



Detecção de erros grosseiros em banco de dados gravimétrico terrestre do Estado do Rio Grande do Sul

Marilei Bender Xavier, PPGSR/CEPSRM/UFRGS/BRASIL
Silvia Beatriz Alves Rolim, PPGSR/CEPSRM/UFRGS/BRASIL
Sérgio Florêncio de Souza, PPGSR/CEPSRM/UFRGS/BRASIL
Adriane Gomes Preissler, IGEO/UFRGS/BRASIL

Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, August 24-28, 2009.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society 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

Since 1950, terrestrial gravity data of the State of Rio Grande do Sul has been systematically collected by the Department of Geodesy of the Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS). This paper proposes three methods for detection of gross errors in this database, based on: 1^o) the digital elevation model of Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), 2^o) the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) and 3^o) the interpolated terrestrial gravity observations. The first method identified 217 points of altimetry, representing 3.00% of the database. The second identified 645 points of gravity observations, representing 8.93% of the database. The third method identified 60 points of terrestrial gravity observations, representing 0.83% of the database. The criterion for elimination of observations was based on identifying coincident outliers in, at least, 2 methods. The matching points of coarse errors between altimetry, gravity and bouguer anomaly were grouped in 177 points, representing 2.45% of total database. These points were considered and disposed of coarse errors database. This approach is accepted as a preliminary correction of the RS gravity database and we suggest field checking. Statistics is a tool and, as such, does not replace the lack of geological or geophysical knowledge.

1. Introdução

Os levantamentos gravimétricos são baseados em medidas das variações do campo de gravidade da Terra que consistem na atração exercida sobre os corpos existentes à sua superfície (Blakely, 1996). Na exploração geofísica, erros de dados gravimétricos podem gerar interpretações incorretas na caracterização de corpos e estruturas de interesse. (Featherstone *et al.*, 1997). Em prospecção mineral, as anomalias gravimétricas têm amplitudes raramente superiores a 2 mGal, sendo muito comuns valores inferiores a 1 mGal (Silva, 1995). Desta forma, são requeridas medidas precisas, tanto da gravidade como dos valores plani-altimétricos usados nas correções. Assim, a identificação incorreta de um alvo pode resultar em desnecessária e dispendiosa perfuração na amostra de campo,

especialmente em áreas remotas. Um ponto identificado como erro grosseiro altimétrico pode levar consigo um ponto de gravidade validado. Neste caso, o erro é provavelmente oriundo da medida de posição planimétrica. Erros grosseiros de dados gravimétricos podem ser causados por: 1) erro de leitura, 2) erro de transcrição dos dados, 3) estação de referência gravimétrica incorreta, 4) coordenadas gravimétricas de observação em 3D incorretas. Vários métodos podem ser utilizados para detecção de erros grosseiros e avaliação da confiabilidade de um banco de dados.

Em geral, a técnica estatística de análise exploratória de resíduos é muito sensível à presença de valores extremos. Porém, mesmo após a eliminação destes pontos, muitas vezes, não se consegue satisfazer as exigências formais da estatística para validar um modelo ou um banco de dados e inferir resultados segundo uma lei de probabilidade. Ocorre que a complexidade das variáveis em estudo, variáveis regionalizadas, exclui a formulação de um modelo teórico. Seus valores amostrais não são completamente independentes da localização geográfica. Segundo Landim (2003), os valores residuais provenientes dessas variáveis apresentam autocorrelação espacial, deixando como única solução a determinação empírica ou relativa das probabilidades presentes nas observações. Desta forma, a estatística Z da distribuição normal ou Gaussiana é inapropriada para inferir resultados da natureza destas variáveis, quando a finalidade é detectar *outliers*. Neste trabalho três bancos de dados foram integrados, analisados para a eliminação de observações discrepantes. Para tanto, utilizaram-se três métodos de detecção de erros grosseiros e análise visual integrada. A partir dos dados corrigidos, foi gerado o mapa de anomalia bouguer do Estado do Rio Grande do Sul (RS) para posterior validação geológica das informações geofísicas.

2. Aspectos geológicos da área de estudo

A área de estudo localiza-se no extremo sul do Brasil e compreende o Estado do Rio Grande do Sul (RS), abrangendo uma área total 282.680 km². O Estado do RS está inserido entre as latitudes -34° a -27° e entre as longitudes -58° a -49° (Figura 1).

Mais da metade da área de estudo é recoberta por unidades vulcânicas básicas e ácidas, constituindo a formação Serra Geral de idade Cretácea (Figura 2). Na porção nordeste se encontram derrames basálticos intercalados com derrames riolíticos em altitudes superiores, geralmente acima de 700-800 m.

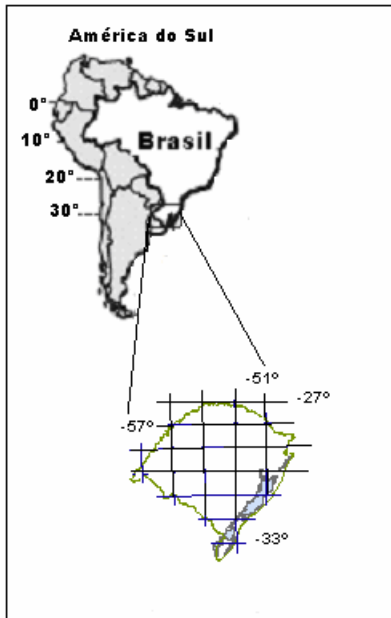


Figura 1. Localização da área de estudo.

Na porção oeste predominam as rochas basálticas e também ocorrem afloramentos de arenitos, onde as altitudes não ultrapassam 250 m

A região centro-sul do estado é caracterizada pelas unidades do Escudo Sul-rio-grandense e da Planície Costeira. O Escudo Sul-rio-grandense apresenta uma diversidade de rochas gerada, principalmente, pela acreção e deformação de blocos crustais pré-cambrianos durante o ciclo orogênico Brasileiro/Pan-africano, 900-540 Ma (Chemale, 2000). Possui embasamento de rochas granito-gnáissicas, vulcano sedimentares, rochas gnáissicas, graníticas e anfíbolíticas, suítes ígneas plutônicas e metamórficas. Nesta área as altitudes não ultrapassam 400m e a densidade média das rochas está entre 2,60 g/cm³ e 2,96 g/cm³. Na Planície Costeira ocorrem os depósitos quaternários que cobrem a Bacia de Pelotas (Tomazelli *et al.*, 2000), desenvolvida sobre o embasamento pré-cambriano e pelas seqüências sedimentares e vulcânicas paleozóicas e mesozóicas, da Bacia do Paraná. Nessa porção, as altitudes variam entre 0 m e 40m. As densidades e os tipos de rochas em cada região encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1. Tipo de rocha e densidade em regiões do RS.

Região	Tipo de rocha		Varição média de densidade (g/cm ³)
Serra Geral	Ígnea	Básicas	2,09 a 3,17
		Ácidas	2,30 a 3,11
	Ígnea intermediária a ácida	2,50 a 2,70	
	Sedimentar		1,46 a 2,30
Escudo	Metamórfica		2,60 a 2,96
Planície Costeira	Sedimentar		1,46 a 2,30

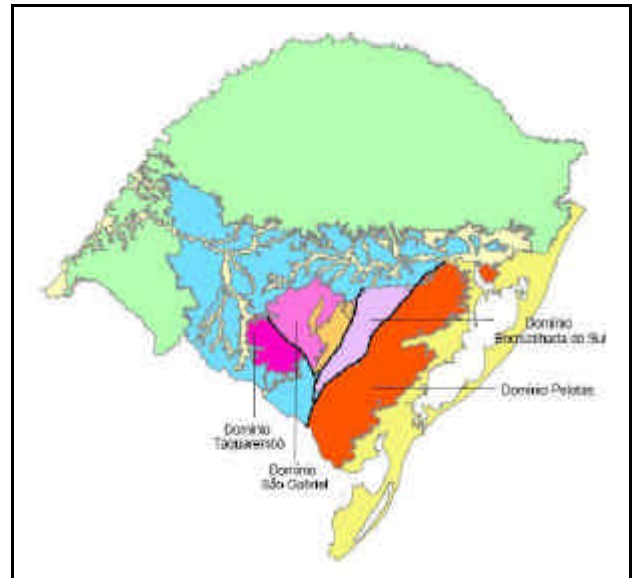


Figura 2. Domínios Tectônicos do Rio Grande do Sul (Modificado de CPRM, 2008).

3. Bancos de dados

O banco de dados gravimétricos terrestres do Estado do RS é composto por um total de 7218 pontos coletados desde o final da década de 1950 e foi construído a partir de várias instituições: Departamento de Geodésia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Observatório Nacional (ON) e Instituto de Astronomia e Geofísica da Universidade de São Paulo (IAG/USP). É importante ressaltar que essa base de dados gravimétricos terrestre não foi previamente corrigida.

As variáveis medidas apresentam um espaçamento médio de 2,5 km, e foram coletadas com diferentes equipamentos, entre eles, SCINTREX CG3 (resolução de 0,005 mGal) e LaCoste & Romberg (resolução de 0,01 mGal). A altimetria foi medida a partir de dados extraídos de cartas topográficas em diferentes escalas, levantamentos barométricos, nivelamento geométrico, entre outros, cujos erros mínimo e máximo esperados são de 0,1 m a 10 m, respectivamente. A Figura 3 apresenta a distribuição da malha de pontos, onde o sistema de coordenadas geográficas adotado foi o Datum WGS1984.

O banco de dados da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) faz parte de um projeto entre a *National Imagery Mapping Agency* (NIMA) e a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), cujo objetivo é produzir dados digitais da topografia de 80% da superfície terrestre (área contida entre as latitudes 60°N e 56°S). O SRTM gerou elevação a cada 1 arco de segundo (aproximadamente 30 m) numa grade de latitude/longitude. As imagens são disponibilizadas com resolução de 30m para os Estados Unidos e 90m para o Brasil e demais países (NASA, 2008). O datum e o elipsóide de referência são *World Geodetic System 1984* (WGS 84), com dados de altitude (h) em metros (HALL *et al.*, 2005). De acordo com as especificações da missão SRTM, os modelos digitais de elevação foram produzidos com uma precisão vertical de 16m.

Os dados da missão *Gravity Recovery And Climate Experiment* (GRACE) constam de um projeto entre a NASA e o Centro Alemão Aeroespacial (DLR), onde dois satélites lançados em 5 de março de 2002 coletaram dados para determinar o campo gravitacional global em alta resolução e as variações temporais de gravidade.

O SRTM e os dados da missão GRACE, foram validados para o Estado do RS, assegurando uma fonte de dados independente para este estudo.

De uma forma geral, o procedimento de correção das variáveis dos bancos de dados constituiu-se de 4 etapas: 1) padronização para eliminação de observações duplicadas; 2) tratamento estatístico para análise de resíduos; 3) processamento e visualização dos dados corrigidos; e 4) interpretação da resposta geofísica com base em modelo geológico estabelecido para da área.

O programa *Oasis Montag (Geosoft)* foi utilizado para a geração dos *grids* (xyz) georreferenciados e para o tratamento e elaboração dos mapas de altimetria e anomalia bouguer. O programa *ArcGIS Version 9.3* foi utilizado para espacialização e visualização de informações de diversos bancos de dados, como mapas geológicos, estruturais, geofísicos, gravimétricos, tabelas de densidades de rocha, etc (CPRM 2009).

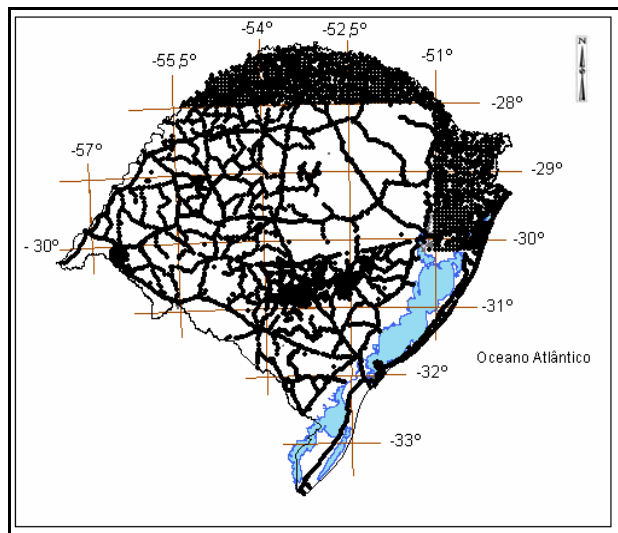


Figura 3. Distribuição dos pontos do banco de dados gravimétricos terrestre do RS.

4. Métodos

4.1. Cálculo da Anomalia Bouguer

A anomalia gravimétrica é obtida através de $\Delta g = g_0 - \gamma$, onde g_0 corresponde à gravidade real observada (observação terrestre), reduzida à superfície do geóide, e γ corresponde à gravidade normal ou teórica, obtida em função da latitude da estação sobre a superfície do esferóide. O valor teórico da gravidade para a Terra foi gerado pela Fórmula Internacional da Gravidade calculada sobre o elipsóide de referência de 1980, Gemael (1999):

$$g_{80} = 978032,6776 \cdot (1 + 0,005279041 \cdot (\text{SEN}(j))^2 + 0,000023272 \cdot (\text{SEN}(j))^4 + 0,000000126 \cdot (\text{SEN}(j))^6)$$

onde j é a latitude do ponto em radianos.

Neste estudo, as anomalias bouguer foram calculadas a partir da expressão $\Delta g_b = g_0 + 0,3086 \cdot h - 0,1119 \cdot h - \gamma$, onde o segundo termo corresponde à correção *Free-Air* e o terceiro termo à correção de *bouguer*, sendo “h” a altitude no ponto, g_0 e γ os valores da gravidade real observada e da gravidade teórica calculada, respectivamente. Os valores foram calculados com valor de densidade média de 2,67 g/cm³. Não foi considerada a correção de terreno, visto que seus valores foram insignificantes na precisão da interpolação para este estudo.

4.2. Cálculo de resíduos

A detecção de erros grosseiros dos dados gravimétricos terrestres foi realizada com base em três métodos. O primeiro método (M1) calculou os resíduos entre os dados do modelo digital de elevação do SRTM interpolados e os dados de observação de altimetria terrestre. O segundo método (M2) utilizou os dados interpolados da missão GRACE confrontando cada observação gravimétrica com as observações da gravimetria terrestre. O terceiro (M3) calculou os resíduos a partir de verificação cruzada entre dados de cada observação de anomalia bouguer calculada e das anomalias bouguer interpoladas correspondentes. As interpolações dos dados para os três métodos foram realizadas pelo método de krigagem, com variograma ajustado para modelo de distribuição esférica.

4.3. Tratamento estatístico dos dados

A primeira etapa corresponde à correção (limpeza) dos bancos de dados gravimétricos terrestre. Posteriormente, processou-se a análise estatística exploratória dos resíduos de cada método. Os resíduos calculados em M1, M2 e M3 foram plotados em histogramas. Em cada método decidiu-se, empiricamente, por um limiar para os dados observados (Tabela 2), onde a escolha destes limiares é baseada na eliminação de pontos das extremidades da curva da distribuição da região de inflexão demonstrada pelo histograma das 7218 observações dos dados brutos. A definição dos limiares superior e inferior permitiu a eliminação de pontos discrepantes em cada método. As observações suspeitas de erros grosseiros foram cruzadas entre os métodos. A eliminação dos pontos ocorreu quando houve identificação coincidente na latitude e na longitude de, pelo menos, dois métodos.

Tabela 2. Limiares de decisão para os erros grosseiros para os três métodos utilizados.

Resíduos	Mínimo (limiar de decisão)	Máximo (limiar de decisão)
M1	-90 m	+90 m
M2	-25 mGal	+25 mGal
M3	-12 mGal	+12 mGal

4.4. Tratamento Integrado dos Dados

Eliminados os pontos coincidentes por latitude e longitude, partiu-se para interpretação dos dados de anomalia bouguer e produtos derivados de filtragens (filtros passa alta e continuações para cima) com base na informação geológica e geofísica da área.

5. Resultados

O método M1 identificou 217 pontos residuais, correspondendo a 3,00% do banco de dados total, suspeitos de erros grosseiros. O M2 identificou 645 pontos referentes a 8,93% do banco de dados; e o M3 identificou 60 pontos, representando 0,83% do banco.

As Figuras 4, 5 e 6 apresentam os histogramas residuais resultantes da aplicação dos métodos M1, M2 e M3, respectivamente. A estatística residual cruzada entre os métodos está representada nas Tabelas 3, 4 e 5. As porcentagens de observações coincidentes excluídas pelos métodos foram (Figuras 7 e 8):

- M1 e M2: 2,0% (148 pontos)
- M2 e M3: 0,3% (23 pontos)
- M1 e M3: 0,1% (7 pontos)

Tabela 3. Estatística residual entre os métodos M1 e M2.

M1		M2			Total
		Limiar inferior de rejeição (-25 mGal)	Intervalo de aceitação (-25 mGal,+25mGal)	Limiar superior de rejeição (+25 mGal)	
Limiar inferior de rejeição (-90m)	nº pontos	0	42	123	165
	% Total	,0%	,8%	1,7%	2,3%
Intervalo de aceitação (-90m,+90m)	nº pontos	297	6504	200	7001
	% Total	4,1%	90,1%	2,8%	97,0%
Limiar superior de rejeição (+90m)	nº pontos	25	27	0	52
	% Total	,3%	,4%	,0%	,7%
Total	nº pontos	322	6573	323	7218
	% Total	4,5%	91,1%	4,5%	100,0%

Tabela 4. Estatística residual entre os métodos M1 e M3.

M1		M3			Total
		Limiar inferior de rejeição (-12 mGal)	Intervalo de aceitação (-12 mGal,+12mGal)	Limiar superior de rejeição (+12 mGal)	
Limiar inferior de rejeição (-90m)	nº pontos	2	163	0	165
	% Total	,0%	2,3%	,0%	2,3%
Intervalo de aceitação (-90m,+90m)	nº pontos	24	6948	29	7001
	% Total	,3%	96,3%	,4%	97,0%
Limiar superior de rejeição (+90m)	nº pontos	1	47	4	52
	% Total	,0%	,7%	,1%	,7%
Total	nº pontos	27	7158	33	7218
	% Total	,4%	99,2%	,5%	100,0%

Tabela 5. Estatística residual entre os métodos M2 e M3.

M2		M3			Total
		Limiar inferior de rejeição (-12mGal)	Intervalo de aceitação (-12 mGal,+12mGal)	Limiar superior de rejeição (+12 mGal)	
Limiar inferior de rejeição (-25m)	nº pontos	7	315	0	322
	% Total	,1%	4,4%	,0%	4,5%
Intervalo de aceitação (-25m,+25m)	nº pontos	20	6536	17	6573
	% Total	,3%	90,6%	,2%	91,1%
Limiar superior de rejeição (+25m)	nº pontos	0	307	16	323
	% Total	,0%	4,3%	,2%	4,5%
Total	nº pontos	27	7158	33	7218
	% Total	,4%	99,2%	,5%	100,0%

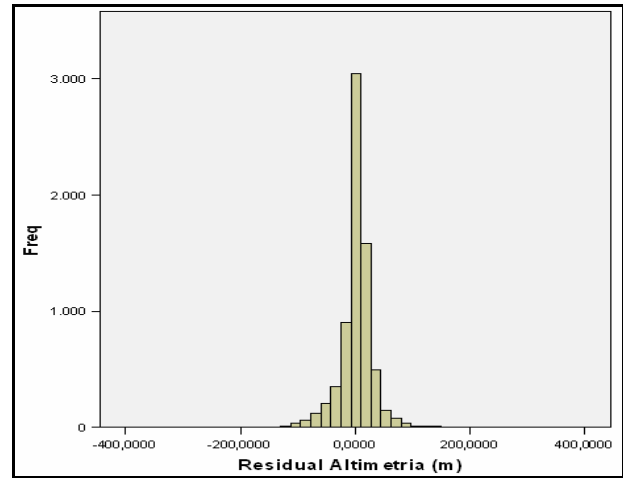


Figura 4. Histograma das diferenças entre os valores de elevação dos 7218 pontos e os respectivos pontos do SRTM interpolados pelo método de Krigagem.

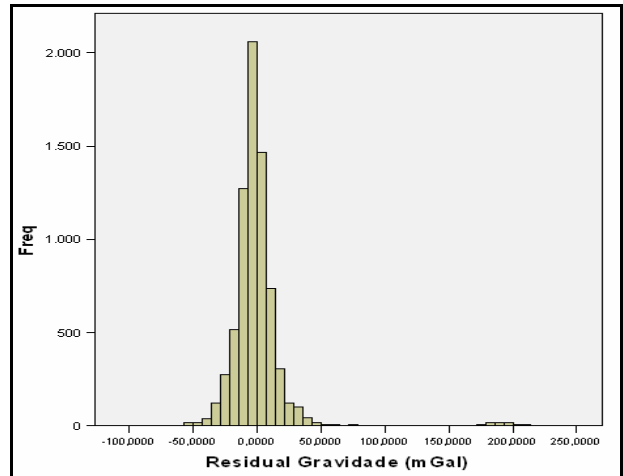


Figura 5. Histograma das diferenças entre os valores de gravidade dos 7218 pontos e os respectivos pontos da missão GRACE interpolado pelo método de Krigagem.

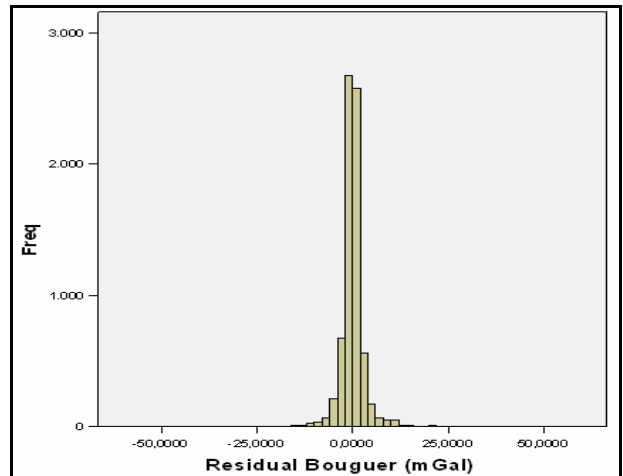


Figura 6. Histograma das diferenças entre os valores de anomalia bouguer calculada dos 7218 pontos e os respectivos pontos de anomalia bouguer interpolada pelo método de Krigagem.

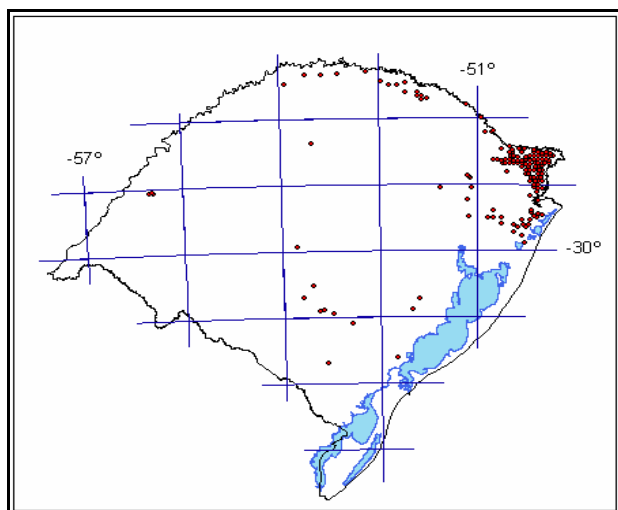


Figura 7. Localização dos 148 pontos excluídos pelos residuais entre altimetria e gravidade (métodos M1 e M2).

A maioria dos pontos excluídos foi identificada pelos métodos M1 e M2 (Figura 7) e localizam-se na região de maior altitude, na porção nordeste do RS, onde ocorrem unidades vulcânicas da Formação Serra Geral. Estes pontos estão relacionados a erros de altimetria terrestre, provavelmente, devido à falta de Referência de Nível nos locais amostrados. As altitudes verificadas nessa região ultrapassam 1000 m, concordando com os dados do SRTM.

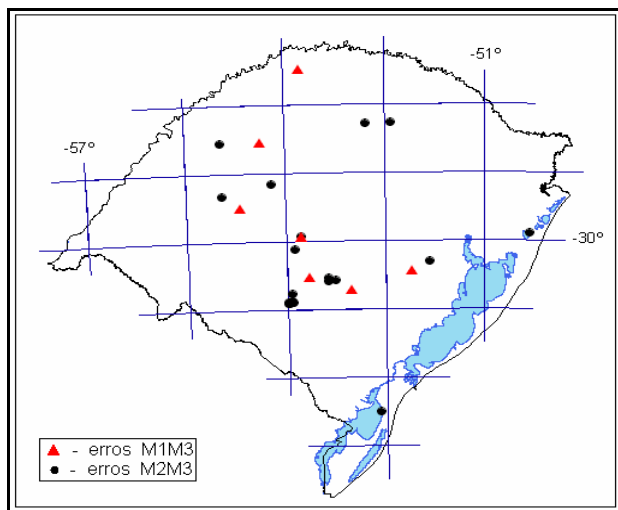


Figura 8. Localização dos pontos excluídos pelos métodos M1e M3, e M2 e M3.

A soma dos pontos coincidentes excluídos pelos métodos M1, M2 e M3 apresentou um total de 178 pontos, sendo identificado apenas um ponto coincidente nos três métodos. Assim, eliminaram-se 177 pontos com valores discrepantes nos dados de altimetria, gravidade e anomalia bouguer, representando 2,45% do banco de dados total (Figura 9).

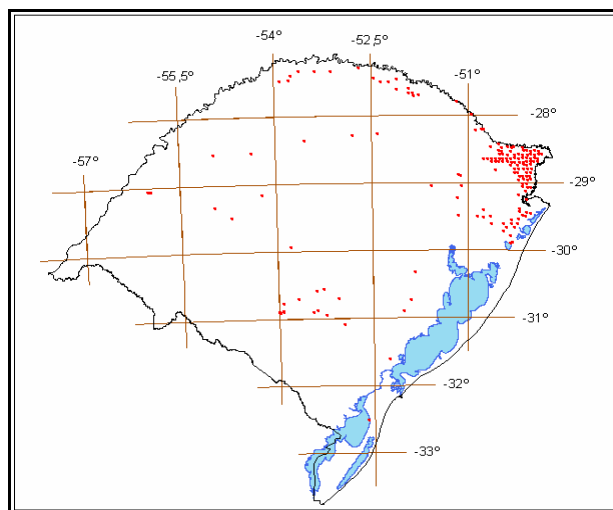


Figura 9. Localização dos 177 pontos grosseiros do RS eliminados do banco de dados, entre os três métodos.

Entretanto, os pontos localizados em altitudes mais baixas (identificados por M2 e M3) na região do Escudo e norte do Estado estão associados a erros de gravidade e anomalia bouguer (Figura 8).

Reconhece-se a subjetividade implícita na eliminação desses pontos. Entretanto, a alta curtose da distribuição dos dados impede a validação de um modelo normal para procedimento de eliminação de *outliers*. Porém, o valor limite de 90 m para o limiar de elevação é muito superior ao erro esperado na precisão absoluta de modelos digitais de elevação do SRTM (17 m) e observações terrestres (0,1 m a 10 m). Da mesma forma, o limiar de 25 mGal para a gravidade é superior ao pior erro que se pode cometer em observações gravimétricas (15 mGal a 20 mGal). Já o limiar de 12 mGal para os dados de anomalia bouguer pode ter sido uma escolha rigorosa. Entretanto, o pequeno número de pontos excluídos pelo método M3, torna a escolha deste limiar menos crítica.

A Figura 11 apresenta o mapa de anomalia bouguer gerado a partir do banco de dados gravimétricos terrestre corrigido pelos métodos M1, M2 e M3, onde foram identificados 4 domínios gravimétricos: D1, D2, D3 e D4. Observa-se uma forte correlação dos 4 domínios gravimétricos representados no mapa de anomalia bouguer com a informação geológica regional do RS. De uma forma geral, os domínios D1 e D2 estão associados ao vulcanismo básico (D1) e ácido (D2) da Formação Serra Geral. O domínio D3 está relacionado com unidades vulcânicas de composição intermediária-ácida da porção sudoeste do Estado. O domínio D4 associa-se às unidades do Escudo Sul Rio-grandense e à Planície Costeira.

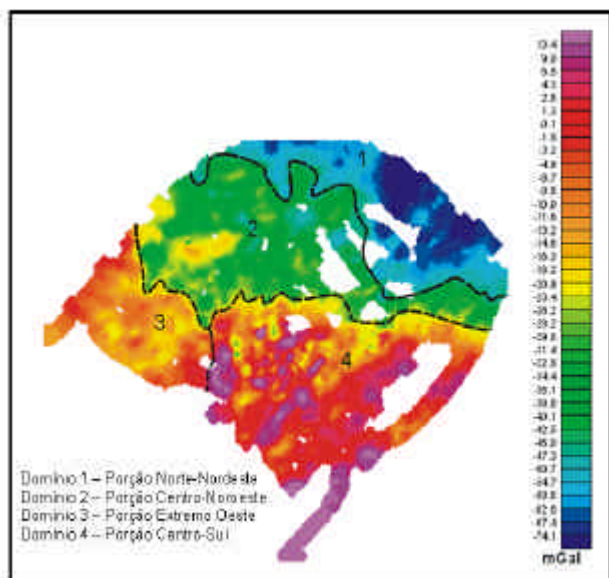


Figura 11. Domínios Geofísicos do RS, caracterizados a partir do banco de dados corrigido.

7. Comentários e Conclusões

A utilização destes três métodos baseados nos resíduos altimétricos, gravimétricos e de anomalia bouguer objetivou filtrar as observações discrepantes do banco de dados, propiciando uma melhor interpretação dos resultados, possibilitando a caracterização geofísica do RS.

Esta abordagem integrada é aceita como critério preliminar de correção do banco de dados de gravimetria terrestre do RS, sugerindo-se continuidade de avaliação com verificações de campo através de levantamentos pontuais para validação. A estatística é uma ferramenta e, como tal, não substitui a falta de conhecimento geológico, geofísico, ou de qualquer outro conhecimento específico.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento através do Projeto nº 485037/2006-8. M.X. agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Programa de Pós Graduação em Sensoriamento Remoto (PPGSR) pela bolsa de mestrado.

Referências

- Blakley, R.J.**, 1996. *Potential Theory in Gravity & Magnetic Applications*. Cambridge University Press, London, 441 pp.
- Chemale, J.R. F.**, 2000. Evolução geológica do Escudo Sul-Rio grandense. In: Holz, M.; De Ros, L.F. (Eds), *Geologia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 13-52.

CPRM. 2008. *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Sul*. Escala 1:750.000. Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais. Porto Alegre.

Featherstone, W. E., Kearsley, A. H. W., and Gilliland, J. R., 1997. Data preparations for a new Australian gravimetric geoid: *The Australian Surveyor*, 42, 33-34.

Gemael, C., 1999. *Introdução à Geodésia Física*. Curitiba: UFPR. 302 p.

Hall, O.; Falorni, G.; Bras, R. L., 2005. Characterization and quantification of data voids in the shuttle radar topography mission data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing letters*, v.2, n.2.

Landim, P. M. B., 2003. *Análise estatística de dados geológicos*. São Paulo: UNESP, 253p.

Luiz, J.G., Silva., 1995. L.M.C. *Geofísica de prospecção*. Universidade Federal do Pará, Volume 1, 311 p.

NASA. 2008. *Shuttle Radar Topography Mission*, disponível em: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>, acessado em 04/09/2008.

Radam/Brasil. 1986. *Folha SH.22 Porto Alegre e parte das Folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim: Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Vegetação, Uso Potencial da Terra*. 1986. Rio de Janeiro: IBGE 796p. (Levantamento de Recursos Naturais, v. 33).

Roisenberg, A. 1990. *Petrologia e Geoquímica do Vulcanismo Ácido Mesozóico da Província Meridional da Bacia do Paraná*. Porto Alegre, Tese de doutorado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. (Inédito).

Tomazelli, L.J., Villwock, J.A. 2000. O Cenozóico no Rio Grande do Sul: Geologia da Planície Costeira. In: M. Holz, M. & L. F. De Ros, L. F. (eds) *Geologia do Rio Grande do Sul*. CIGO/UFRGS, Porto Alegre. p.375-406.