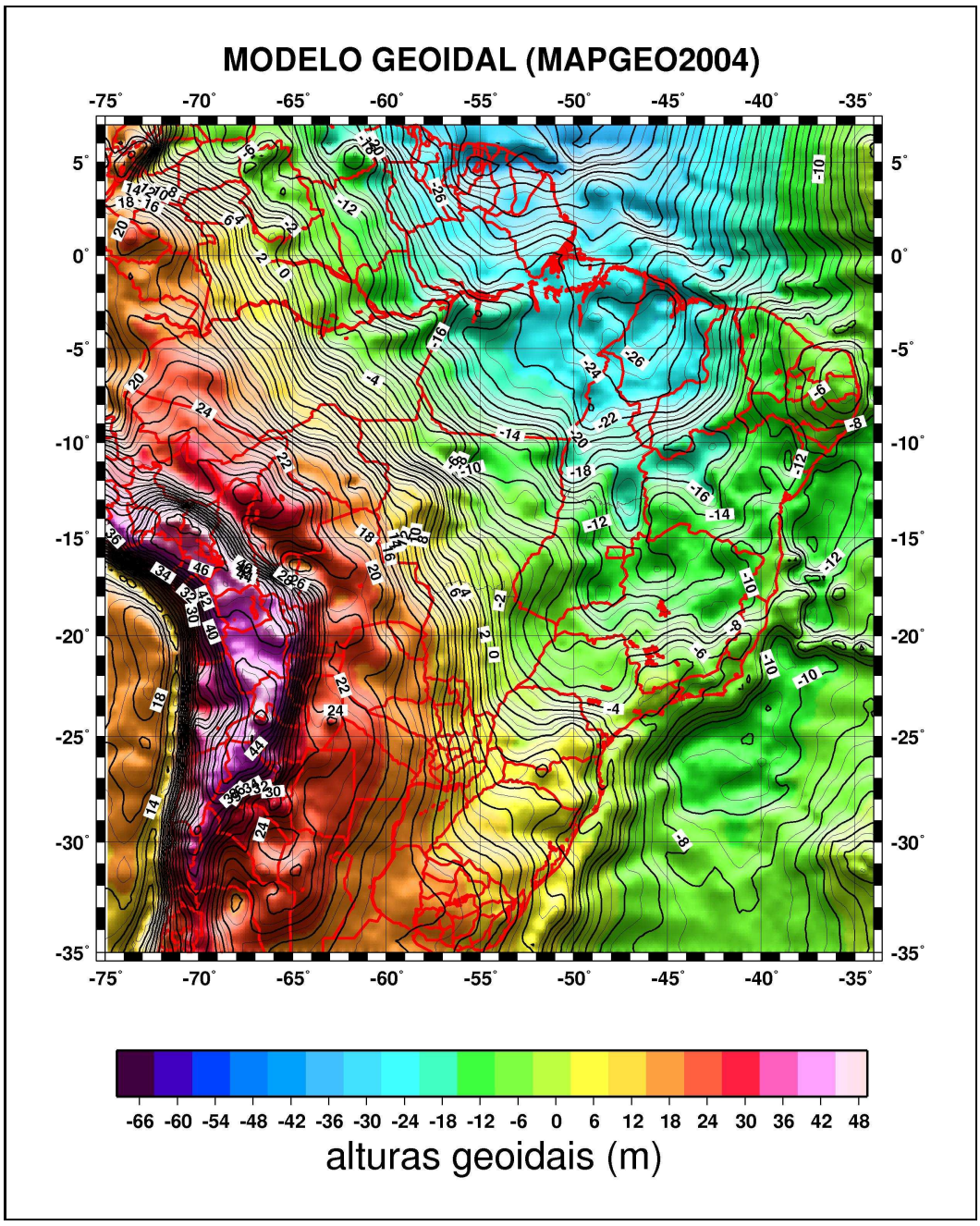

Figura 47: Modelo geoidal MAPGEO2004 em SIRGAS2000

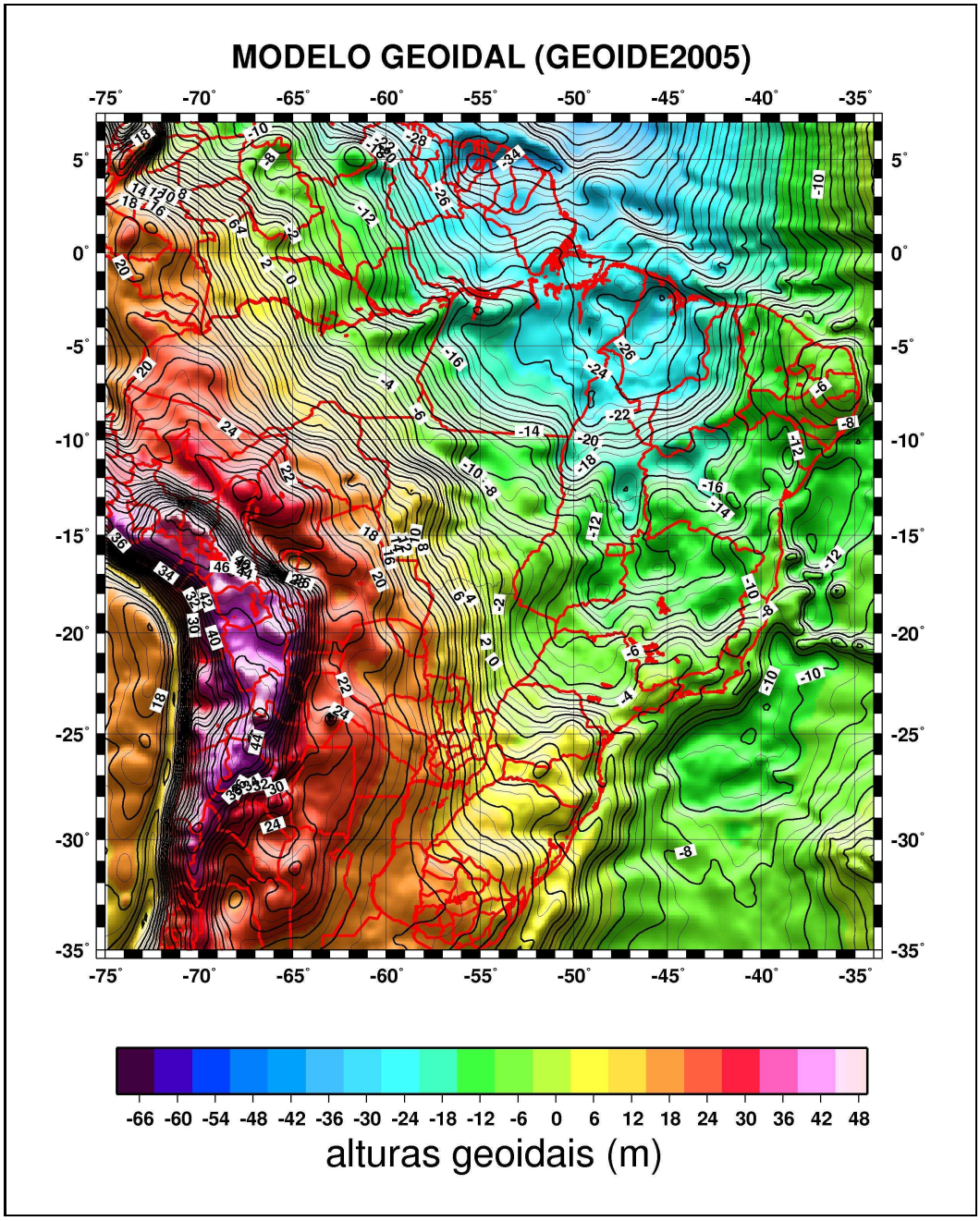

Figura 48: Modelo geoidal GEOIDE2005 em SIRGAS2000

5.1.1 Erro "absoluto" dos modelos geoidais

Para determinação do erro "absoluto" dos modelos, foram utilizadas as ondulações geoidais provenientes das estações GPS/niv e procedidas comparações com os modelos MAPGEO2004, GEOIDE2005 e STOKES2005. As Figuras 49, 50 e 51 apresentam os histogramas das comparações.

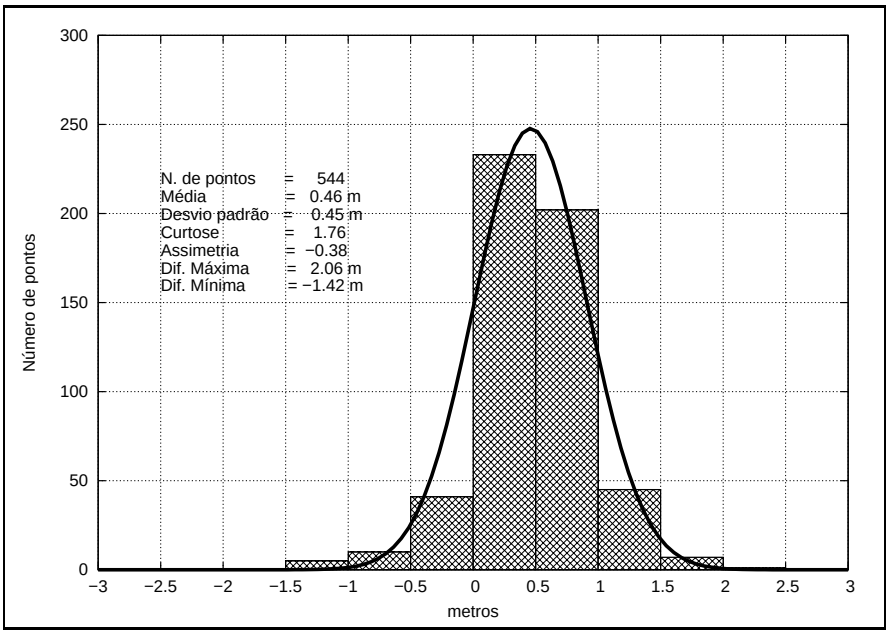

Figura 49: Comparação GPS/niv com o modelo MAPGEO2004

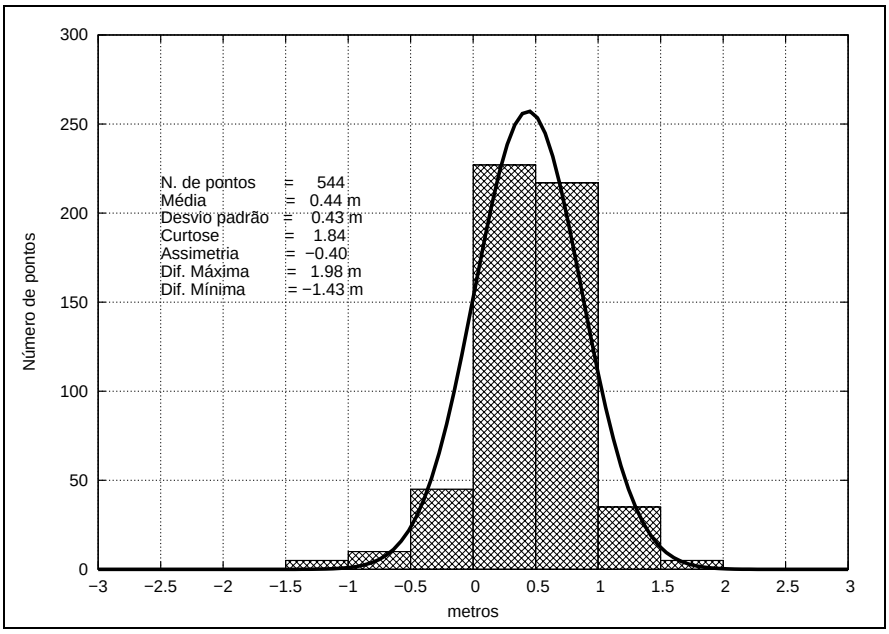

Figura 50: Comparação GPS/niv com o modelo GEOIDE2005

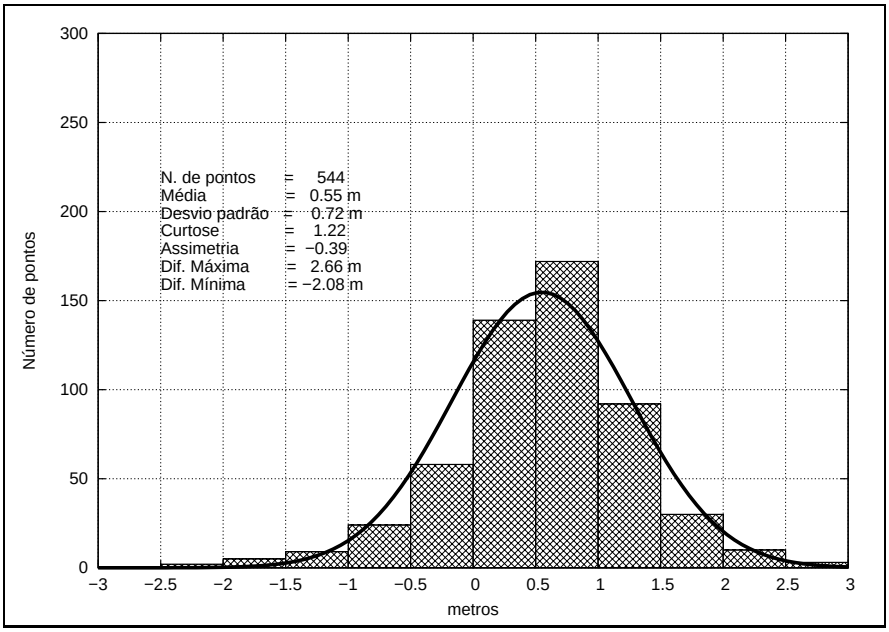

Figura 51: Comparação GPS/niv com o modelo STOKES2005

Na Tabela 10 são apresentados os resultados destas comparações da ondulação geoidal GPS/niv com as obtidas por meio dos modelos de ondulação geoidal MAPGEO2004, GEOIDE2005 e STOKES2005.

Tabela 10: Estatísticas dos modelos geoidais

Modelo	Média (m)	Desvio Padrão (m)	Variância (m)	Assimetria	Curtose	Valor Máximo (m)	Valor Mínimo (m)
MAPGEO2004	0,46	0,45	0,20	-0,38	1,76	2,06	-1.42
STOKES2004	0,55	0,72	0,52	-0,39	1,22	2,66	-2,08
GEOIDE2005	0,44	0,43	0,19	-0,40	1,84	1,98	-1,43

As Figuras 52 a 66 apresentam, à direita, a comparação do modelo GEOIDE2005 (ondulação geoidal disposta na forma de grade) com os valores de ondulação geoidal fornecidos diretamente de estações GPS/niv. A cor verde corrresponde às estações determinadas pelo IBGE e a azul às estações cedidas pelo IAG/USP. As isolinhas do GEOIDE2005 são representadas em vermelho. À esquerda de cada figura, encontra-se a localização da quadrícula ao seu lado, onde pode ser vista a diferença regional do GEOIDE2005, função da distribuição e qualidade dos dados utilizados para o seu cálculo, diferente em cada região.

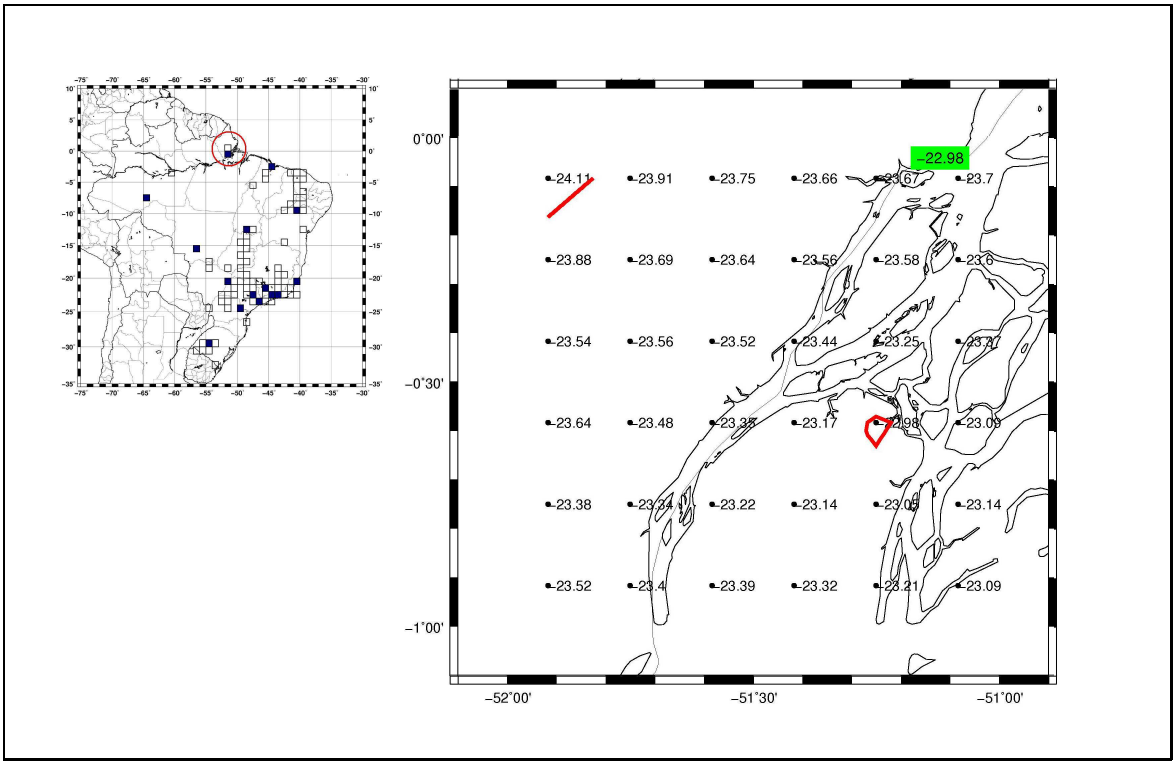

Figura 52: Comparação GPS/nivelamento com o GEOIDE2005 na área $0° \leq \varphi \leq -1°$ e $-51° \leq \lambda \leq -52°$

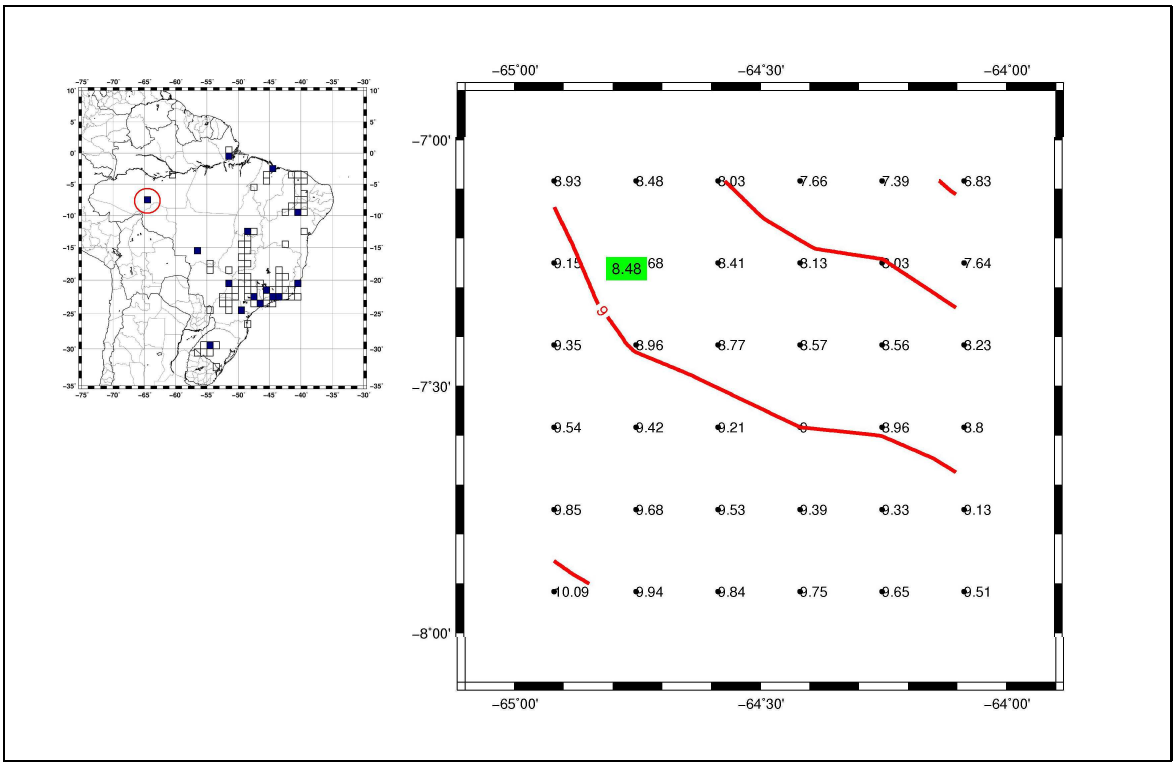

Figura 53: Comparação GPS/nivelamento com o GEOIDE2005 na área $-7° \leq \varphi \leq -8°$ e $-65° \leq \lambda \leq -66°$

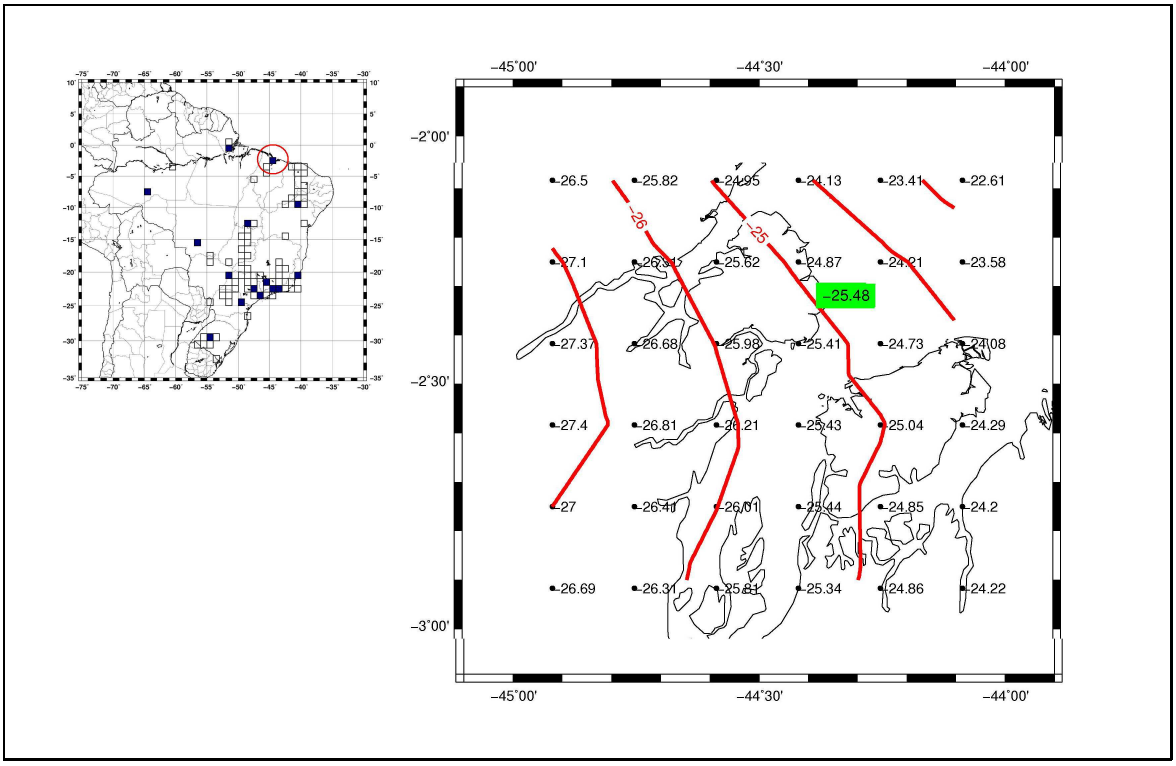

Figura 54: Comparação GPS/nivelamento com o GEOIDE2005 na área $-2° \leq \varphi \leq -3°$ e $-44° \leq \lambda \leq -45°$

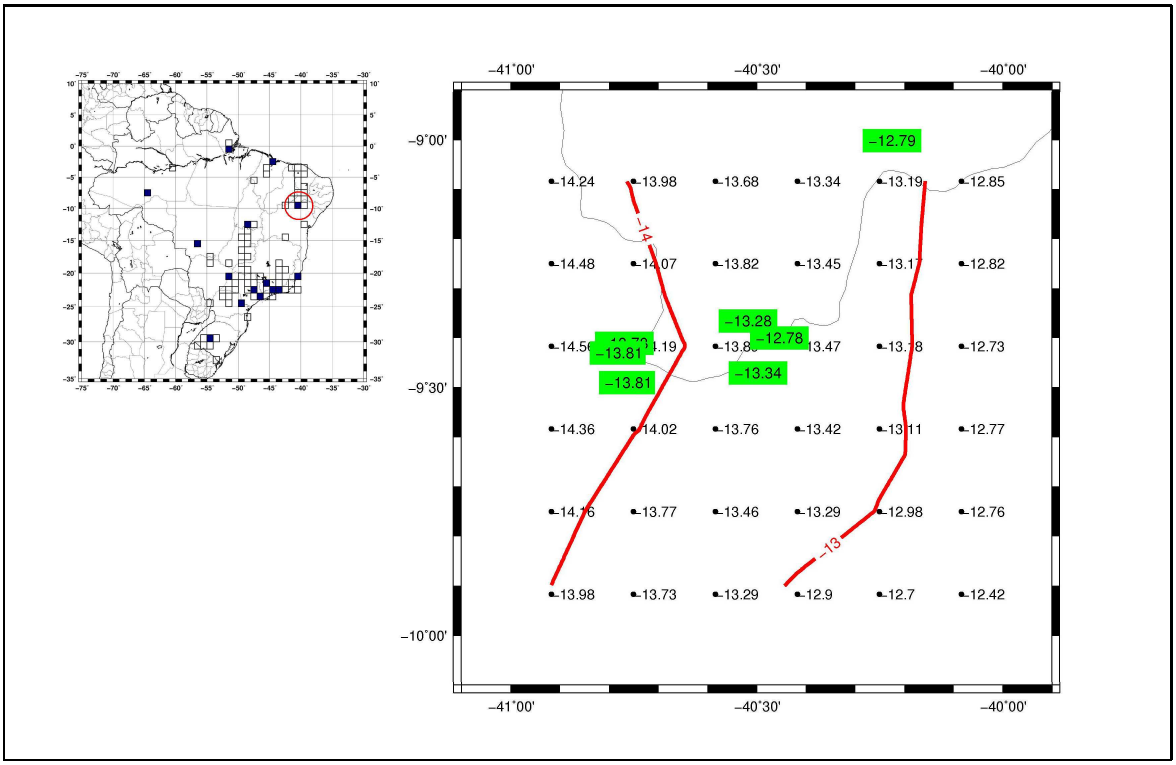

Figura 55: Comparação GPS/nivelamento com o GEOIDE2005 na área $-9° \leq \varphi \leq -10°$ e $-40° \leq \lambda \leq -41°$

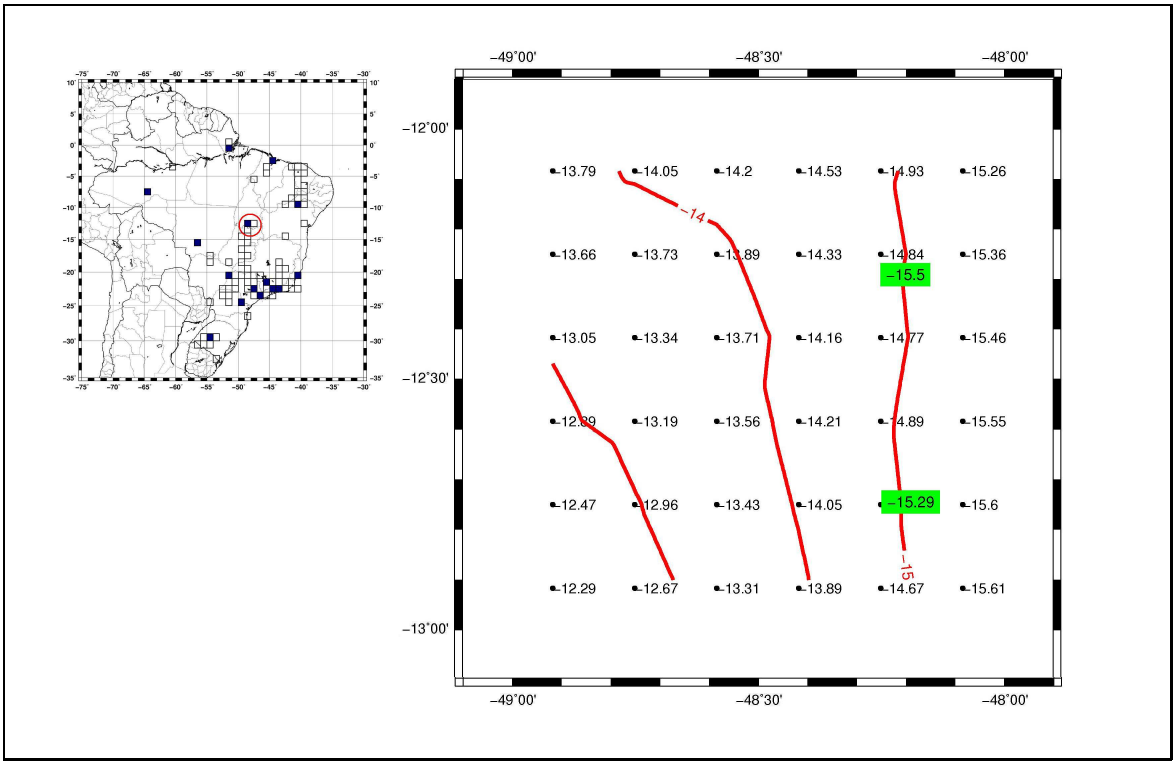

Figura 56: Comparação GPS/nivelamento com o GEOIDE2005 na área $-12° \leq \varphi \leq -13°$ e $-48° \leq \lambda \leq -49°$

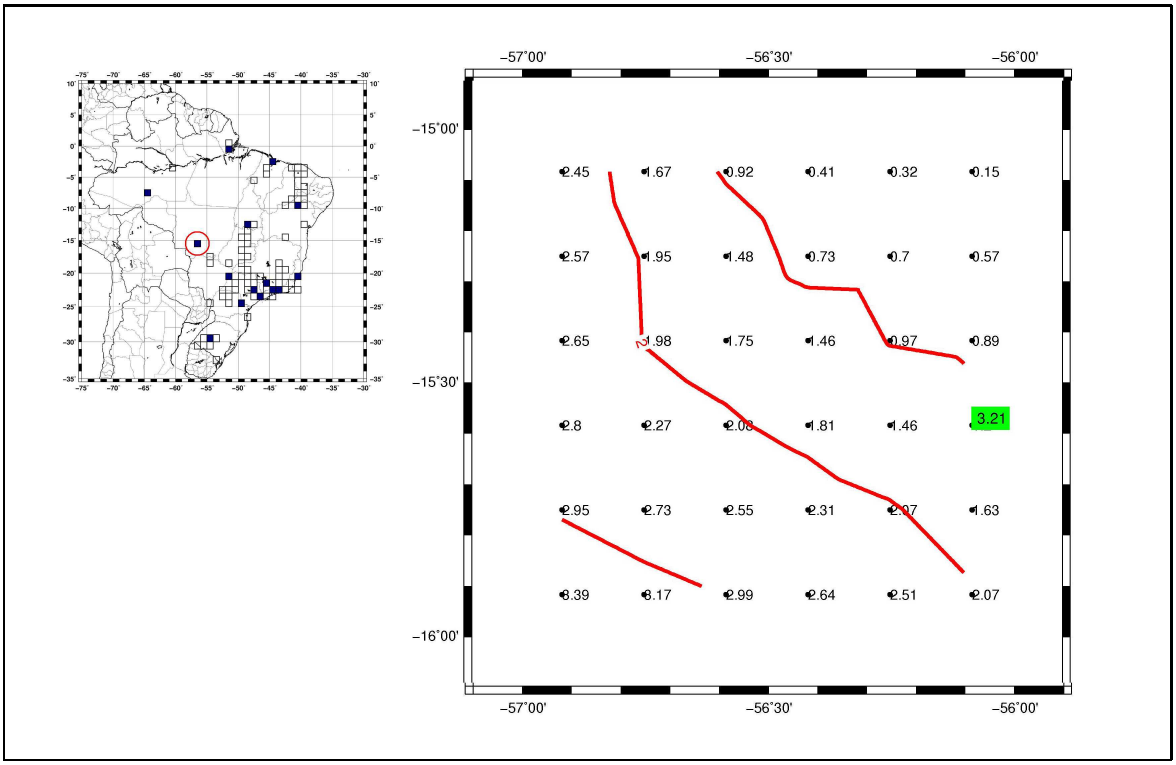

Figura 57: Comparação GPS/nivelamento com o GEOIDE2005 na área $-15° \leq \varphi \leq -16°$ e $-56° \leq \lambda \leq -57°$

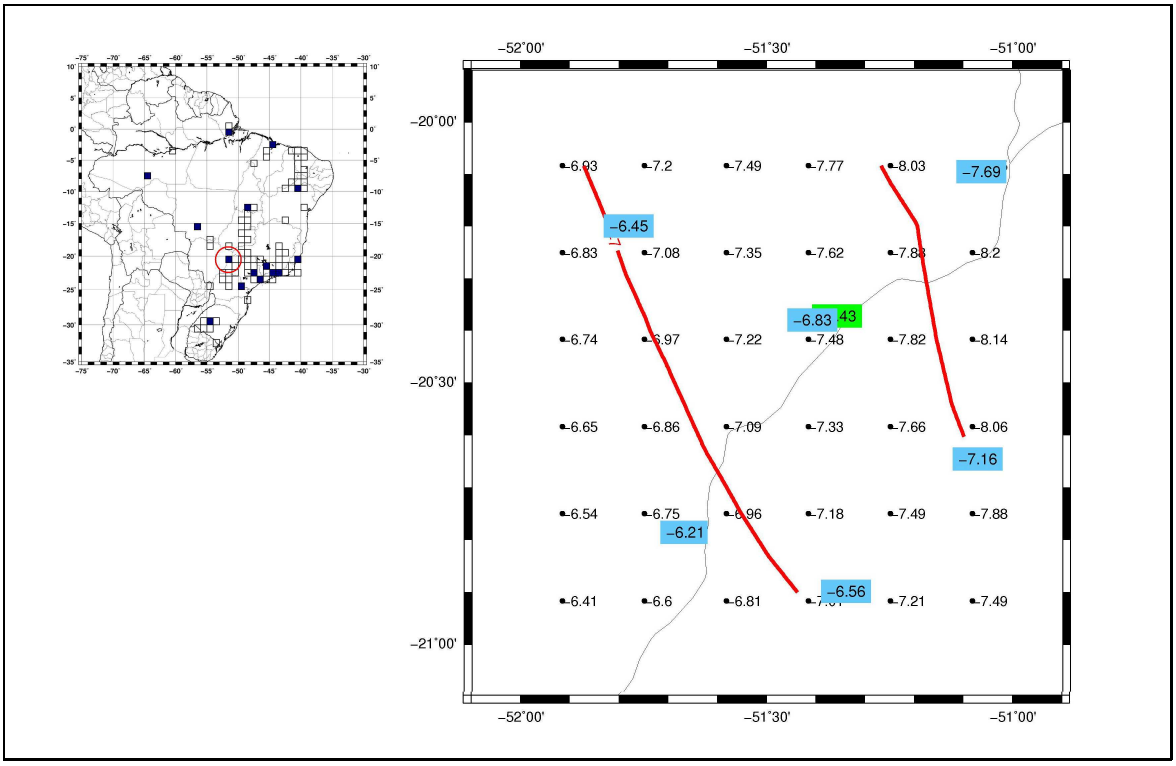

Figura 58: Comparação GPS/nivelamento com o GEOIDE2005 na área $-20° \leq \varphi \leq -21°$ e $-51° \leq \lambda \leq -52°$

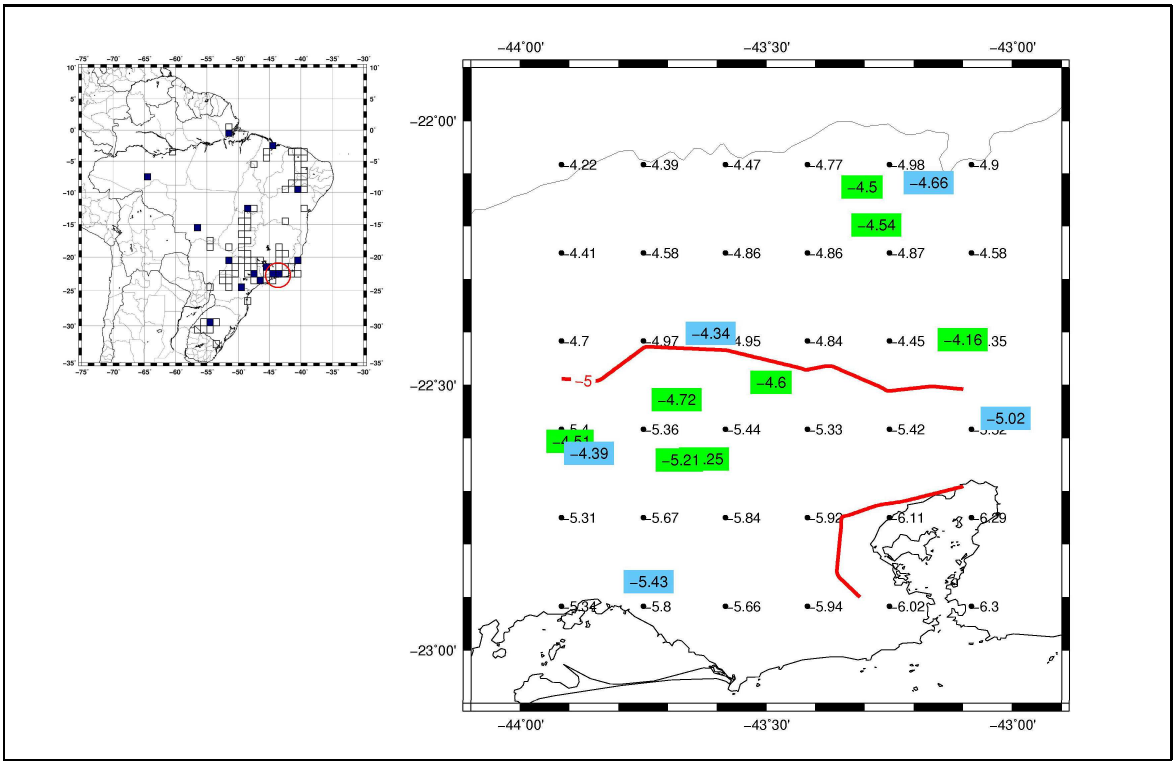

Figura 59: Comparação GPS/nivelamento com o GEOIDE2005 na área $-22° \leq \varphi \leq -23°$ e $-43° \leq \lambda \leq -44°$

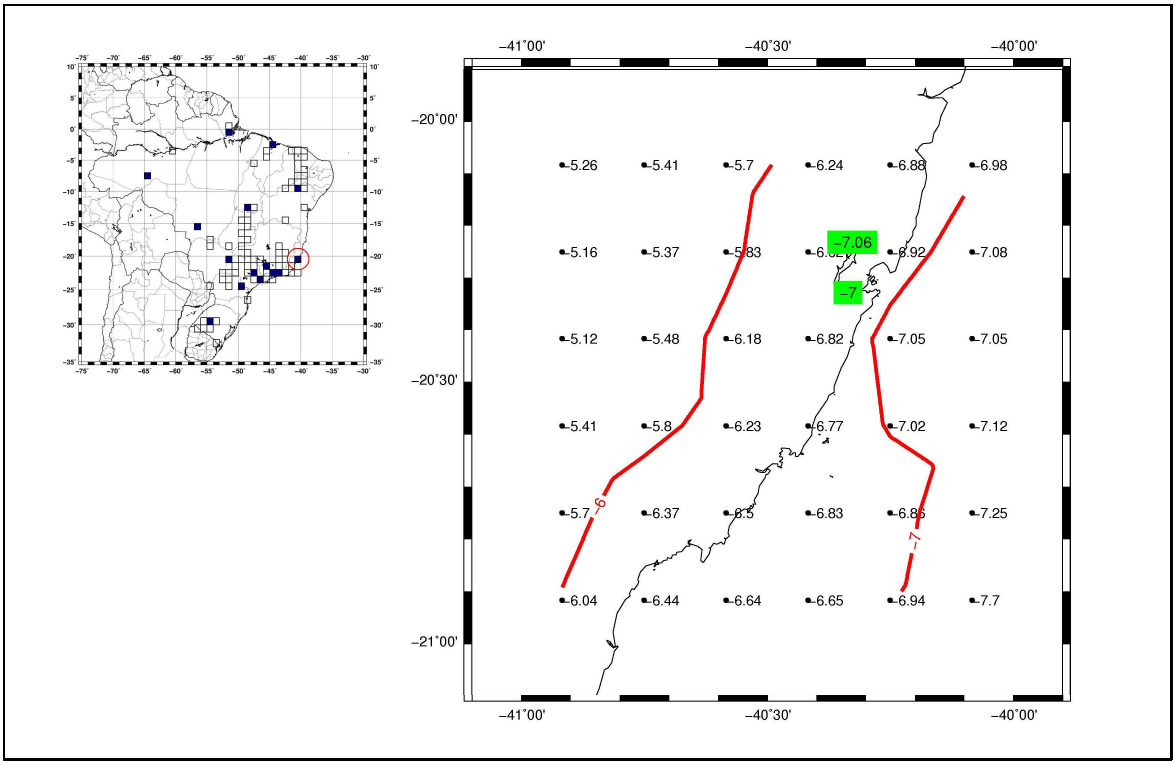

Figura 60: Comparação GPS/nivelamento com o GEOIDE2005 na área $-20° \leq \varphi \leq -21°$ e $-40° \leq \lambda \leq -41°$

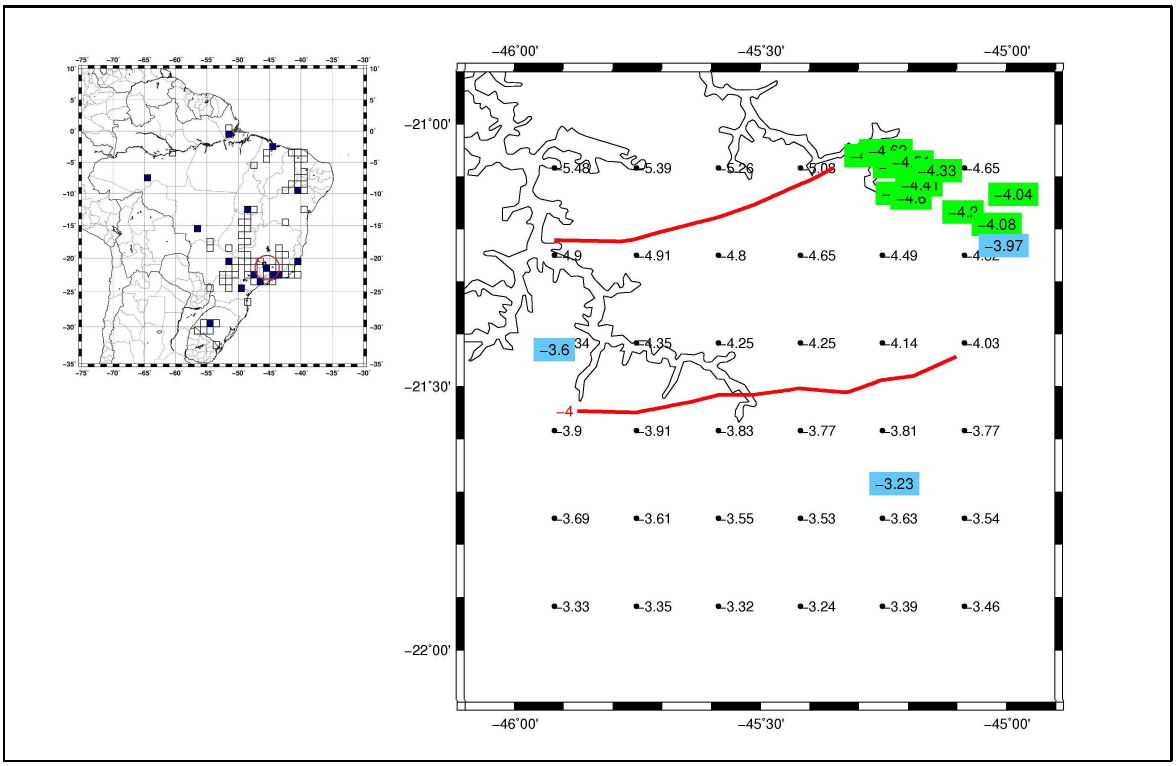

Figura 61: Comparação GPS/nivelamento com o GEOIDE2005 na área $-21° \leq \varphi \leq -22°$ e $-45° \leq \lambda \leq -46°$

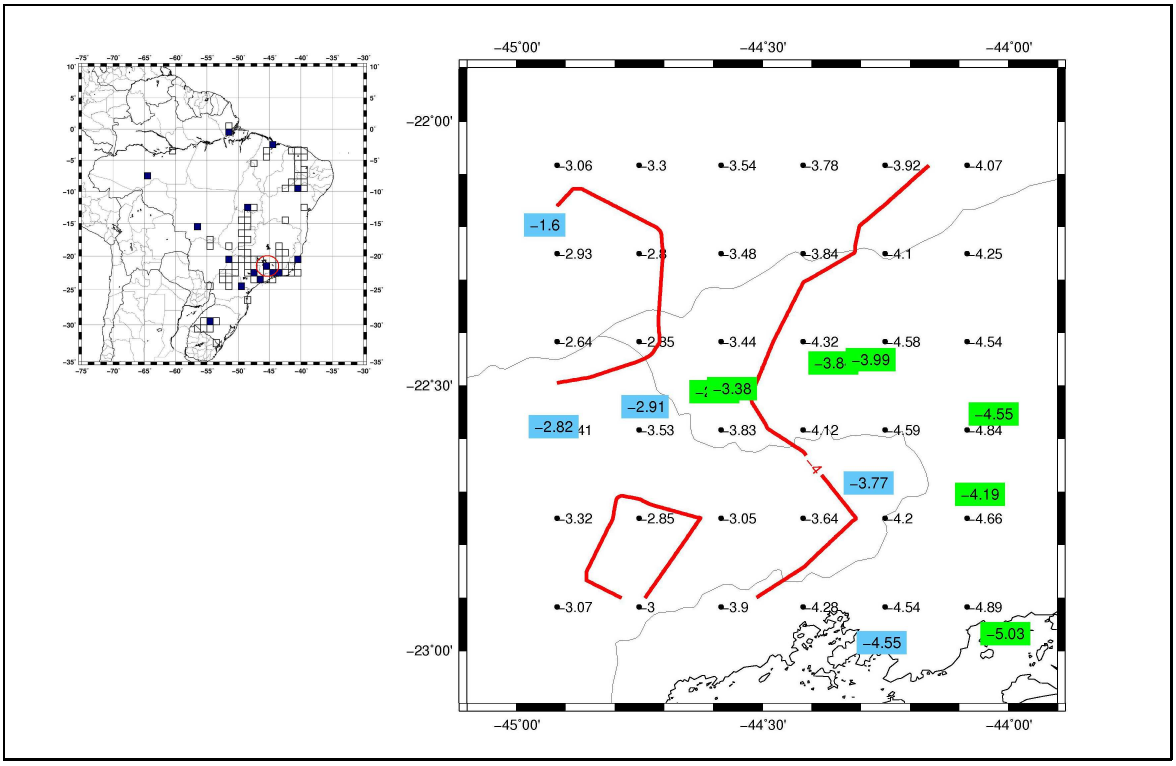

Figura 62: Comparação GPS/nivelamento com o GEOIDE2005 na área $-22° \leq \varphi \leq -23°$ e $-44° \leq \lambda \leq -45°$

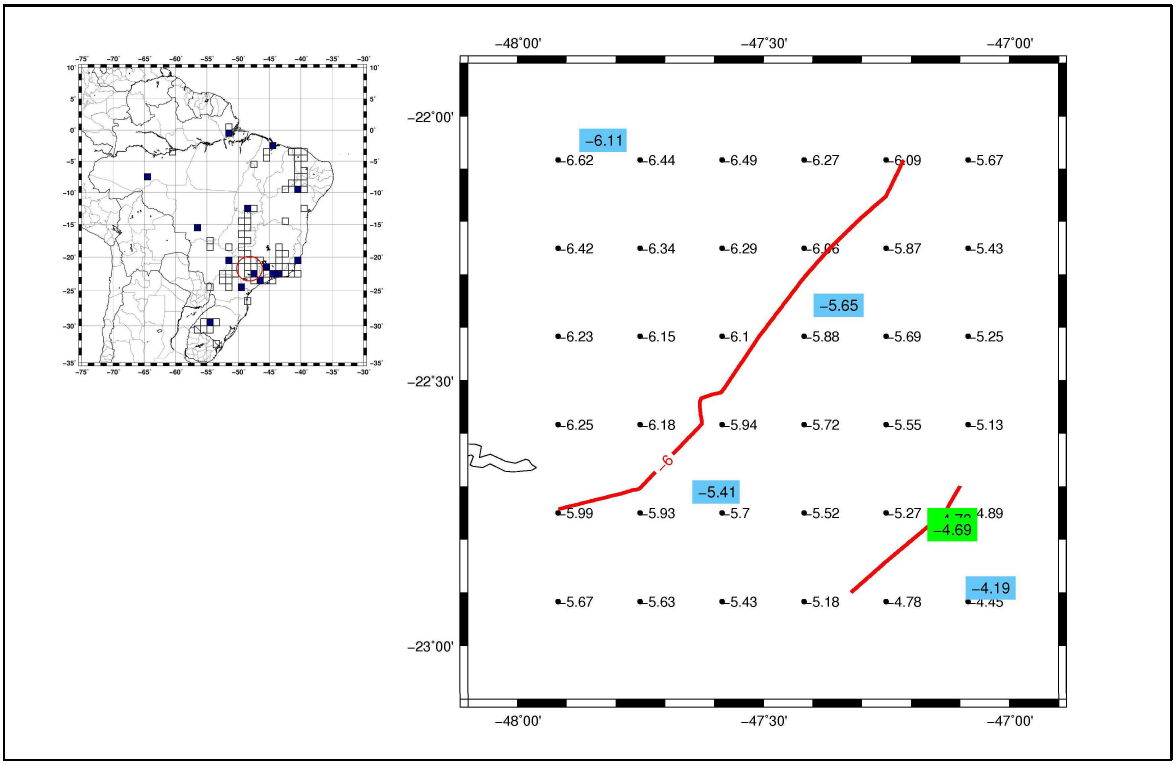

Figura 63: Comparação GPS/nivelamento com o GEOIDE2005 na área $-22° \leq \varphi \leq -23°$ e $-47° \leq \lambda \leq -48°$

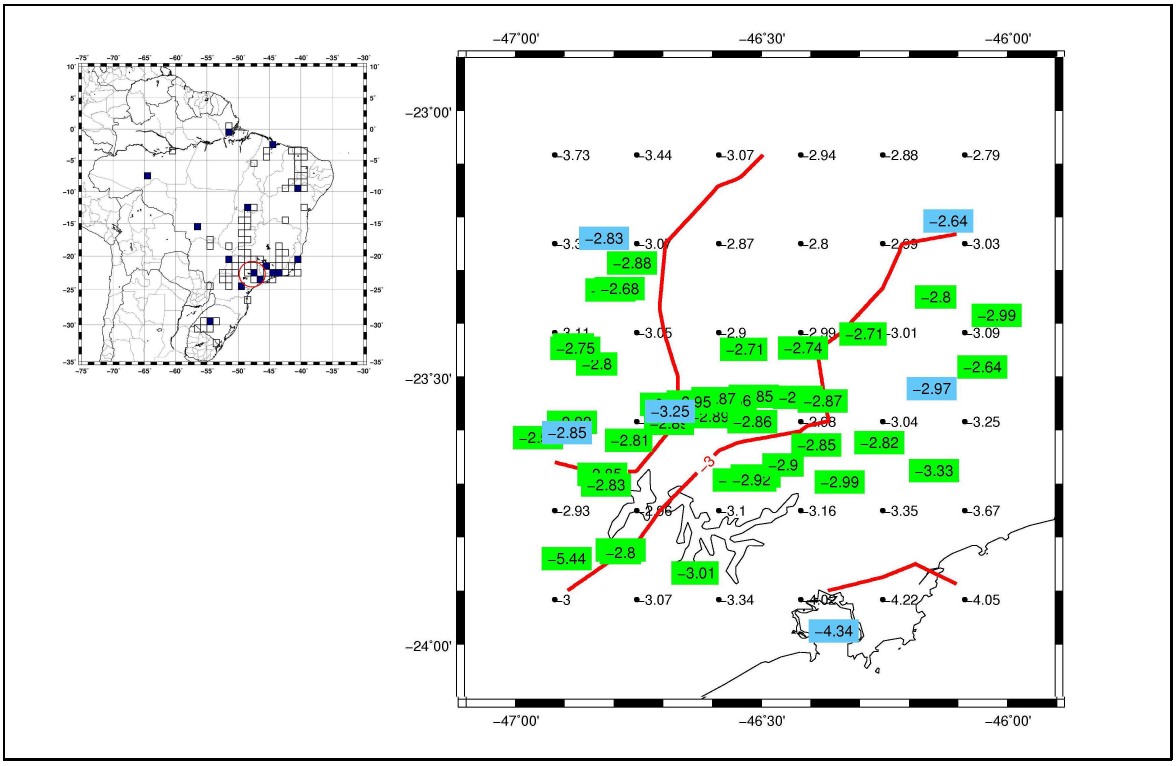

Figura 64: Comparação GPS/nivelamento com o GEOIDE2005 na área $-23° \leq \varphi \leq -24°$ e $-46° \leq \lambda \leq -47°$

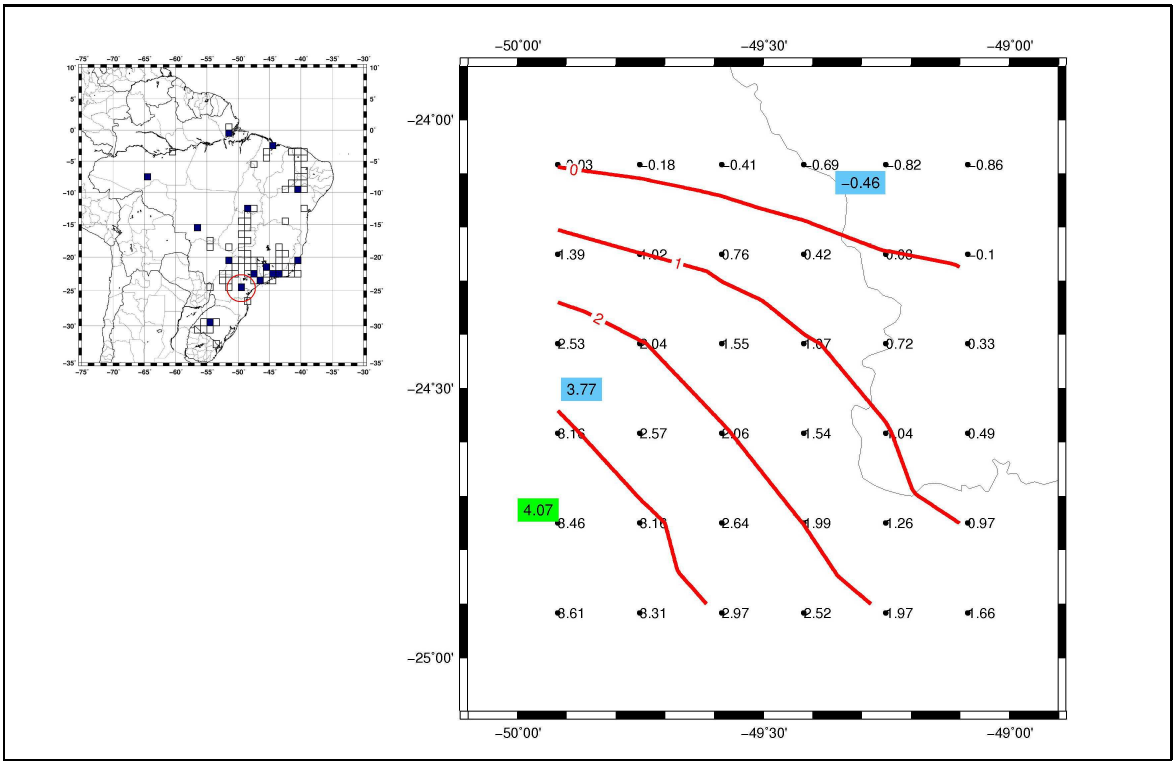

Figura 65: Comparação GPS/nivelamento com o GEOIDE2005 na área $-24° \leq \varphi \leq -25°$ e $-49° \leq \lambda \leq -50°$

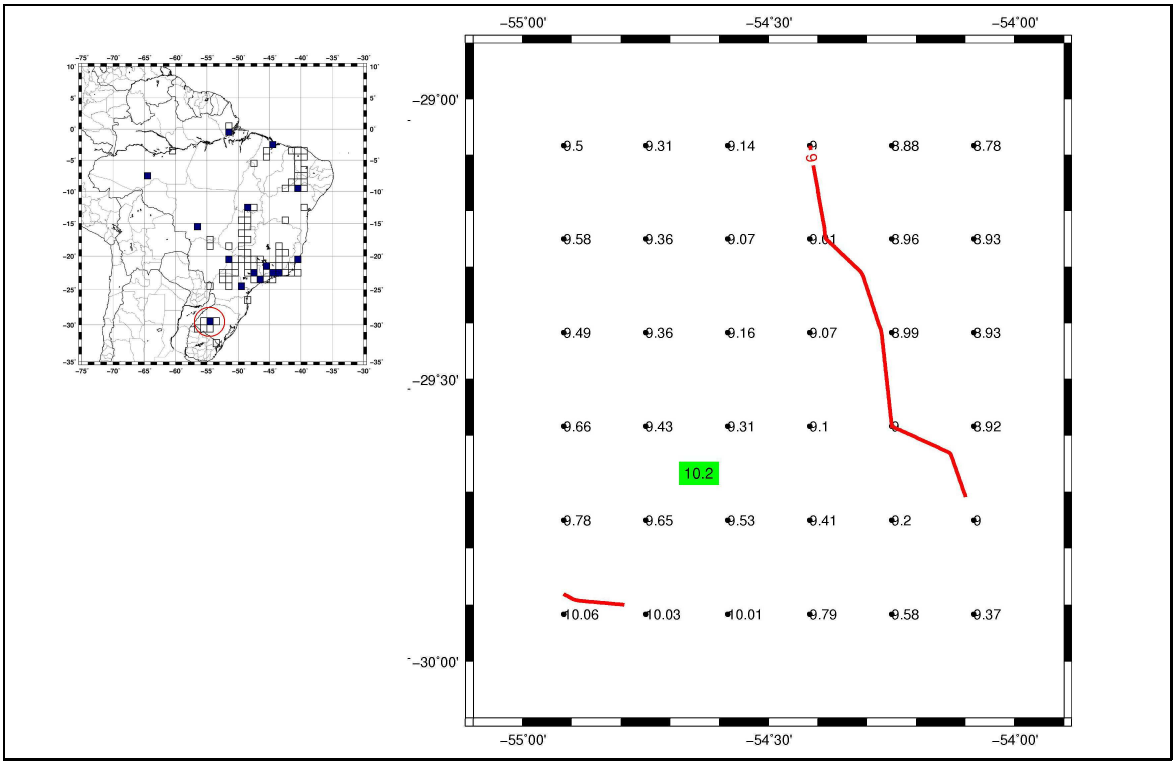

Figura 66: Comparação GPS/nivelamento com o GEOIDE2005 na área $-29° \leq \varphi \leq -30°$ e $-54° \leq \lambda \leq -55°$

5.1.2 Erro relativo dos modelos geoidais

Para avaliar a acurácia relativa dos modelos geoidais aqui comparados, foram selecionados 74 pares de estações GPS/niv, distribuídas em território nacional, separadas de distâncias que variam de 5 km a 100 km (Figuras 67 e 68). O valor final da acurácia relativa foi definido como sendo o valor médio resultante dessas bases. Para o modelo MAPGEO2004, a acurácia relativa foi de 0,58 cm/km e para o modelo GEOIDE2005, o valor foi de 0,56 cm/km. Os resultados são apresentados na Tabela 11 e nos histogramas nas Figuras 69 e 70. A Figura 71 apresenta a distribuição da diferença entre os modelos MAPGEO2004 e GEOIDE2005, a Figura 72 o histograma associado e a Tabela 12 mostra as estatísticas dessa diferença para 60516 pontos.

Tabela 11: Estatísticas e erro relativo dos modelos geoidais

Modelo	Média (m)	Desvio Padrão (m)	Variância (m)	Assimetria	Curtose	Valor Máximo (m)	Valor Mínimo (m)
MAPGEO2004	-0,07	0,57	0,33	-0,71	0,09	0,90	-1,66
GEOIDE2005	-0,05	0,56	0,31	-0,48	0,01	1,05	-1,57

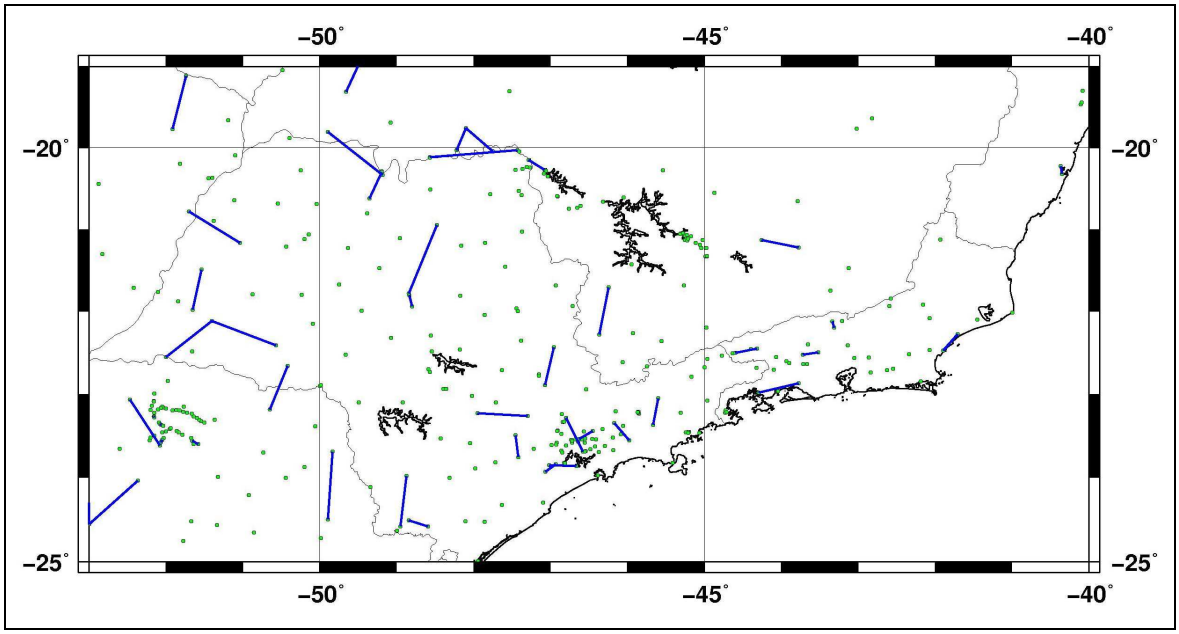

Figura 67: Pares de estações GPS/niv selecionados
para cálculo do erro relativo (área 1)

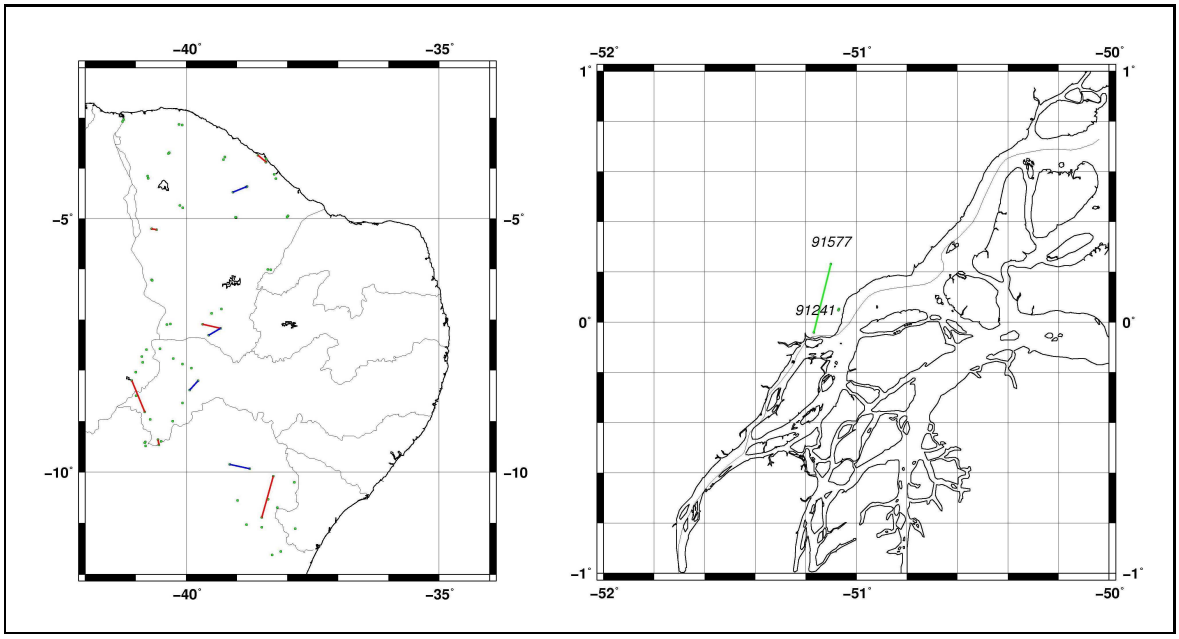

Figura 68: Pares de estações GPS/niv selecionados
para cálculo do erro relativo (áreas 2 e 3)

Calculando o erro relativo do modelo MAPGEO2004:

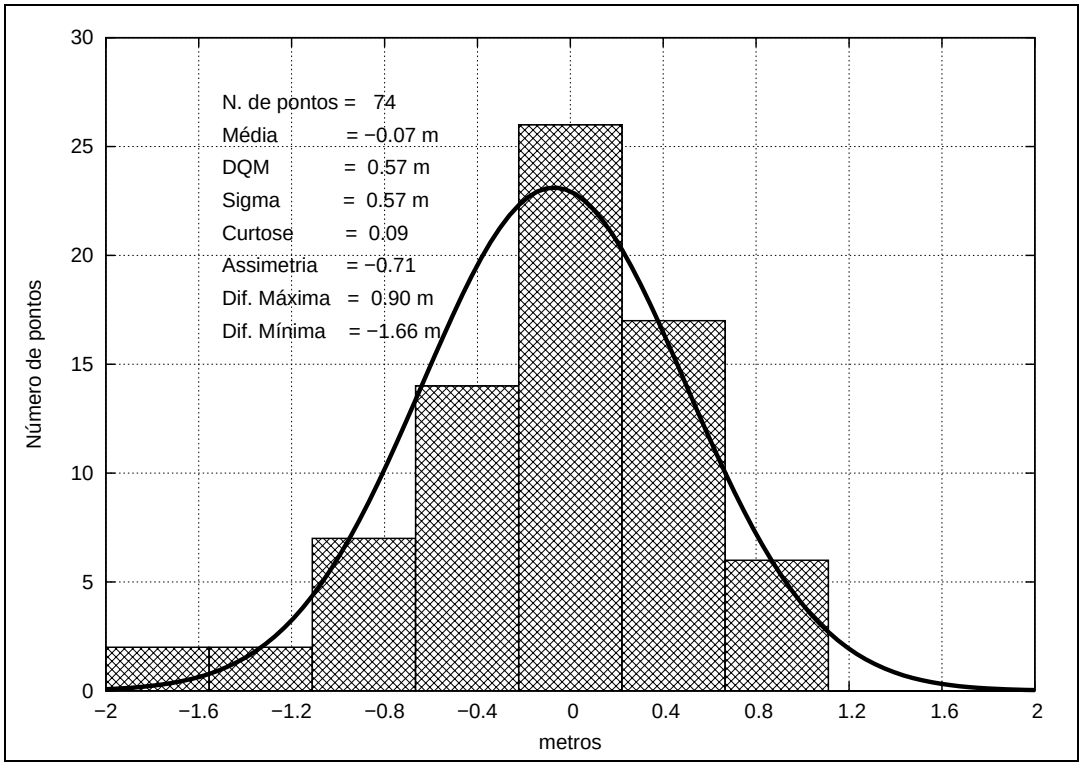

Figura 69: Erro relativo do modelo MAPGEO2004

Calculando o erro relativo do modelo GEOIDE2005:

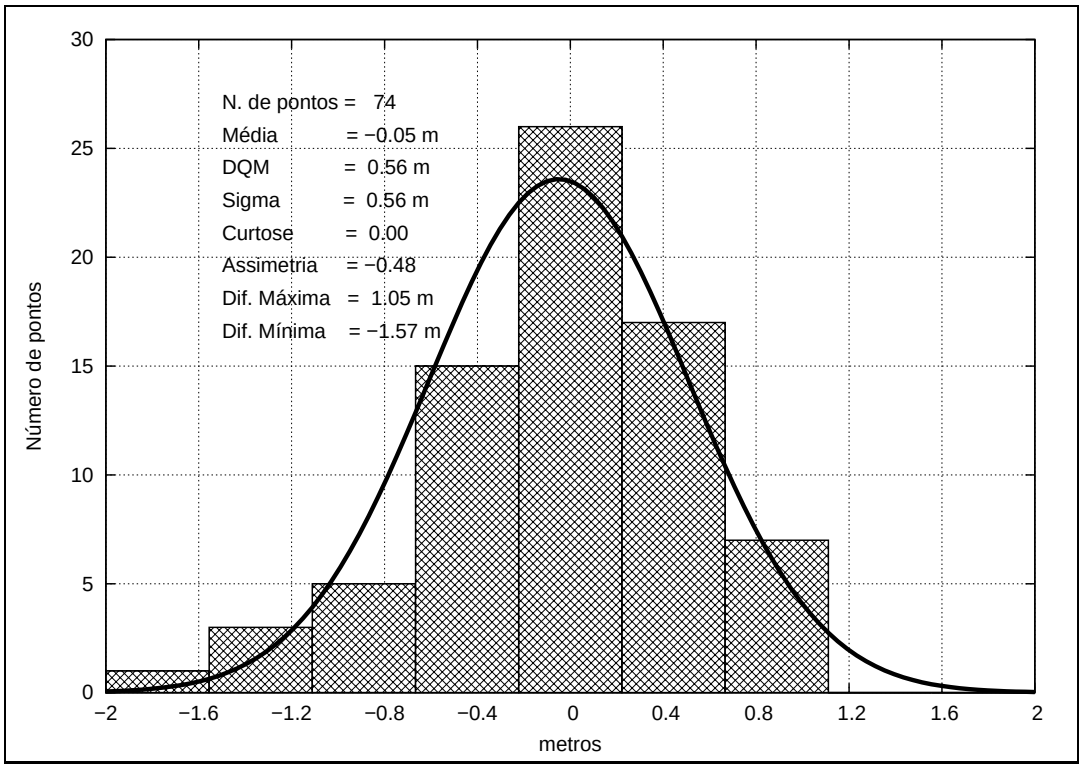

Figura 70: Erro relativo do modelo GEOIDE2005

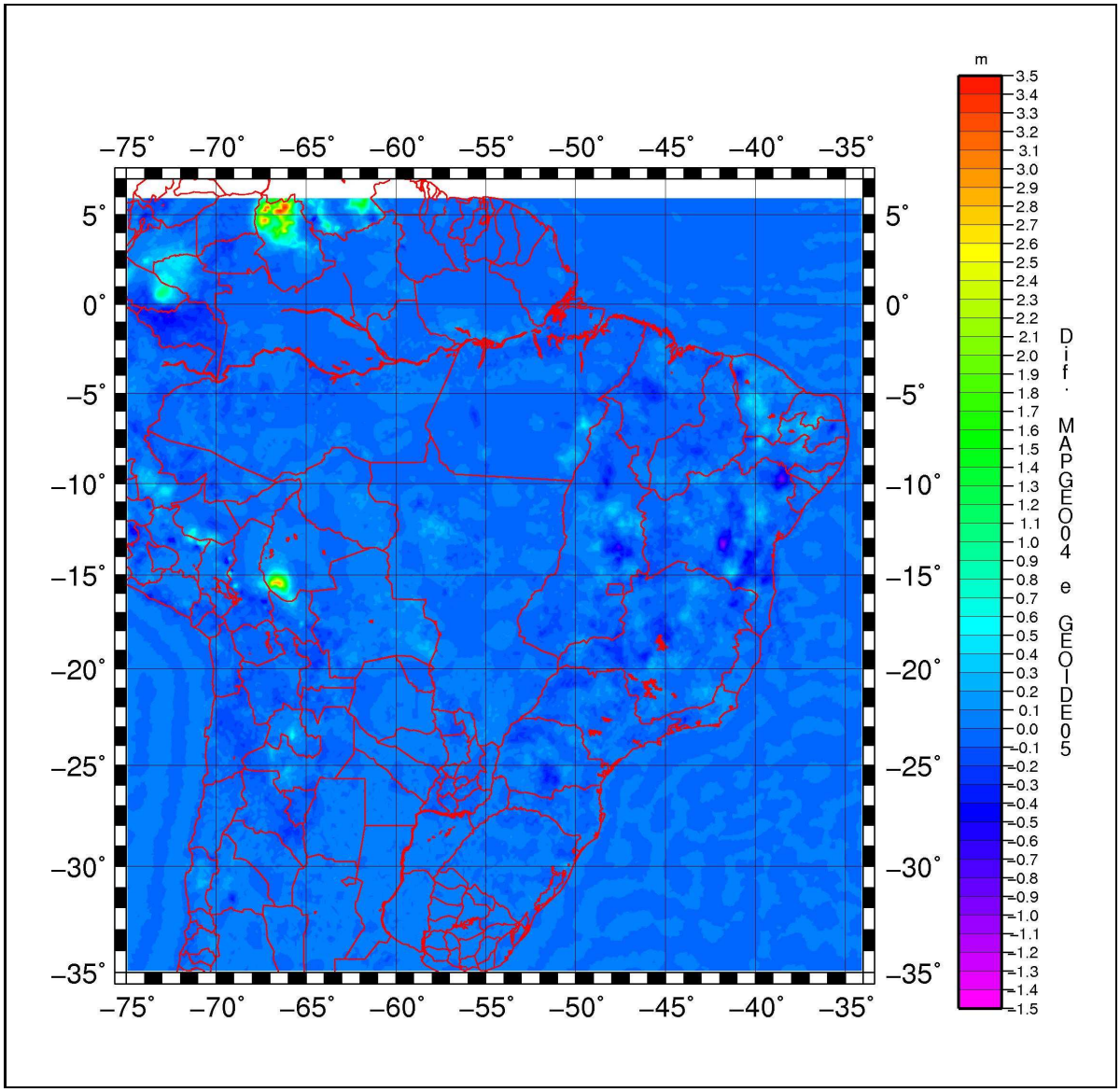

Figura 71: Localização das diferenças entre os modelos MAPGEO2004 e GEOIDE2005

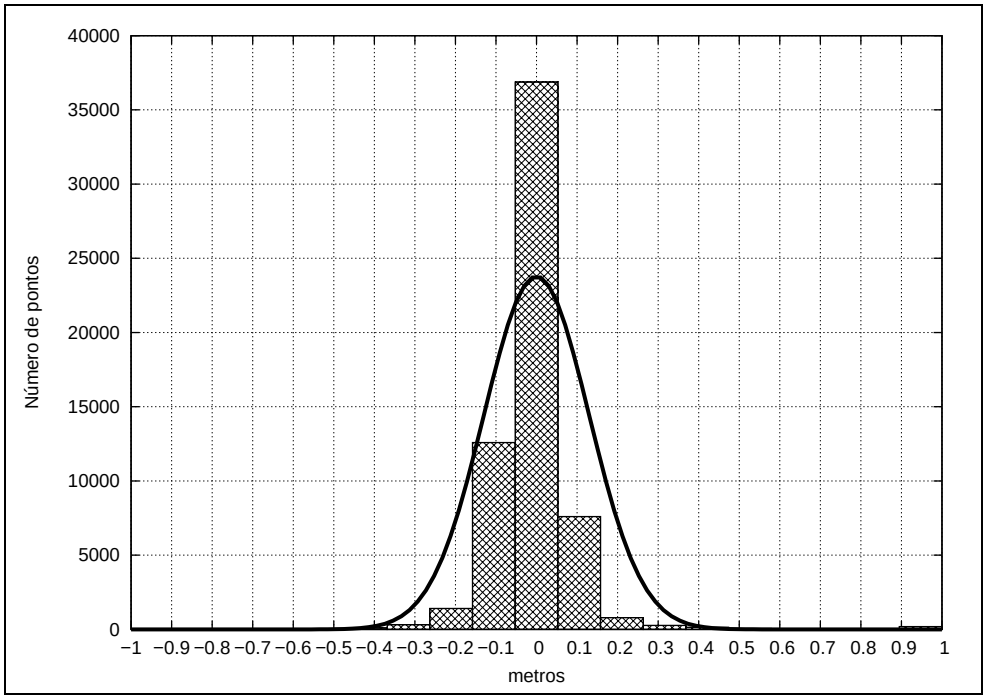

Figura 72: Histograma com a diferença entre MAPGEO2004 e GEOIDE2005

Tabela 12: Estatísticas da diferença entre MAPGEO2004 e GEOIDE2005

Modelo	Média (m)	Desvio Padrão (m)	Variância (m)	Assimetria	Curtose	Valor Máximo (m)	Valor Mínimo (m)
MAPGEO2004 - GEOIDE05	-0,0045	0,1348	0,0182	9,8753	177,0962	3,4400	-1,0600