

Determinação do relevo do embasamento e da Moho por inversão de dados gravimétricos. Aplicação na borda norte da bacia do Paraná

Vanderlei C. Oliveira Jr.

Memorial – parte I

2012

Estrutura

- Localização da área de estudo, dados gravimétricos e informações a priori
- Esboço geológico
- Metodologia
- Resultados
- Conclusões
- Referências
- Produção científica
- Considerações pessoais
- Apêndice 1 – Formulação matemática do problema inverso
- Apêndice 2 – Detalhes da aplicação aos dados reais

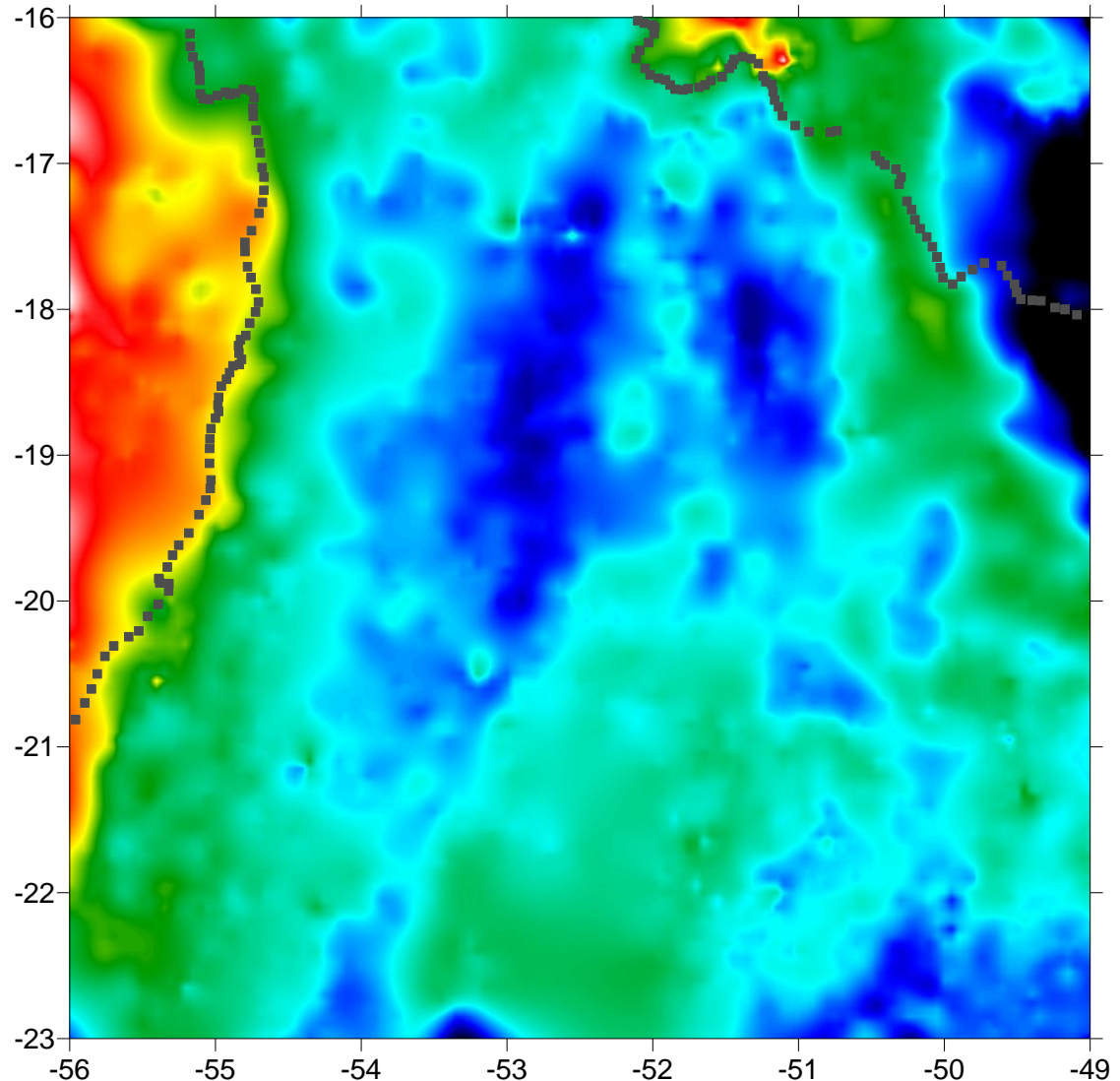
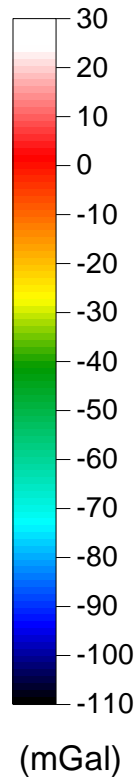
Localização da área de estudo, dados gravimétricos e informações a priori



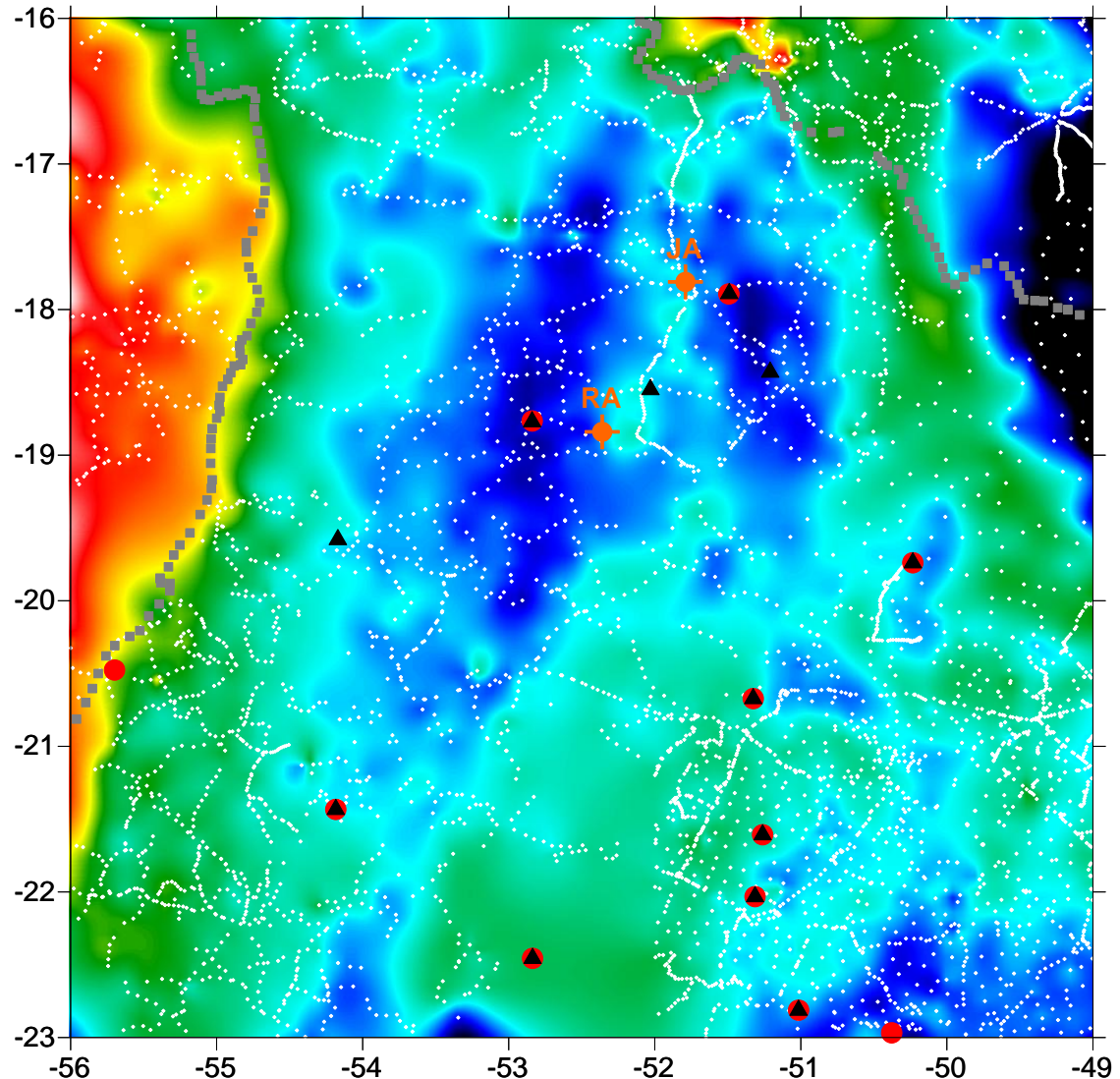
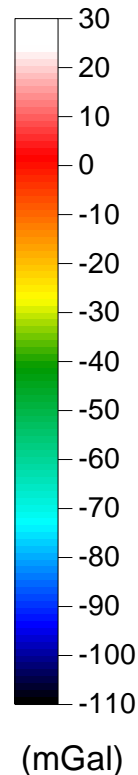
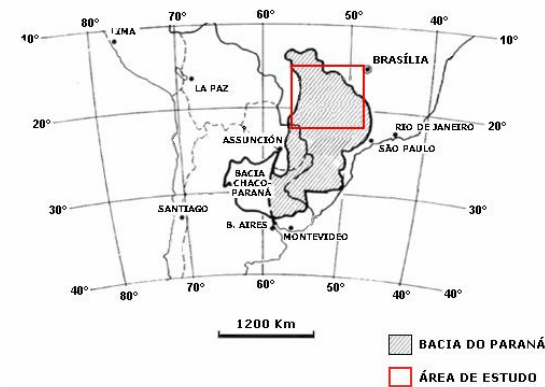
Localização da área de estudo, dados gravimétricos e informações a priori



Anomalia
Bouguer



Localização da área de estudo, dados gravimétricos e informações a priori

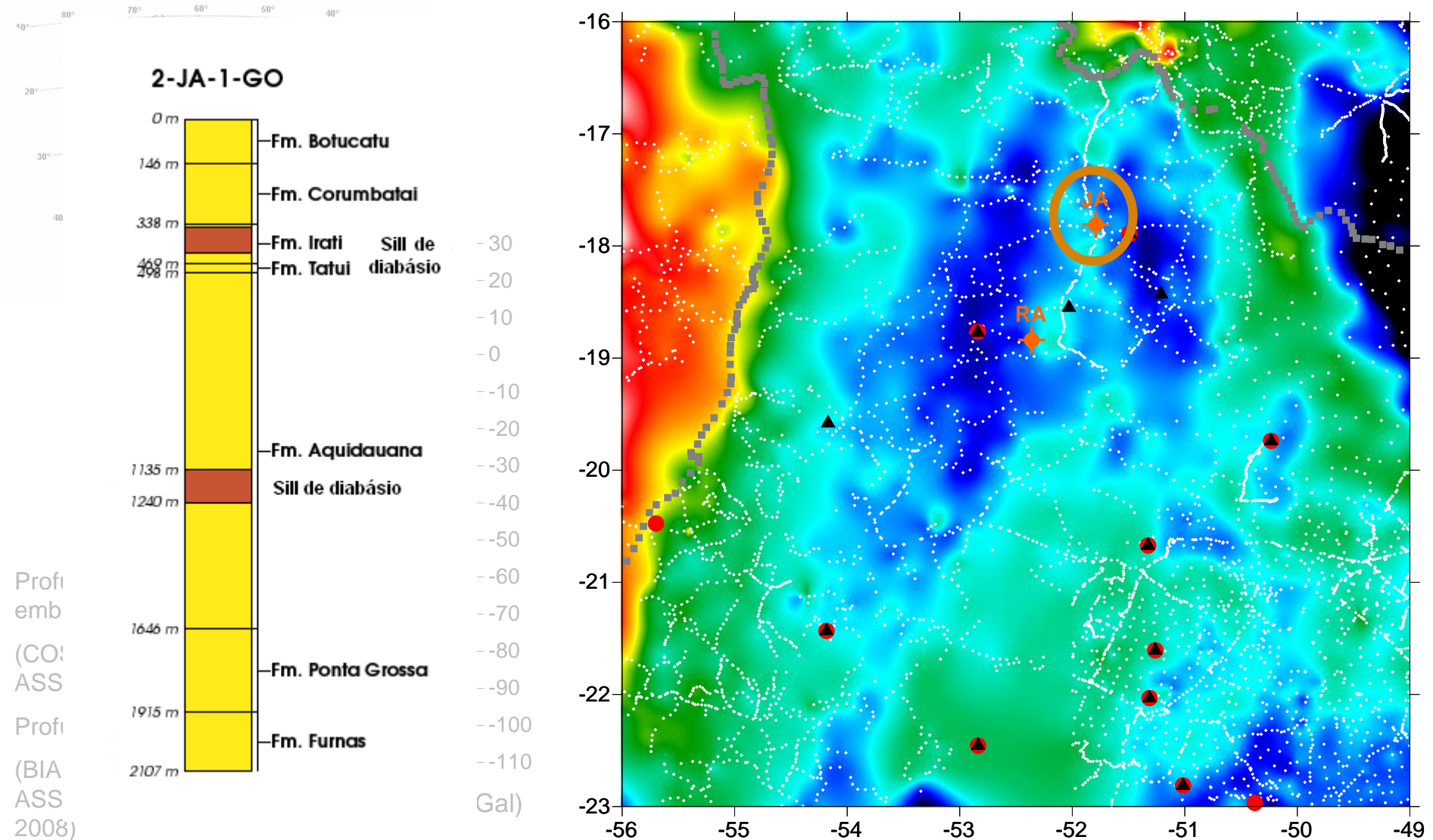


Profundidade do embasamento ▲

(COSTA, 2006;
ASSUMPÇÃO, inf. pessoal)

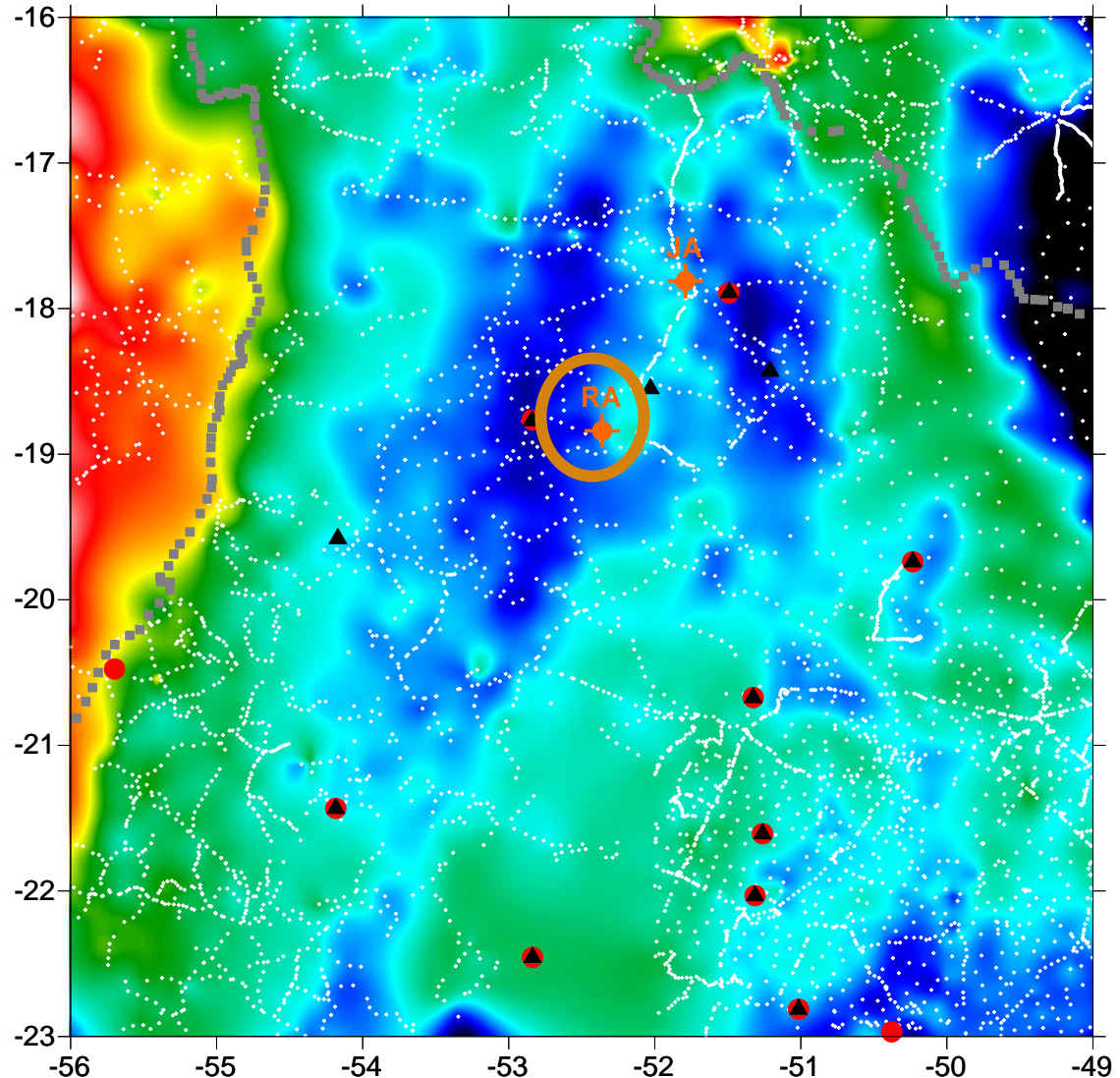
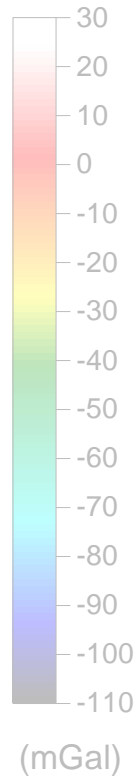
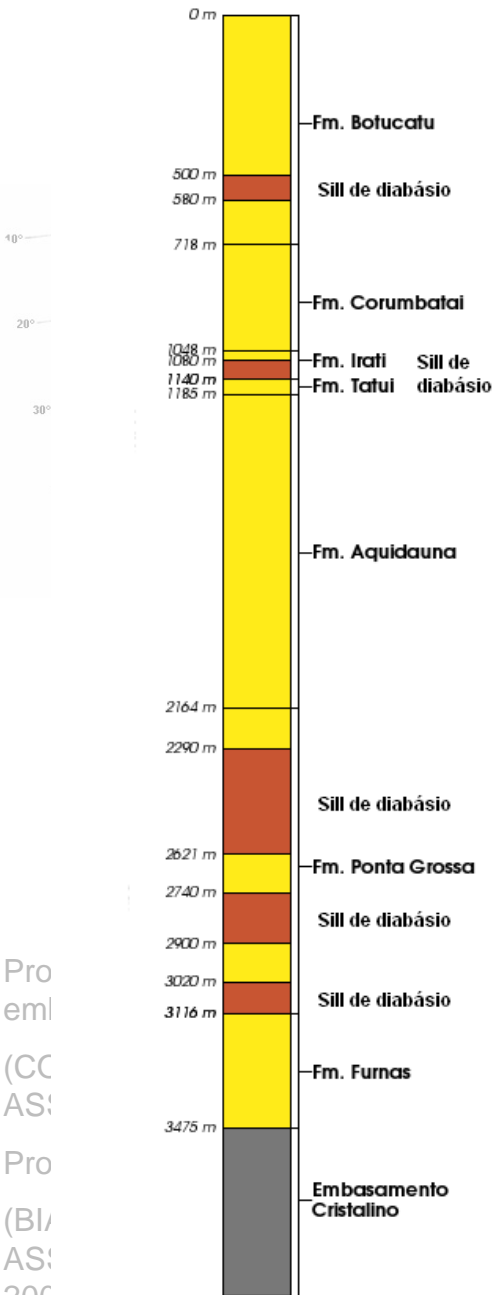
Profundidade da Moho ●
(BIANCHI, 2008; JULIÁ;
ASSUMPÇÃO; ROCHA,
2008)

Localização da área de estudo, dados gravimétricos e informações a priori



ção da área de estudo, dados tricos e informações a priori

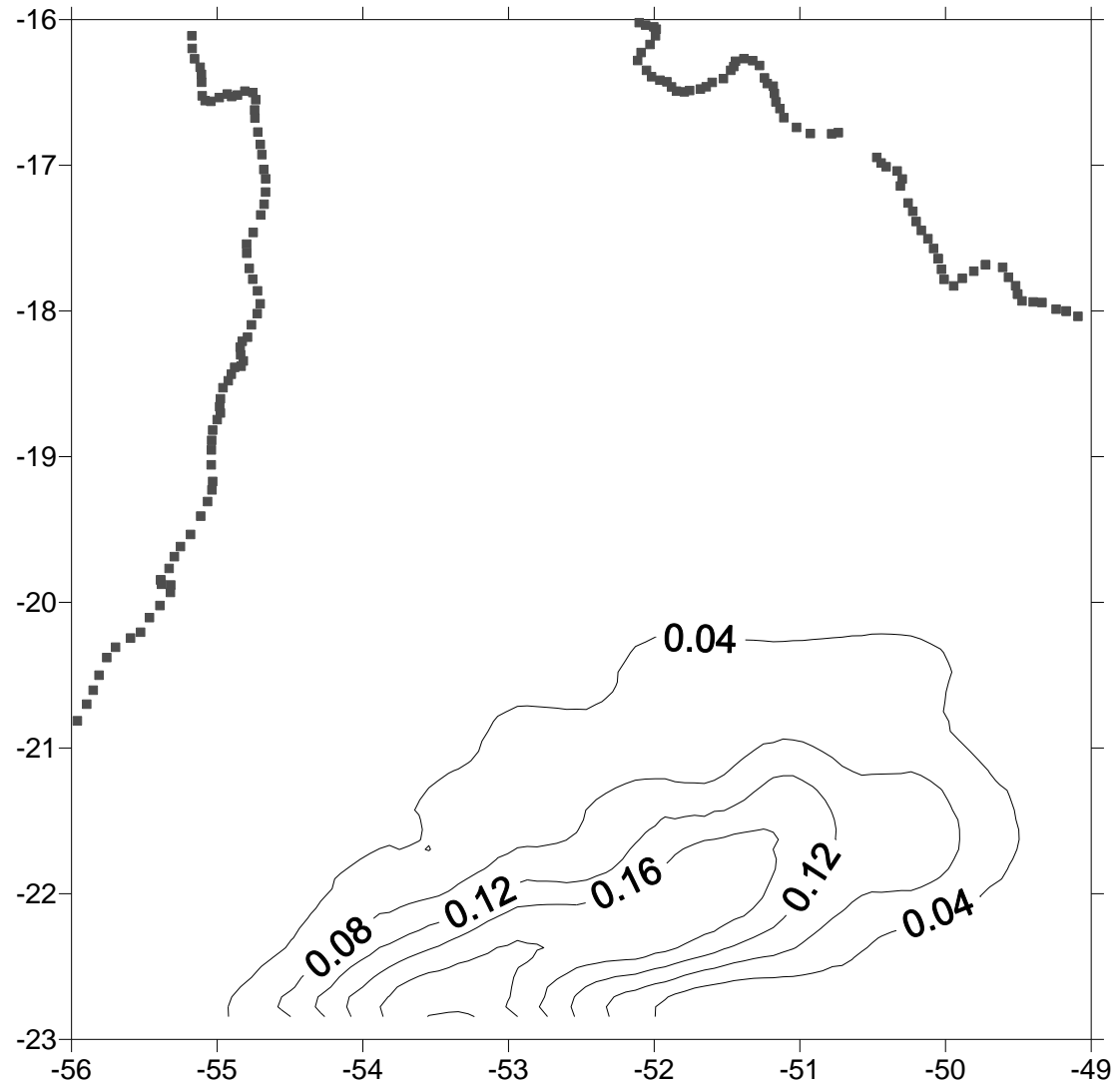
2-RA-1-MS



Localização da área de estudo, dados gravimétricos e informações a priori

Profundidades
da Formação
Bauru

As profundidades
estão em km

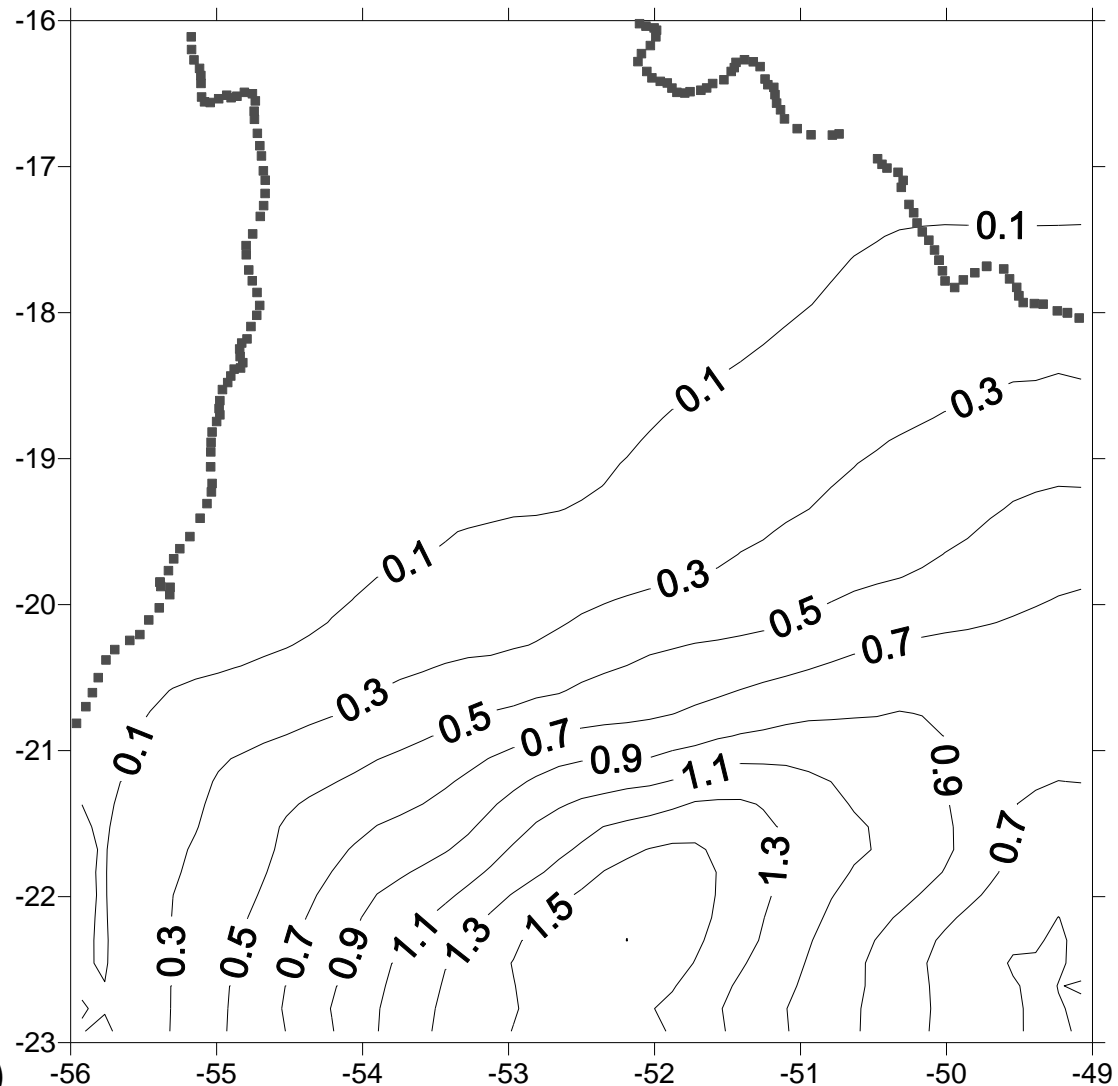


Modificado de Milani (1997)

Localização da área de estudo, dados gravimétricos e informações a priori

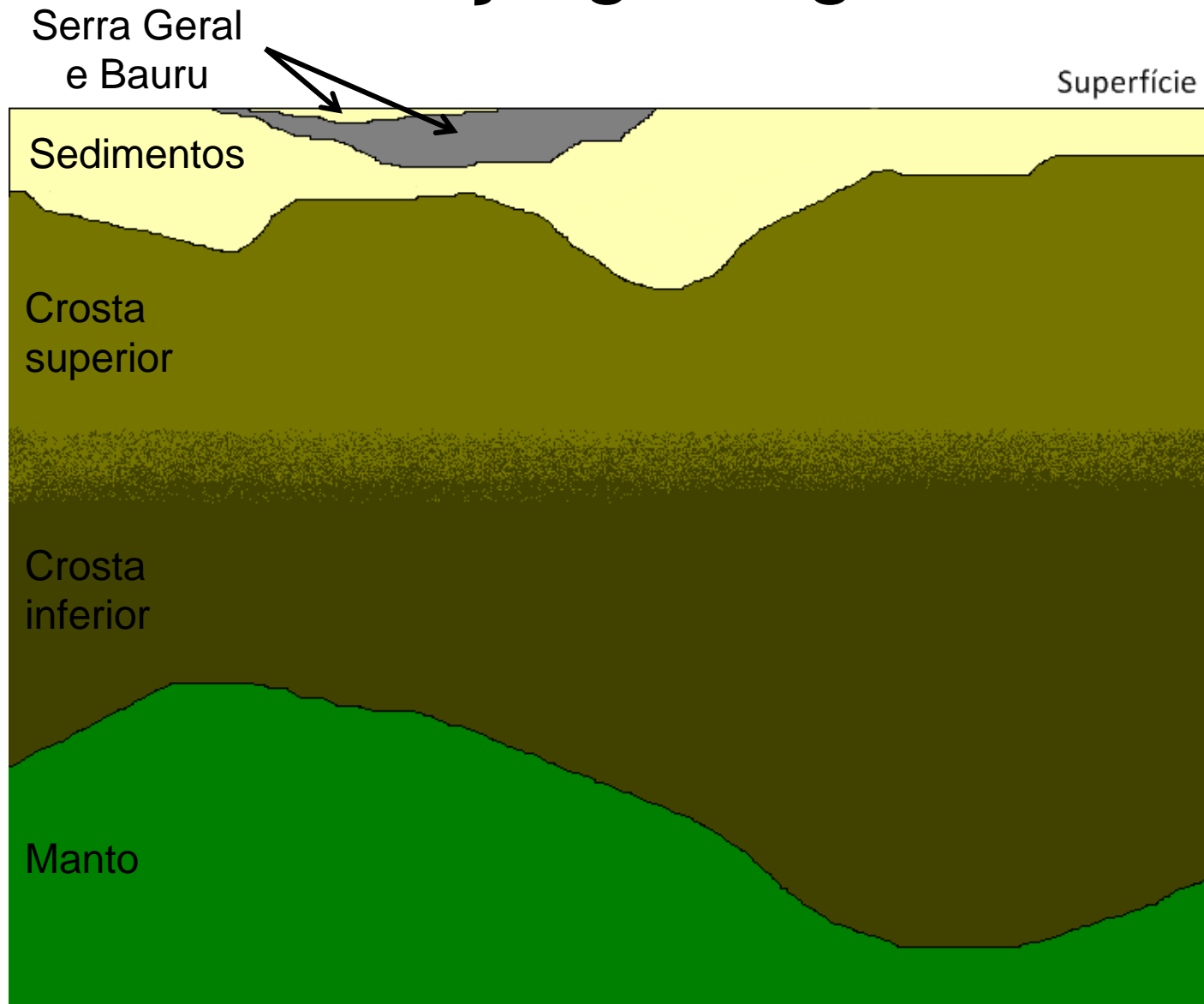
Profundidades da Formação Serra Geral

As profundidades estão em km

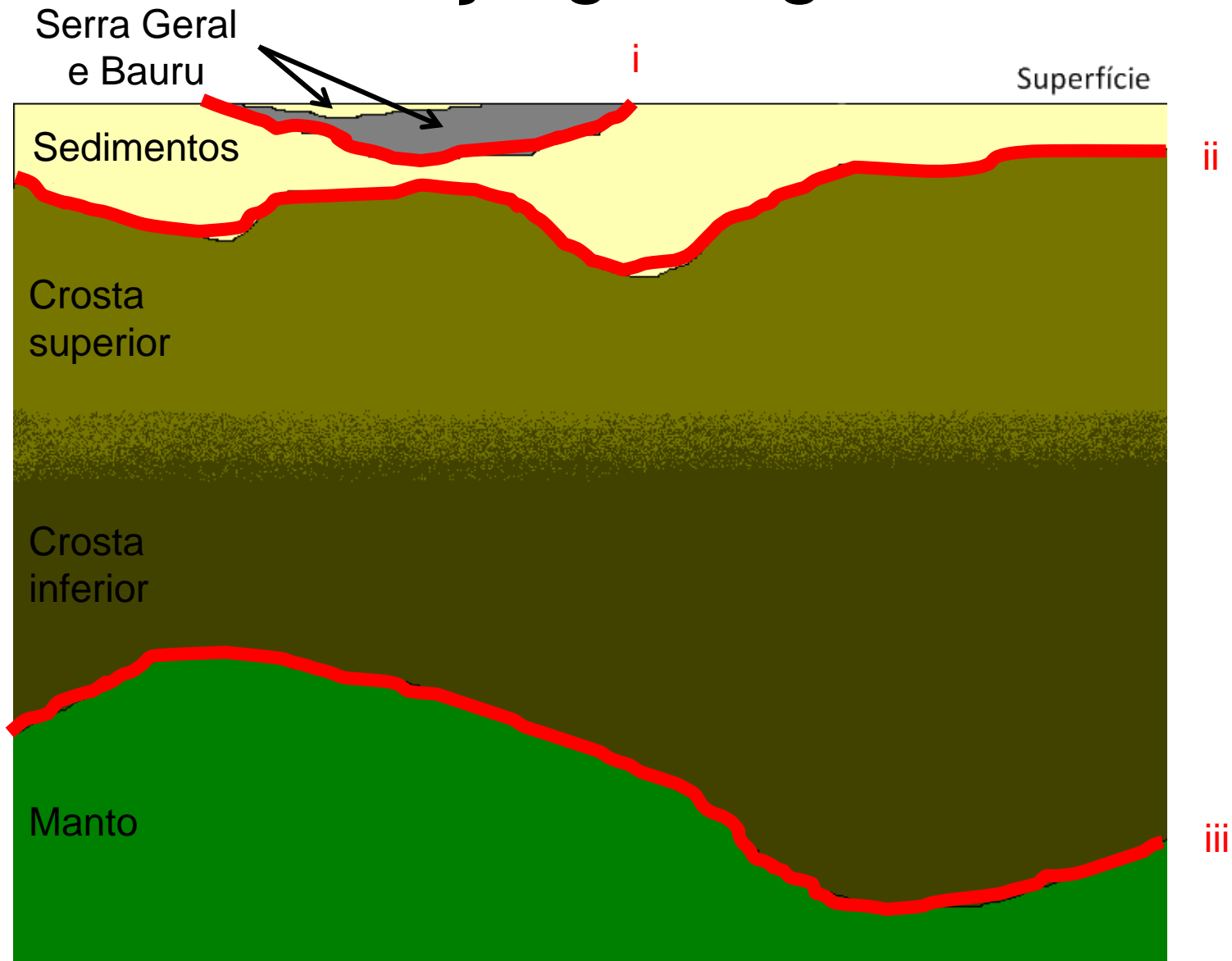


Modificado de Zalán et al. (1990)

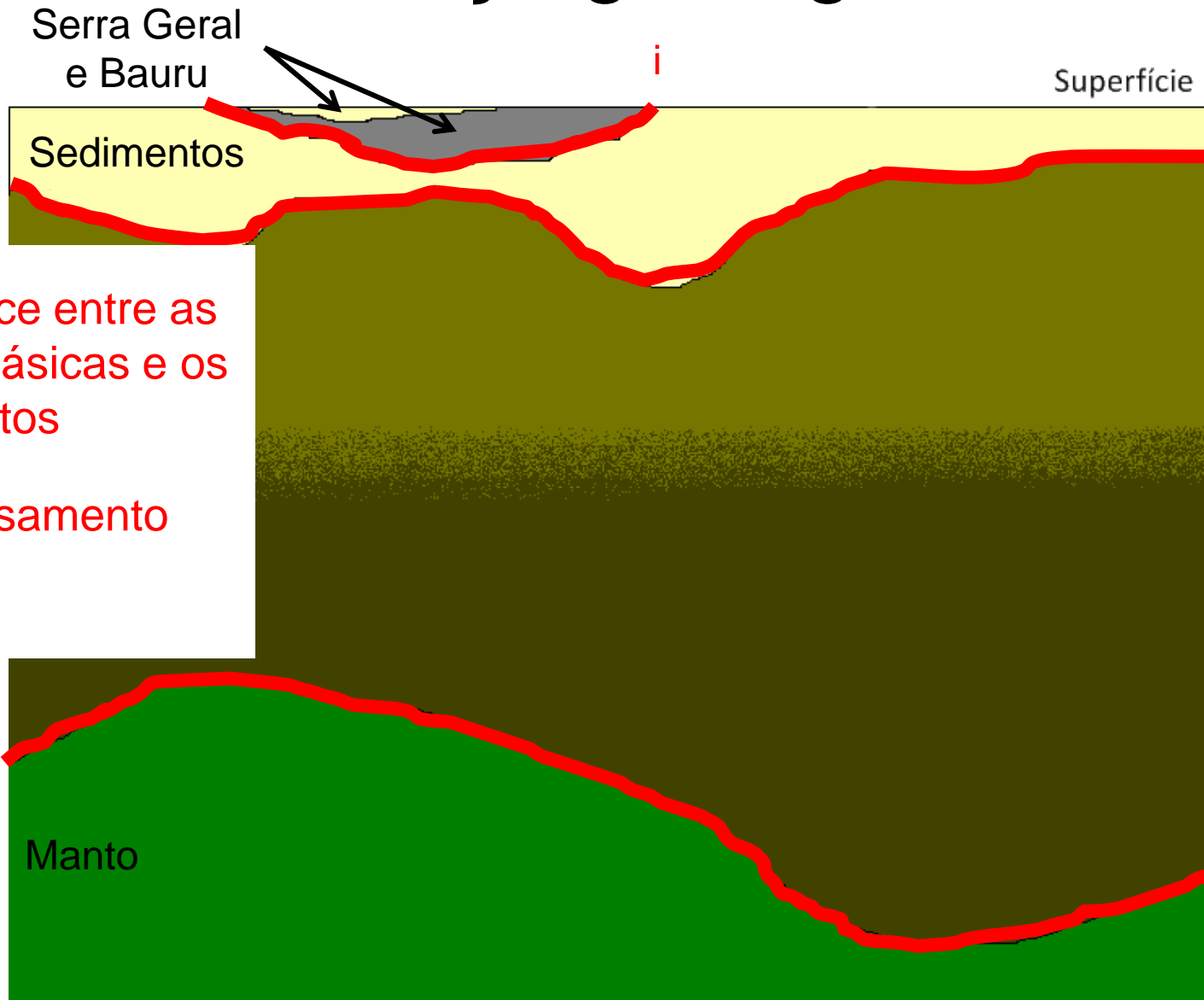
Esboço geológico



Esboço geológico



Esboço geológico

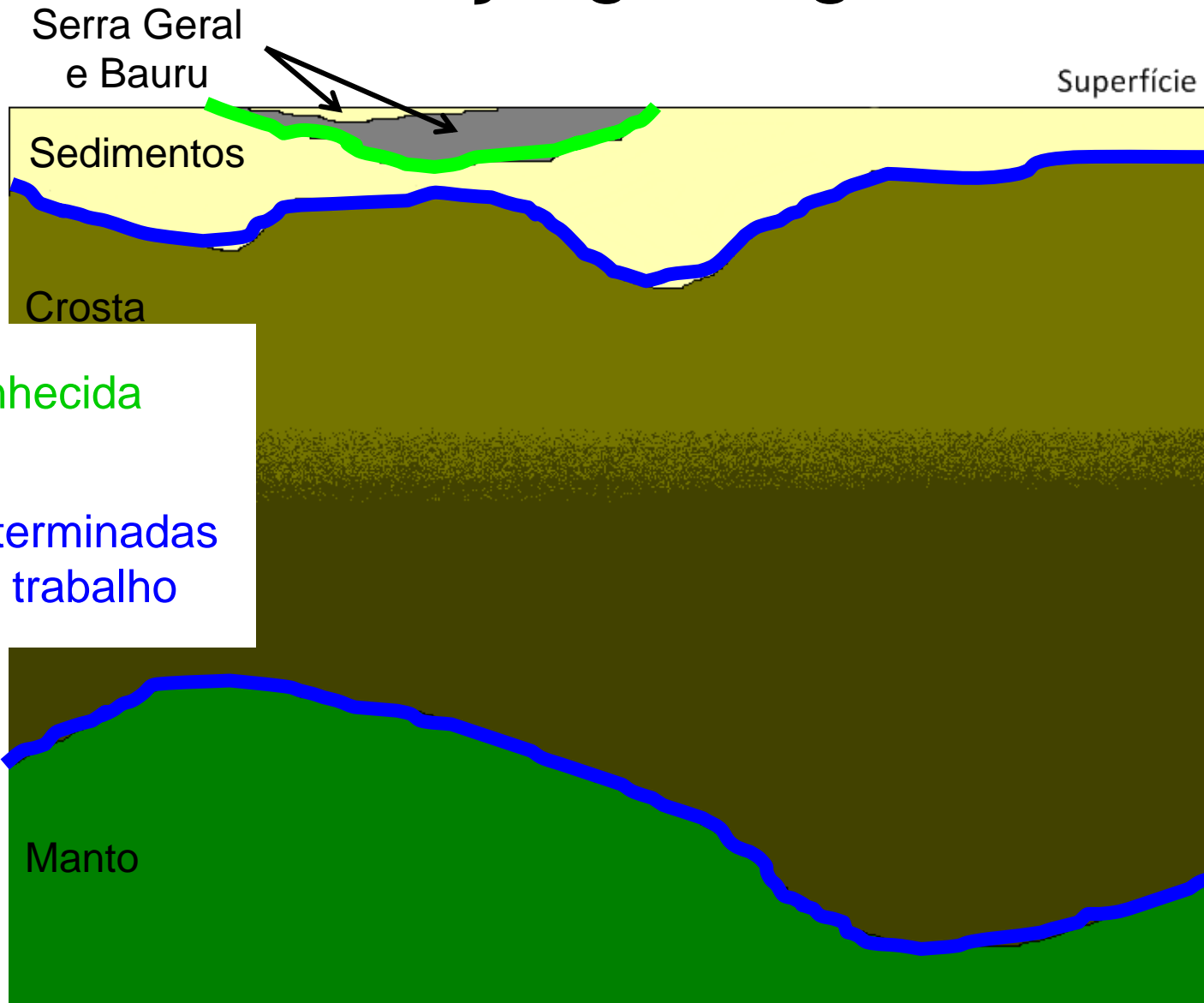


i) Interface entre as rochas básicas e os sedimentos

ii) Embasamento

iii) Moho

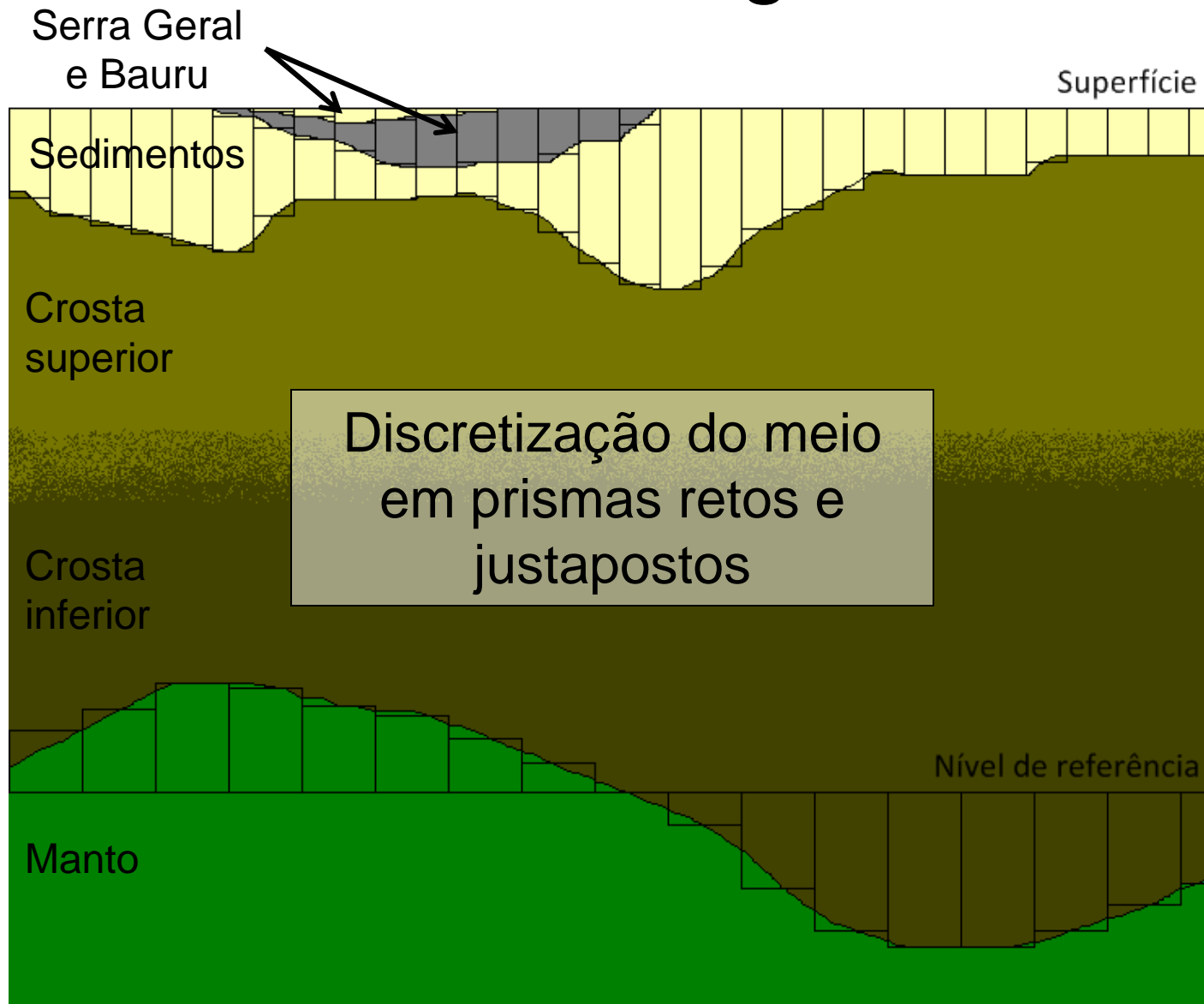
Esboço geológico



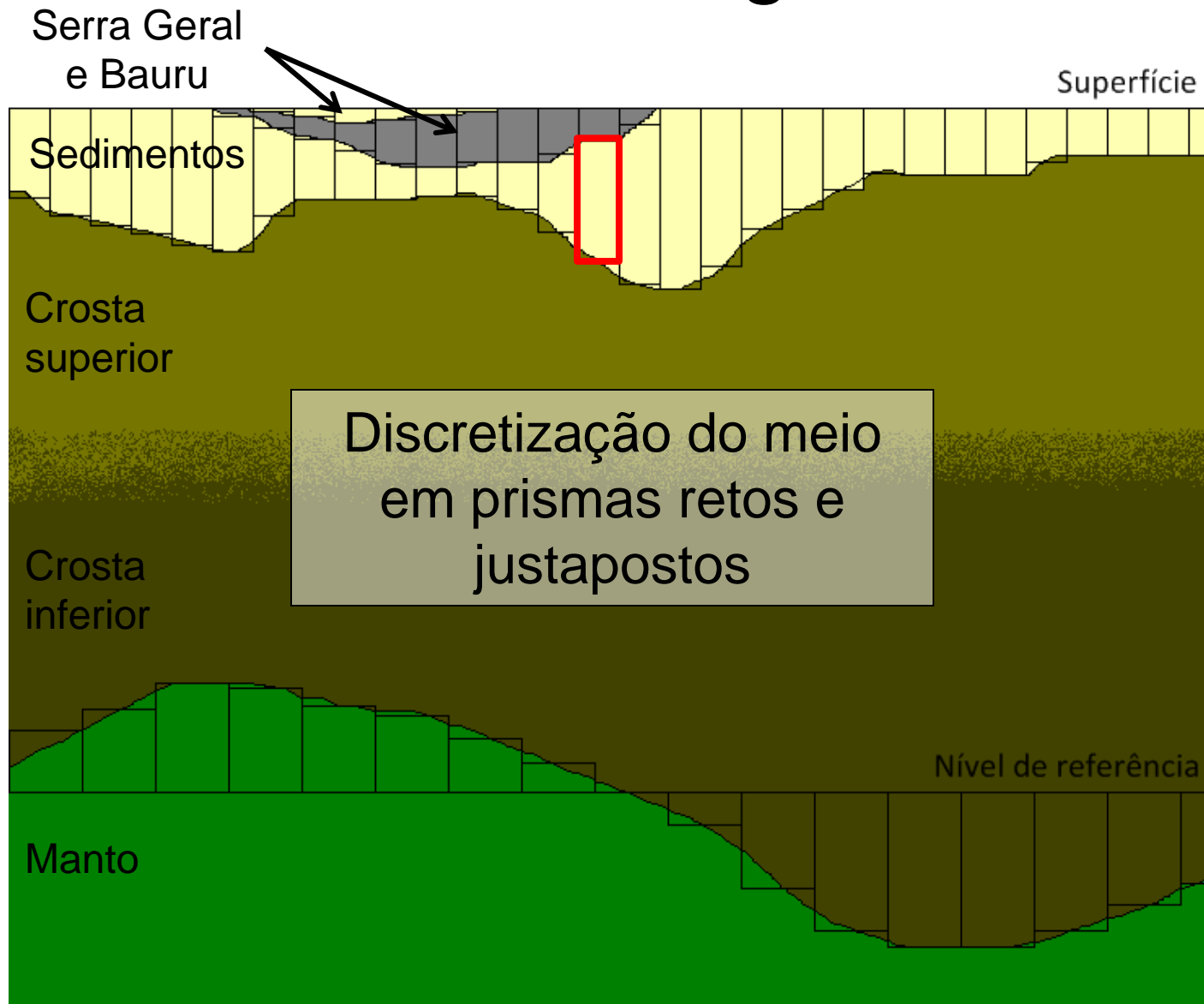
Conhecida

São determinadas
neste trabalho

Metodologia

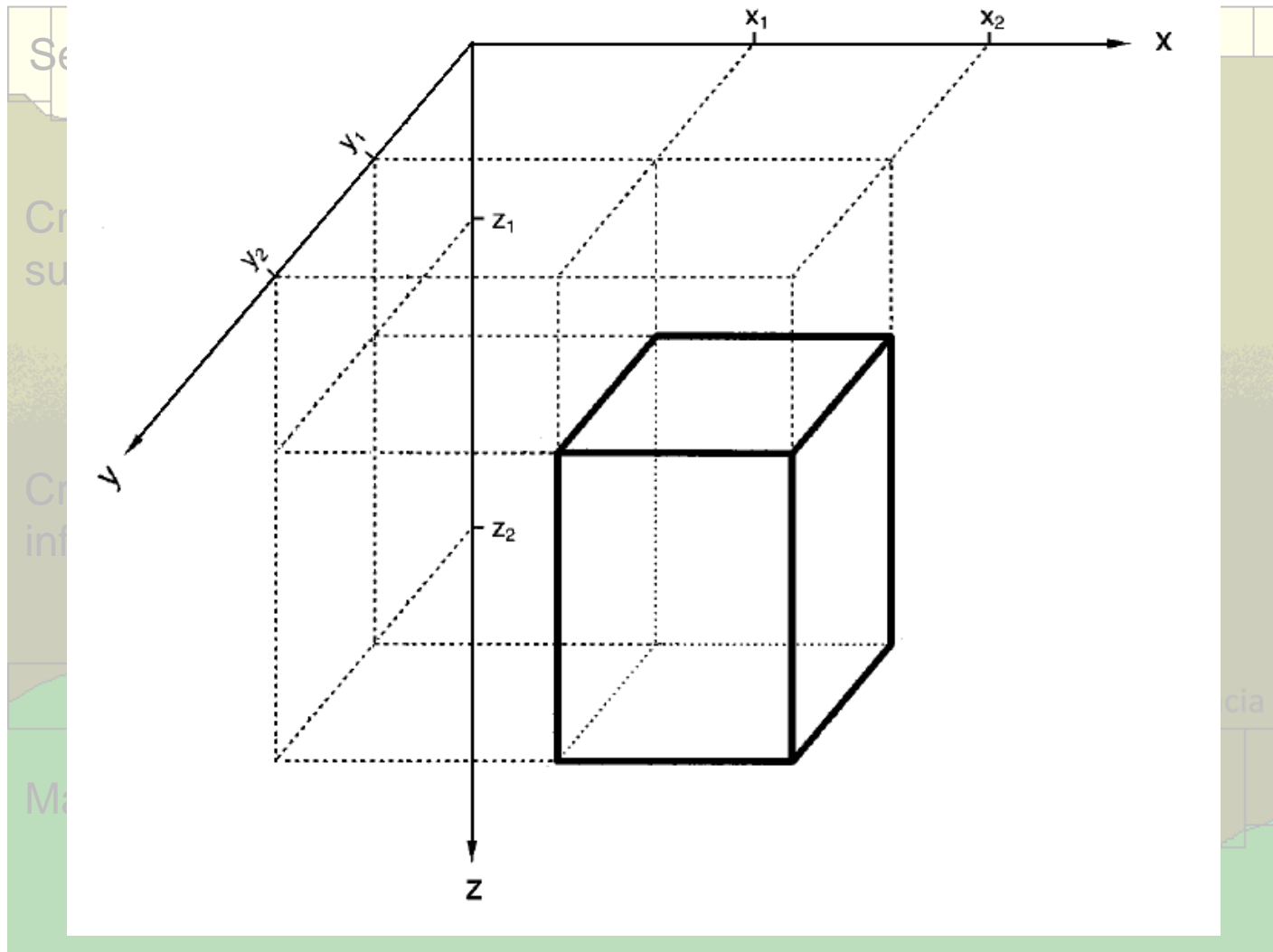


Metodologia



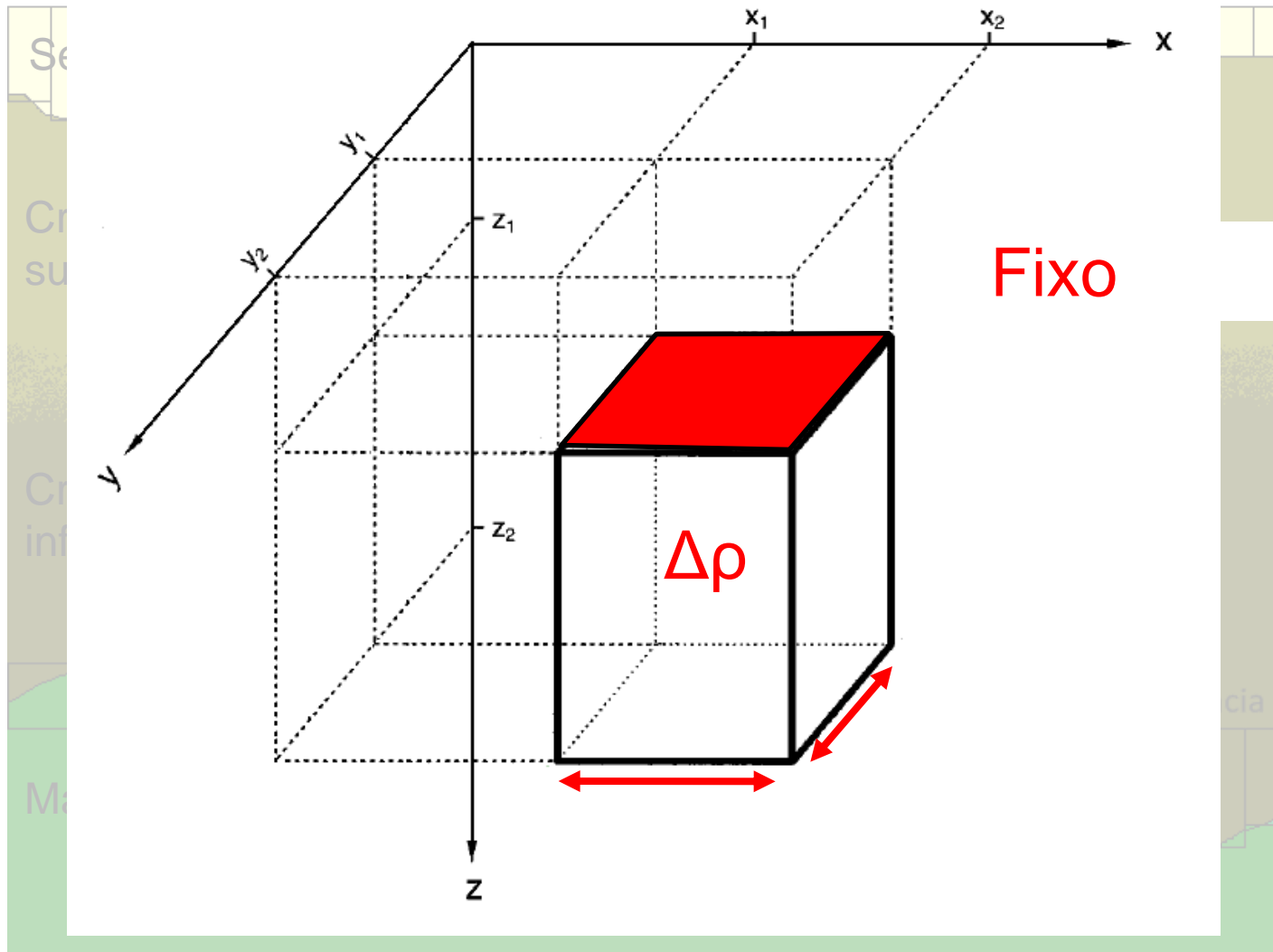
Metodologia

Serra Geral
e Rauriti

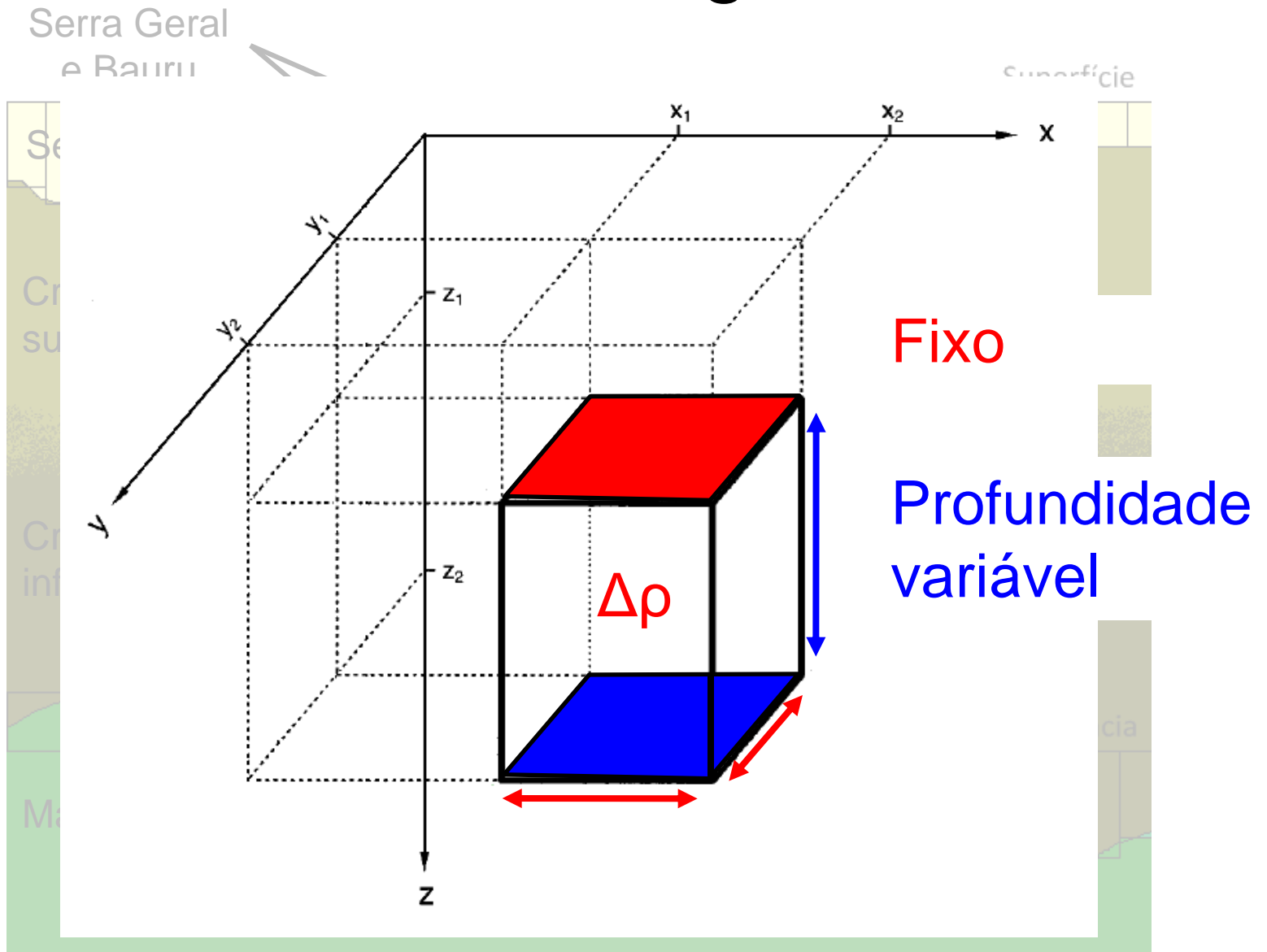


Metodologia

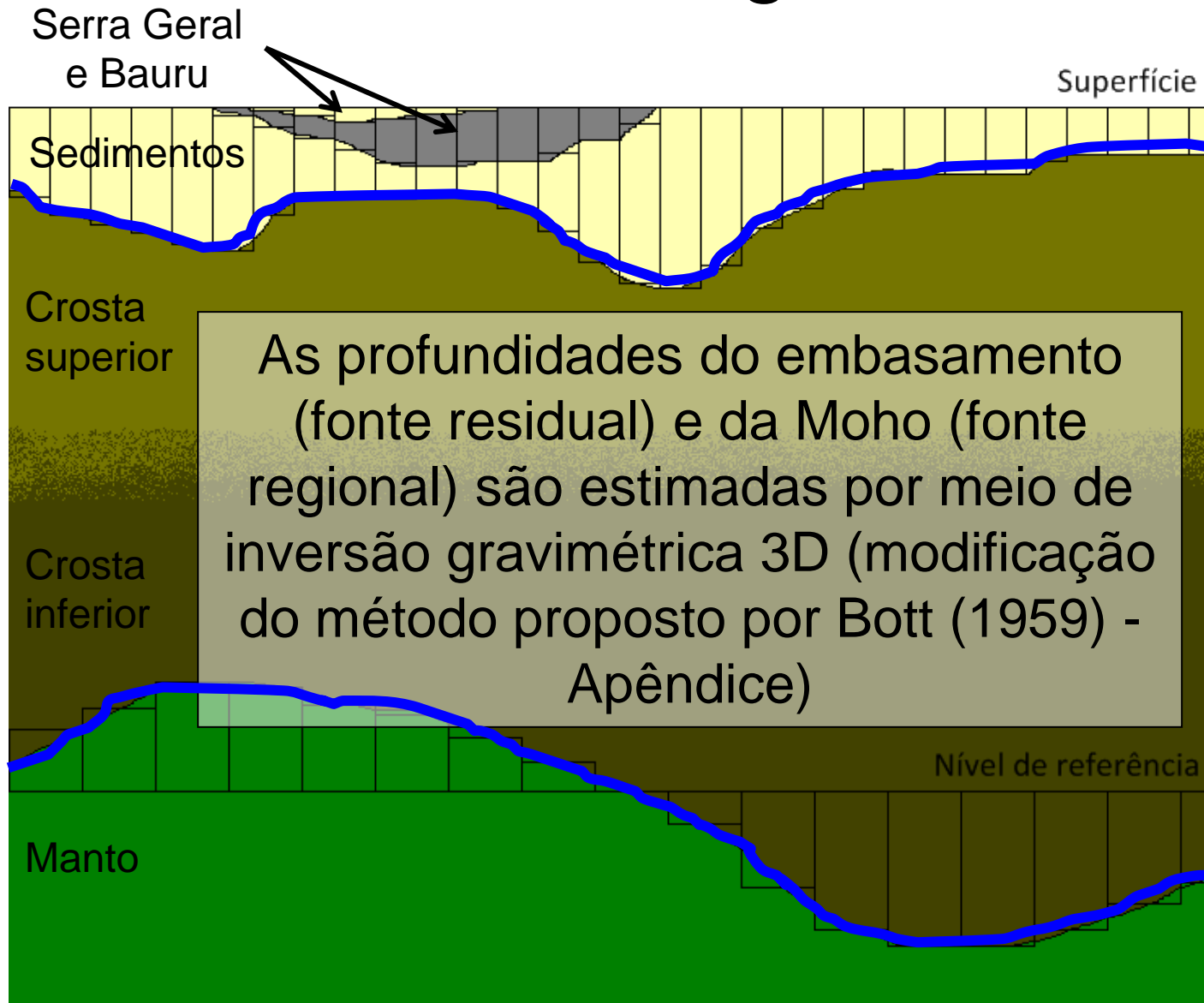
Serra Geral
e Rauriti



Metodologia

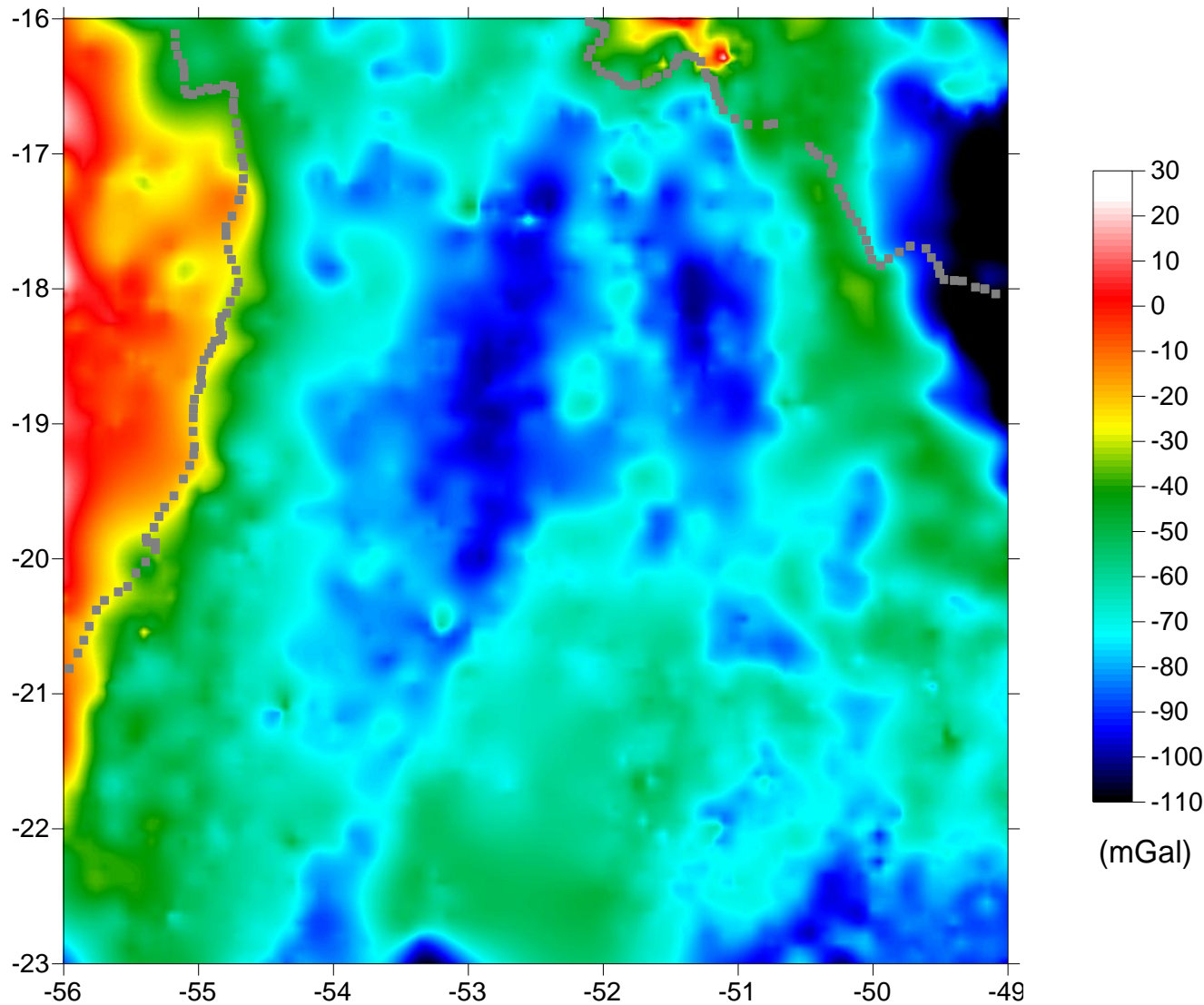


Metodologia



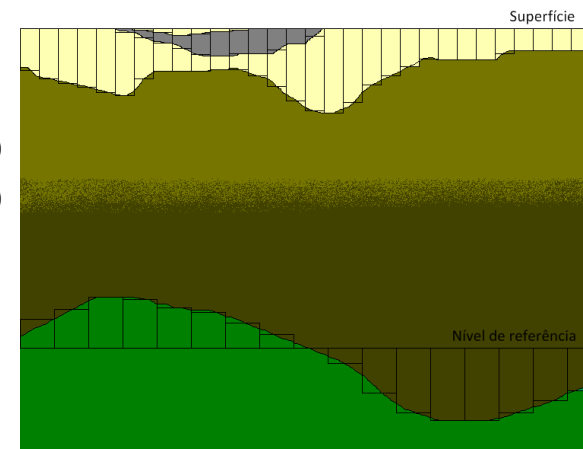
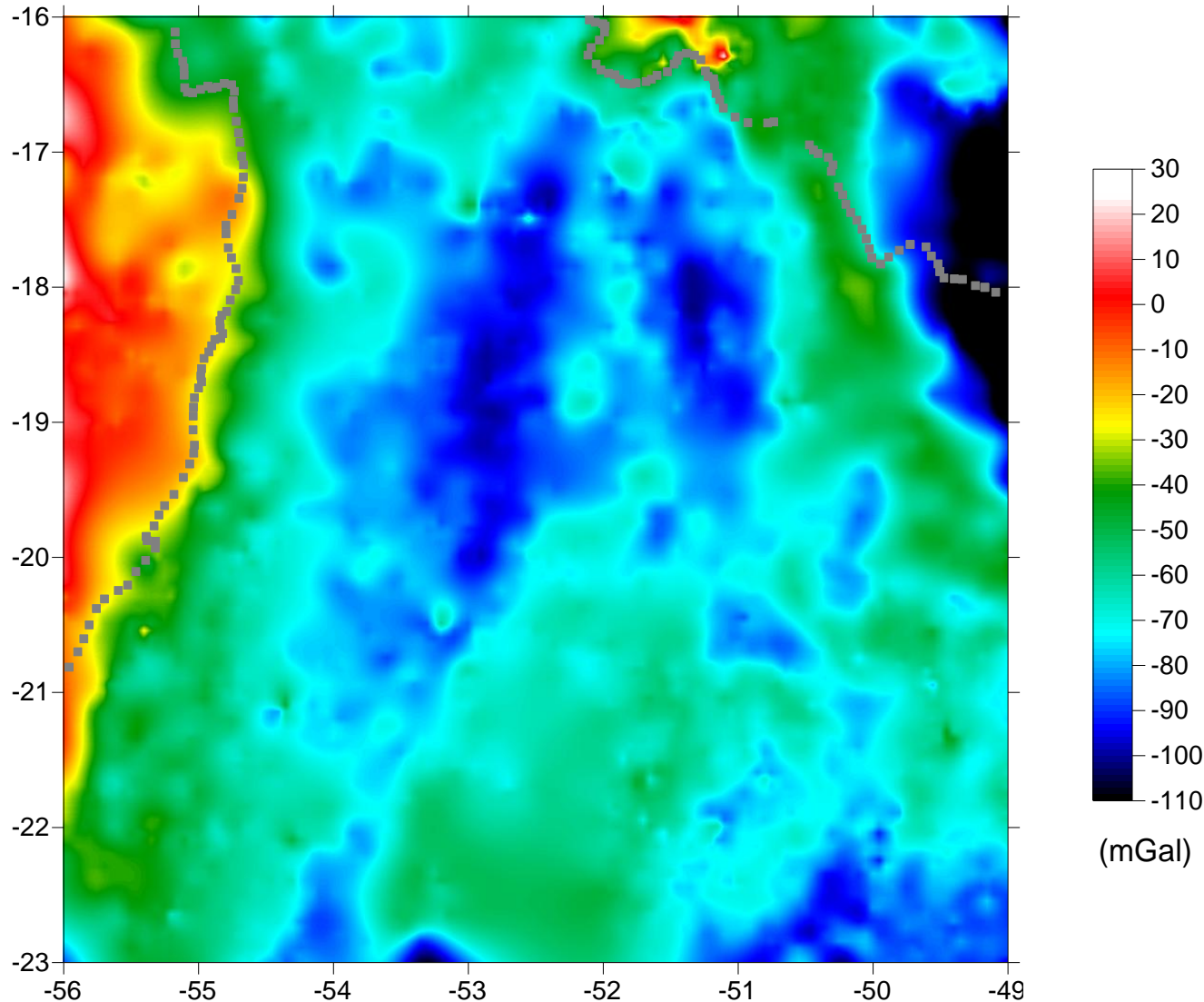
Resultados

Anomalia Bouguer
observada



Resultados

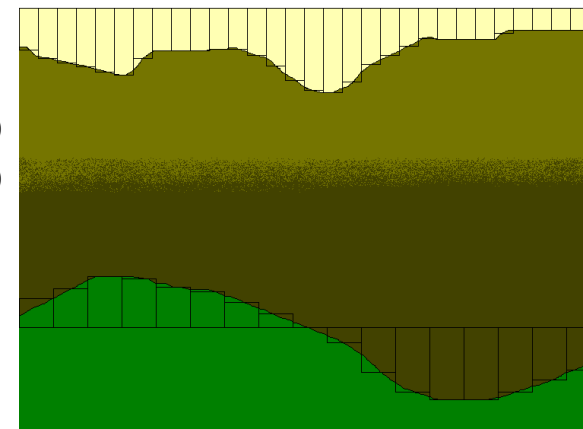
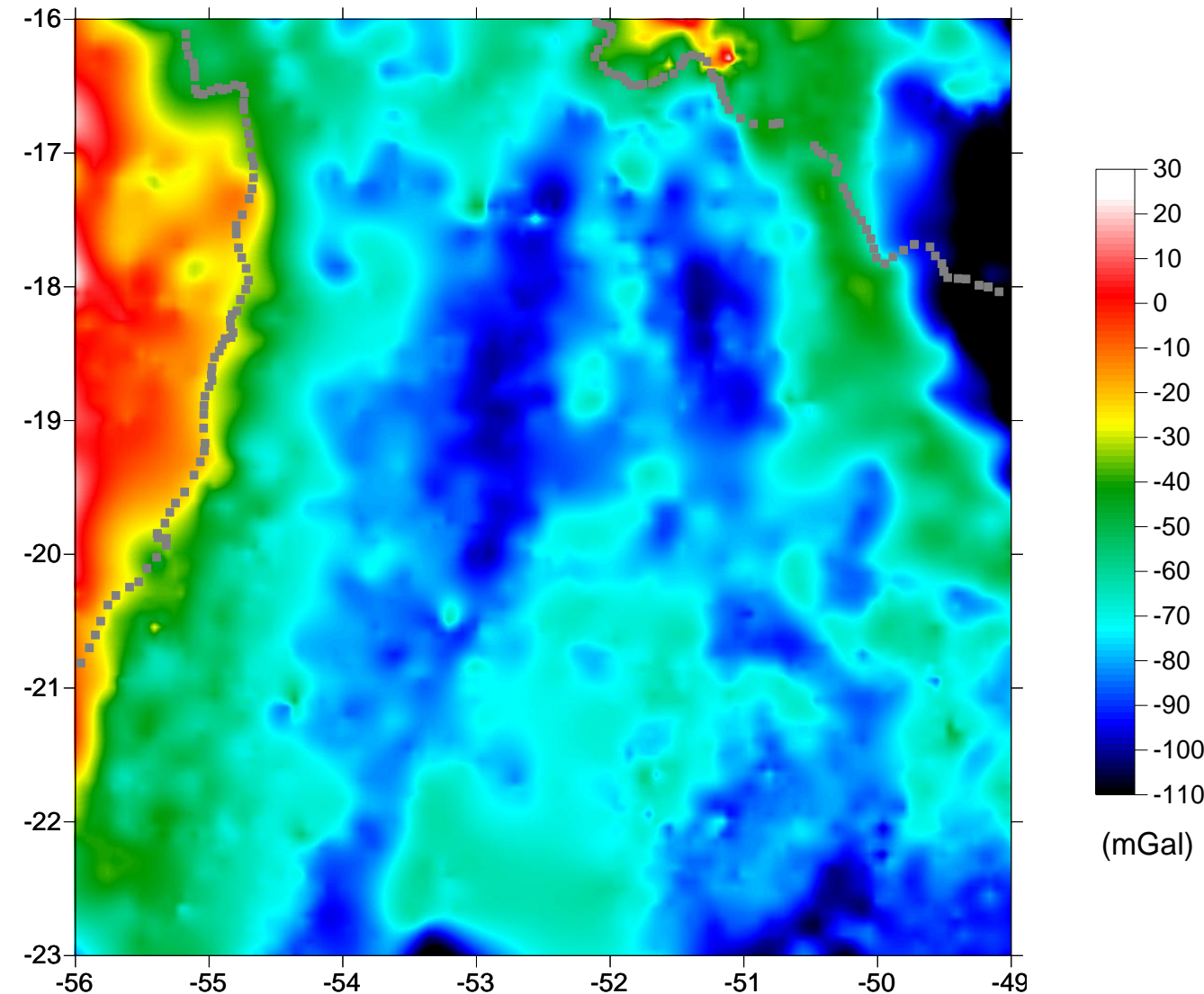
Anomalia Bouguer
observada



Resultados

Anomalia Bouguer
observada

Anomalia Bouguer
sem a influência
das fontes rasas

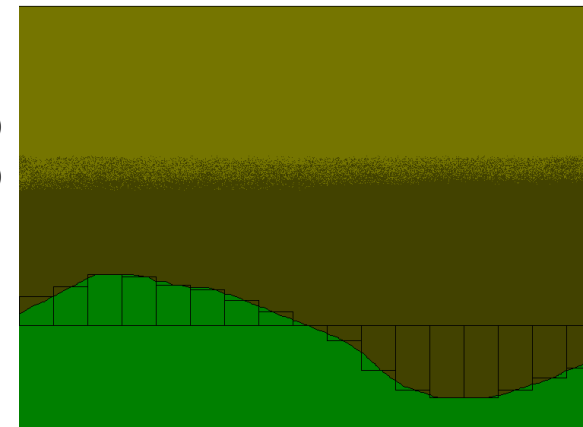
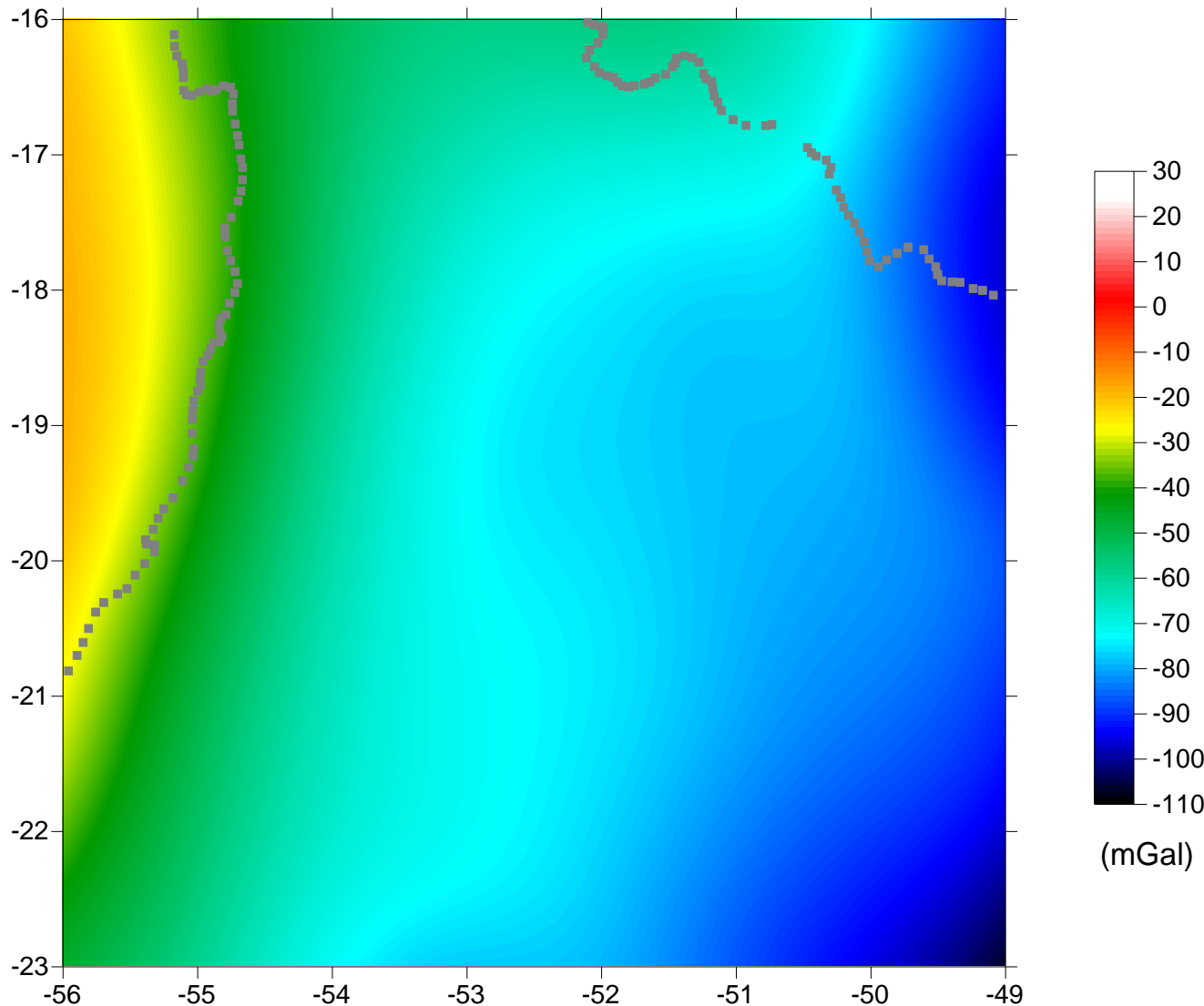


Resultados

Anomalia Bouguer
observada

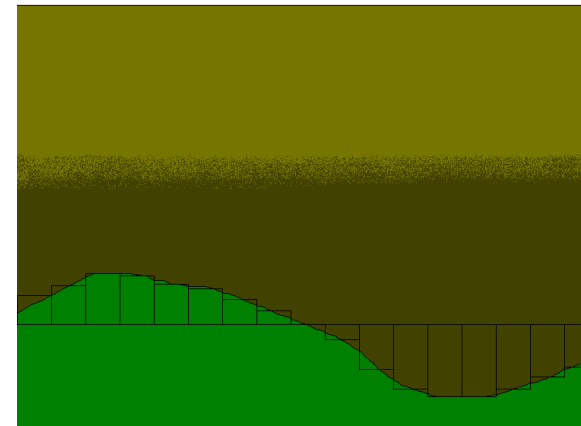
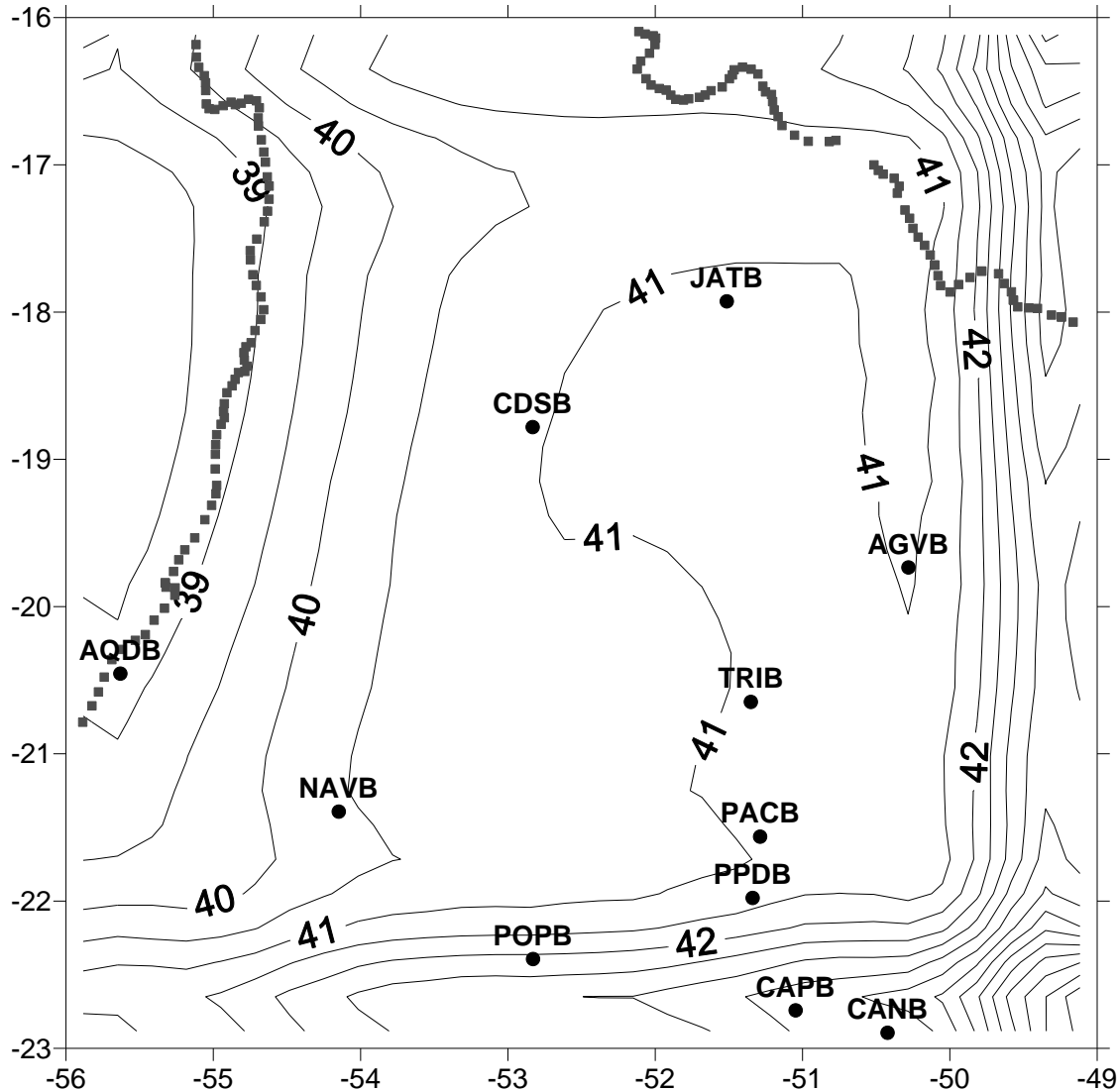
Anomalia Bouguer
sem a influência
das fontes rasas

Anomalia Bouguer
sem a influência
das fontes rasas e
continuada para
cima até 100 km



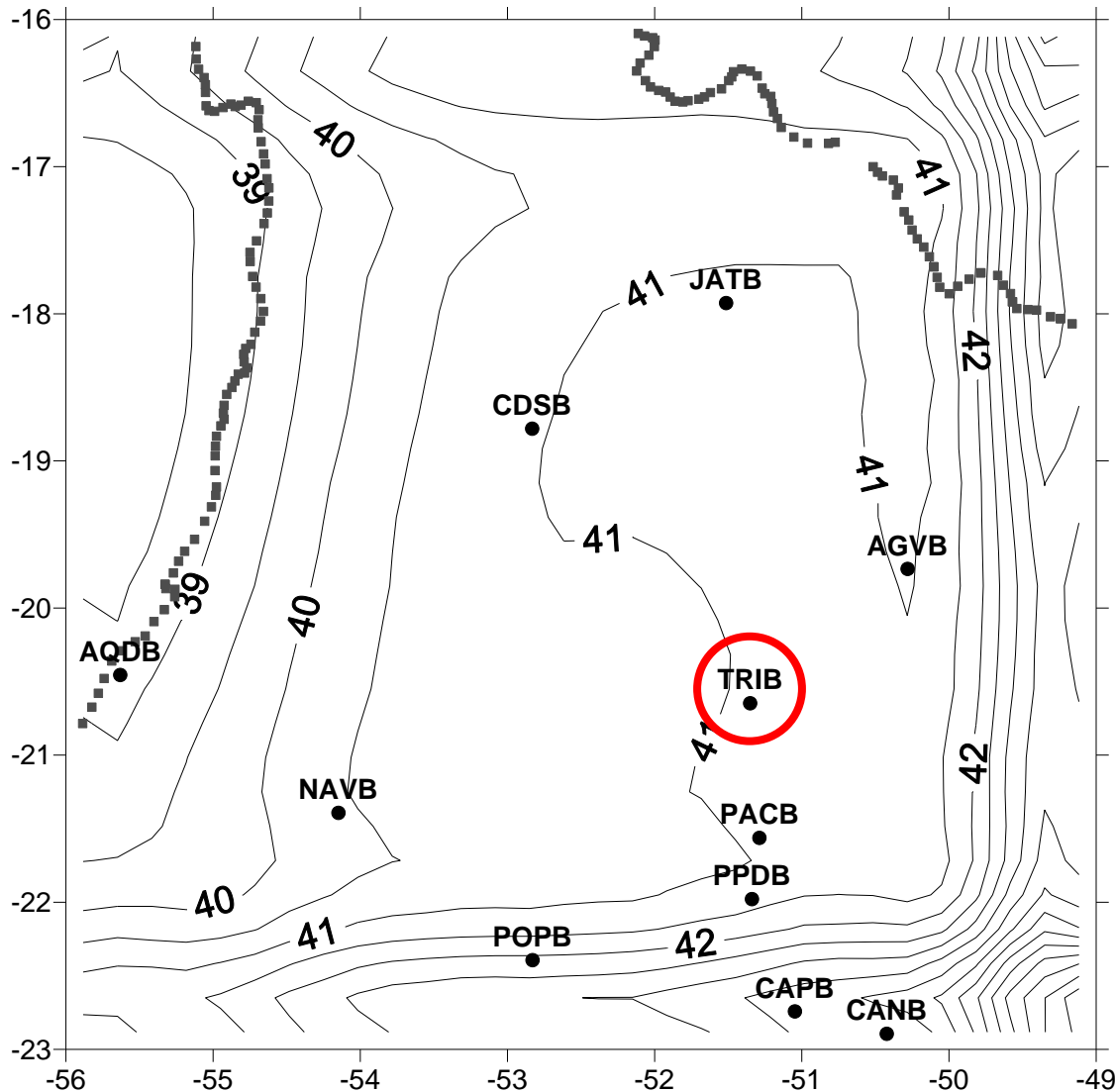
Resultados

Profundidades estimadas via inversão



Resultados

Profundidades estimadas via inversão

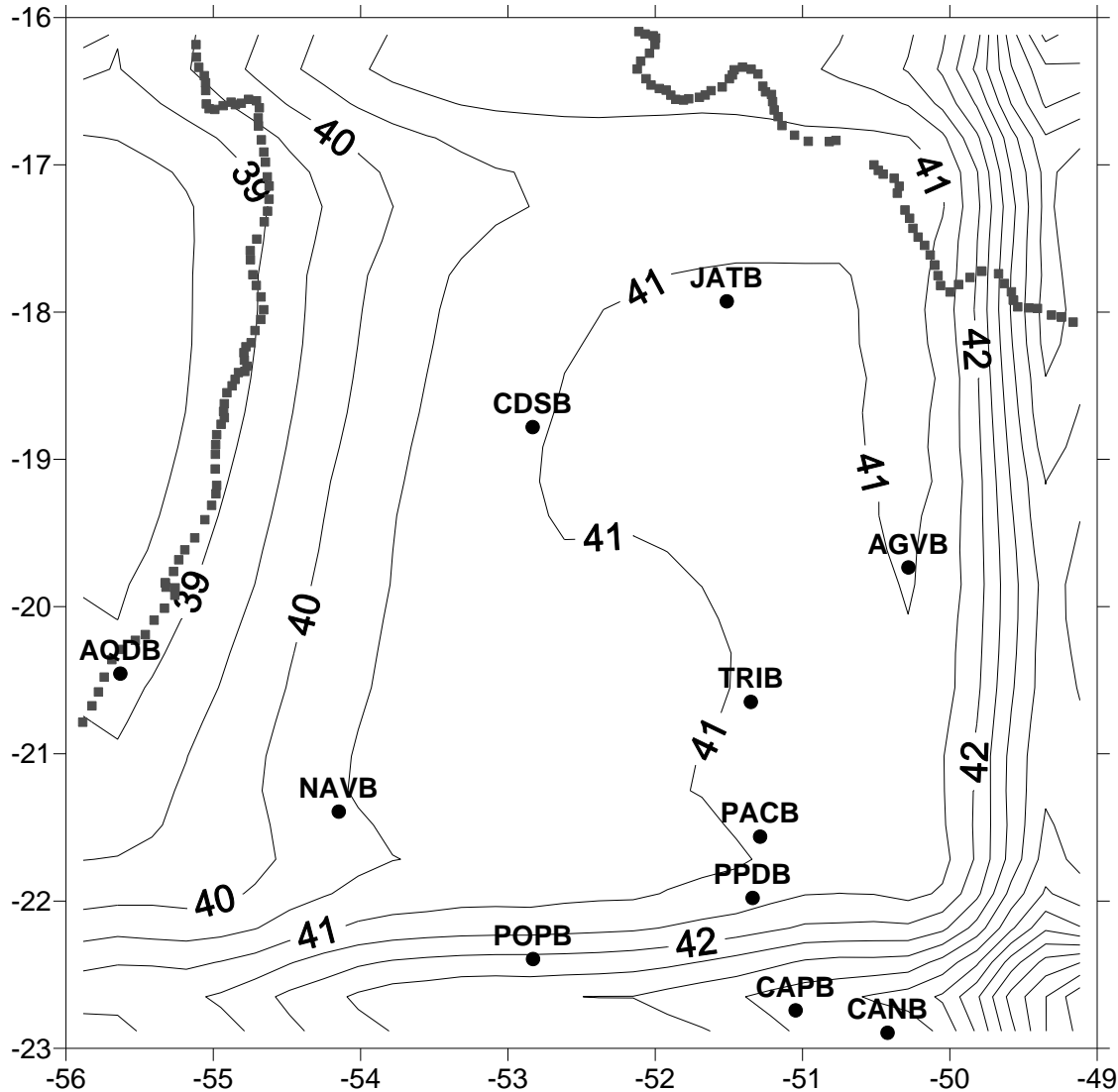


Estações sismográficas onde
foram estimadas a
profundidade da Moho

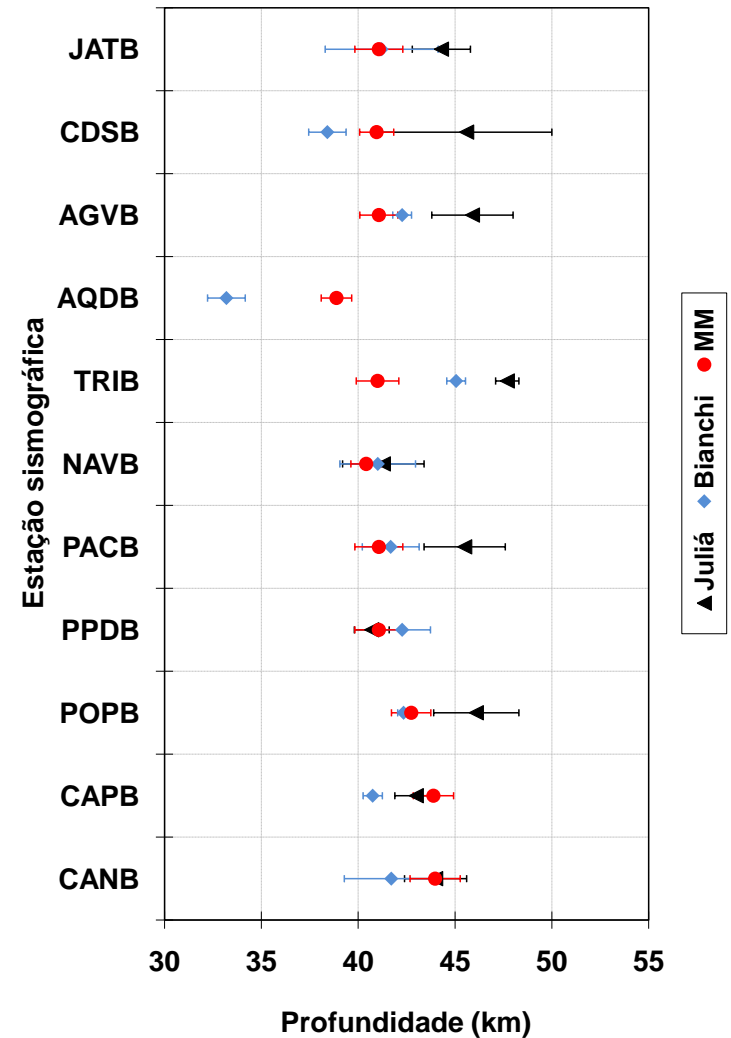
(BIANCHI, 2008; JULIÁ;
ASSUMPÇÃO; ROCHA, 2008)

Resultados

Profundidades estimadas via inversão

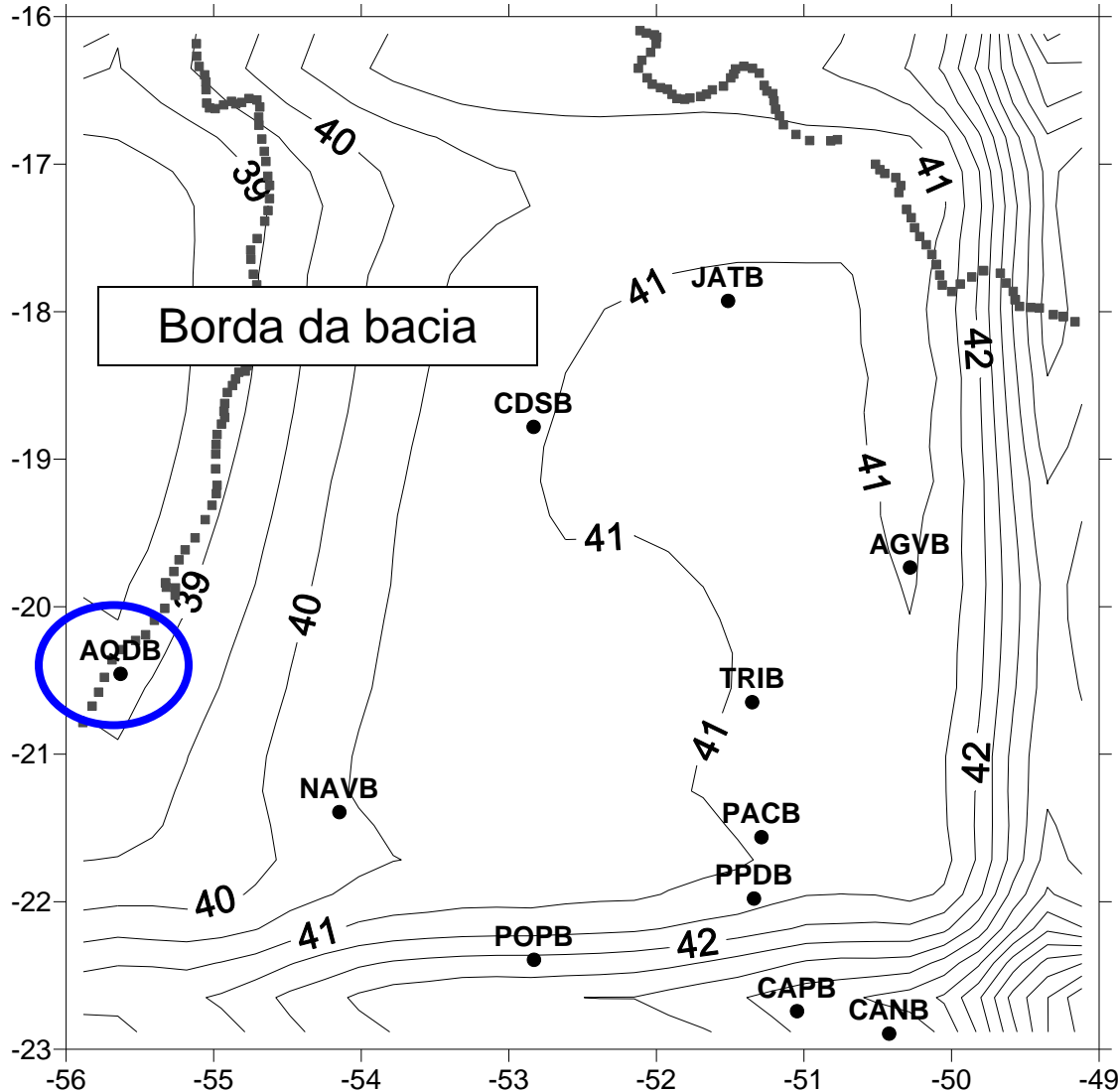


Comparação com inf. a priori

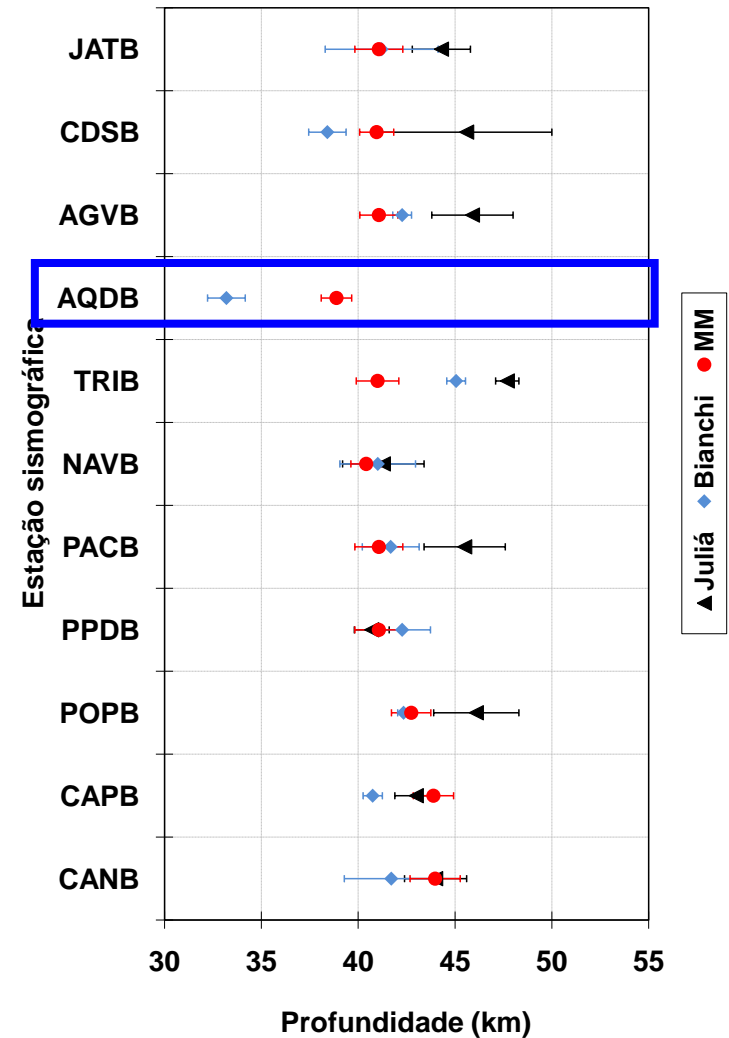


Resultados

Profundidades estimadas via inversão



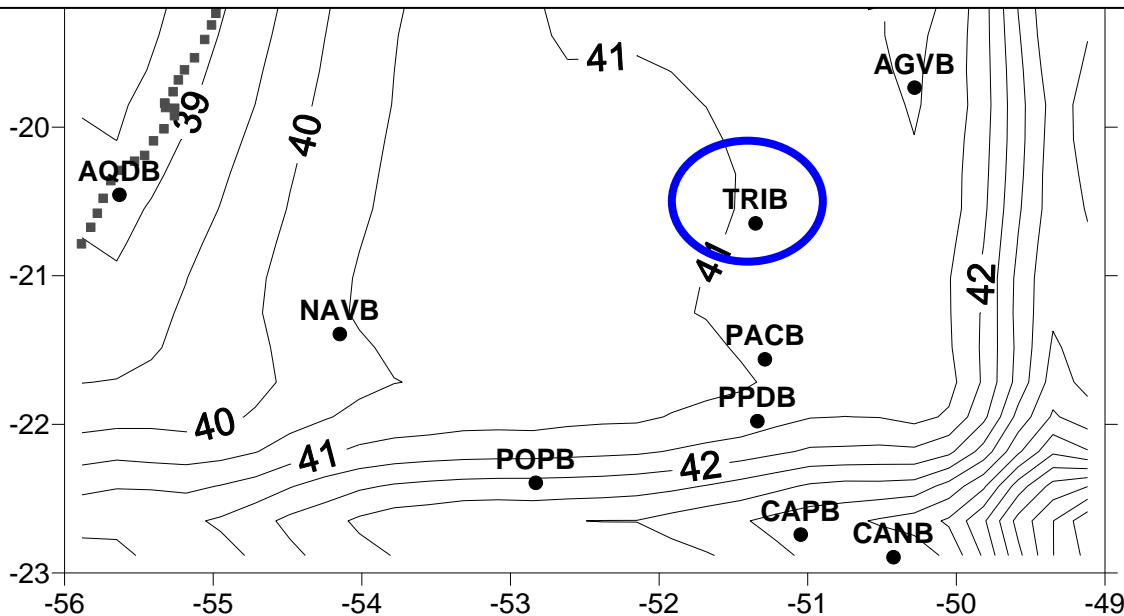
Comparação com inf. a priori



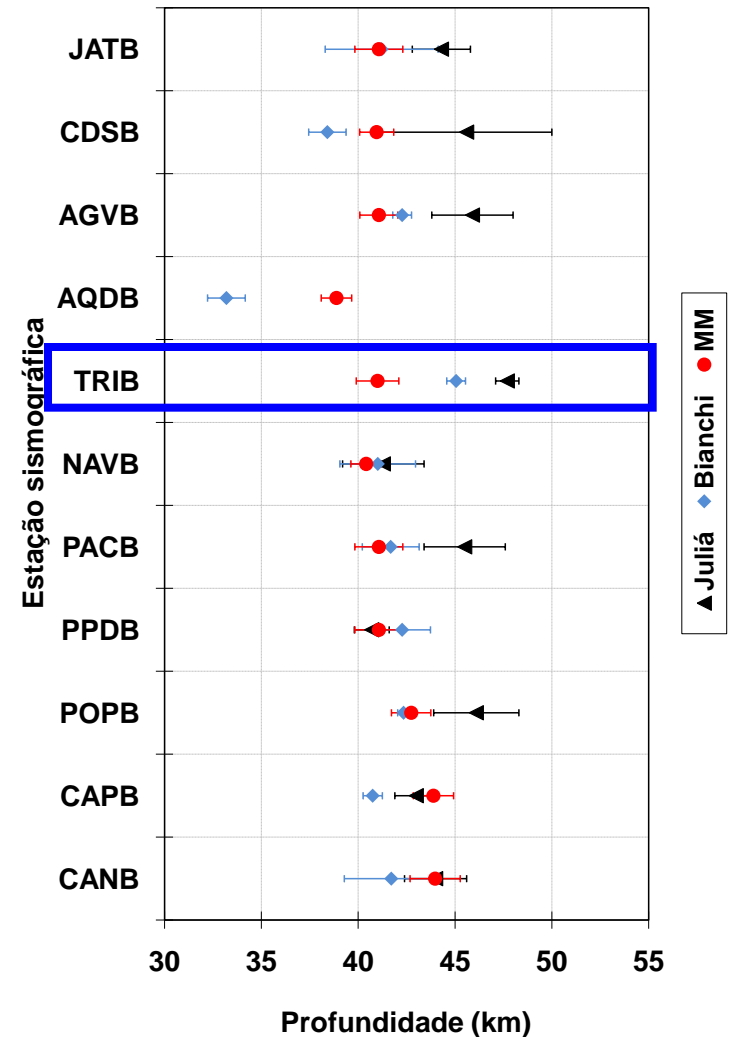
Resultados

Profundidades estimadas via inversão

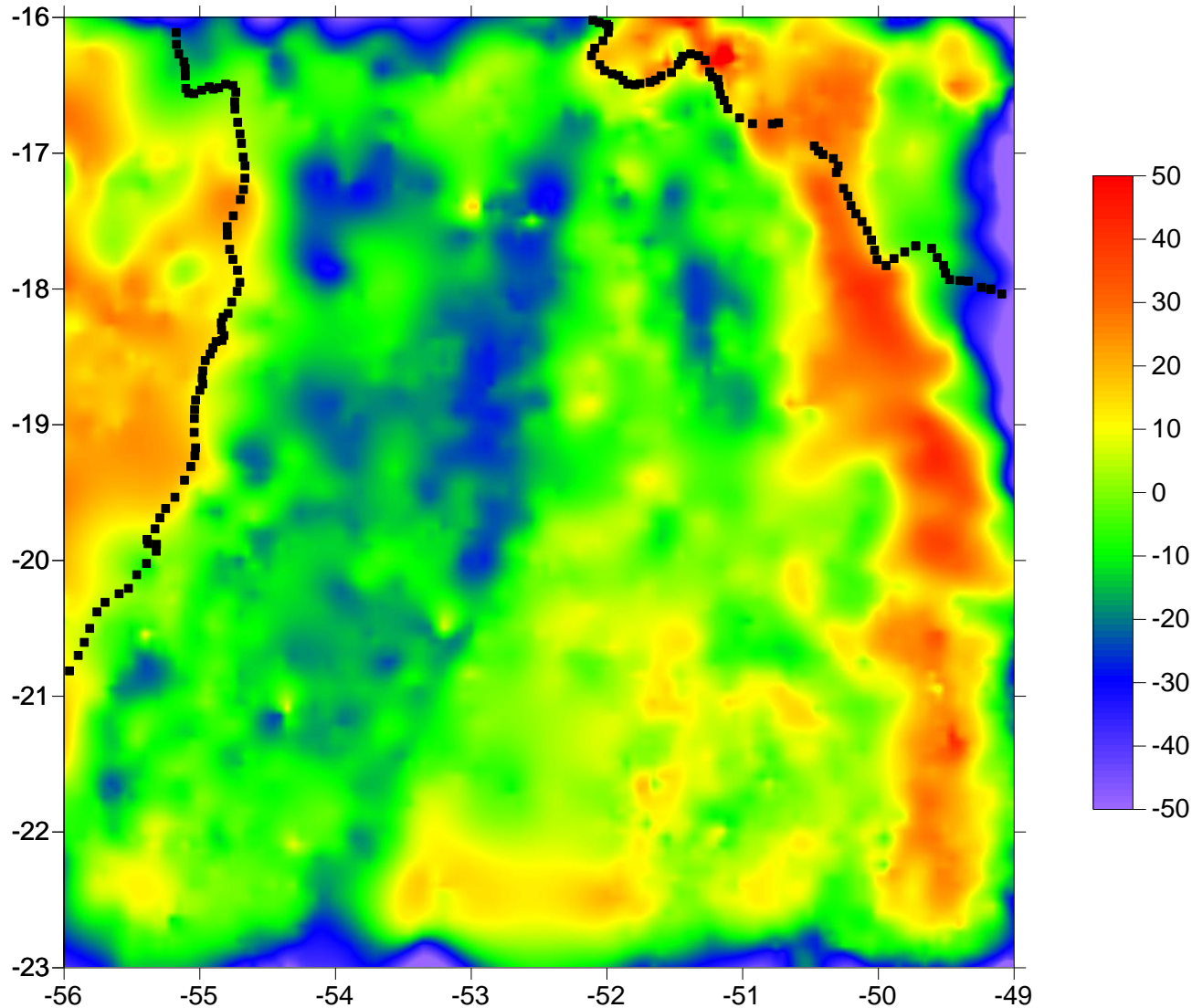
Em comparação aos resultados obtidos por Juliá e outros, Bianchi obteve profundidades sistematicamente menores, uma vez que ele removeu o efeito dos sedimentos na propagação das ondas. Sendo assim, a remoção de um pacote sedimentar menos espesso implicaria em uma superestimativa da profundidade da Moho.



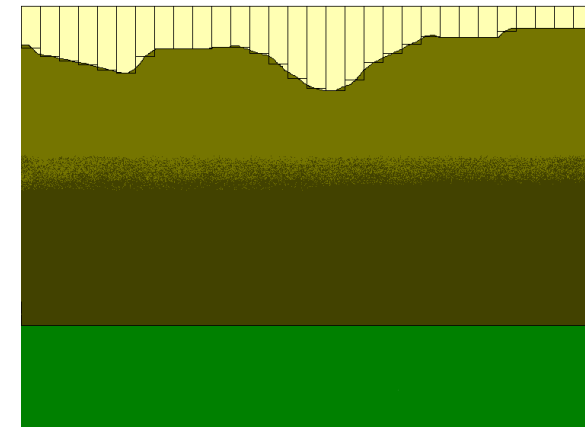
Comparação com inf. a priori



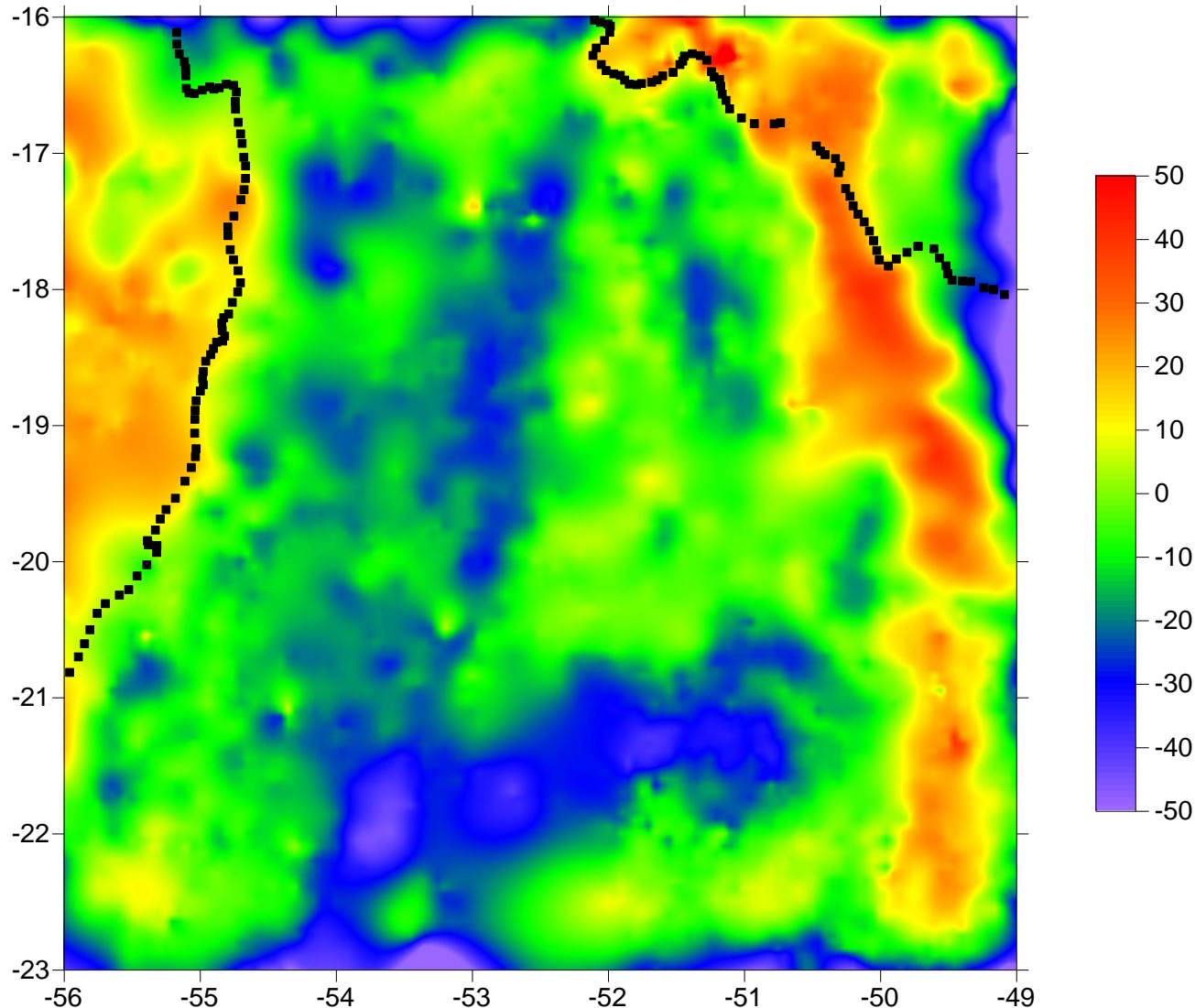
Resultados



Anomalia Bouguer
observada menos a
influência das fontes
rasas e da fonte
regional (Moho)



Resultados

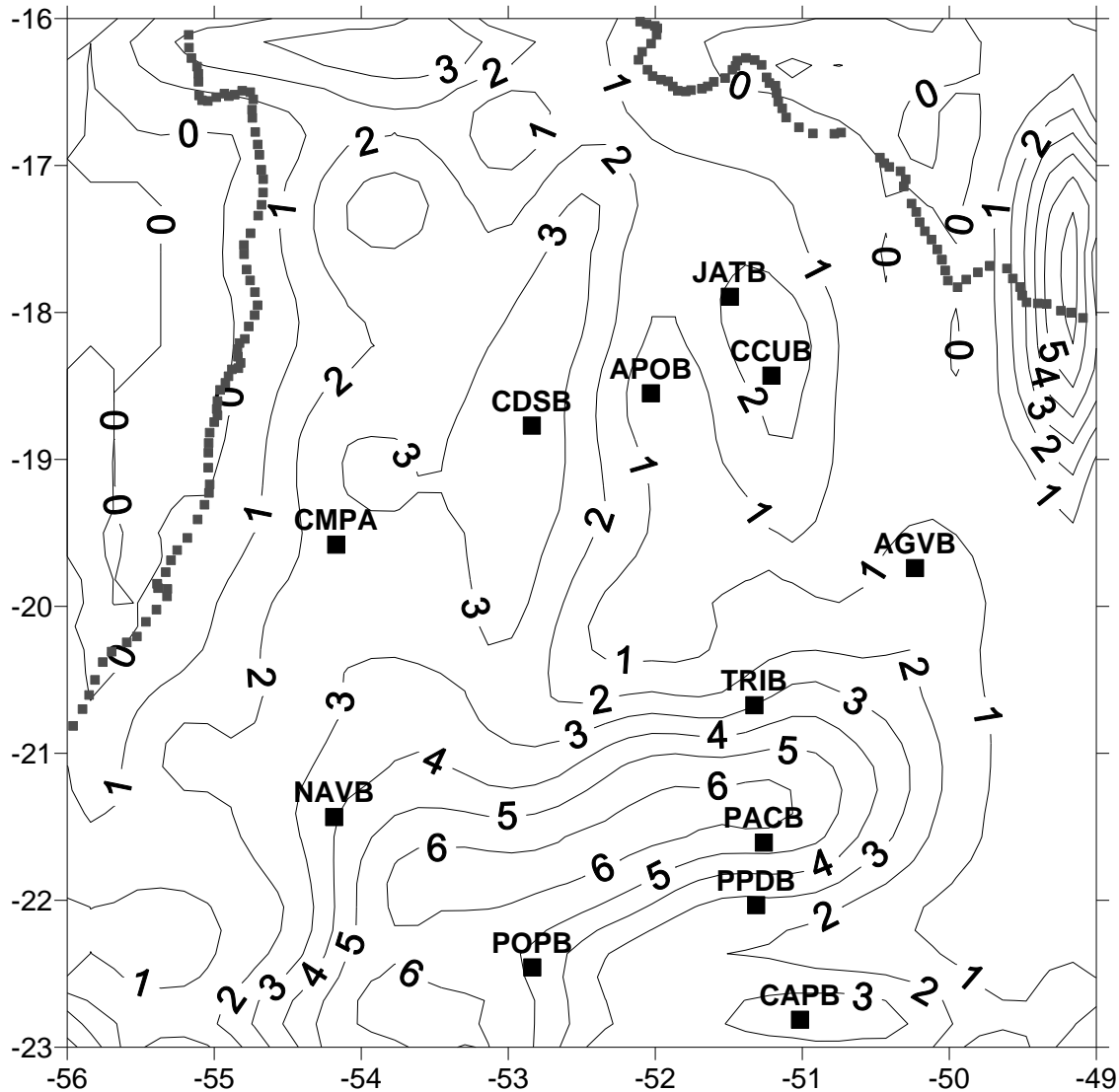


Anomalia Bouguer observada menos a influência das fontes rasas e da fonte regional (Moho)

Remoção de uma anomalia positiva, que é produzida por uma fonte de massa desconhecida

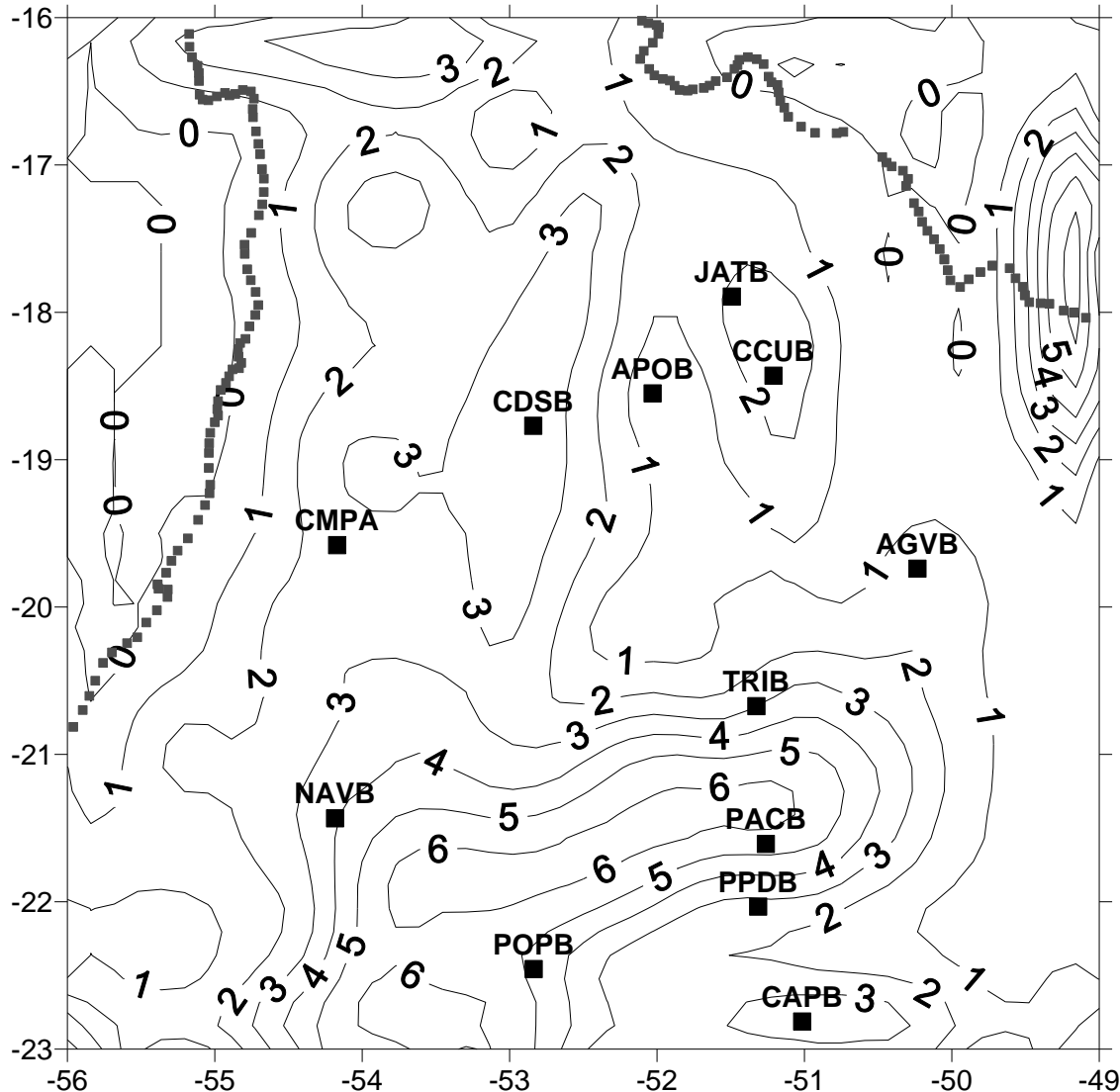
Resultados

Profundidades estimadas via inversão

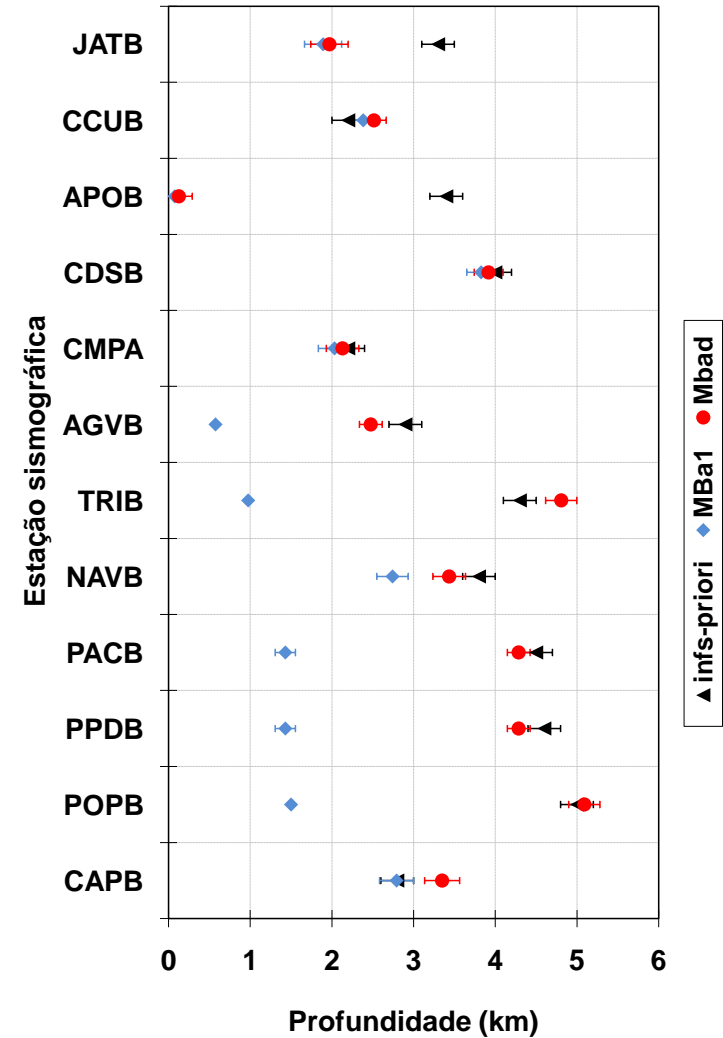


Resultados

Profundidades estimadas via inversão

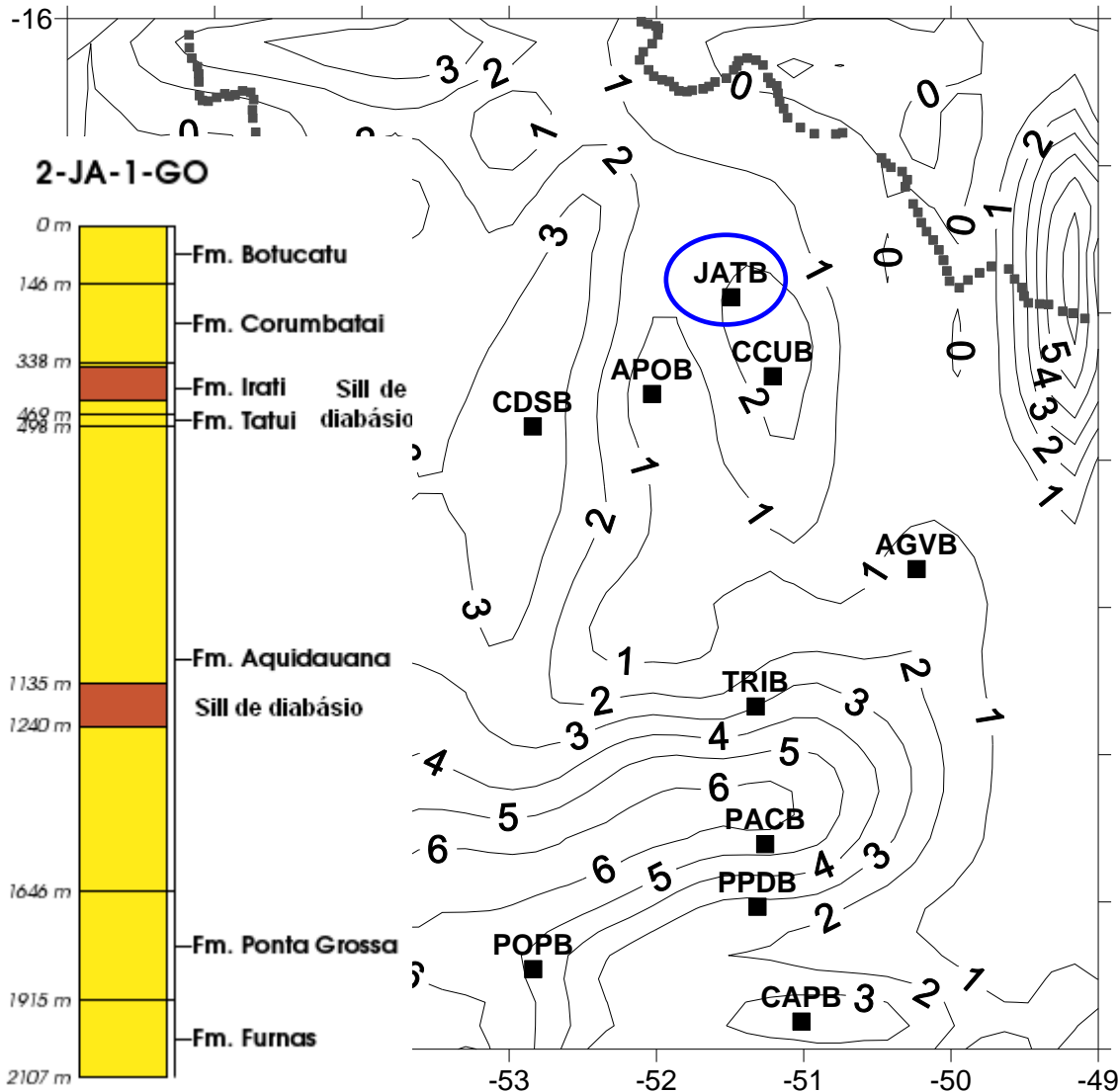


Comparação com
inf. a priori

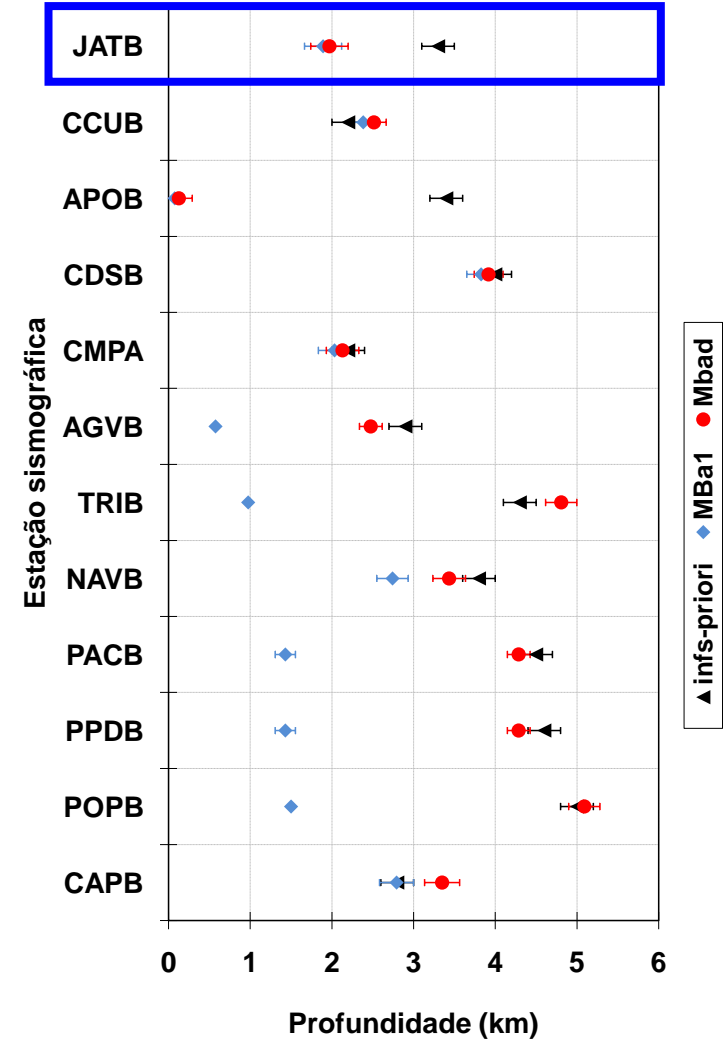


Resultados

Profundidades estimadas via inversão



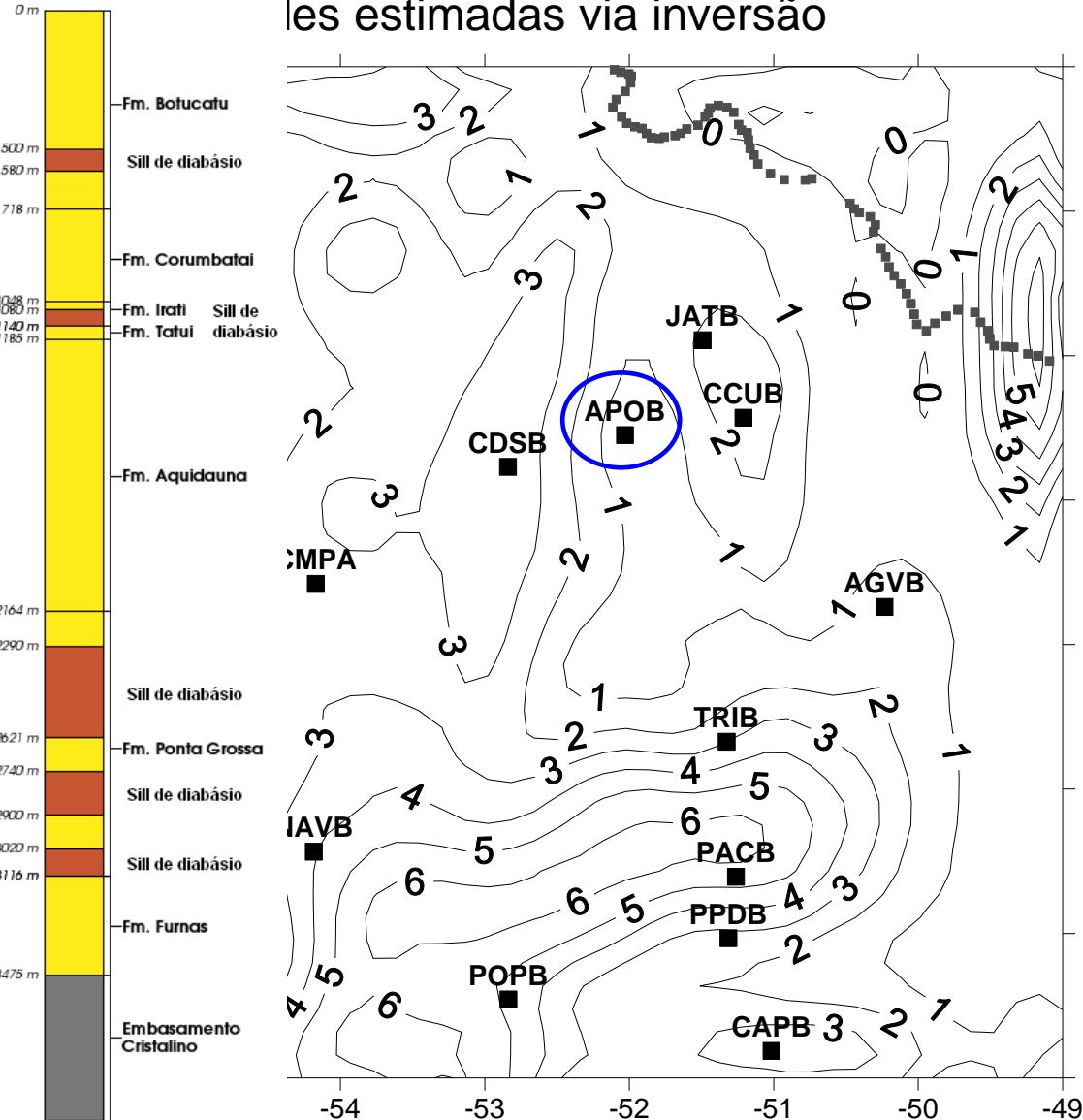
Comparação com inf. a priori



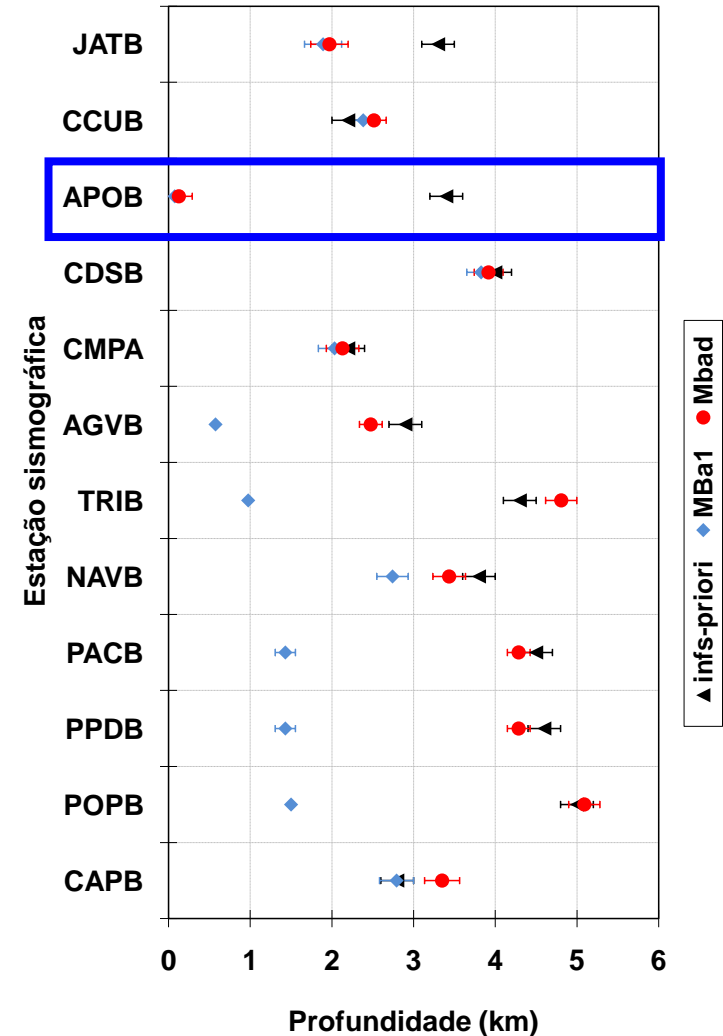
Resultados

les estimadas via inversão

2-RA-1-MS

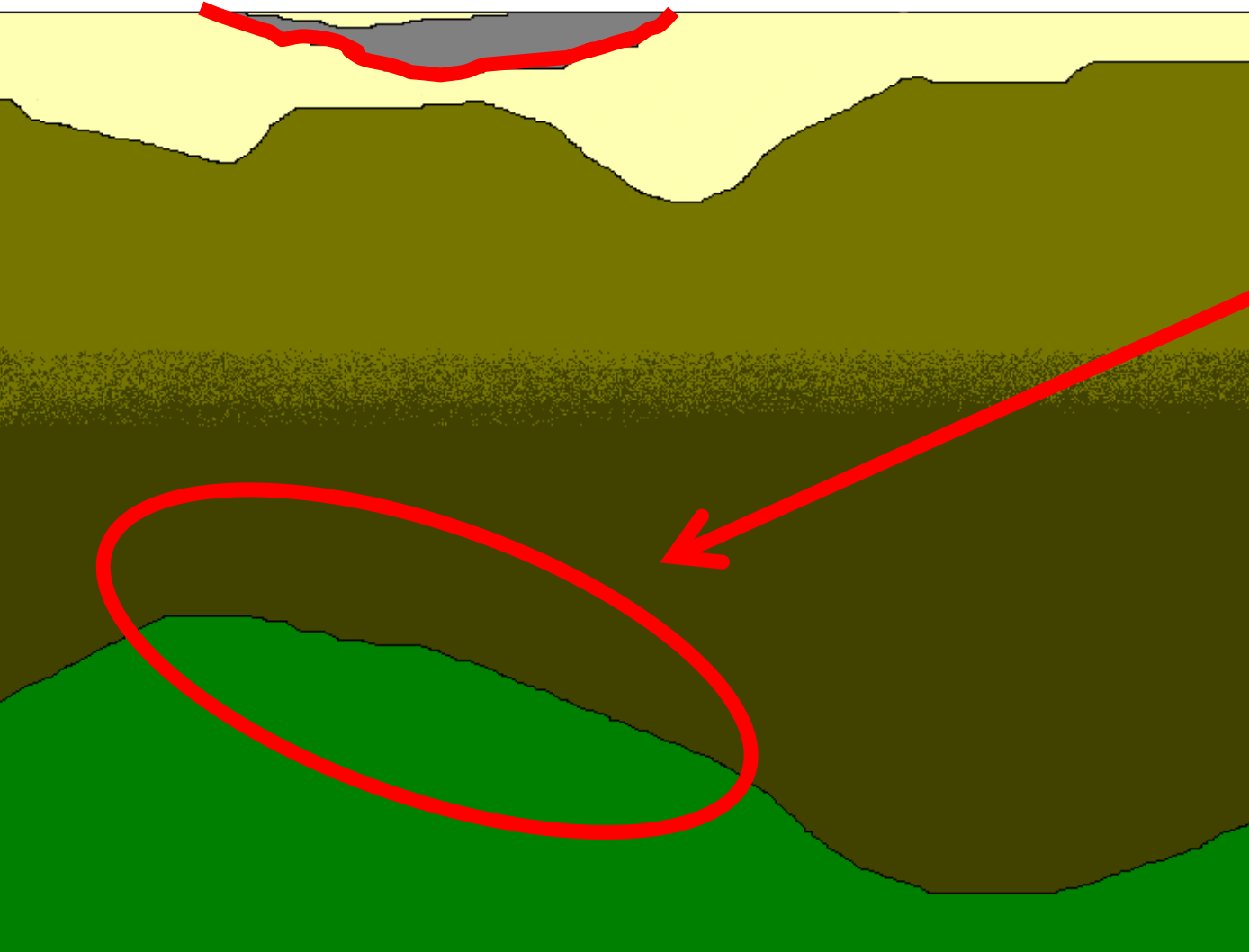


Comparação com
inf. a priori



Resultados

Modelo Serra Geral
mais espesso ?

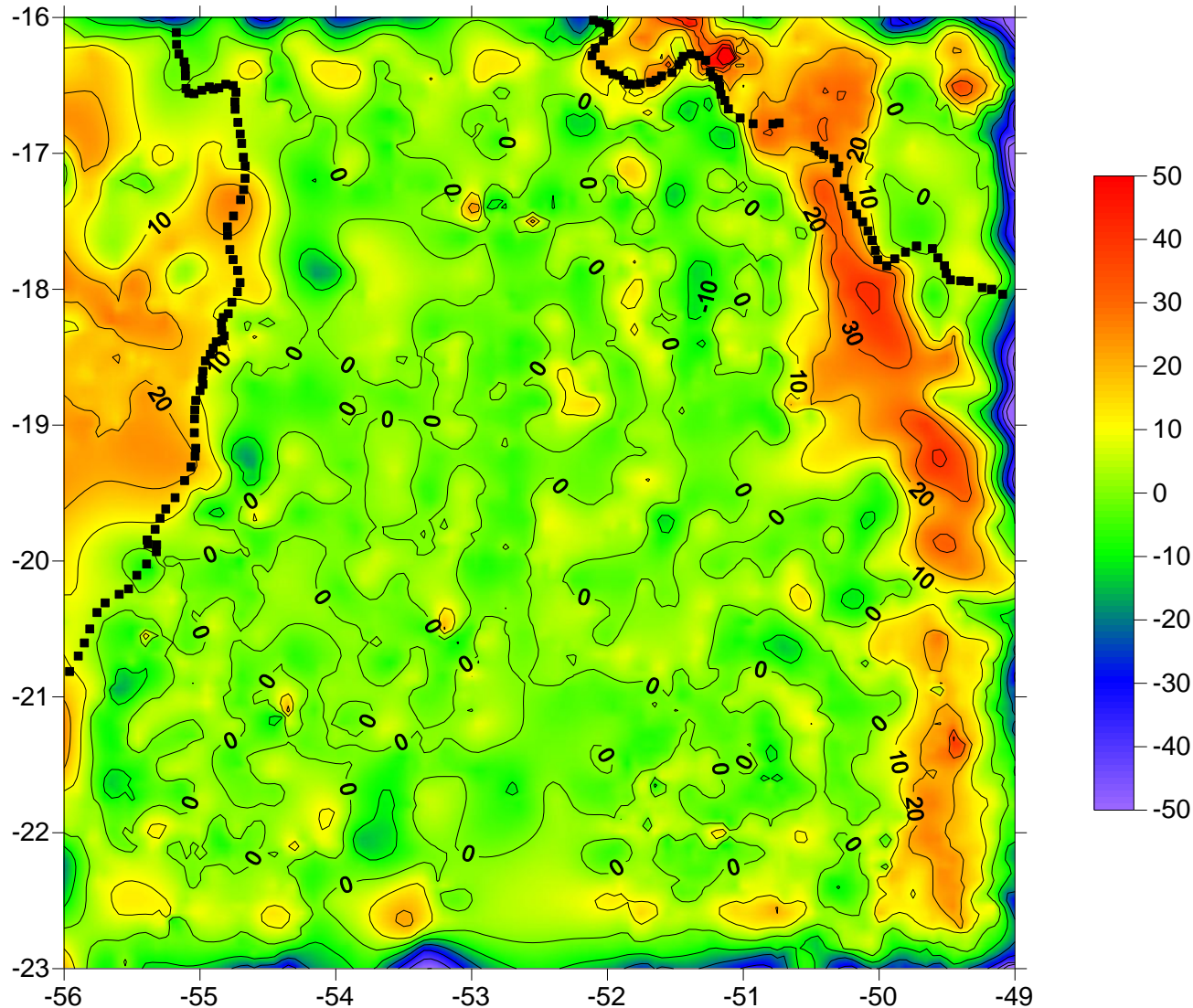


Contaminação
crustal ?

Possíveis
explicações
para a fonte
de massa
adicional

Resultados

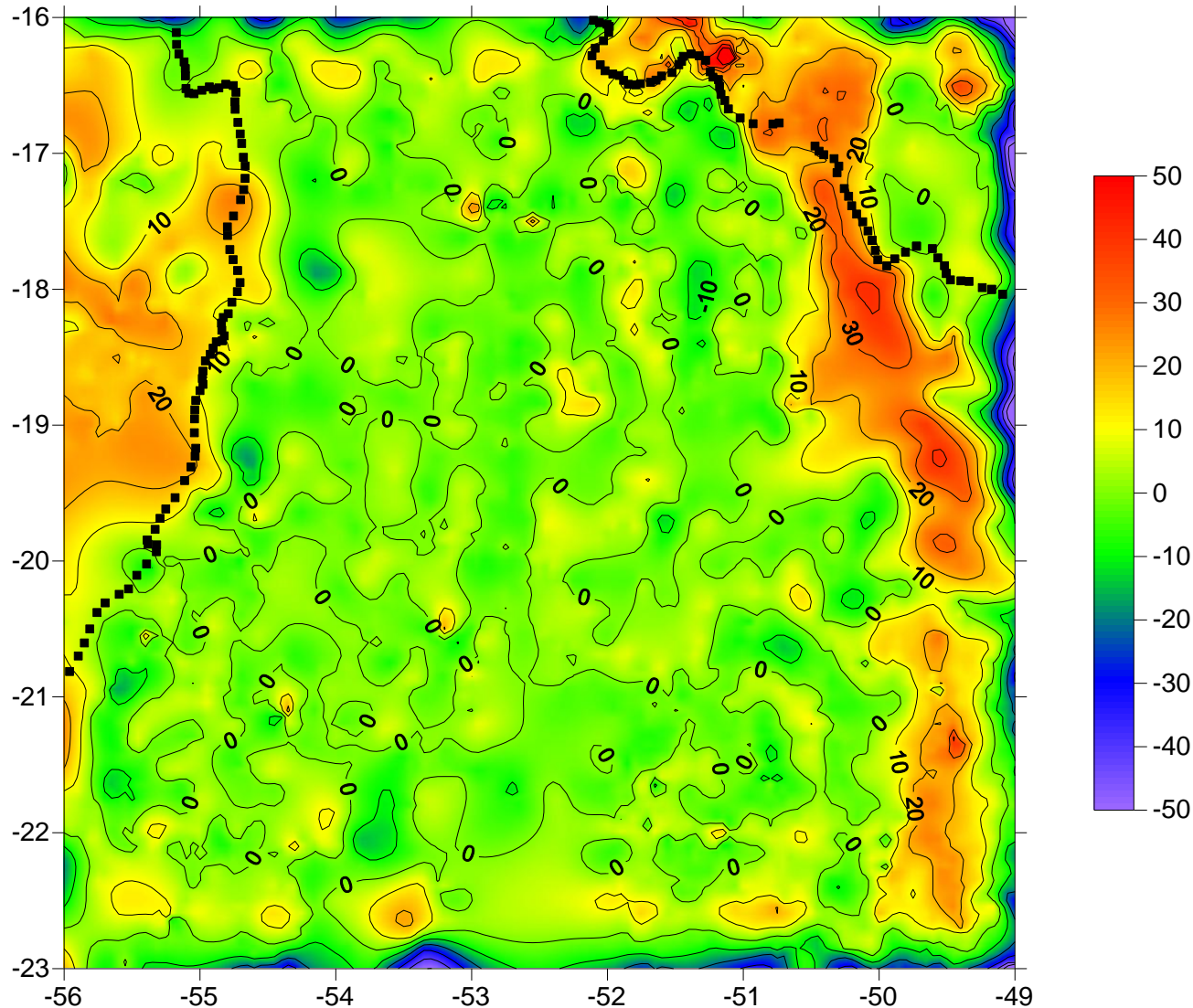
Anomalia Bouguer
observada menos a
influência de todas
as fontes de massa
consideradas e
menos a anomalia
positiva adicional



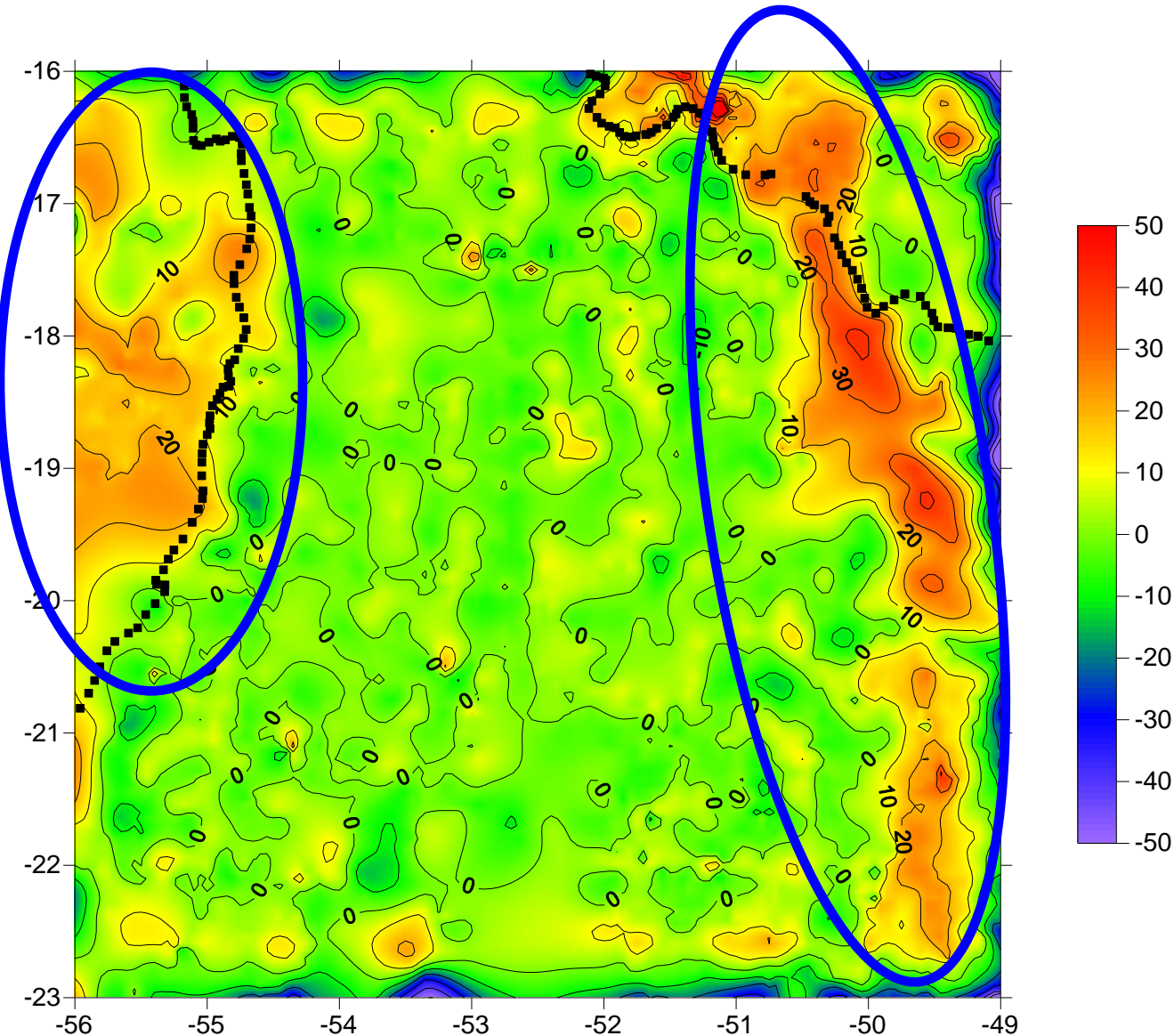
Resultados

Anomalia Bouguer observada menos a influência de todas as fontes de massa consideradas e menos a anomalia positiva adicional

Esta anomalia oscila em torno de zero e isso significa que os modelos conseguem reproduzir a anomalia Bouguer observada



Resultados

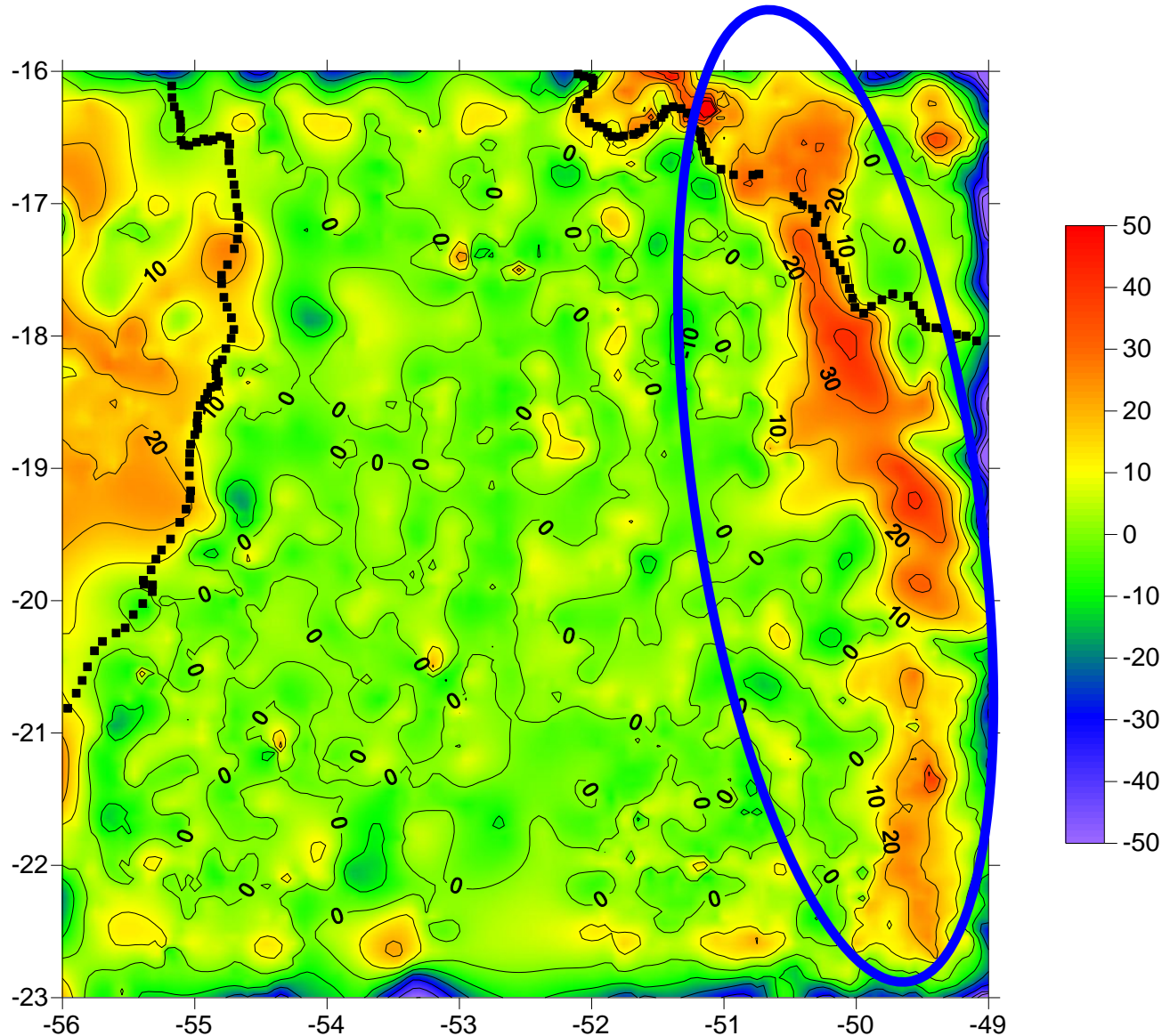


Anomalia Bouguer observada menos a influência de todas as fontes de massa consideradas e menos a anomalia positiva adicional

Esta anomalia oscila em torno de zero e isso significa que os modelos conseguem reproduzir a anomalia Bouguer observada

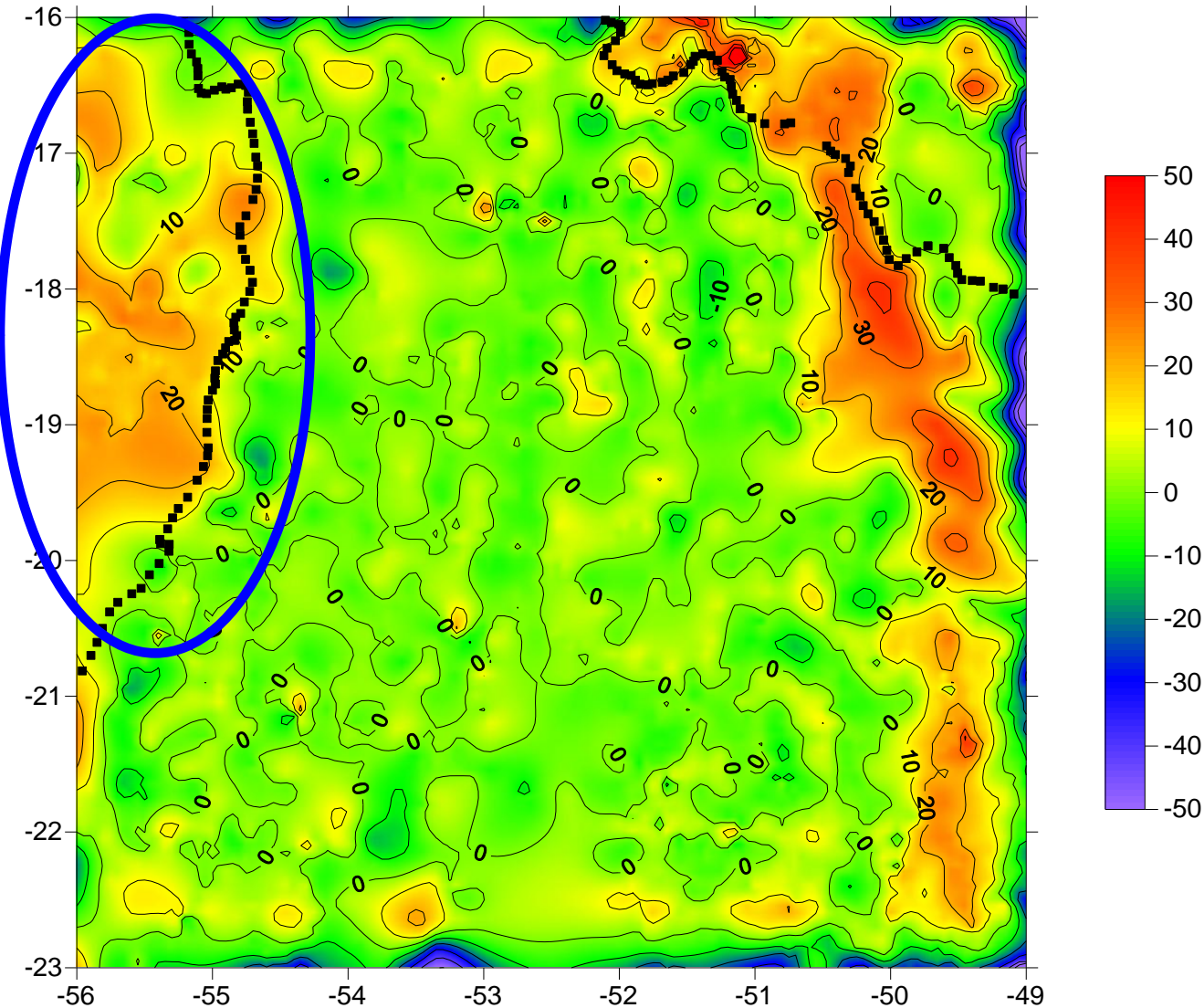
No entanto restam feições positivas nas bordas da bacia

Resultados



Análises preliminares indicam que a feição positiva à leste pode ser causada por um espessamento dos basaltos e/ou a presença de outra fonte de massa mais profunda.

Resultados



A feição positiva à oeste pode estar relacionada a presença de um manto mais denso

Conclusões

- Mesmo sem a imposição de vínculos, as estimativas concordam com as informações a priori e explicam praticamente toda a anomalia Bouguer observada.
- O modelo de Moho indica uma profundidade média em torno de 41 km e concorda com os resultados obtidos por Bianchi (2008).
- Os modelos de bacia sugerem a presença de dois grabens com profundidades de ~4 e ~2,5 km e concorda com Costa (2006).
- Para que haja concordância entre os modelos de bacia e as informações a priori, é necessário uma fonte de massa adicional na parte sul da área de estudo. Aparentemente, essa fonte pode ser explicada por um espessamento da formação Serra Geral e/ou por uma possível contaminação crustal.
- As feições positivas nas bordas da bacia devem ser melhor analisadas.
- Possíveis desdobramentos da pesquisa:
 - Utilizar outro método de inversão
 - Incorporar as informações a priori no problema inverso

Conclusões

- Mesmo sem a imposição de vínculos, as estimativas concordam com as informações a priori e explicam praticamente toda a anomalia Bouguer observada.
- O modelo de Moho indica uma profundidade média em torno de 41 km e concorda com os resultados obtidos por Bianchi (2008).
- Os modelos de bacia sugerem a presença de dois grabens com profundidades de ~4 e ~2,5 km e concorda com Costa (2006).
- Para que haja concordância entre os modelos de bacia e as informações a priori, é necessário uma fonte de massa adicional na parte sul da área de estudo. Aparentemente, essa fonte pode ser explicada por um espessamento da formação Serra Geral e/ou por uma possível contaminação crustal.
- As feições positivas nas bordas da bacia devem ser melhor analisadas.
- Possíveis desdobramentos da pesquisa:
 - Utilizar outro método de inversão
 - Incorporar as informações a priori no problema inverso

Conclusões

- Mesmo sem a imposição de vínculos, as estimativas concordam com as informações a priori e explicam praticamente toda a anomalia Bouguer observada.
- O modelo de Moho indica uma profundidade média em torno de 41 km e concorda com os resultados obtidos por Bianchi (2008).
- Os modelos de bacia sugerem a presença de dois grabens com profundidades de ~4 e ~2,5 km e concorda com Costa (2006).
- Para que haja concordância entre os modelos de bacia e as informações a priori, é necessário uma fonte de massa adicional na parte sul da área de estudo. Aparentemente, essa fonte pode ser explicada por um espessamento da formação Serra Geral e/ou por uma possível contaminação crustal.
- As feições positivas nas bordas da bacia devem ser melhor analisadas.
- Possíveis desdobramentos da pesquisa:
 - Utilizar outro método de inversão
 - Incorporar as informações a priori no problema inverso

Conclusões

- Mesmo sem a imposição de vínculos, as estimativas concordam com as informações a priori e explicam praticamente toda a anomalia Bouguer observada.
- O modelo de Moho indica uma profundidade média em torno de 41 km e concorda com os resultados obtidos por Bianchi (2008).
- Os modelos de bacia sugerem a presença de dois grabens com profundidades de ~4 e ~2,5 km e concorda com Costa (2006).
- Para que haja concordância entre os modelos de bacia e as informações a priori, é necessário uma fonte de massa adicional na parte sul da área de estudo. Aparentemente, essa fonte pode ser explicada por um espessamento da formação Serra Geral e/ou por uma possível contaminação crustal.
- As feições positivas nas bordas da bacia devem ser melhor analisadas.
- Possíveis desdobramentos da pesquisa:
 - Utilizar outro método de inversão
 - Incorporar as informações a priori no problema inverso

Conclusões

- Mesmo sem a imposição de vínculos, as estimativas concordam com as informações a priori e explicam praticamente toda a anomalia Bouguer observada.
- O modelo de Moho indica uma profundidade média em torno de 41 km e concorda com os resultados obtidos por Bianchi (2008).
- Os modelos de bacia sugerem a presença de dois grabens com profundidades de ~4 e ~2,5 km e concorda com Costa (2006).
- Para que haja concordância entre os modelos de bacia e as informações a priori, é necessário uma fonte de massa adicional na parte sul da área de estudo. Aparentemente, essa fonte pode ser explicada por um espessamento da formação Serra Geral e/ou por uma possível contaminação crustal.
- **As feições positivas nas bordas da bacia devem ser melhor analisadas.**
- Possíveis desdobramentos da pesquisa:
 - Utilizar outro método de inversão
 - Incorporar as informações a priori no problema inverso

Conclusões

- Mesmo sem a imposição de vínculos, as estimativas concordam com as informações a priori e explicam praticamente toda a anomalia Bouguer observada.
- O modelo de Moho indica uma profundidade média em torno de 41 km e concorda com os resultados obtidos por Bianchi (2008).
- Os modelos de bacia sugerem a presença de dois grabens com profundidades de ~4 e ~2,5 km e concorda com Costa (2006).
- Para que haja concordância entre os modelos de bacia e as informações a priori, é necessário uma fonte de massa adicional na parte sul da área de estudo. Aparentemente, essa fonte pode ser explicada por um espessamento da formação Serra Geral e/ou por uma possível contaminação crustal.
- As feições positivas nas bordas da bacia devem ser melhor analisadas.
- **Possíveis desdobramentos da pesquisa:**
 - Utilizar outro método de inversão
 - Incorporar as informações a priori no problema inverso

Referências

- BIANCHI, M. B. **Variações da estrutura da crosta, litosfera e manto para a Plataforma Sul Americana através de funções do receptor para ondas P e S.** 2008. 134f. Tese (Doutorado em Geofísica) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- BOTT, M. H. P. The use of rapid digital computing methods for direct gravity interpretation of sedimentary basins. **Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society.** v. 3, p. 63-67, 1959.
- COSTA, T. N. **Estudo de espessura sedimentar na Bacia do Paraná com função do receptor de alta frequência.** 2006. 92f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- CÔNEGO Jr., D.; DRIGO, C.S.; MACHADO, F.B.; ROCHA Jr., E.. R. V.; MARQUES, L.S.; NARDY, A.J.R., 2008. Densidades de rochas básicas intrusivas da região Norte da Província magmática do Paraná. 44º Congr. Bras. Geologia, Curitiba/PR, Anais, 549.
- JULIÁ, J.; ASSUMPÇÃO, M.; ROCHA, M. P. Deep crustal structure of the Paraná Basin from receiver functions and Rayleigh-wave dispersion: Evidence for a fragmented cratonic root. **Journal of Geophysical Research – Solid Earth**, v. 13, 2008.
- MILANI, E. J. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana Sul-Occidental.** 1997. 255p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 1997.
- VIDOTTI, R. M.; EBINGER, C. J.; FAIRHEAD, J. D. Gravity signature of the western Paraná basin, Brazil. **Earth and Planetary Science Letters.** v. 159, 117-132, 1998.
- ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J. C.; MARQUES, A.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; APPI, V. T. 1990. Bacia do Paraná. In: **Origem e evolução de Bacias Sedimentares.** PETROBRÁS, Rio de Janeiro, p. 135-164.

Produção científica

- II Simpósio da SBGf
(2006)
- 10th International
Congress of SBGf (2007)
- 11th International
Congress of SBGf (2009)
- Seminário no IAG-USP
(2009)

Produção científica

- II Simpósio da SBGf (2006)
- 10th International Congress of SBGf (2007)
- 11th International Congress of SBGf (2009)
- Seminário no IAG-USP (2009)



II Simpósio Brasileiro de Geofísica



Estudo de anomalias gravimétricas na borda norte da Bacia do Paraná

Renato De F. Moraes, Vanderlei Coelho de O. Junior & Yara Regina Marangoni.
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.

Copyright 2006, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica.
Este trabalho é propriedade para a apresentação no II Simpósio de Geofísica da Sociedade Brasileira de Geofísica, Natal, 27-31 de setembro de 2006. Seu conteúdo foi revisado pelo Conselho Técnico-Científico do II SBGf. O SBGf não se responsabiliza por erros e omissões de conteúdo de artigos associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização do SBGf.

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo apresentar resultados obtidos de um modelamento direto confeccionado a partir de dados gravimétricos levantados na borda norte da Bacia do Paraná e com isto contribuir para uma melhor compreensão da distribuição de massa resultante dos processos geológicos ocorridos naquela região. O conjunto modelado consistiu da bacia com espessura de sedimentos variando de 0 a 4 km, afloramento de basalto, com espessura de 180 m, vinculado a observações de campo, diques básicos e ácidos. A espessura dos sedimentos e do basalto foi vinculada a resultados da função do receptor (apresentados neste Simpósio).

Introdução

A bacia do Paraná tem sido objeto de estudo gravimétrico ao longo das últimas décadas, porém a borda noroeste só foi recoberta por estações gravimétricas a partir de 1996 pelo IBGE. Vidotti et al. (1998) apresentaram um mapa Bouguer para a bacia com os dados gravimétricos disponíveis na época e mapearam um baixo gravimétrico na porção norte de bacia. Esse baixo alonga-se na direção NS e não apresenta correlação com as estruturas geológicas observadas em superfície, todas na direção preferencial EW. Em 1997, o IBGE, completou o estudo gravimétrico do estado de Goiás, especialmente na porção SW, preenchendo um vazio no mapa apresentado por Vidotti et al. (1998) e melhorando a distribuição de pontos na área. O mapa Bouguer com os todos os dados disponíveis atualmente (Figura 1) mostra que a feição alongada detectada anteriormente continua até o limite norte da bacia e que a leste da mesma existe uma outra feição de menor extensão longitudinal. Os baixos têm amplitude de cerca de 20 mGal, circundados por fortes gradientes horizontais (~0,8 mGal/km) e separados entre si por um alto gravimétrico de mesma amplitude. O forte gradiente horizontal na anomalia Bouguer sugere uma fonte rasa para a anomalia, que não é prevista em função da geologia conhecida da bacia para a região, como salientado por Vidotti et al. (1998). Modelos iniciais

desse baixos gravimétricos sugerem a presença de um sistema de dois grabens orientados N-S (Machado et al. 2001).

As espessuras do basalto e profundidades do embasamento obtidas com o modelamento da Função do Receptor de An & Assumpção (2004 a, b) são compatíveis com o que se conhece da Bacia do Paraná baseado nos poucos poços profundos já perfurados. As profundidades do embasamento no local analisado variam de 1 a 4 km.

Este trabalho apresenta resultados obtidos através do estudo de duas anomalias gravimétricas negativas encontradas. As análises consistiram em, primeiramente, densificar o levantamento dos dados da região através de perfis com estações espaçadas de cerca 4-5 km, cortando longitudinalmente as anomalias, analisar o regional e fazer modelamento direto (2,5D). Para diminuir a ambiguidade da resposta, informações de Função do Receptor (Costa et al., 2006) integradas aos dados gravimétricos foram utilizadas.

Metodologia

Os perfis foram completados (Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul) no segundo semestre de 2005 e com isso, a geração de mapas para uma análise mais eficiente foi elaborada. O levantamento gravimétrico foi realizado com Gravímetro LaCoste & Romberg, Modelo G. As anotações de cada estação foram realizadas numa tabela padronizada e nela consta o ponto medido (coordenadas), hora prevista da medição intermediária de um conjunto de 3 (três) medidas, altimetria, sendo que estas informações são utilizadas para as correções relacionadas aos Astros (interferência da Lua e do Sol) e da posição geodética.

As coordenadas geodéticas foram obtidas por posicionamento com receptor GPS de dupla frequência, no modo relativo usando a RBMC (IBGE, 2004), com monitoramento contínuo por 15 min. O geóide gravimétrico da América do Sul (SA, 2004) foi usado no processo de transformação de altitudes geométricas para ortométricas. Em seguida foi realizada a redução dos dados coletados, que transforma as leituras do equipamento em acelerações e anomalias de gravidade. Primeiramente fazem-se as correções de variações temporais do campo de gravidade usadas pela atração luni-solar, resultando no valor de gravidade no ponto. Em seguida subtrai o valor da gravidade normal para estação, fornecida pela fórmula do Sistema Geodésico de Referência de 1967, do valor da correção An-livre para

Produção científica



Inversão de anomalia gravimétrica na borda norte da Bacia do Paraná Vanderlei Coelho de Oliveira Junior* & Yara Regina Marangoni, IAG-USP

Copyright 2007, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 10th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 19-22 November 2007.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 10th 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 (Font: Arial Bold, 8)

The Bouguer anomaly map of the north part of Paraná Basin displays two elongated NS negative anomalies. These anomalies were inverted using an algorithm to determine the basement relief. The maximum depth expected was controlled by values from receiver function in the area. Inversion confirms the initial hypothesis of grabens at the basement as responsible for the low anomalies. These grabens have varying relief but can be 2 km deeper than the surrounding basement. Inversion failed in the central part of profile and a font of positive density may be necessary to account for the observed anomaly.

Introdução

Com uma forma ligeiramente ovalada e uma área total aproximadamente entre 1.400.000 km² e 1.500.000 km², a Bacia do Paraná se estende por porções territoriais do Brasil meridional, Paraguai oriental, nordeste da Argentina e norte do Uruguai. Seu eixo maior tem uma direção aproximadamente NE-SO, por onde corre paralelamente o Rio Paraná. A Bacia do Paraná tem sido objeto de estudo gravimétrico ao longo das últimas décadas. Vidotti et al. (1998) apresentaram um mapa Bouguer com os dados gravimétricos disponíveis na época e encontraram um baixo gravimétrico na porção norte de bacia. Esse baixo alonga-se na direção NS. Os autores sugerem que essa feição pode ter origem em um rift enterrado sob os sedimentos da bacia ou na presença de rochas menos densas dentro do embasamento. Em 1997 o IBGE completou o estudo gravimétrico do estado de Goiás, especialmente na porção SW, preenchendo um vazio no mapa apresentado por Vidotti et al. (1998) e melhorando a distribuição de pontos na área. O mapa Bouguer com os novos dados (figura 1) mostrou que a feição alongada, detectada anteriormente, continua até a borda da bacia e que a leste da mesma existe uma outra feição de menor extensão longitudinal. Os baixos têm amplitude de cerca 15 mGal, separados entre si por um alto gravimétrico de mesma amplitude. O forte gradiente horizontal na anomalia Bouguer sugere uma fonte rasa para a anomalia, que não é prevista em função da geologia conhecida da bacia para a região, como salientado por Vidotti et al. (1998).

Como pode ser observado na figura 2, as litologias aflorantes não mostram correlação com a anomalia Bouguer. Os baixos gravimétricos alongam-se preferencialmente na direção NS enquanto que os afloramentos mostram uma tendência NW-SE, a mesma observada no padrão de drenagem da área. Outra característica observada é que as anomalias cortam várias formações. A anomalia maior, a oeste, corta diferentes formações: Cachoeirinha, Botucatu, Serra Geral e Corumbataí. A anomalia a leste corta as formações Pirambóia, Adamantina e Serra Geral. Como as formações são distintas, as anomalias devem estar relacionadas a estruturas mais profundas dentro da bacia ou no seu embasamento. Uma característica comum às mesmas são pequenos baixos mais centralizados nas porções mais a norte das anomalias.

O presente trabalho apresenta os resultados obtidos do modelamento inverso desses baixos gravimétricos. A inversão foi feita com o intuito de estimar a profundidade e topografia do embasamento, para tal foi utilizado o programa *suavphix* (Barbosa et al., 1999, 1997, Silva e Barbosa, 2002) que permite interpretar anomalias devidas a interfaces com relevo abrupto, particularmente relevos do embasamento de bacias sedimentares que se desenvolveram sob regime de grandes esforços distensores.

Considerações referentes ao modelo direto

Para utilizar o programa *suavphix* é necessário colocar um modelo inicial para o embasamento. Para facilitar utilizou-se o resultado do modelamento direto. O perfil utilizado para o modelamento está localizado aproximadamente na latitude 18,5° S e entre as longitudes 54,5° a 51,5° W. Nestas coordenadas podemos analisar as duas anomalias negativas onde as suas amplitudes são maiores. Próximo a este perfil estão localizadas as estações sísmológicas (figura 1) que forneceram informações sobre a profundidade do embasamento através de estimativas usando função do receptor (Costa, 2005) (Tabela 1). Os afloramentos de rochas ígneas básicas encontrados no local também foram levados em consideração modelo direto (figura 3), essas rochas, representadas por um enxame de diques máficos seriam as responsáveis pelo alto entre os dois baixos. A base geológica da suposição é a presença da formação Serra Geral na área e pela observação de rochas básicas em afloramentos na região atravessada pelo perfil, como mostrado na porção leste do modelo (figs. 1 e 3).

A anomalia observada foi interpretada partindo-se do pré-suposto que os baixos gravimétricos seriam causados por feições localizadas na interface bacia-embasamento. Tais feições seriam resultantes do sistema de dois grabens orientados sugeridos por Vidotti et al. (1998) e

- II Simpósio da SBGf (2006)
- 10th International Congress of SBGf (2007)
- 11th International Congress of SBGf (2009)
- Seminário no IAG-USP (2009)

Produção científica



- II Simpósio da SBGf (2006)
- 10th International Congress of SBGf (2007)
- 11th International Congress of SBGf (2009)
- Seminário no IAG-USP (2009)

Relevo do embasamento e da Moho na borda norte da Bacia do Paraná através de dados gravimétricos.

Vanderlei C. Oliveira Jr., IAG/USP, Brasil
Yara R. Marangoni, IAG/USP, Brasil

Copyright 2008, 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 25-28, 2008.

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

This paper presents the results from an iterative inversion that considers all Bouguer anomaly signal and different mass sources at each step. Results are compared with independent geophysical and geological information. Relief from mantle-crust and basement interfaces are provided. The study area shows Moho going deeper towards E, with depths from 38 to 42 km. Basement has two grabens of 4 and 3 km deep with a horst in between.

Introdução

Há uma década atrás, um levantamento gravimétrico na borda norte da Bacia do Paraná apontou uma feição gravimétrica com sinal negativo, alongada na direção NS, de difícil correlação com as camadas sedimentares observadas em superfície. Na modelagem direta de perfis cortando essa estrutura Vidotti et al. (1998) consideraram as hipóteses de graben no embasamento ou a presença de rochas menos densas dentro do embasamento.

Nos últimos três anos o estudo da estrutura da crosta sob estações sísmográficas dentro da bacia usando a função do receptor forneceu informações sobre a profundidade do embasamento (Costa, 2006) e da Moho (Blanchi, 2008). Essas informações independentes e novos levantamentos gravimétricos, que permitiram definir outra feição negativa a leste da estudada anteriormente, possibilitaram a inversão 3D em uma tentativa de responder onde as massas anômalas estão alojadas.

Inicialmente foram gerados modelos que descrevem fontes de massa conhecidas com base em informações a priori. A contribuição gravimétrica desses modelos foi removida da anomalia Bouguer e a anomalia resultante foi separada em uma componente regional e outra residual. A primeira foi associada ao relevo da interface crosta-manto e a outra ao da interface bacia-embasamento. O cálculo dos modelos que descrevem essas interfaces foi feito por inversão 3D. Várias informações geofísicas e geológicas, como a profundidade do embasamento e da Moho em alguns locais na área, espessura dos sedimentos e da camada de basaltos, serviram para controlar os resultados obtidos.

Os critérios de aceitação dos modelos obtidos são: (1) a soma da anomalia gravimétrica associada a cada modelo gerado por inversão ou por informações a priori deve reproduzir a anomalia Bouguer observada e (2) a geometria dos modelos deve ser validada pelas informações a priori. Quando algum desses critérios falha é necessário procurar modelos alternativos para explicar a discrepância. Dois modelos alternativos foram propostos neste trabalho: variação do contraste de densidade na Moho e espessamento dos basaltos da formação Serra Geral. O primeiro modelo está relacionado com a ideia de underplating proposta por Molina et al. (1988) para explicar um alto gravimétrico local a sul da área estudada. O outro modelo concorda com o que foi proposto recentemente por Bologna et al. (2008) como forma de explicar resultados de levantamentos magnetotélúricos na borda NE da bacia do Paraná.

Neste trabalho todos os comprimentos de onda da anomalia Bouguer são aplicados considerando-se as várias fontes. As informações geofísicas e geológicas não são usadas como vínculos na inversão, mas como controle na aceitação dos resultados. Como elas estão presentes em várias escalas do modelo, os resultados obtidos apresentam maior ambigüidade.

Informações geofísicas e geológicas da área de estudo

Dados gravimétricos: A área de estudo compreende parte da borda norte da bacia do Paraná. A região está recoberta por 4590 estações gravimétricas obtidas ao longo de várias décadas, pelo IAG-USP e pelo IBGE. Os dados gravimétricos estão ligados à Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira (RBGF; Escobar, 1980). Foi utilizada a fórmula internacional de gravidade de 1967 (GRS67; Heiskanen e Moritz, 1967) para a correção de latitude e a densidade de 2,67 g/cm³ para a correção de Bouguer. O erro máximo na anomalia Bouguer é de 0,5 mGal. A figura 1 mostra o mapa da anomalia Bouguer com a localização das estações gravimétricas. Neste mapa nota-se duas feições alongadas, na direção NS, com amplitude de 20 a 30 mGal abaixo do nível médio de -60 mGal para a bacia.

Espessura do embasamento e da Moho: As ondas sísmicas de um terremoto distante trazem informações sobre a fonte, o percurso pelo manto da Terra, e a estrutura local sob a estação registradora. As ondas P de um sismo distante incidem nas camadas abaixo da estação com um ângulo próximo da vertical. A deconvolução da componente radial pela componente vertical remove quase todos os efeitos da fonte e do percurso no manto. O traço correspondente a esta função

Produção científica

- II Simpósio da SBGf (2006)
- 10th International Congress of SBGf (2007)
- 11th International Congress of SBGf (2009)
- Seminário no IAG-USP (2009)



Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas



Determinação do relevo do embasamento e da Moho por inversão de dados gravimétricos. Aplicação na borda norte da bacia do Paraná

Vanderlei Coelho de Oliveira Júnior
Observatório Nacional

Este trabalho apresenta uma metodologia para a reconstituição de uma superfície tridimensional que separa dois meios homogêneos (com densidade constante) a partir de dados gravimétricos. Essa metodologia é uma generalização daquela desenvolvida por Bott (1959) e forneceu resultados satisfatórios na caracterização da borda norte da bacia do Paraná. Os modelos geológicos obtidos se mostraram de acordo com as informações a priori, explicam praticamente toda a anomalia Bouguer observada, sugerem a existência de dois grabens e indicam a necessidade de uma fonte de massa adicional na parte sul da área de estudo. Aparentemente, essa fonte é a soma da formação Serra Geral e de uma possível contaminação crustal e/ou diminuição da densidade do manto residual provenientes da produção do grande volume de magma na região.

28/05/2009 - Quinta - 16h30 - Auditório 1 do IAG-USP

Rua do Matão 1226 Cidade Universitária - São Paulo - Tel.: 3091.4760

Considerações pessoais

- Primeiro contato com problemas inversos (problema não-linear).
- Desenvolvido durante a graduação.
- O problema é estável porque os prismas têm grandes dimensões horizontais. Para prismas pequenos, seria necessário adicionar regularização.
- A metodologia tem limitações, mas pode ser utilizada como aproximação inicial em métodos mais complexos.
- Motivação para ingressar no mestrado.

Considerações pessoais

- Primeiro contato com problemas inversos (problema não-linear).
- **Desenvolvido durante a graduação.**
- O problema é estável porque os prismas têm grandes dimensões horizontais. Para prismas pequenos, seria necessário adicionar regularização.
- A metodologia tem limitações, mas pode ser utilizada como aproximação inicial em métodos mais complexos.
- Motivação para ingressar no mestrado.

Considerações pessoais

- Primeiro contato com problemas inversos (problema não-linear).
- Desenvolvido durante a graduação.
- O problema é estável porque os prismas têm grandes dimensões horizontais. Para prismas pequenos, seria necessário adicionar regularização.
- A metodologia tem limitações, mas pode ser utilizada como aproximação inicial em métodos mais complexos.
- Motivação para ingressar no mestrado.

Considerações pessoais

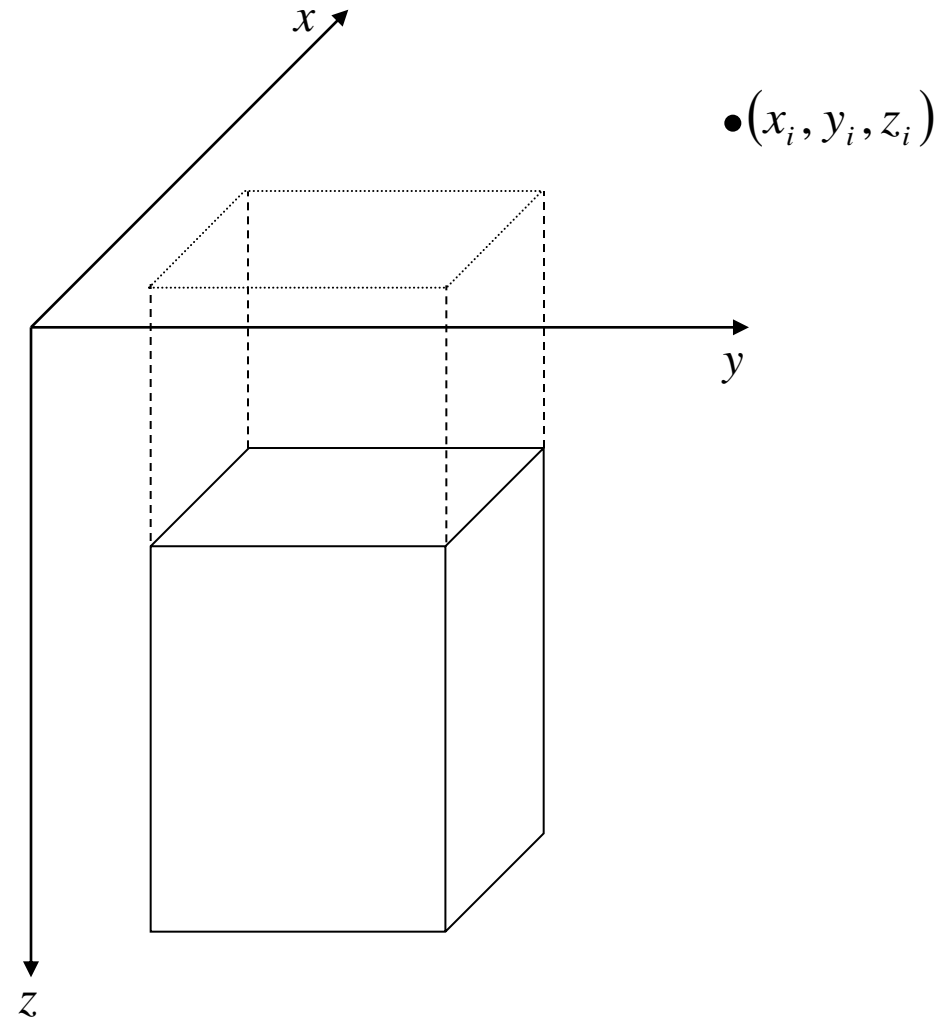
- Primeiro contato com problemas inversos (problema não-linear).
- Desenvolvido durante a graduação.
- O problema é estável porque os prismas têm grandes dimensões horizontais. Para prismas pequenos, seria necessário adicionar regularização.
- A metodologia tem limitações, mas pode ser utilizada como aproximação inicial em métodos mais complexos.
- Motivação para ingressar no mestrado.

Considerações pessoais

- Primeiro contato com problemas inversos (problema não-linear).
- Desenvolvido durante a graduação.
- O problema é estável porque os prismas têm grandes dimensões horizontais. Para prismas pequenos, seria necessário adicionar regularização.
- A metodologia tem limitações, mas pode ser utilizada como aproximação inicial em métodos mais complexos.
- Motivação para ingressar no mestrado.

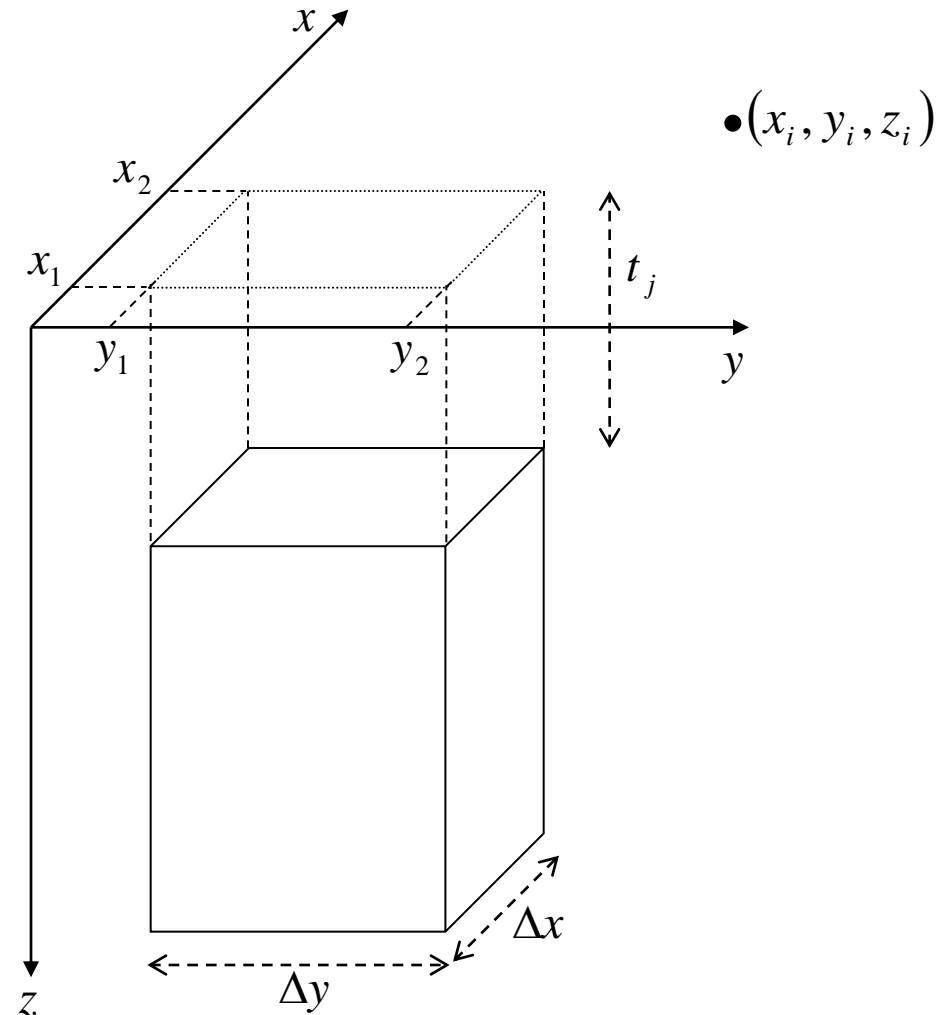
Apêndice 1

Modificação da metodologia de Bott (1956)



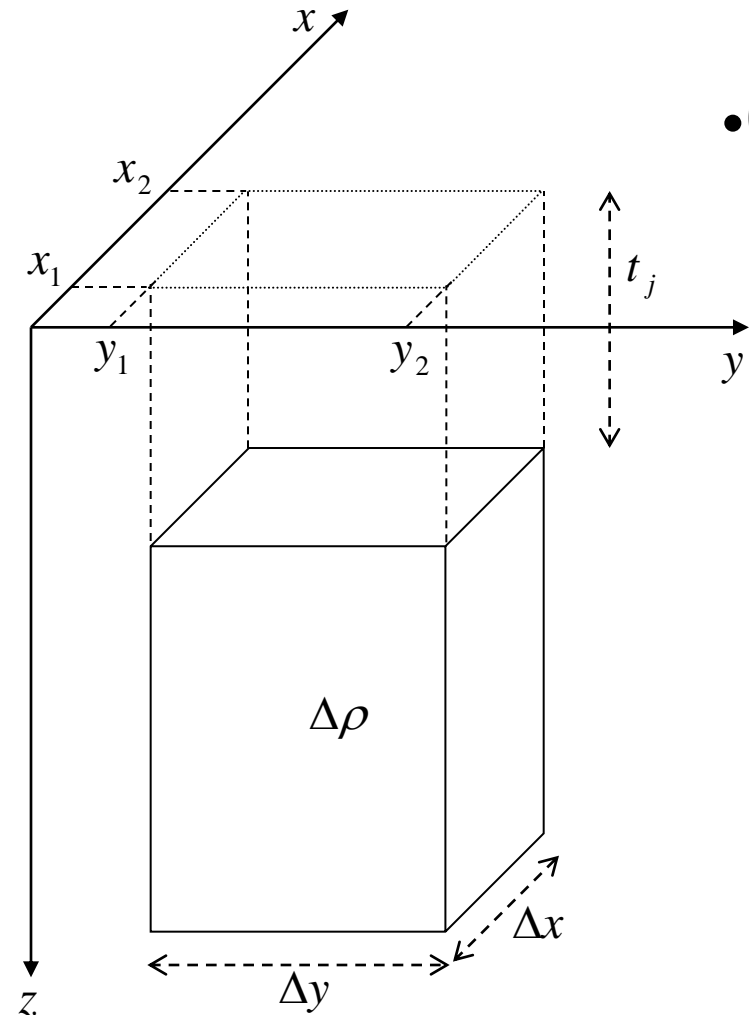
Apêndice 1

Modificação da metodologia de Bott (1956)



Apêndice 1

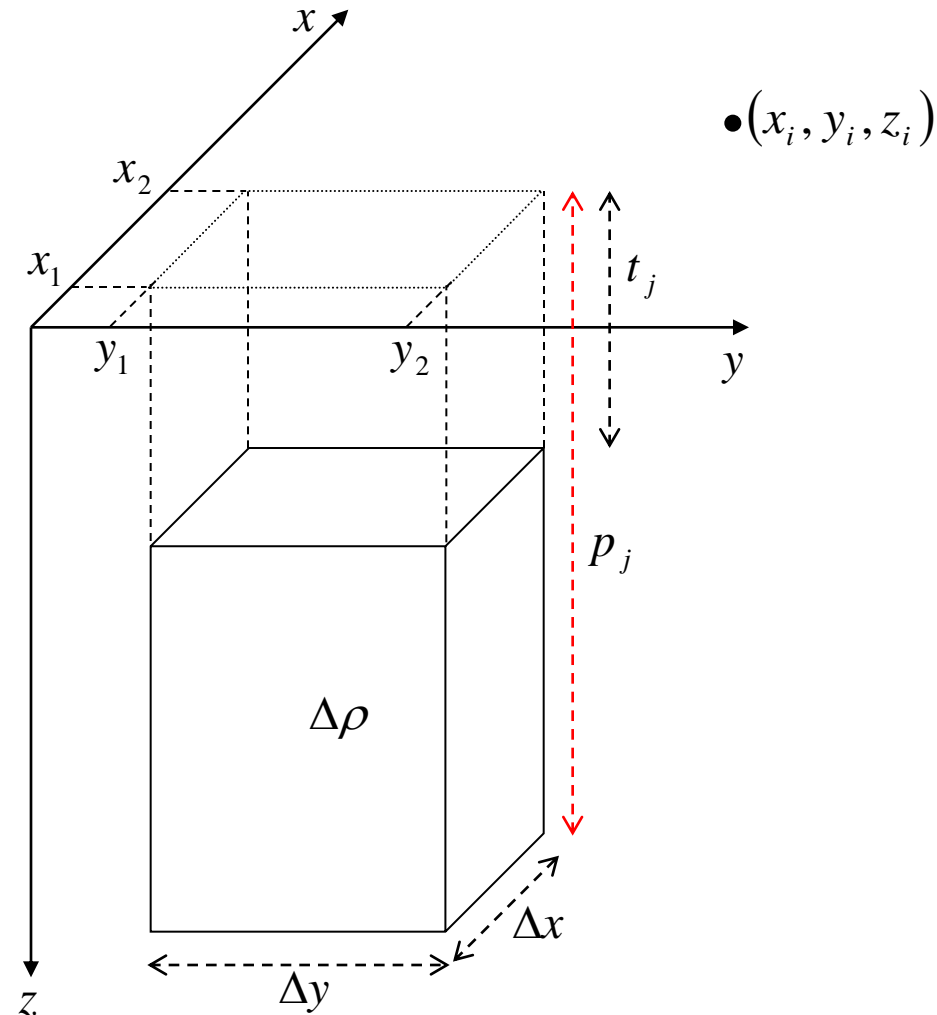
Modificação da metodologia de Bott (1956)



Variáveis
conhecidas

Apêndice 1

Modificação da metodologia de Bott (1956)

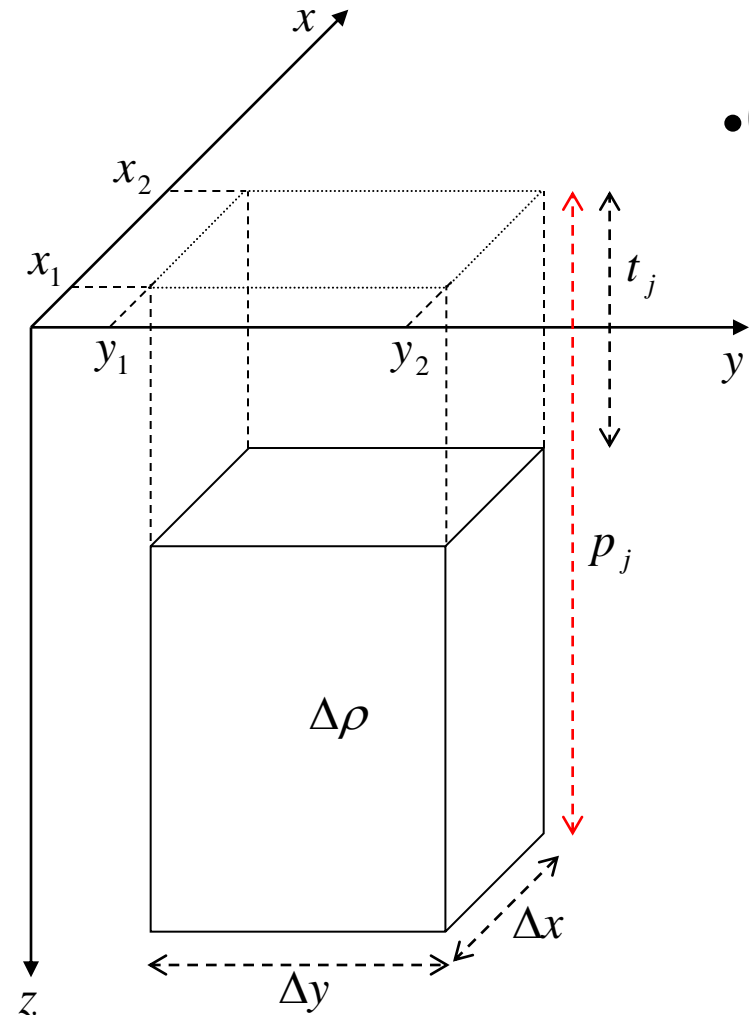


Variáveis
conhecidas

Variável
desconhecida
(parâmetro)

Apêndice 1

Modificação da metodologia de Bott (1956)

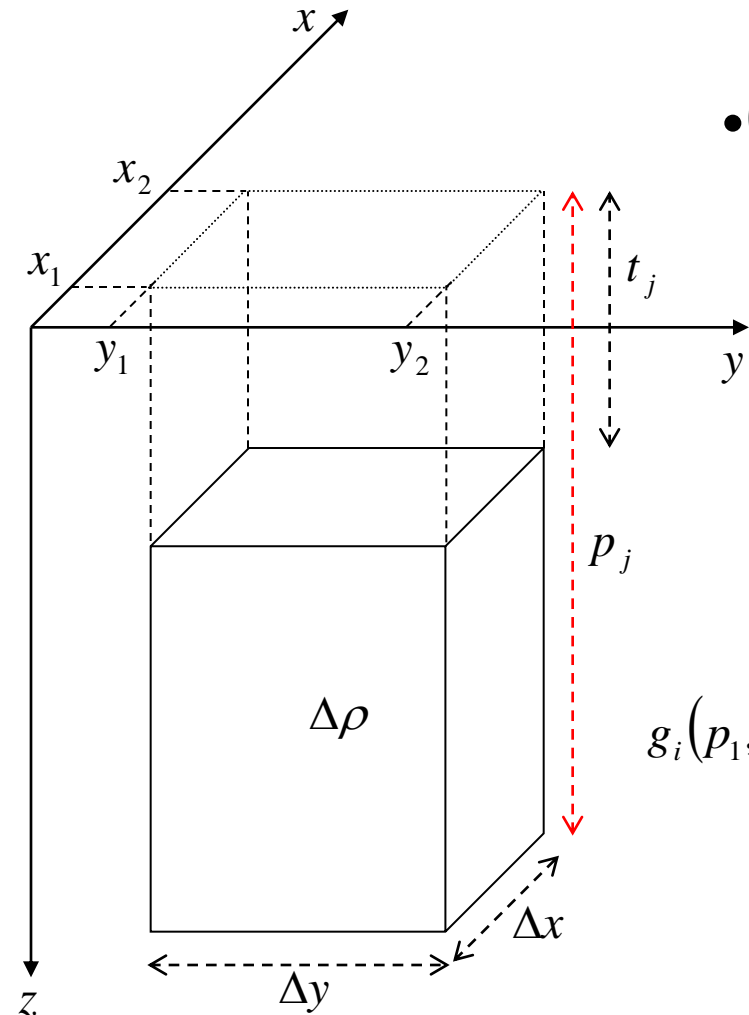


$$g_i^j(x_i, y_i, z_i, x_1, x_2, y_1, y_2, t_j, p_j, \Delta\rho)$$

Atração gravitacional na
posição i devido ao
prisma j

Apêndice 1

Modificação da metodologia de Bott (1956)



$$g_i^j(x_i, y_i, z_i, x_1, x_2, y_1, y_2, t_j, p_j, \Delta\rho)$$

Atração gravitacional na
posição i devido ao
prisma j

$$g_i(p_1, p_2, \dots, p_j) \equiv g_i(\bar{p}) = \sum_{j=1}^M g_i^j(x_i, y_i, z_i, x_1, x_2, y_1, y_2, t_j, p_j, \Delta\rho)$$

Atração gravitacional na
posição i devido a todos
os prismas

Apêndice 1

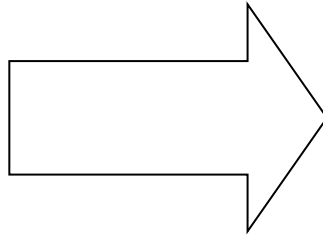
Modificação da metodologia de Bott (1956)

$$\bar{g}(\bar{p}) = \begin{bmatrix} g_1(\bar{p}) \\ g_2(\bar{p}) \\ \vdots \\ g_N(\bar{p}) \end{bmatrix}$$

Vetor de dados preditos

$$\bar{d} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_N \end{bmatrix}$$

Vetor de dados observados



$$\bar{\phi}(\bar{p}) = \bar{d} - \bar{g}(\bar{p})$$

d_i dado observado na posição i

Apêndice 1

Modificação da metodologia de Bott (1956)

$$\bar{\phi}(\bar{p}) \cong \bar{\phi}(\bar{p}_0) + \bar{J}_{\bar{\phi}}(\bar{p}_0)(\bar{p} - \bar{p}_0)$$

Expansão em série de Taylor



$$\bar{J}_{\bar{\phi}}(\bar{p}_0)(\bar{p} - \bar{p}_0) = -\bar{\phi}(\bar{p}_0)$$

$$\bar{J}_{\bar{\phi}}(\bar{p}_0) = -\bar{G}(\bar{p}_0)$$

$$-\bar{\phi}(\bar{p}_0) = -[\bar{d} - \bar{g}(\bar{p}_0)]$$

$$\bar{G}(\bar{p}_0) = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1(\bar{p}_0)}{\partial p_1} & \frac{\partial g_1(\bar{p}_0)}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial g_1(\bar{p}_0)}{\partial p_M} \\ \frac{\partial g_2(\bar{p}_0)}{\partial p_1} & \frac{\partial g_2(\bar{p}_0)}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial g_2(\bar{p}_0)}{\partial p_M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g_N(\bar{p}_0)}{\partial p_1} & \frac{\partial g_N(\bar{p}_0)}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial g_N(\bar{p}_0)}{\partial p_M} \end{bmatrix}$$

$$\bar{G}(\bar{p}_0)(\bar{p} - \bar{p}_0) = \bar{d} - \bar{g}(\bar{p}_0)$$

$$\bar{J}_{\bar{\phi}}(\bar{p}_0)(\bar{p} - \bar{p}_0) = -\bar{\phi}(\bar{p}_0)$$



Método iterativo para o cálculo de \bar{p}

Método de Newton

Apêndice 1

Modificação da metodologia de Bott (1956)

$$\bar{\phi}(\bar{p}) \cong \bar{\phi}(\bar{p}_0) + \bar{J}_{\bar{\phi}}(\bar{p}_0)(\bar{p} - \bar{p}_0) \quad \xrightarrow{\approx \bar{0}} \quad \bar{J}_{\bar{\phi}}(\bar{p}_0)(\bar{p} - \bar{p}_0) = -\bar{\phi}(\bar{p}_0)$$

Expansão em série de Taylor

$$\bar{J}_{\bar{\phi}}(\bar{p}_0) = -\bar{G}(\bar{p}_0)$$

$$-\bar{\phi}(\bar{p}_0) = -[\bar{d} - \bar{g}(\bar{p}_0)]$$

$$\bar{G}(\bar{p}_0) = \begin{bmatrix} \partial g_1(\bar{p}_0) / \partial p_1 & \partial g_1(\bar{p}_0) / \partial p_2 & \dots & \partial g_1(\bar{p}_0) / \partial p_M \\ \partial g_2(\bar{p}_0) / \partial p_1 & \partial g_2(\bar{p}_0) / \partial p_2 & \dots & \partial g_2(\bar{p}_0) / \partial p_M \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \partial g_N(\bar{p}_0) / \partial p_1 & \partial g_N(\bar{p}_0) / \partial p_2 & \dots & \partial g_N(\bar{p}_0) / \partial p_M \end{bmatrix}$$

$$\bar{J}_{\bar{\phi}}(\bar{p}_0)(\bar{p} - \bar{p}_0) = -\bar{\phi}(\bar{p}_0) \quad \xrightarrow{\quad} \quad \bar{G}(\bar{p}_0)(\bar{p} - \bar{p}_0) = \bar{d} - \bar{g}(\bar{p}_0)$$

Método iterativo para o cálculo de \bar{p}
Método de Newton

Apêndice 1

Modificação da metodologia de Bott (1956)

$$\bar{\phi}(\bar{p}) \cong \bar{\phi}(\bar{p}_0) + \bar{\bar{J}}_{\bar{\phi}}(\bar{p}_0)(\bar{p} - \bar{p}_0) \quad \xrightarrow[\approx \bar{0}]{} \quad \bar{\bar{J}}_{\bar{\phi}}(\bar{p}_0)(\bar{p} - \bar{p}_0) = -\bar{\phi}(\bar{p}_0)$$

Expansão em série de Taylor

$$\bar{\bar{J}}_{\bar{\phi}}(\bar{p}_0) = -\bar{\bar{G}}(\bar{p}_0)$$

$$-\bar{\phi}(\bar{p}_0) = -[\bar{d} - \bar{g}(\bar{p}_0)]$$

$$\bar{\bar{G}}(\bar{p}_0) = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1(\bar{p}_0)}{\partial p_1} & \frac{\partial g_1(\bar{p}_0)}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial g_1(\bar{p}_0)}{\partial p_M} \\ \frac{\partial g_2(\bar{p}_0)}{\partial p_1} & \frac{\partial g_2(\bar{p}_0)}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial g_2(\bar{p}_0)}{\partial p_M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g_N(\bar{p}_0)}{\partial p_1} & \frac{\partial g_N(\bar{p}_0)}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial g_N(\bar{p}_0)}{\partial p_M} \end{bmatrix}$$

$$\bar{\bar{G}}(\bar{p}_0)(\bar{p} - \bar{p}_0) = \bar{d} - \bar{g}(\bar{p}_0)$$

$$\bar{\bar{J}}_{\bar{\phi}}(\bar{p}_0)(\bar{p} - \bar{p}_0) = -\bar{\phi}(\bar{p}_0) \quad \xrightarrow{\hspace{1cm}} \quad \begin{array}{l} \text{Método iterativo para o cálculo de } \bar{p} \\ \text{Método de Newton} \end{array}$$

Apêndice 1

Modificação da metodologia de Bott (1956)

$$\bar{\phi}(\bar{p}) \cong \bar{\phi}(\bar{p}_0) + \bar{\bar{J}}_{\bar{\phi}}(\bar{p}_0)(\bar{p} - \bar{p}_0) \quad \xrightarrow{\approx \bar{0}} \quad \bar{\bar{J}}_{\bar{\phi}}(\bar{p}_0)(\bar{p} - \bar{p}_0) = -\bar{\phi}(\bar{p}_0)$$

Expansão em série de Taylor

$$\bar{\bar{J}}_{\bar{\phi}}(\bar{p}_0) = -\bar{\bar{G}}(\bar{p}_0)$$

$$-\bar{\phi}(\bar{p}_0) = -[\bar{d} - \bar{g}(\bar{p}_0)]$$

$$\bar{\bar{G}}(\bar{p}_0) = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1(\bar{p}_0)}{\partial p_1} & \frac{\partial g_1(\bar{p}_0)}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial g_1(\bar{p}_0)}{\partial p_M} \\ \frac{\partial g_2(\bar{p}_0)}{\partial p_1} & \frac{\partial g_2(\bar{p}_0)}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial g_2(\bar{p}_0)}{\partial p_M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g_N(\bar{p}_0)}{\partial p_1} & \frac{\partial g_N(\bar{p}_0)}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial g_N(\bar{p}_0)}{\partial p_M} \end{bmatrix}$$

$$\bar{\bar{J}}_{\bar{\phi}}(\bar{p}_0)(\bar{p} - \bar{p}_0) = -\bar{\phi}(\bar{p}_0) \quad \xrightarrow{\quad} \quad \bar{\bar{G}}(\bar{p}_0)(\bar{p} - \bar{p}_0) = \bar{d} - \bar{g}(\bar{p}_0)$$

Método iterativo para o cálculo de \bar{p}
Método de Newton

Apêndice 1

Modificação da metodologia de Bott (1956)

$$\overline{\overline{G}}(\bar{p}^k)(\bar{p}^{k+1} - \bar{p}^k) = \bar{d} - \bar{g}(\bar{p}^k)$$

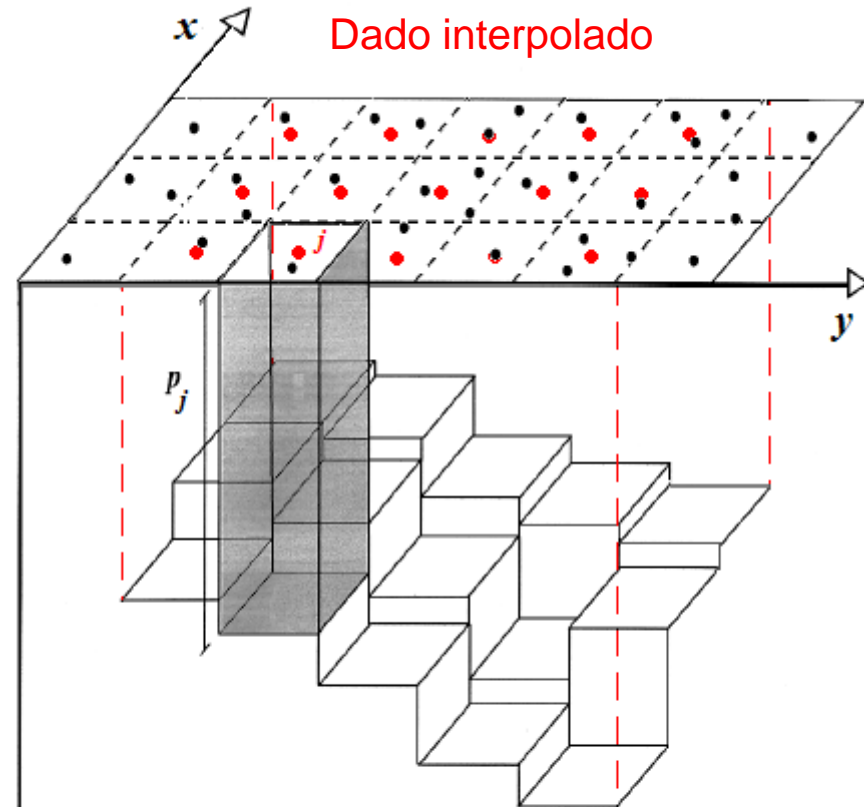
$$\Delta \bar{p}^k = \overline{\overline{G}}(\bar{p}^k)^{-1} [\bar{d} - \bar{g}(\bar{p}^k)]$$

$$\overline{\overline{G}}(\bar{p}^k) \cong \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1(\bar{p}^k)}{\partial p_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{\partial g_2(\bar{p}^k)}{\partial p_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{\partial g_N(\bar{p}^k)}{\partial p_N} \end{bmatrix}$$

$$\Delta \bar{p}^k \cong \begin{bmatrix} \frac{1}{\frac{\partial g_1(\bar{p}^k)}{\partial p_1}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\frac{\partial g_2(\bar{p}^k)}{\partial p_2}} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{\frac{\partial g_N(\bar{p}^k)}{\partial p_N}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 - g_1(\bar{p}^k) \\ d_2 - g_2(\bar{p}^k) \\ \vdots \\ d_N - g_N(\bar{p}^k) \end{bmatrix}$$

Dado observado

Dado interpolado



$$N = M$$

Apêndice 1

Modificação da metodologia de Bott (1956)

$$\overline{\overline{G}}(\bar{p}^k)(\bar{p}^{k+1} - \bar{p}^k) = \bar{d} - \bar{g}(\bar{p}^k)$$

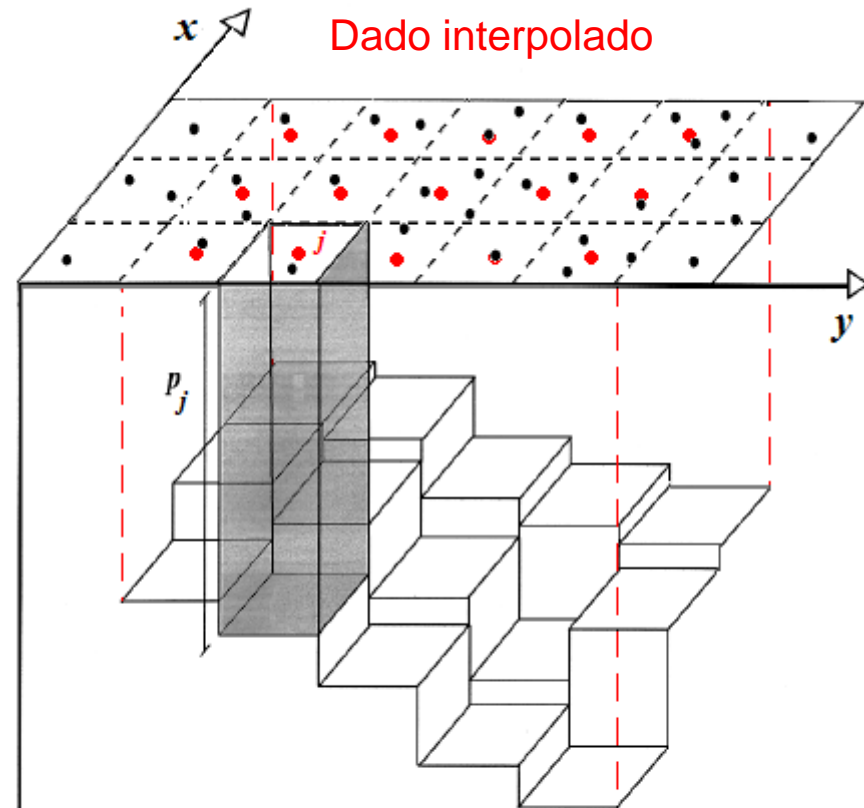
$$\Delta \bar{p}^k = \overline{\overline{G}}(\bar{p}^k)^{-1} [\bar{d} - \bar{g}(\bar{p}^k)]$$

$$\overline{\overline{G}}(\bar{p}^k) \cong \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1(\bar{p}^k)}{\partial p_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{\partial g_2(\bar{p}^k)}{\partial p_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{\partial g_N(\bar{p}^k)}{\partial p_N} \end{bmatrix}$$

$$\Delta \bar{p}^k \cong \begin{bmatrix} \frac{1}{\frac{\partial g_1(\bar{p}^k)}{\partial p_1}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\frac{\partial g_2(\bar{p}^k)}{\partial p_2}} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{\frac{\partial g_N(\bar{p}^k)}{\partial p_N}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 - g_1(\bar{p}^k) \\ d_2 - g_2(\bar{p}^k) \\ \vdots \\ d_N - g_N(\bar{p}^k) \end{bmatrix}$$

Dado observado

Dado interpolado



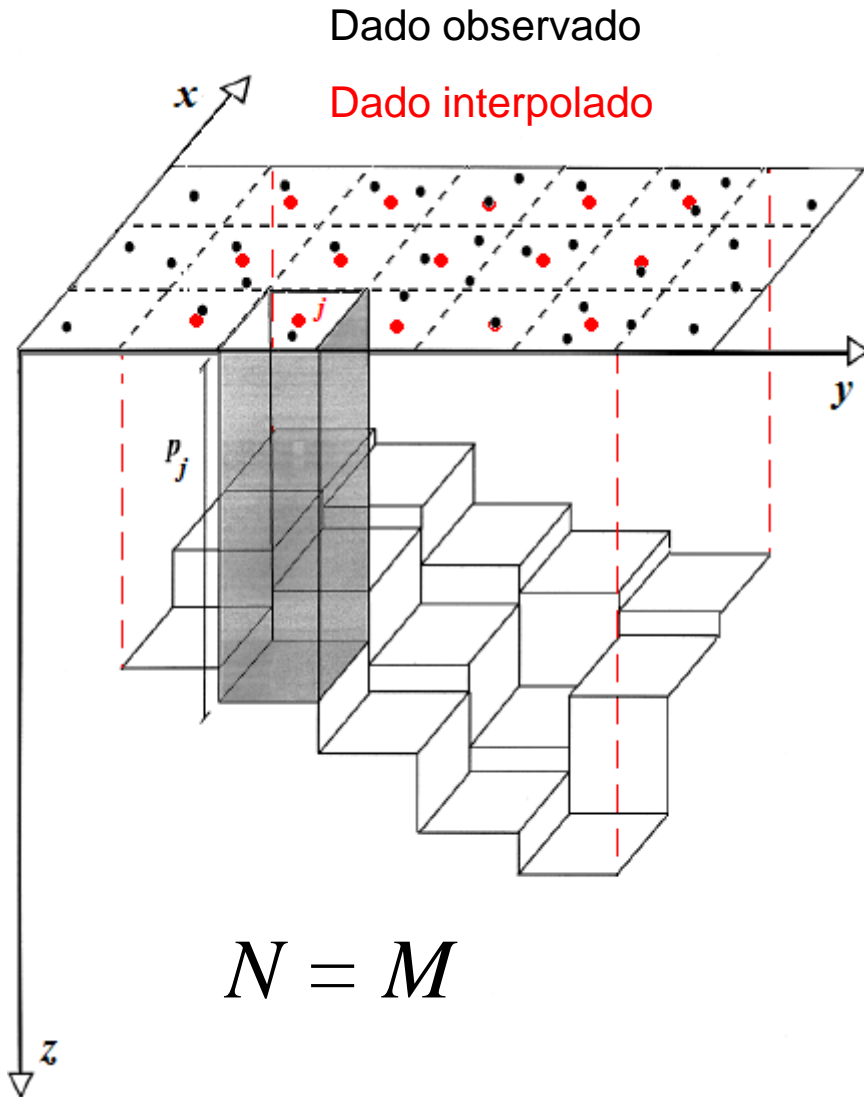
$$N = M$$

Apêndice 1

Modificação da metodologia de Bott (1956)

$$\overline{\overline{G}}(\bar{p}^k)(\bar{p}^{k+1} - \bar{p}^k) = \bar{d} - \bar{g}(\bar{p}^k)$$

$$\Delta \bar{p}^k = \overline{\overline{G}}(\bar{p}^k)^{-1} [\bar{d} - \bar{g}(\bar{p}^k)]$$



$$\overline{\overline{G}}(\bar{p}^k) \cong \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1(\bar{p}^k)}{\partial p_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{\partial g_2(\bar{p}^k)}{\partial p_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{\partial g_N(\bar{p}^k)}{\partial p_N} \end{bmatrix}$$

$$\Delta \bar{p}^k \cong \begin{bmatrix} \frac{1}{\frac{\partial g_1(\bar{p}^k)}{\partial p_1}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\frac{\partial g_2(\bar{p}^k)}{\partial p_2}} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{\frac{\partial g_N(\bar{p}^k)}{\partial p_N}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 - g_1(\bar{p}^k) \\ d_2 - g_2(\bar{p}^k) \\ \vdots \\ d_N - g_N(\bar{p}^k) \end{bmatrix}$$

Apêndice 1

Modificação da metodologia de Bott (1956)

$$\overline{\overline{G}}(\bar{p}^k)(\bar{p}^{k+1} - \bar{p}^k) = \bar{d} - \bar{g}(\bar{p}^k)$$

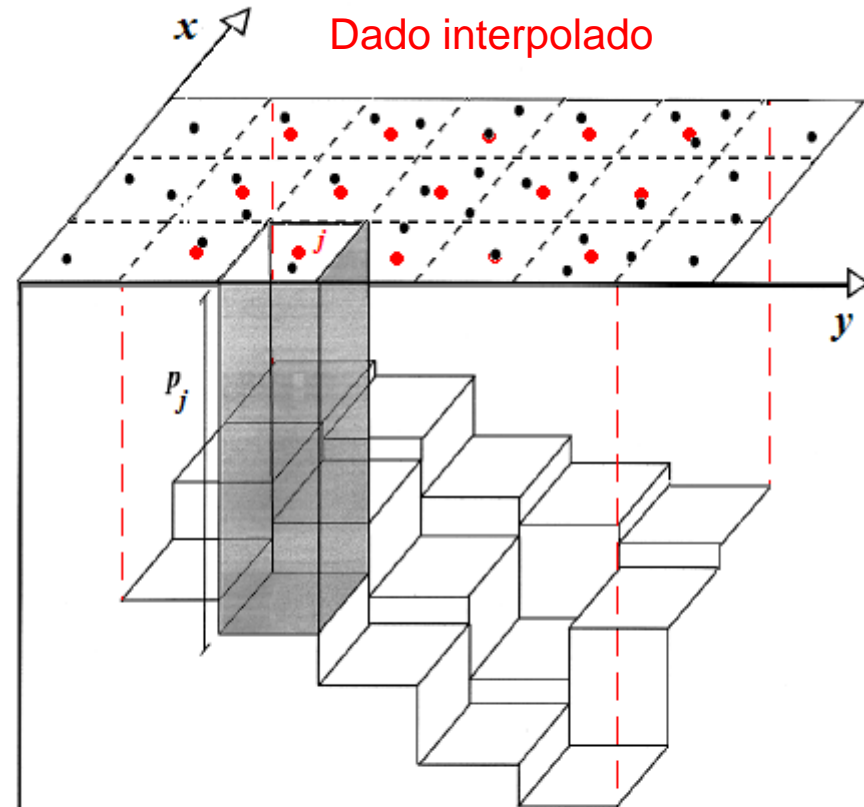
$$\Delta \bar{p}^k = \overline{\overline{G}}(\bar{p}^k)^{-1} [\bar{d} - \bar{g}(\bar{p}^k)]$$

$$\overline{\overline{G}}(\bar{p}^k) \cong \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1(\bar{p}^k)}{\partial p_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{\partial g_2(\bar{p}^k)}{\partial p_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{\partial g_N(\bar{p}^k)}{\partial p_N} \end{bmatrix}$$

$$\Delta \bar{p}^k \cong \begin{bmatrix} \frac{1}{\frac{\partial g_1(\bar{p}^k)}{\partial p_1}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\frac{\partial g_2(\bar{p}^k)}{\partial p_2}} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{\frac{\partial g_N(\bar{p}^k)}{\partial p_N}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 - g_1(\bar{p}^k) \\ d_2 - g_2(\bar{p}^k) \\ \vdots \\ d_N - g_N(\bar{p}^k) \end{bmatrix}$$

Dado observado

Dado interpolado



$$N = M$$

Apêndice 1

Modificação da metodologia de Bott (1956)

$$\overline{\overline{G}}(\bar{p}^k)(\bar{p}^{k+1} - \bar{p}^k) = \bar{d} - \bar{g}(\bar{p}^k)$$

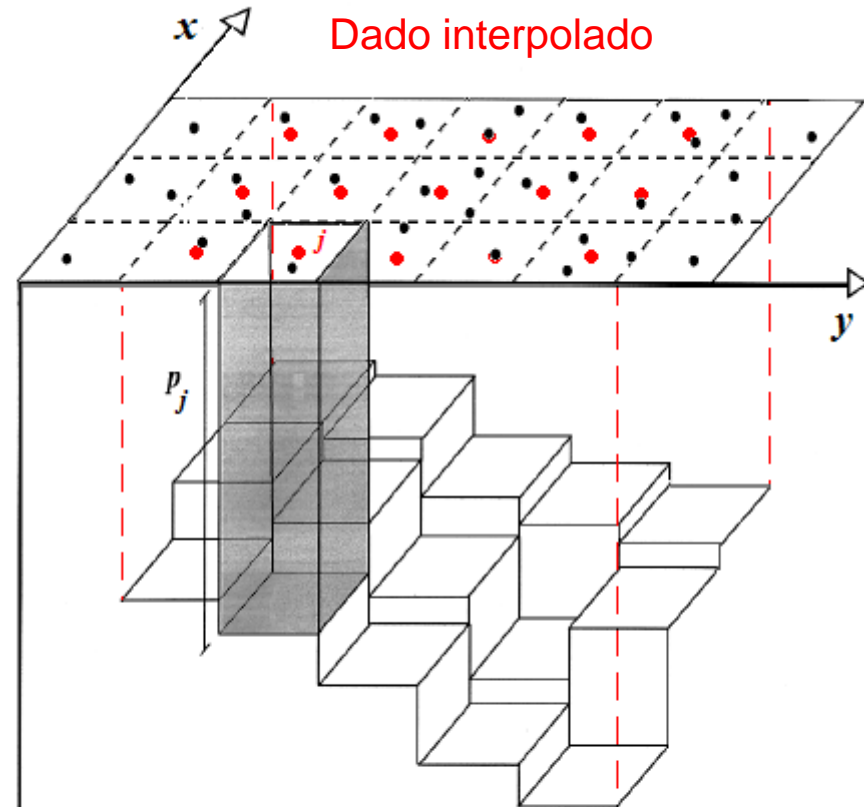
$$\Delta \bar{p}^k = \overline{\overline{G}}(\bar{p}^k)^{-1} [\bar{d} - \bar{g}(\bar{p}^k)]$$

$$\overline{\overline{G}}(\bar{p}^k) \cong \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1(\bar{p}^k)}{\partial p_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{\partial g_2(\bar{p}^k)}{\partial p_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{\partial g_N(\bar{p}^k)}{\partial p_N} \end{bmatrix}$$

$$\Delta \bar{p}^k \cong \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ \frac{\partial g_1(\bar{p}^k)}{\partial p_1} & 1 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{\partial g_2(\bar{p}^k)}{\partial p_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ & & & \frac{\partial g_N(\bar{p}^k)}{\partial p_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 - g_1(\bar{p}^k) \\ d_2 - g_2(\bar{p}^k) \\ \vdots \\ d_N - g_N(\bar{p}^k) \end{bmatrix}$$

Dado observado

Dado interpolado



$$N = M$$

Apêndice 1

Modificação da metodologia de Bott (1956)

$$p_i^{k+1} = p_i^k + \frac{d_i - g_i(\bar{p}^k)}{\partial g_i(\bar{p}^k) / \partial p_i}$$

$$p_i^{k+1} = p_i^k + \beta[d_i - g_i(p^k)]$$

Neste trabalho

$$\beta = \frac{1}{\partial g_i(\bar{p}^k) / \partial p_i^k} \lambda \quad p_i^0 = \frac{\Delta \rho}{|\Delta \rho|} \lambda d_i$$

Bott (1959) e Rao, Prakash e Babu (1993)

$$\beta = \frac{1}{2\pi\gamma\Delta\rho} \quad p_i^0 = \beta d_i$$

γ Constante gravitacional

Apêndice 1

Modificação da metodologia de Bott (1956)

$$p_i^{k+1} = p_i^k + \frac{d_i - g_i(\bar{p}^k)}{\partial g_i(\bar{p}^k) / \partial p_i}$$

$$p_i^{k+1} = p_i^k + \beta[d_i - g_i(p^k)]$$

Neste trabalho

$$\beta = \frac{1}{\partial g_i(\bar{p}^k) / \partial p_i^k} \lambda \quad p_i^0 = \frac{\Delta \rho}{|\Delta \rho|} \lambda d_i$$

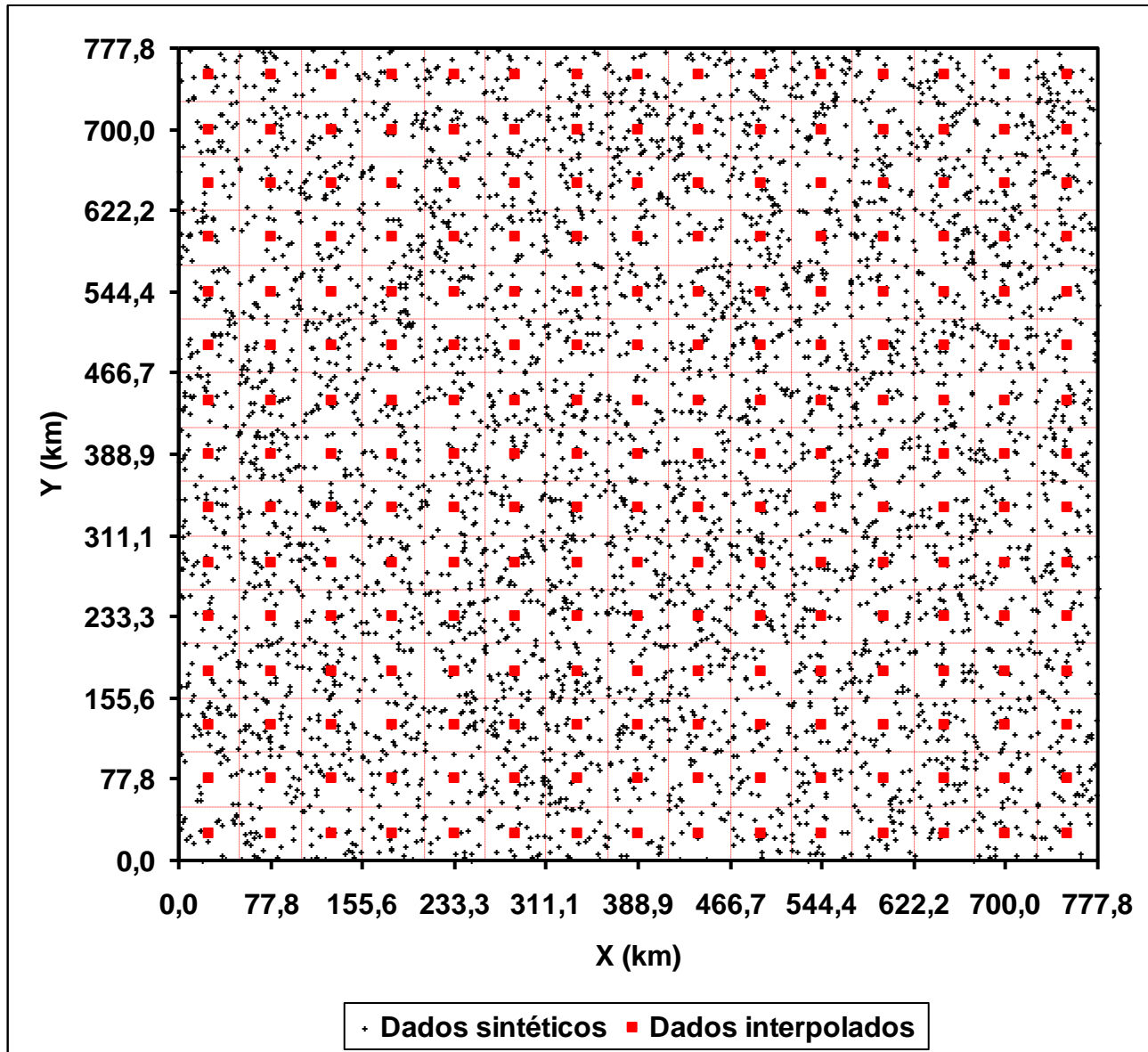
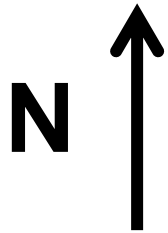
Bott (1959) e Rao, Prakash e Babu (1993)

$$\beta = \frac{1}{2\pi\gamma\Delta\rho} \quad p_i^0 = \beta d_i$$

γ Constante gravitacional

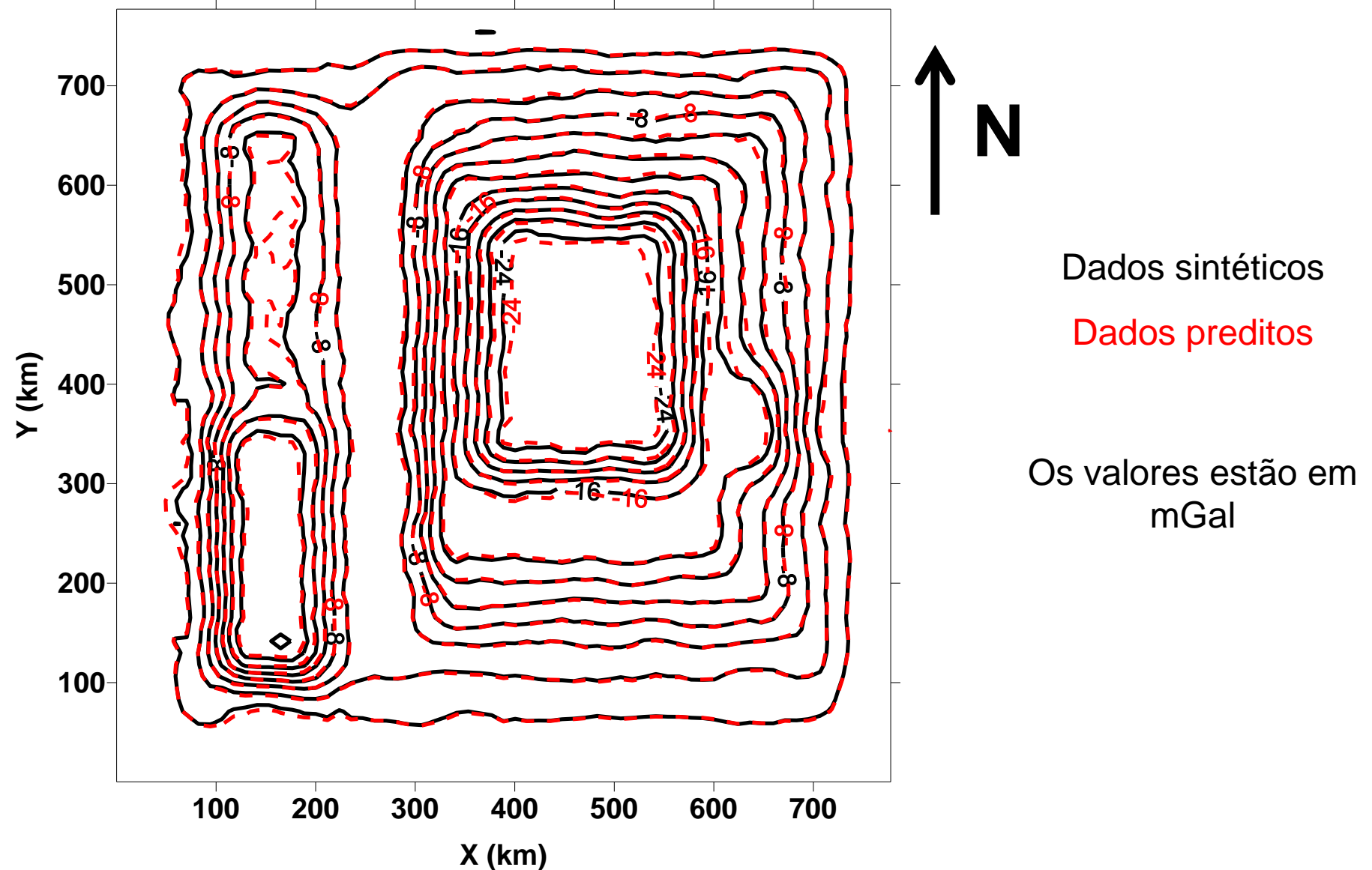
Apêndice 1

Teste com dados sintéticos



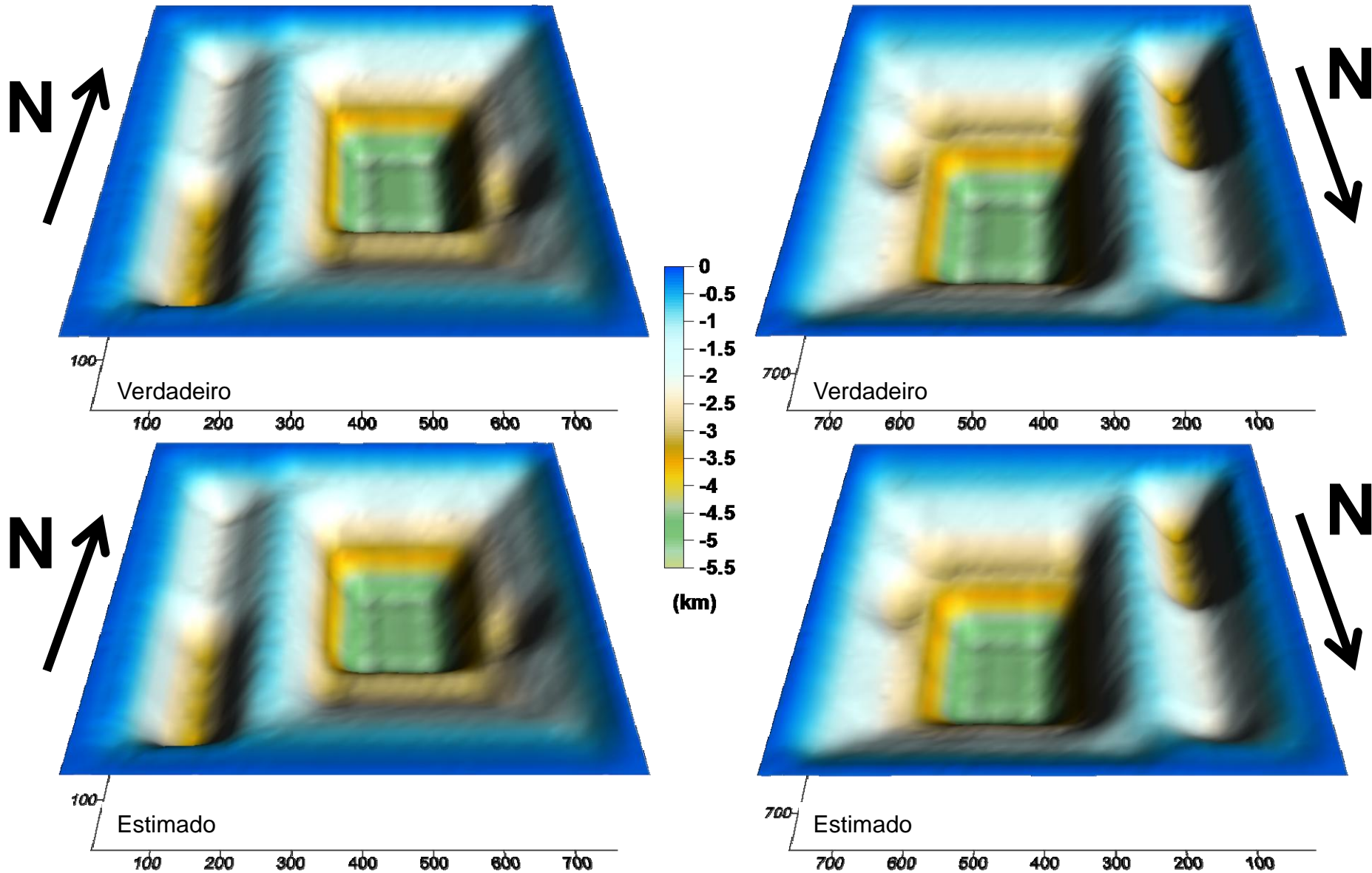
Apêndice 1

Teste com dados sintéticos



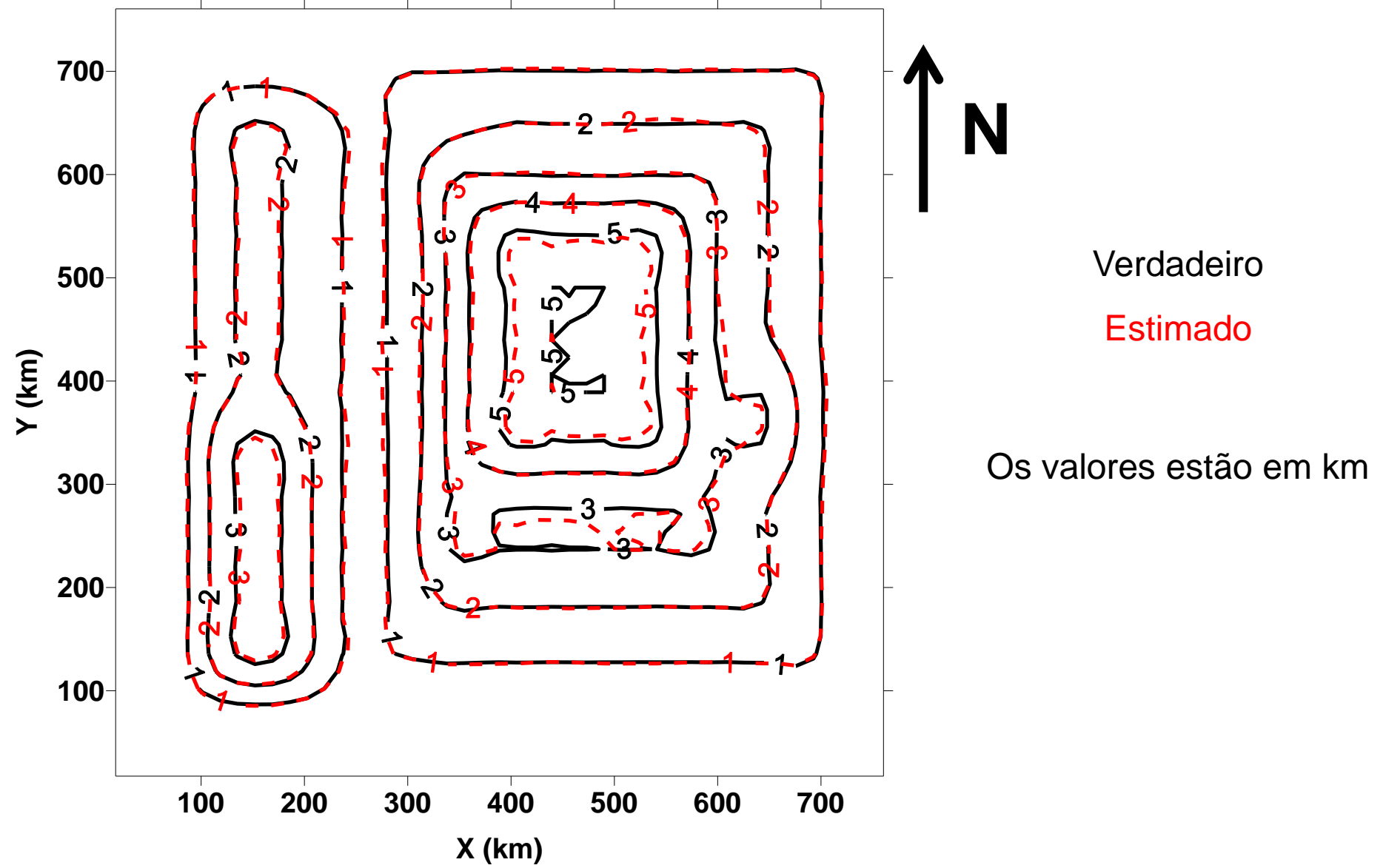
Apêndice 1

Teste com dados sintéticos



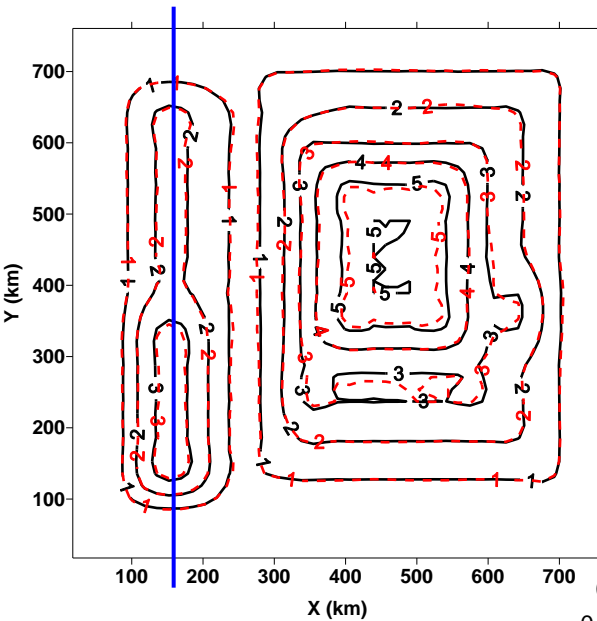
Apêndice 1

Teste com dados sintéticos



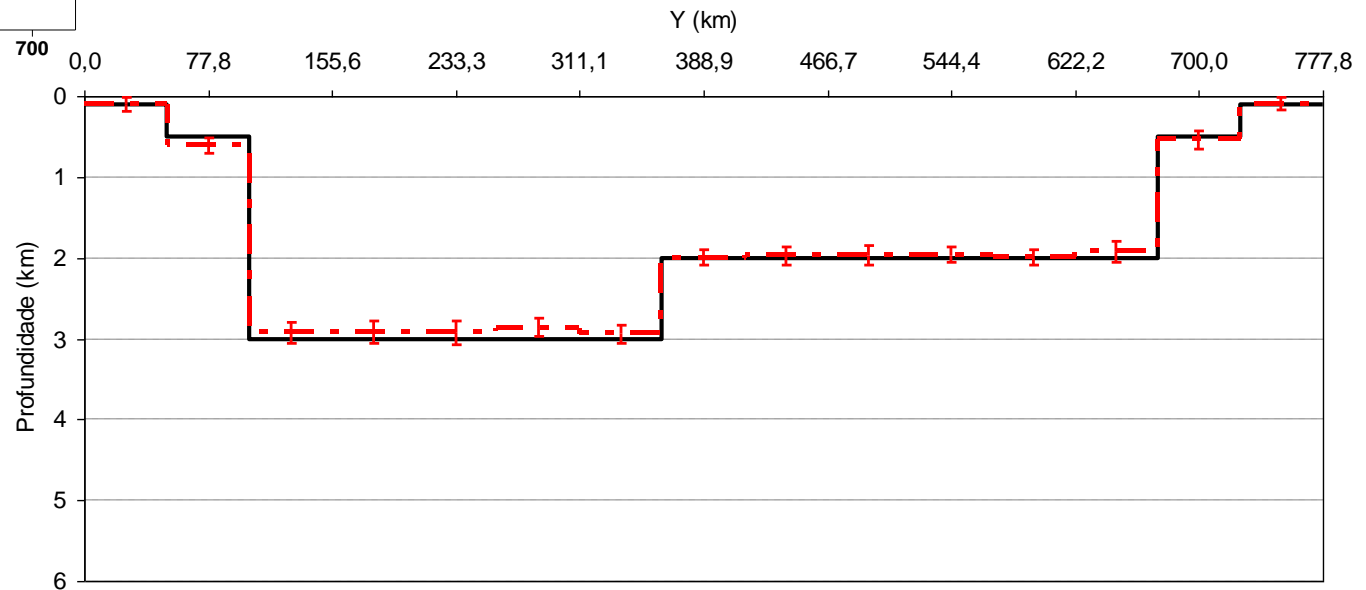
Apêndice 1

Teste com dados sintéticos



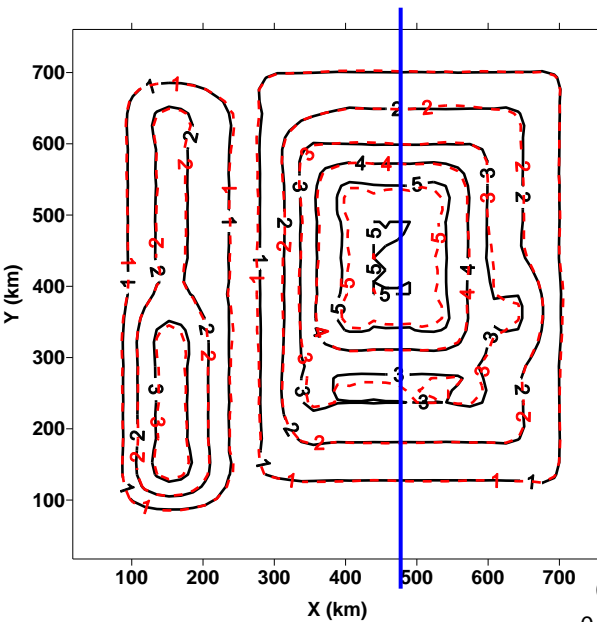
O erro foi estimado
contaminando-se os dados
com uma amostra aleatória de
média ~ 0 e desvio padrão $\sim 0,5$

Perfil X 129,6 km



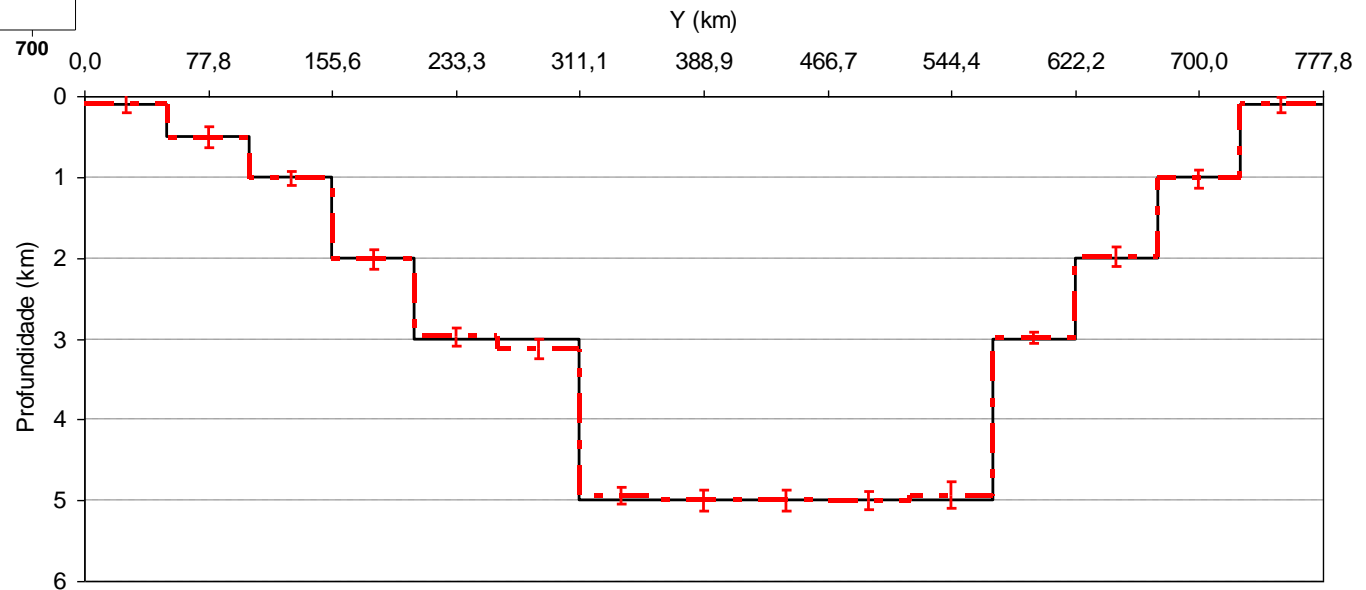
Apêndice 1

Teste com dados sintéticos



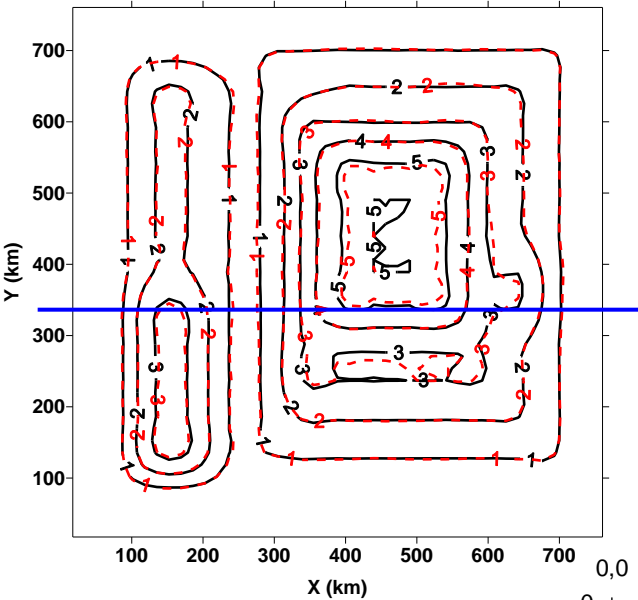
O erro foi estimado
contaminando-se os dados
com uma amostra aleatória de
média ~ 0 e desvio padrão $\sim 0,5$

Perfil X 492,6 km



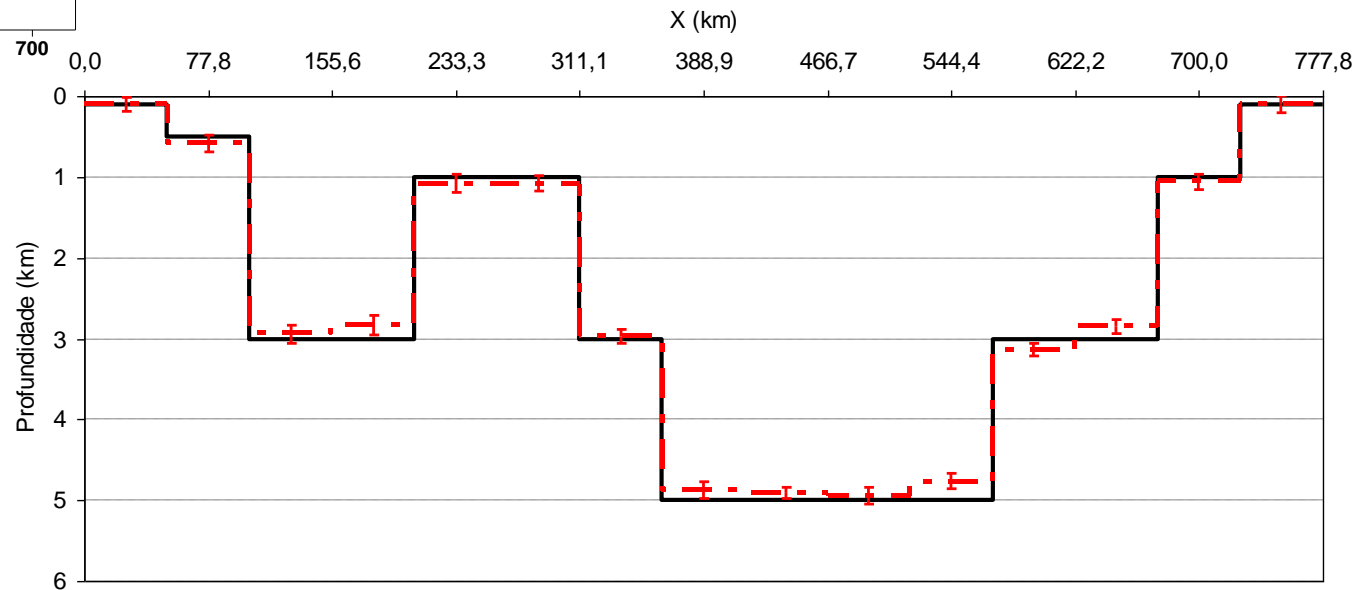
Apêndice 1

Teste com dados sintéticos



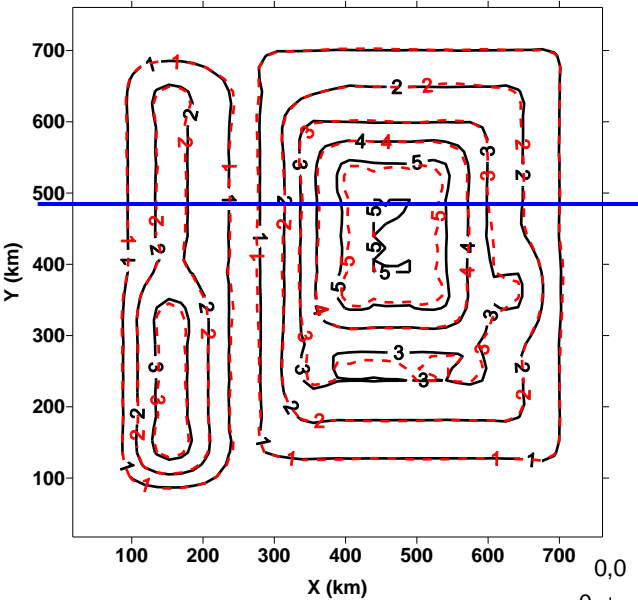
O erro foi estimado
contaminando-se os dados
com uma amostra aleatória de
média ~ 0 e desvio padrão $\sim 0,5$

Perfil Y 337,0 km



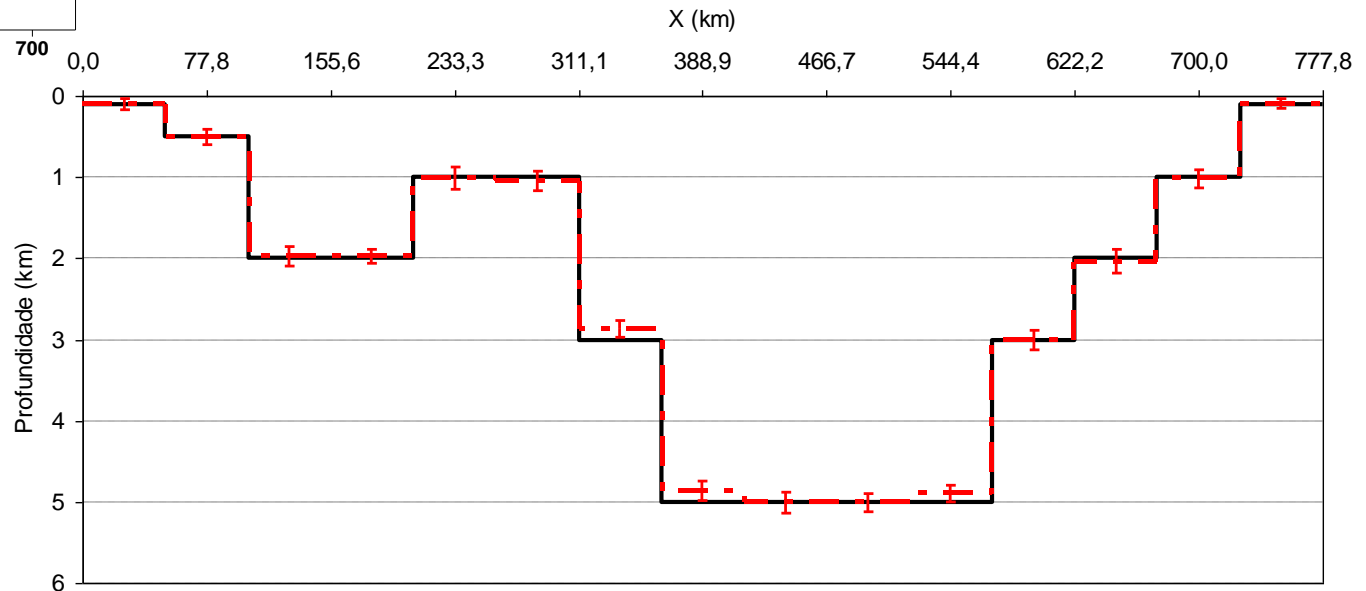
Apêndice 1

Teste com dados sintéticos



O erro foi estimado
contaminando-se os dados
com uma amostra aleatória de
média ~ 0 e desvio padrão $\sim 0,5$

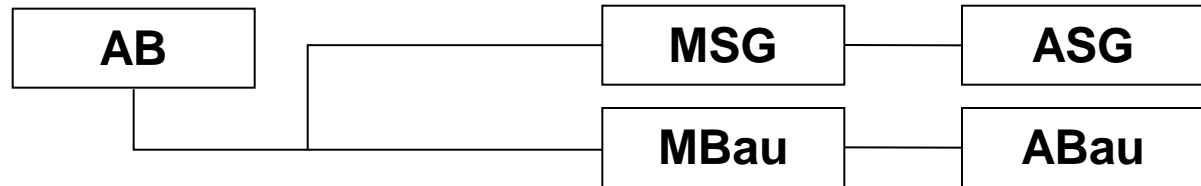
Perfil Y 492,6 km



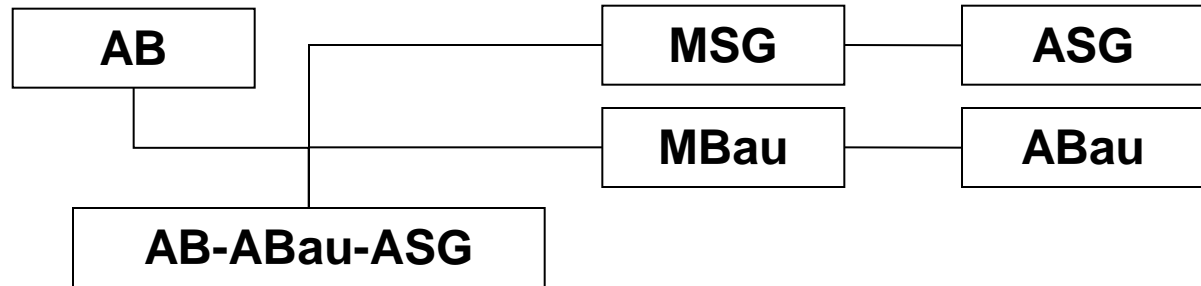
Apêndice 2

AB

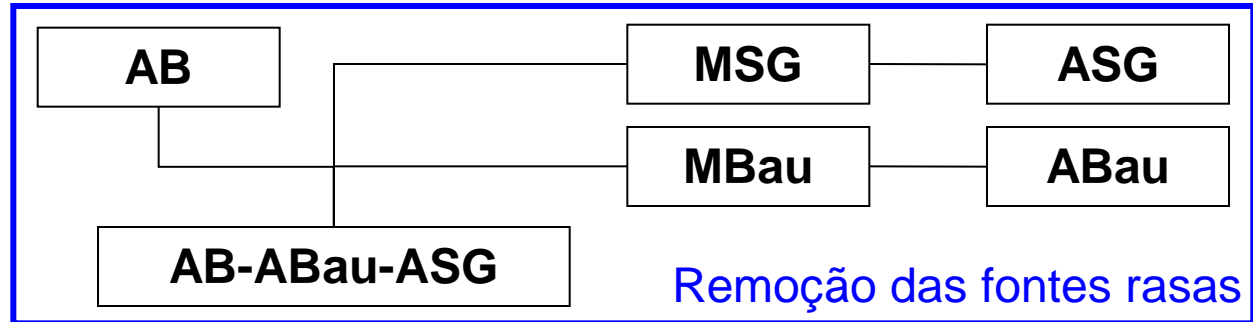
Apêndice 2



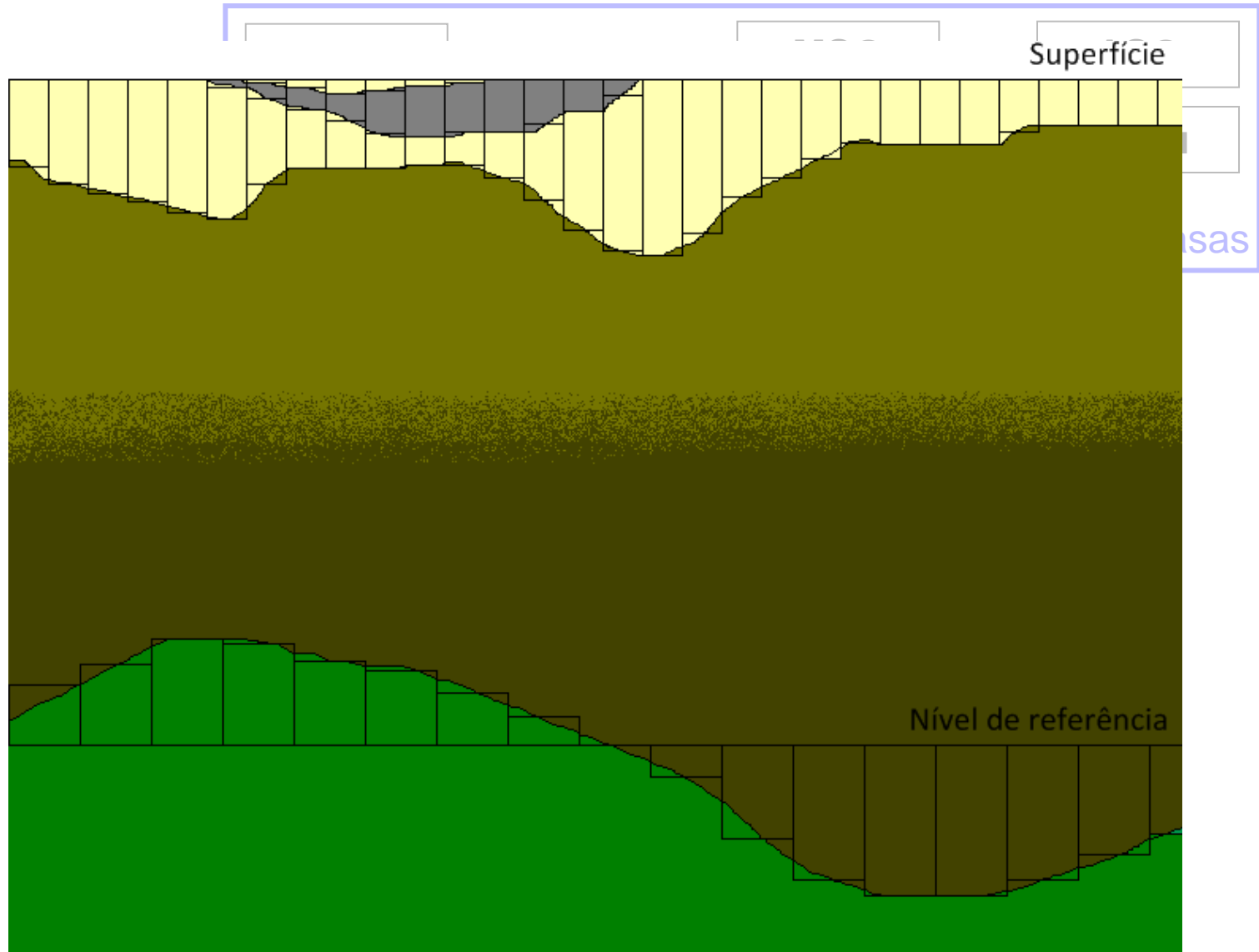
Apêndice 2



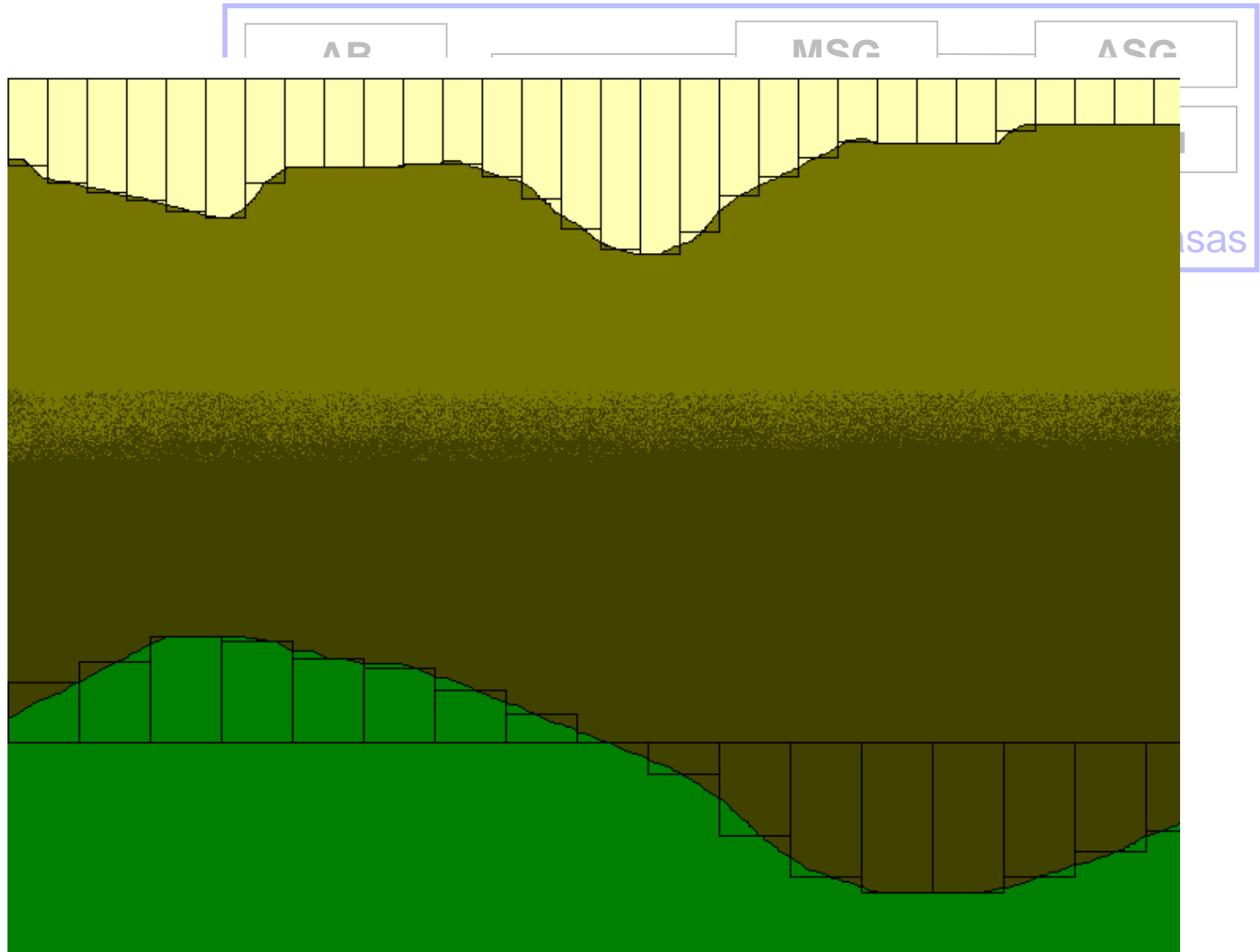
Apêndice 2



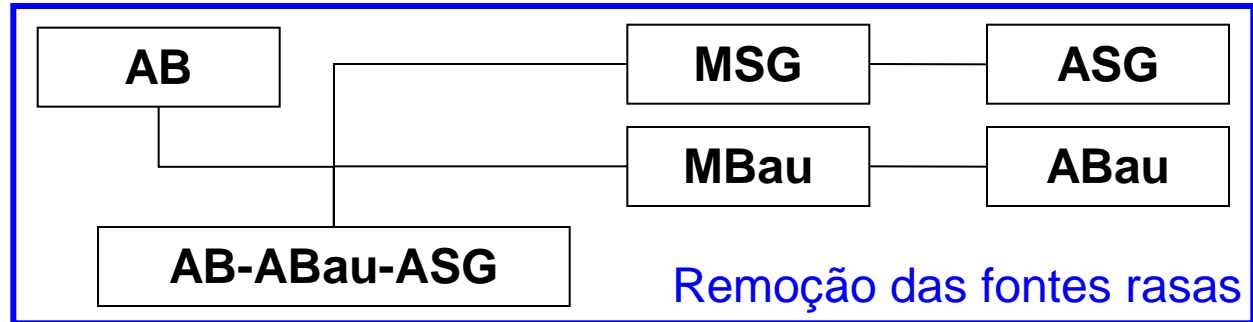
Apêndice 2



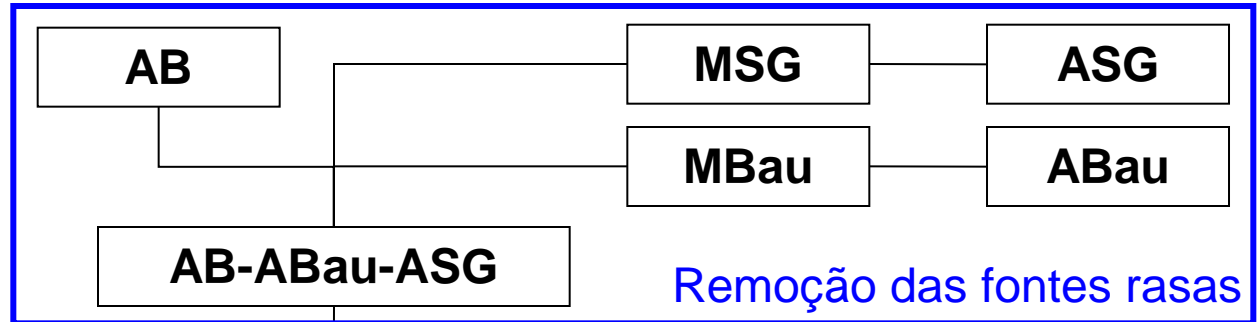
Apêndice 2



Apêndice 2

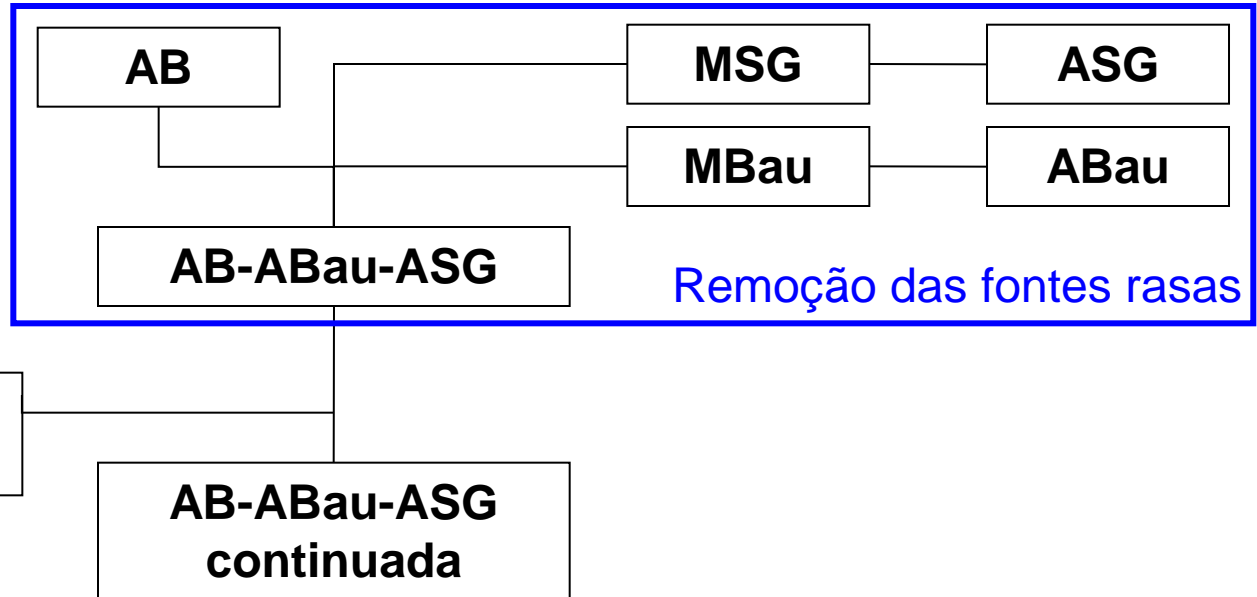


Apêndice 2

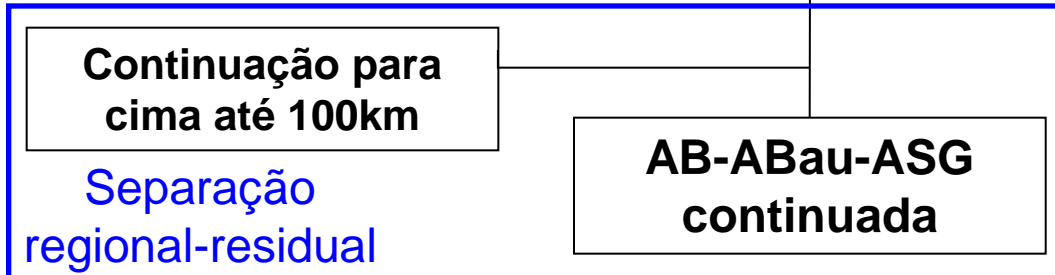
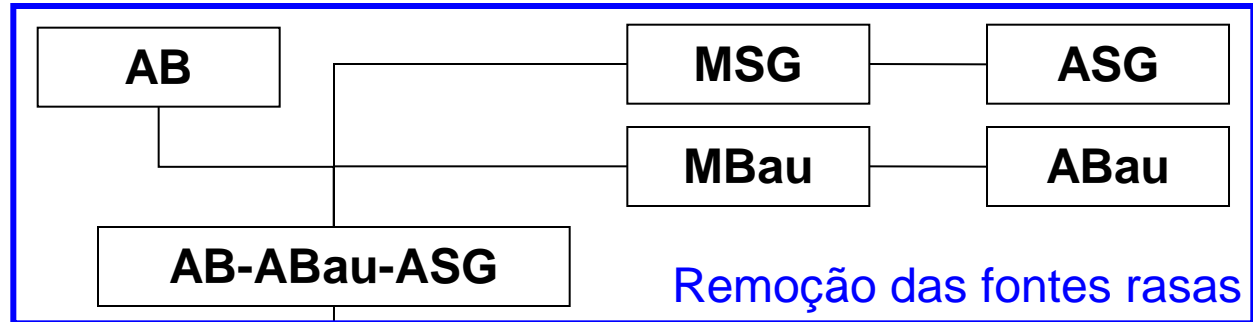


**Continuação para
cima até 100km**

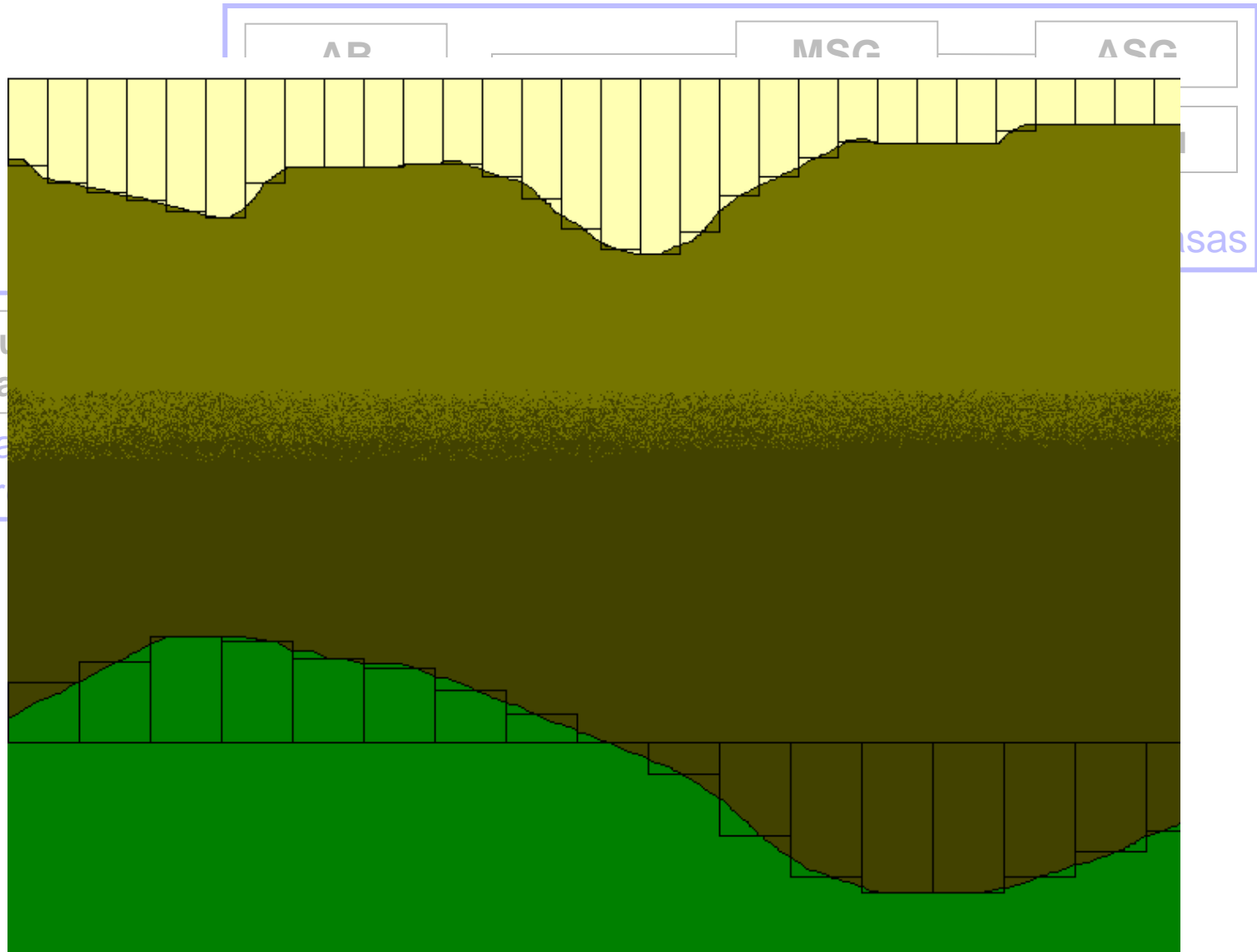
Apêndice 2



Apêndice 2



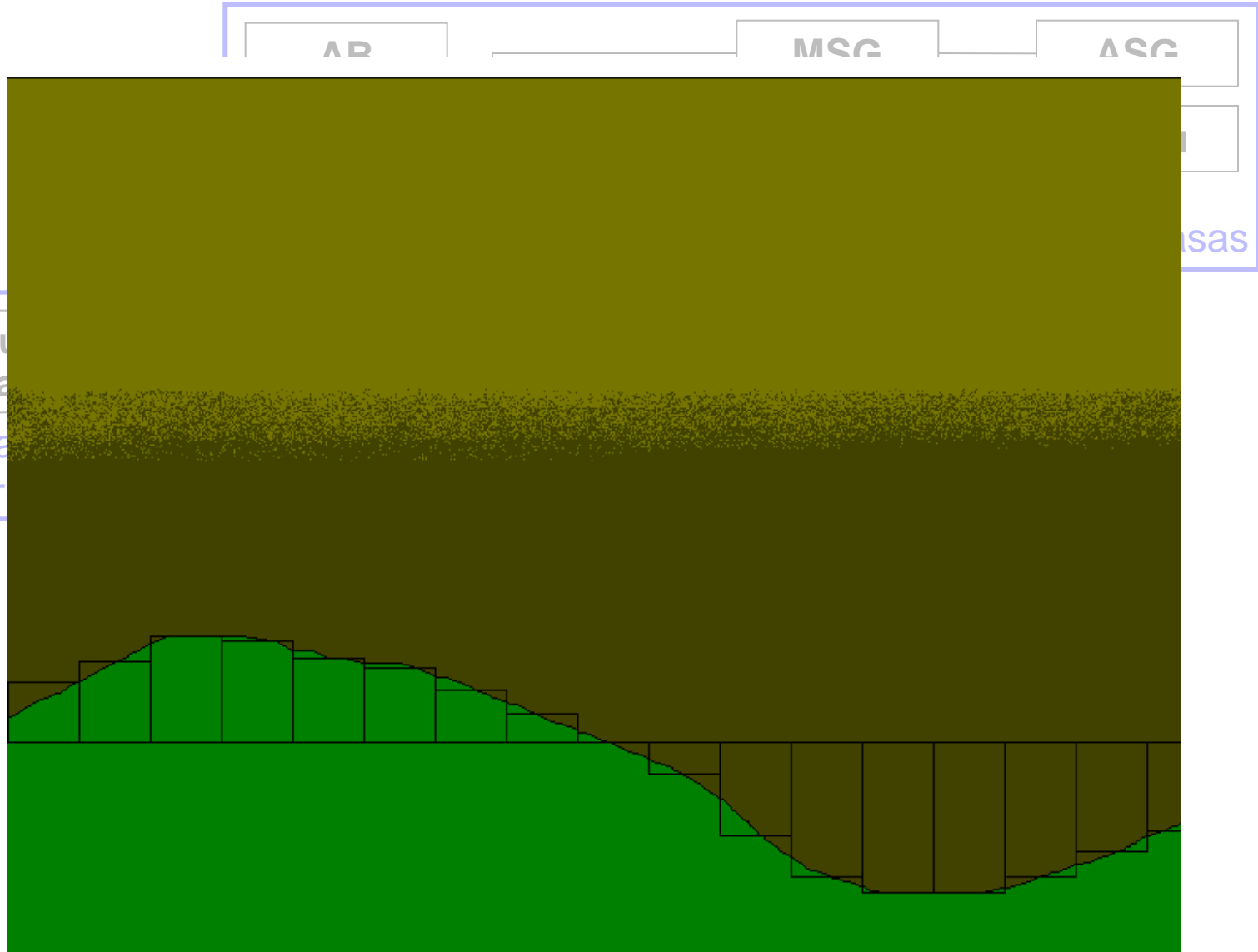
Apêndice 2



Continu
cima a

Separa
regional-r

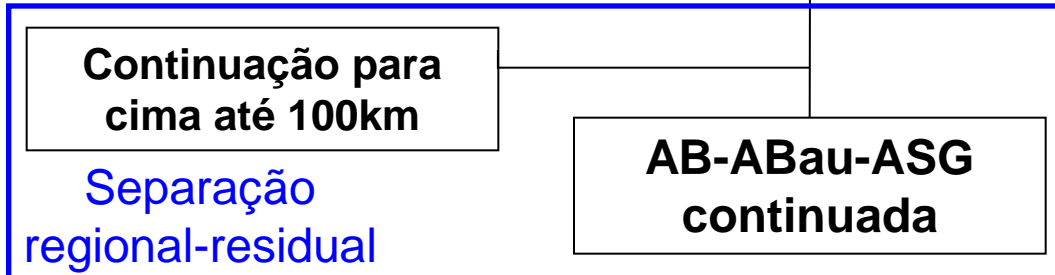
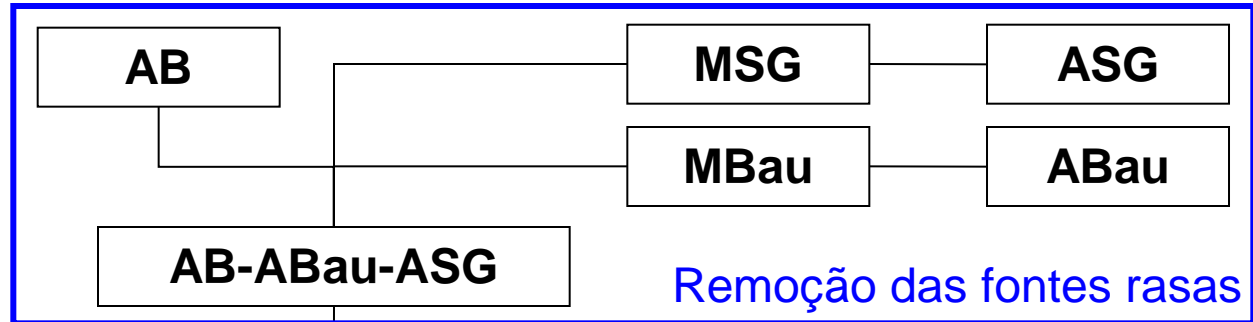
Apêndice 2



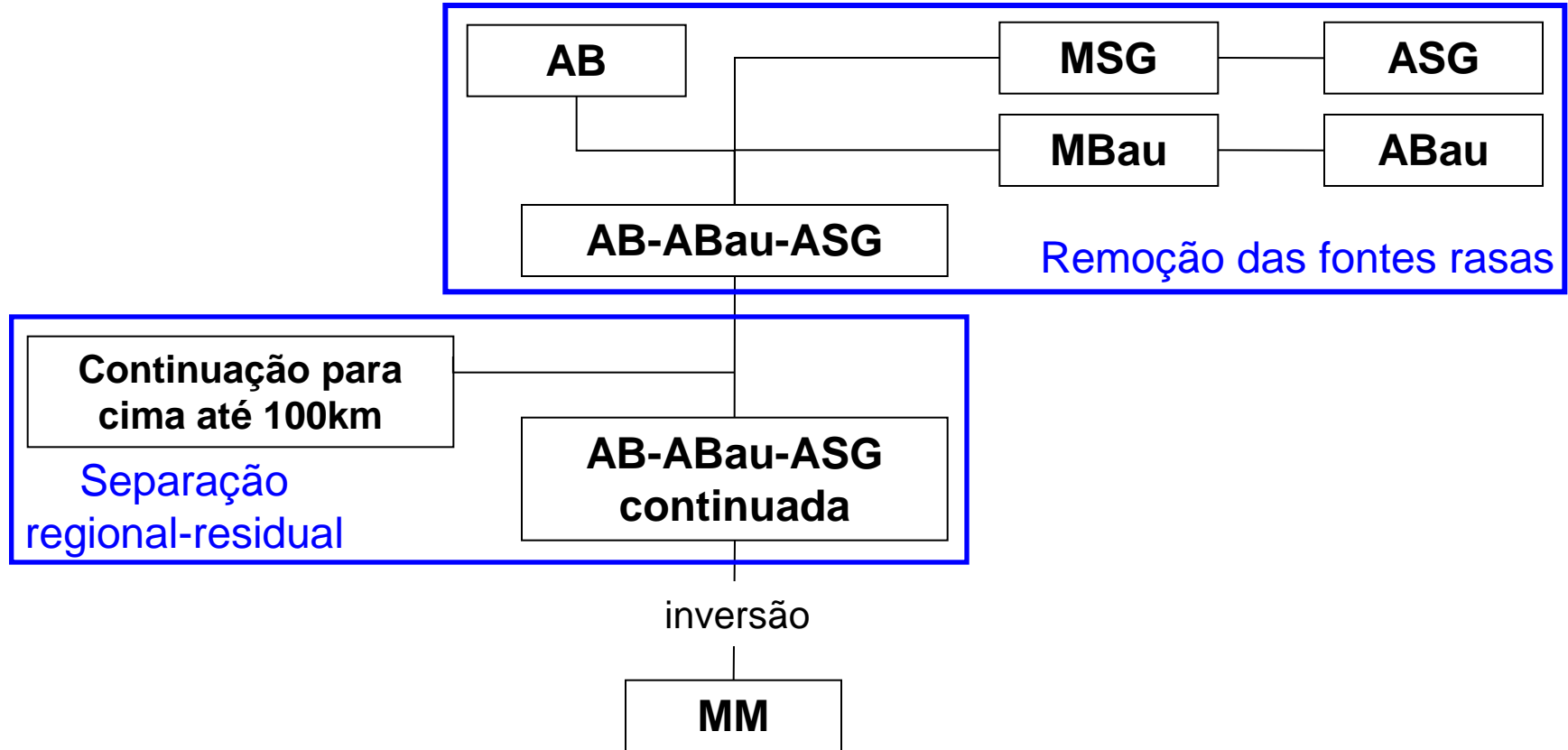
Continu
cima a

Separ
regional-r

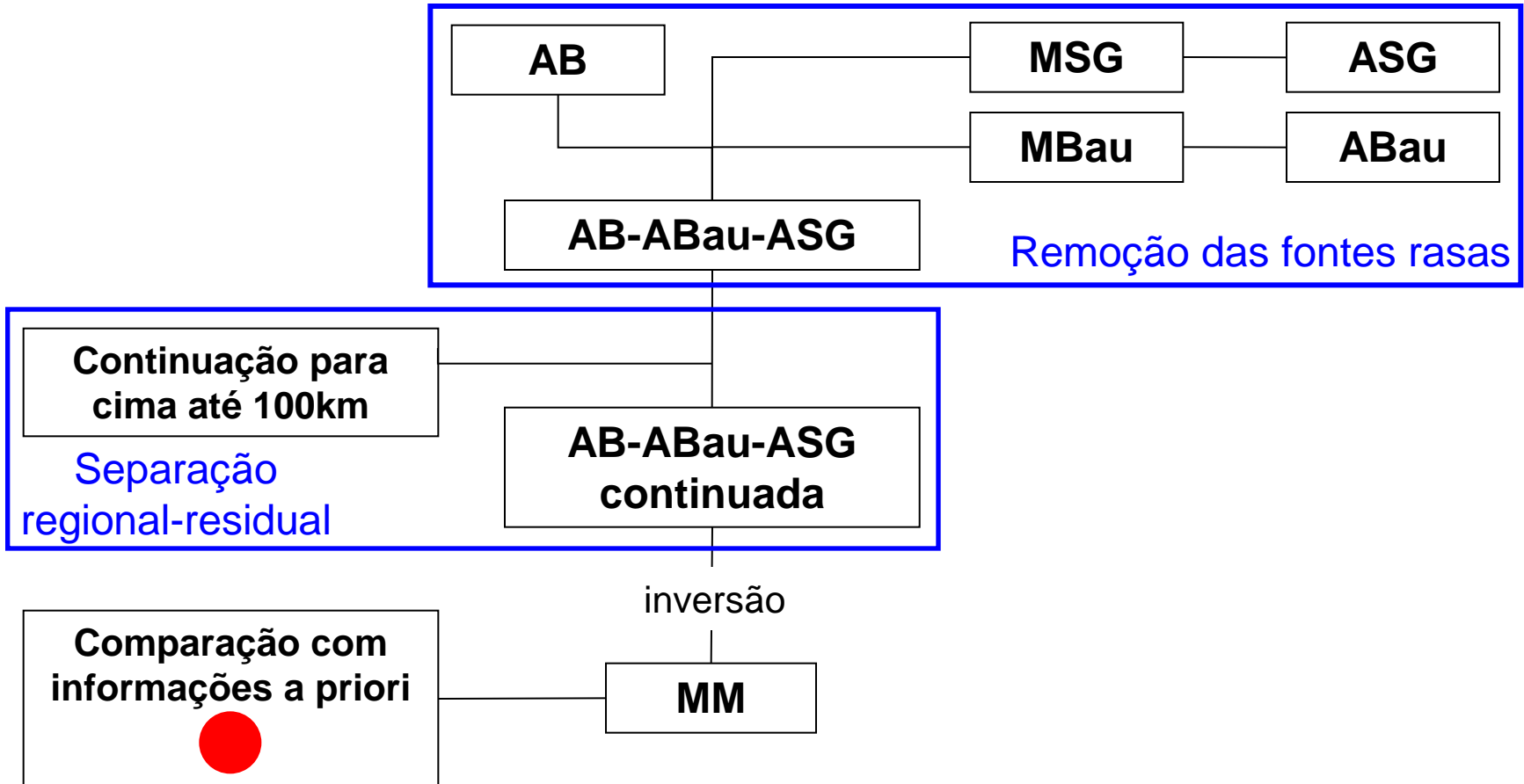
Apêndice 2



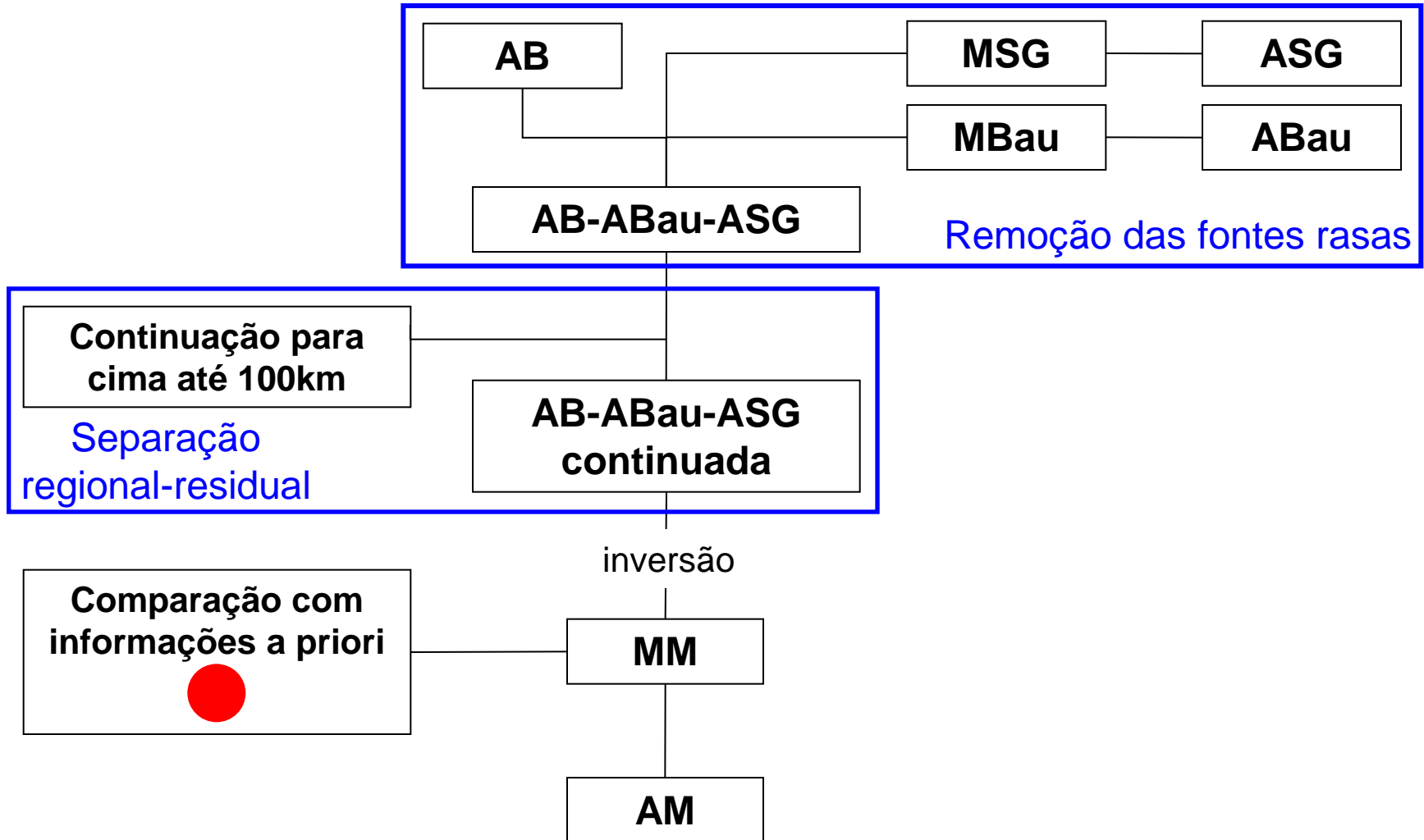
Apêndice 2



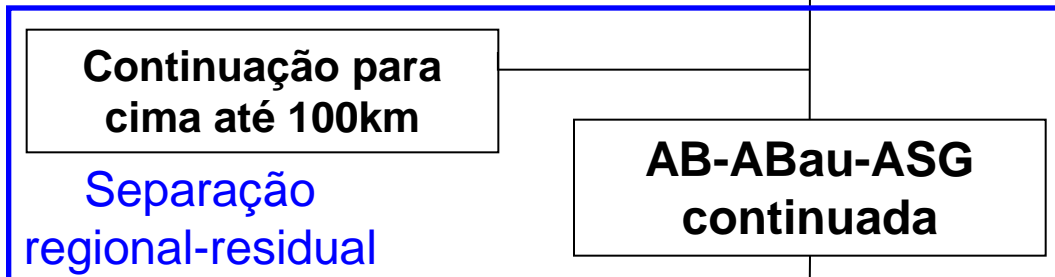
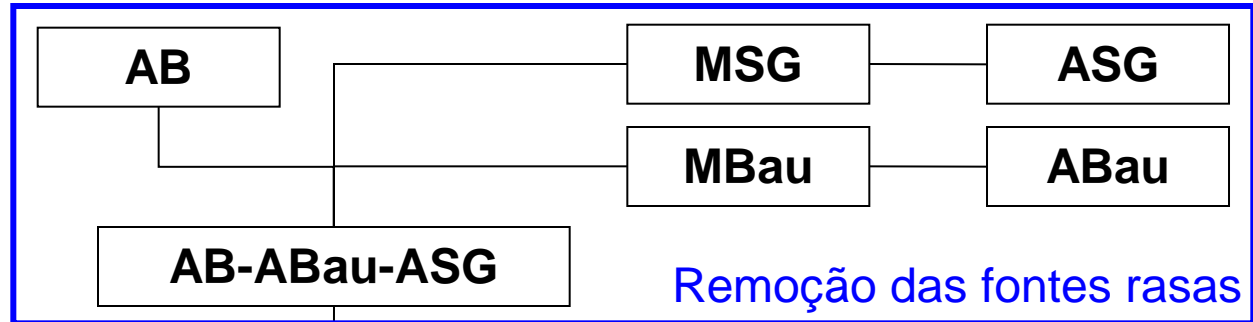
Apêndice 2



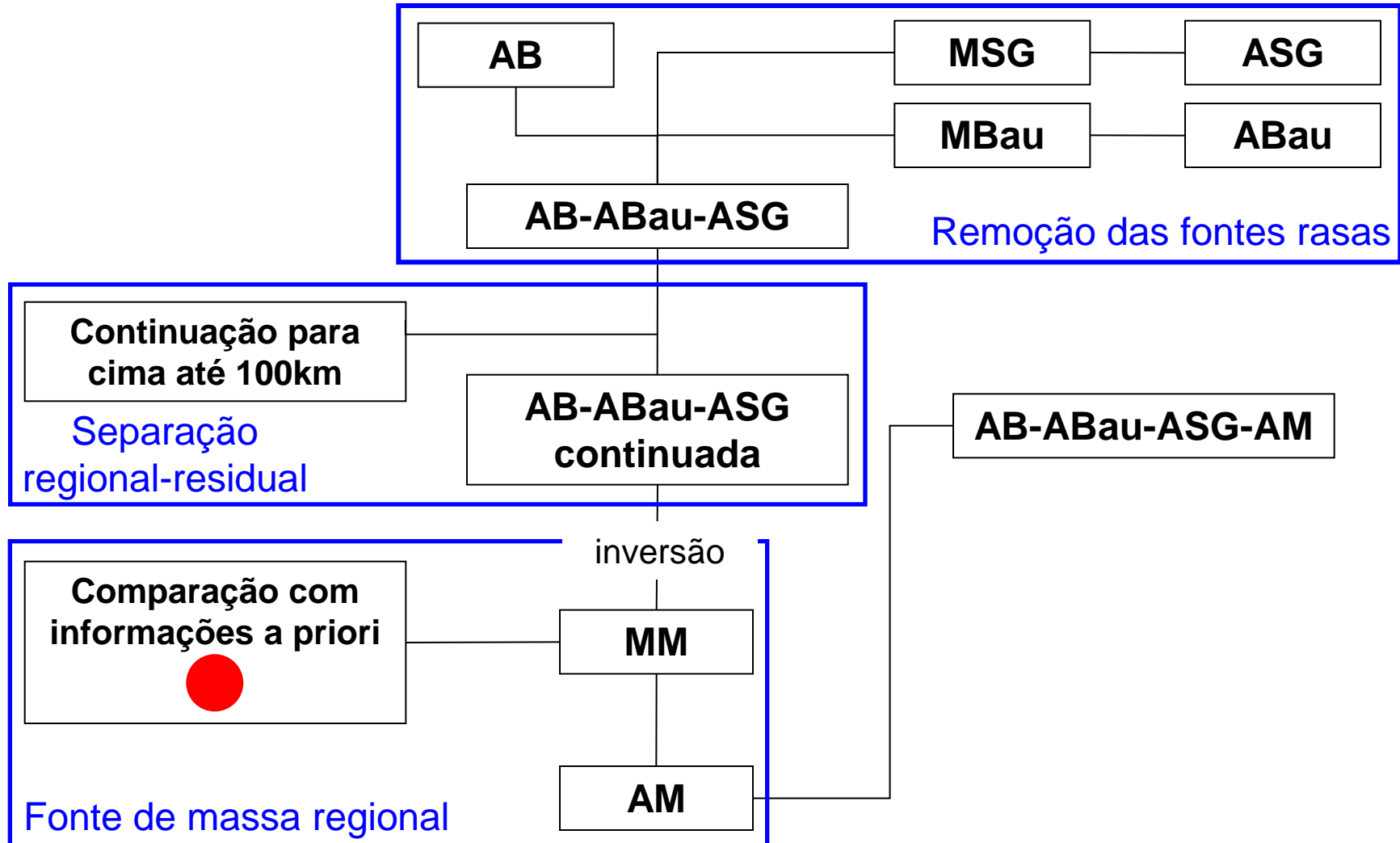
Apêndice 2



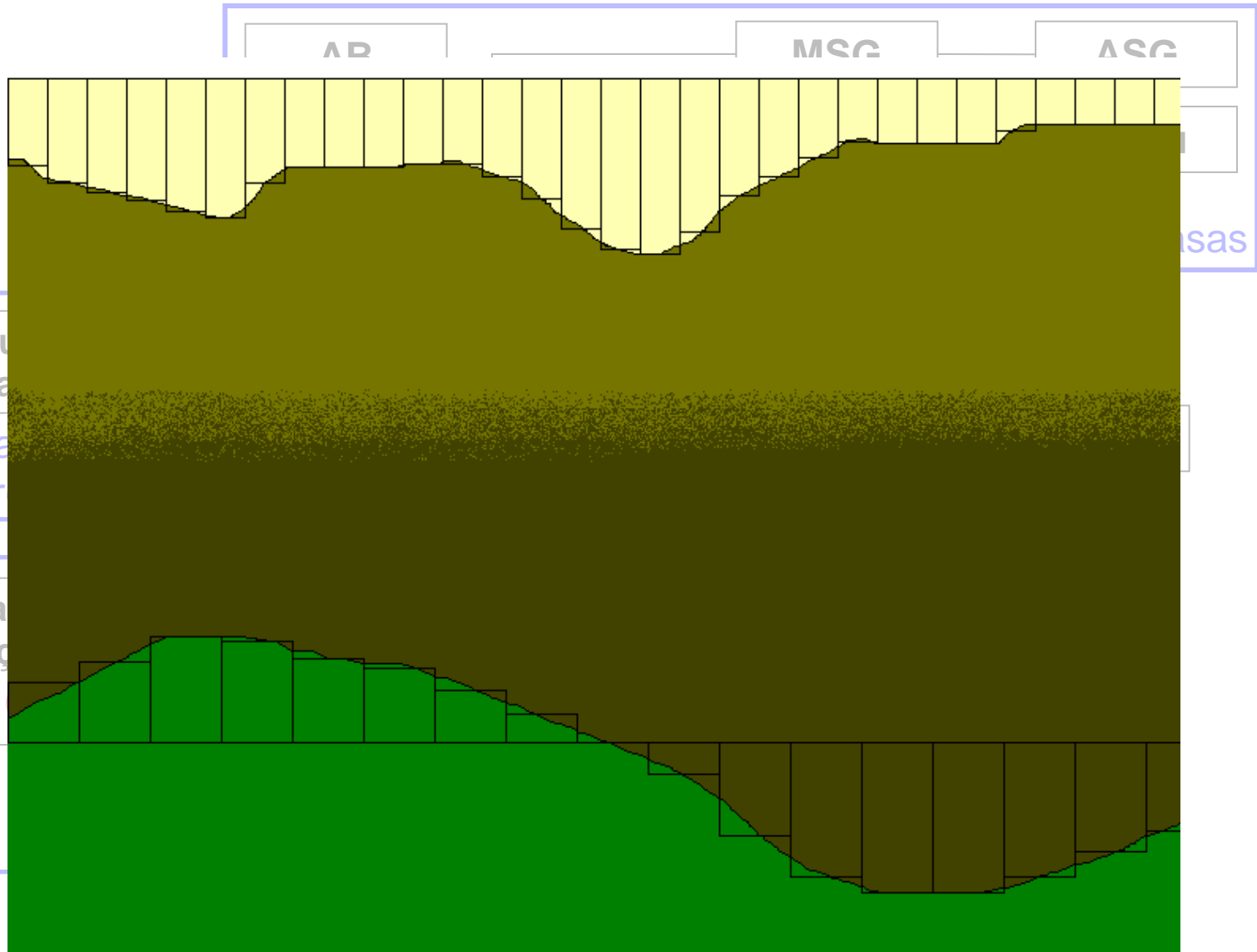
Apêndice 2



Apêndice 2



Apêndice 2



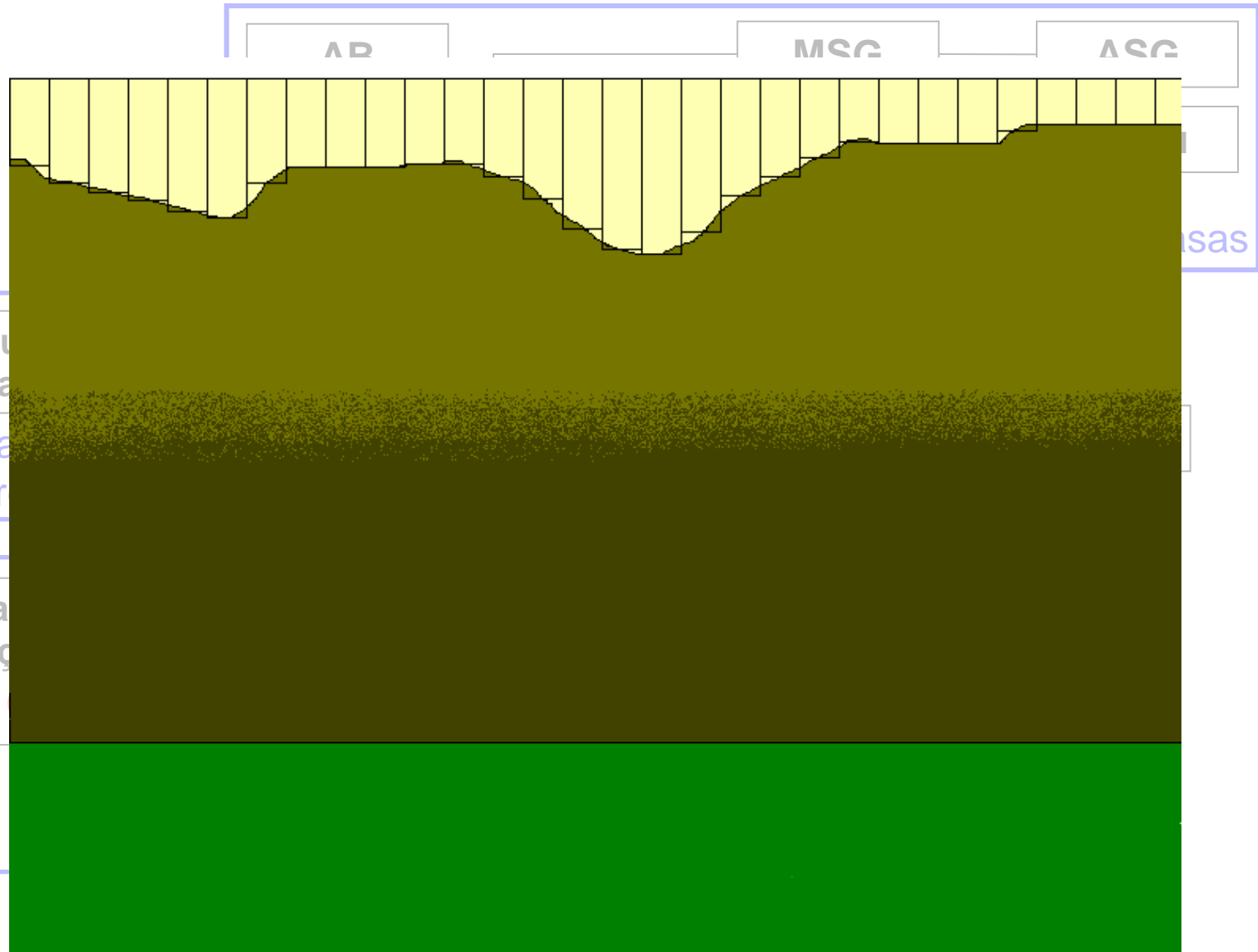
Continu
cima a

Separa
regional-r

Compa
informaç

Fonte de

Apêndice 2



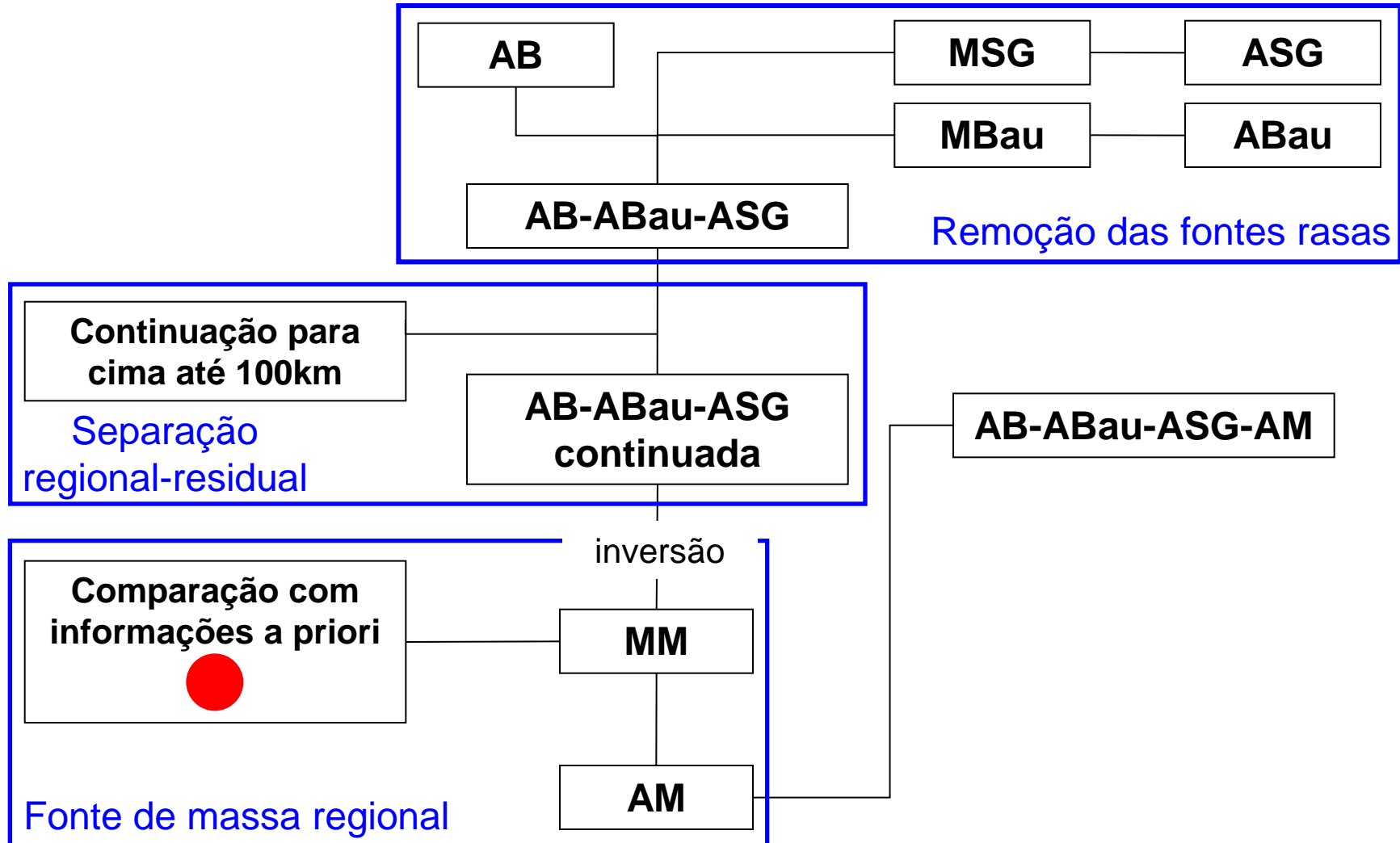
Continu
cima a

Separa
regional-r

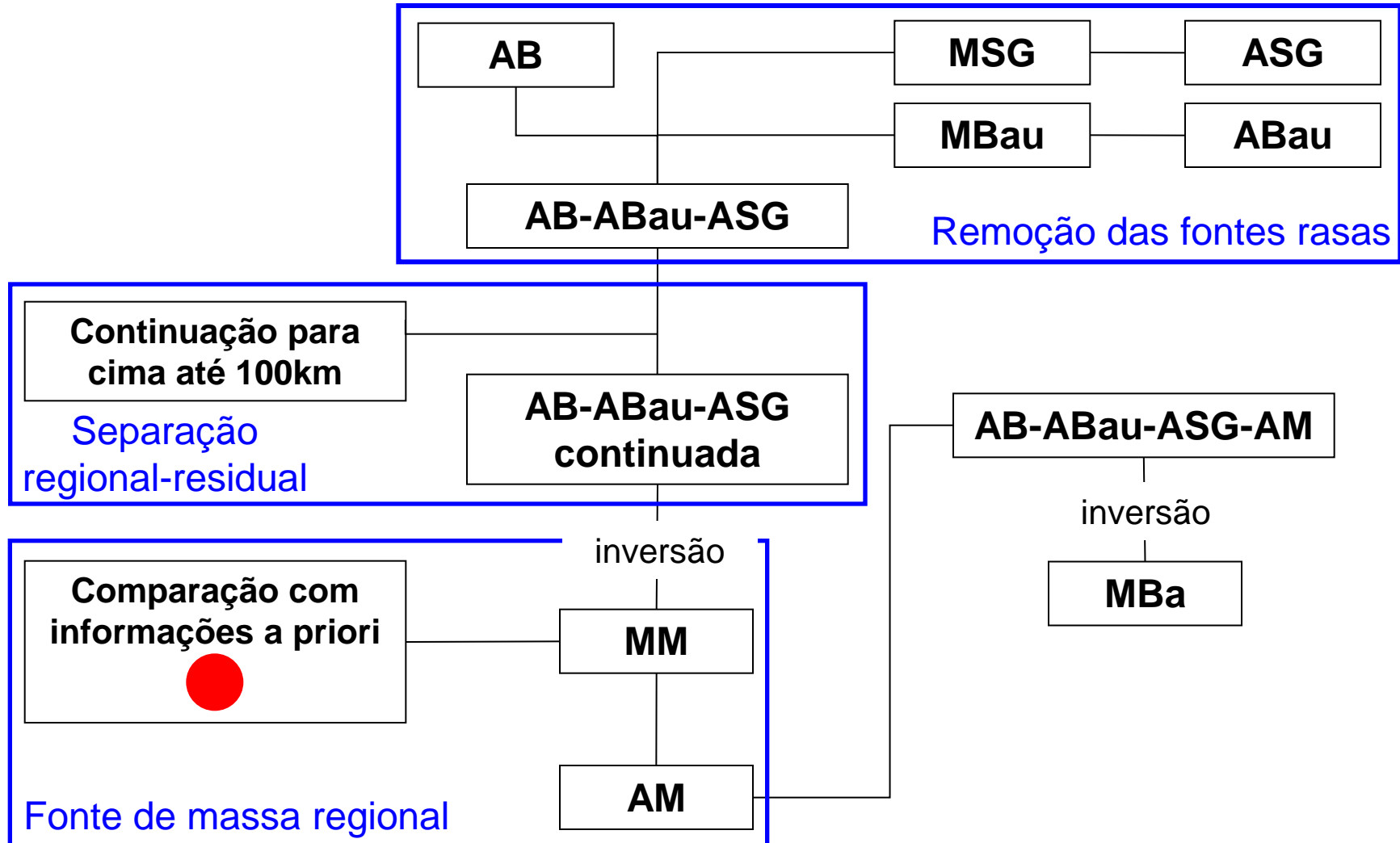
Compa
informaç

Fonte de

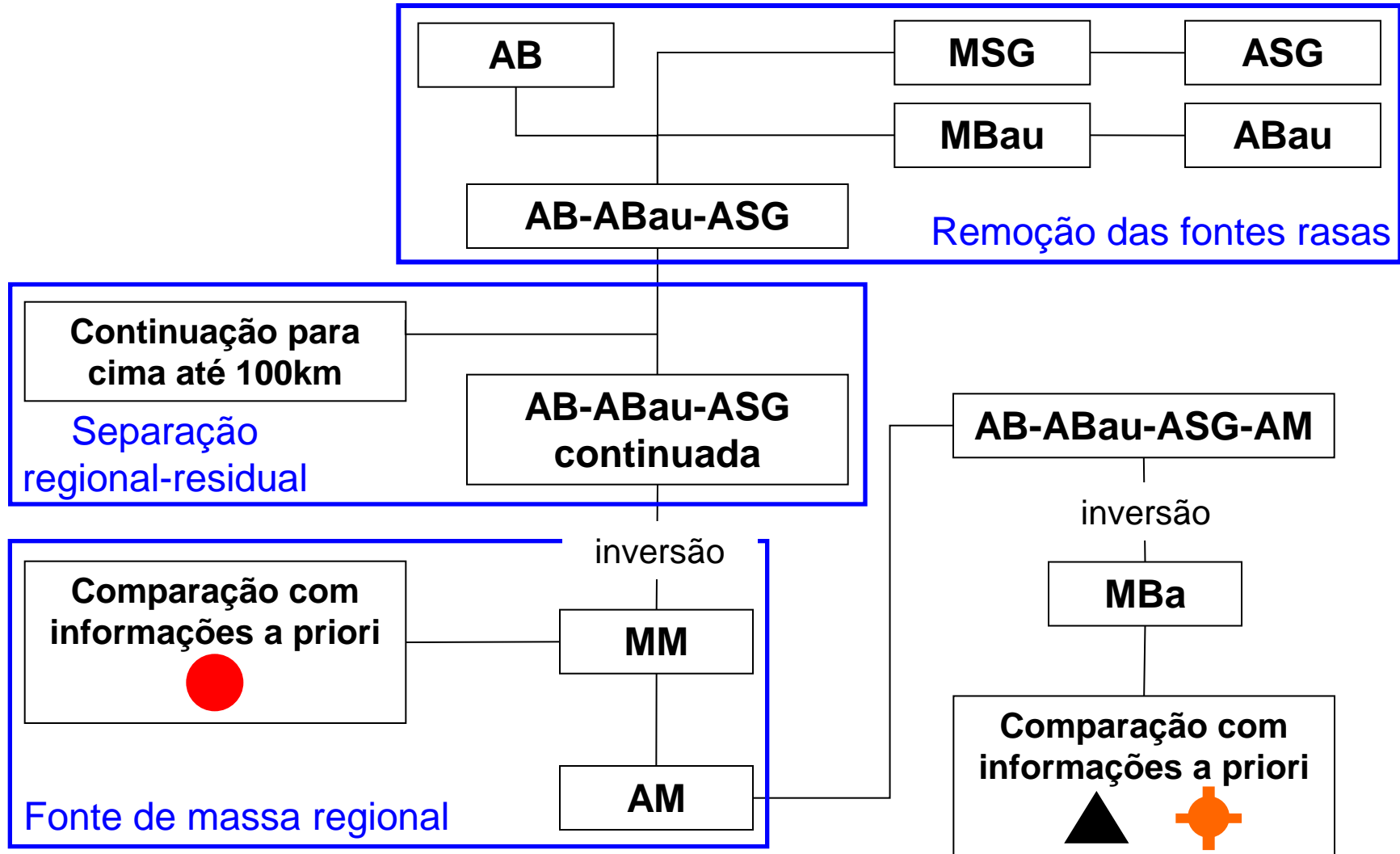
Apêndice 2



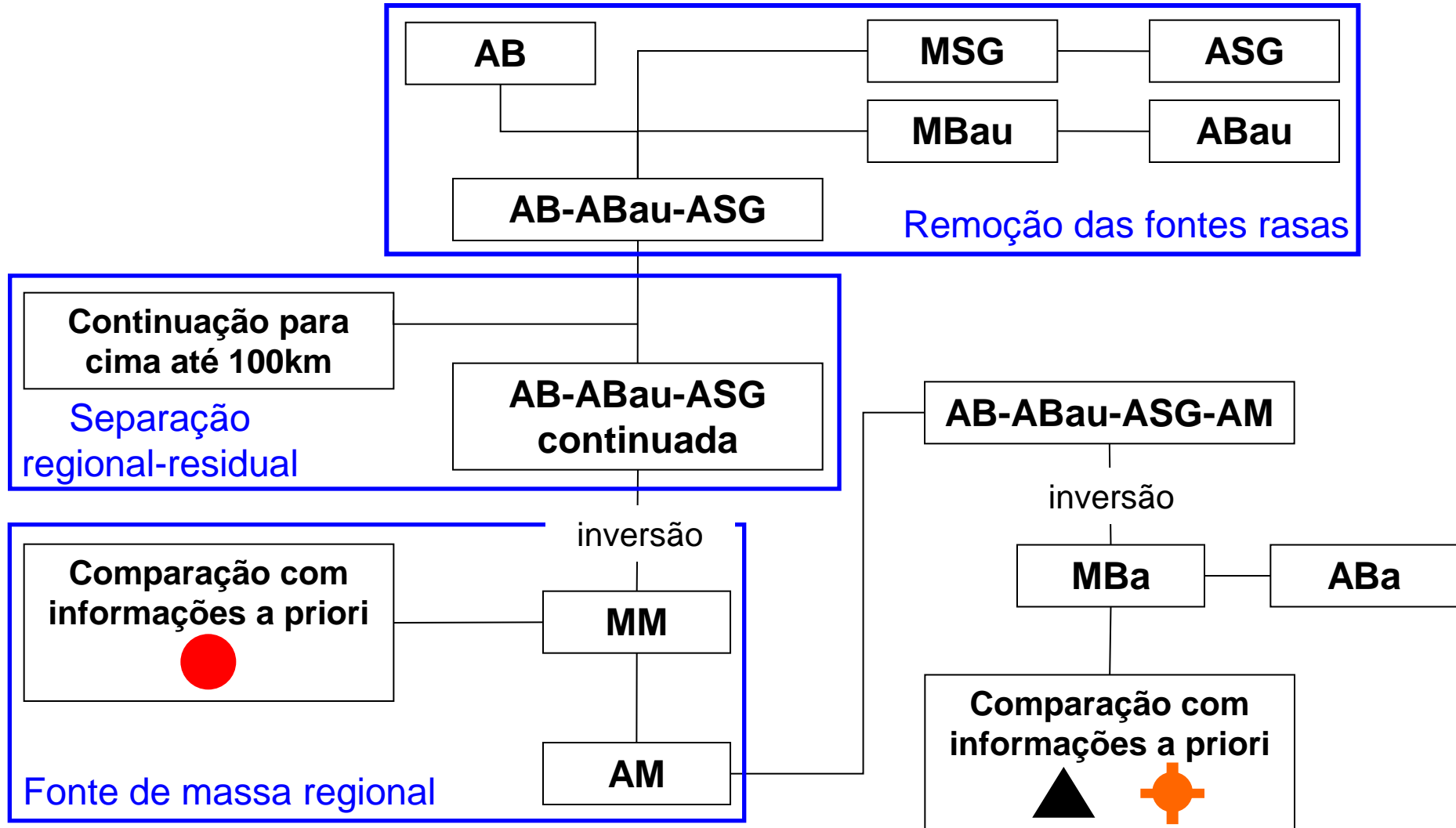
Apêndice 2



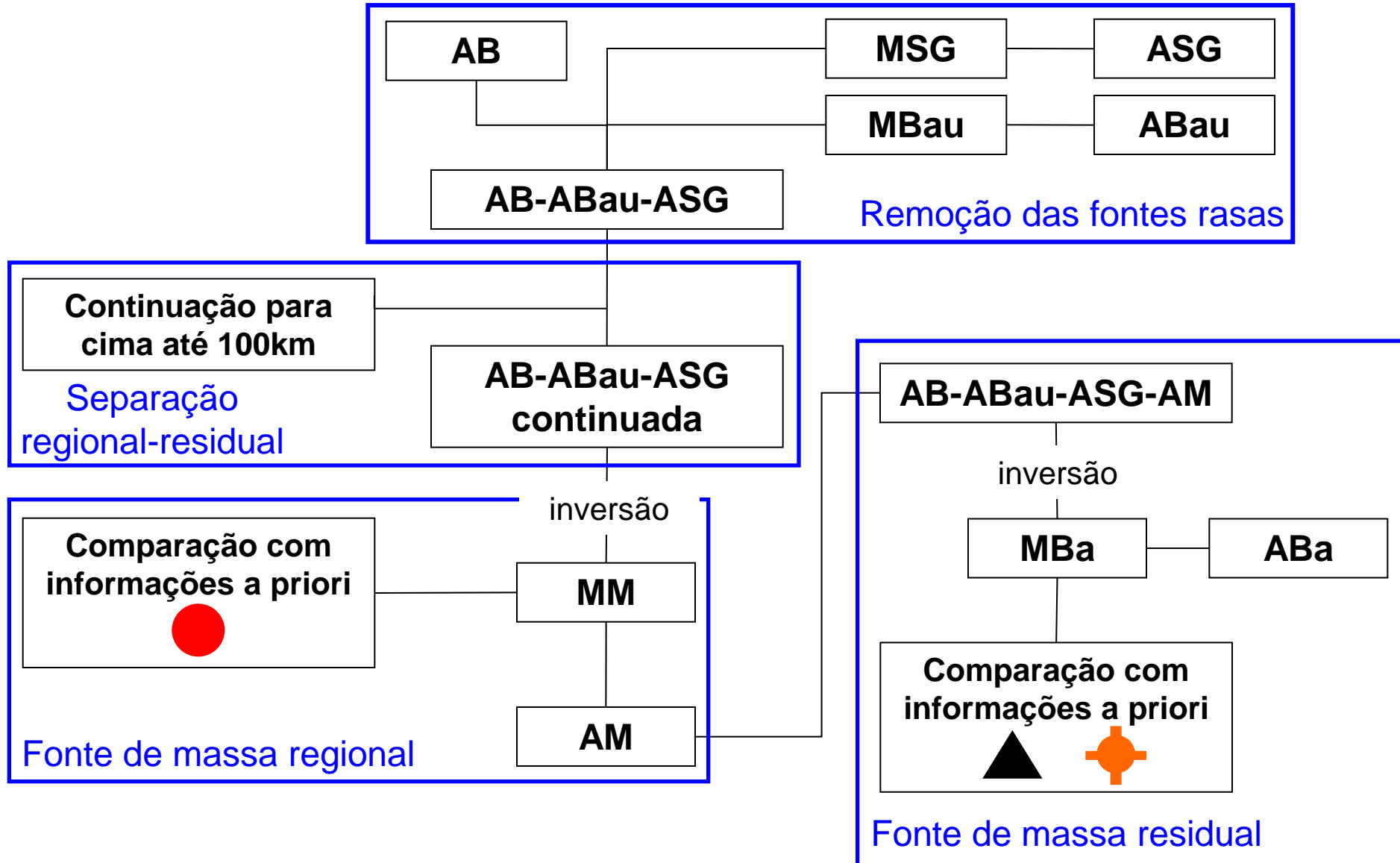
Apêndice 2



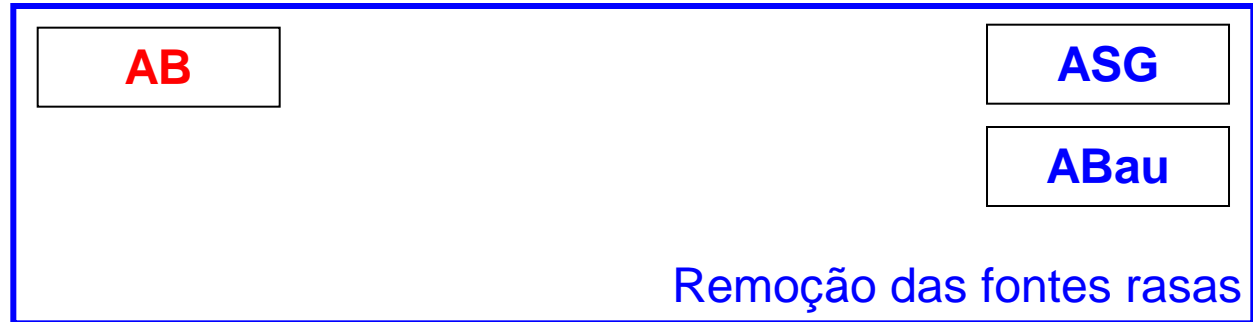
Apêndice 2



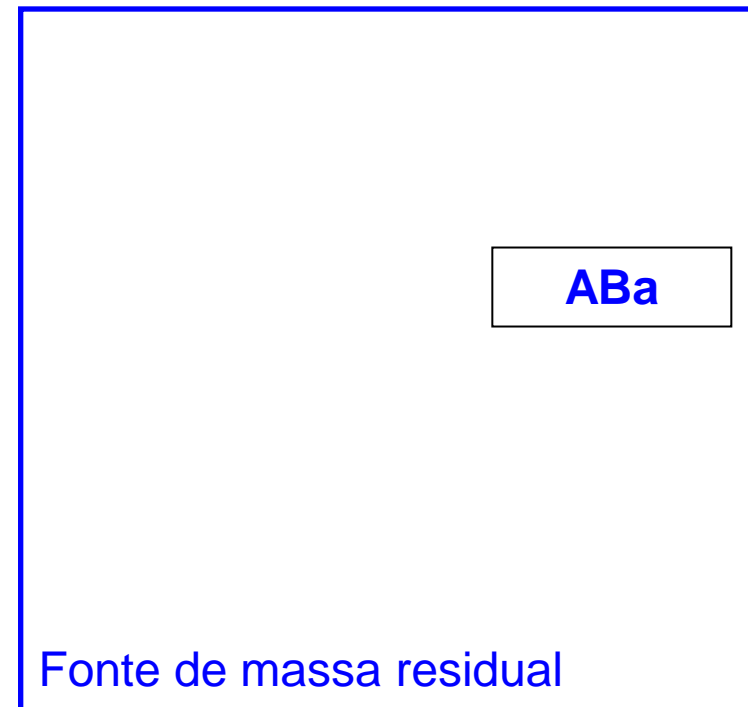
Apêndice 2



Apêndice 2



$$\text{AB-ABau-ASG-AM-ABa} \approx 0$$



Apêndice 2

Profundidades da Formação Bauru

As profundidades estão em km

Modelo da formação Bauru

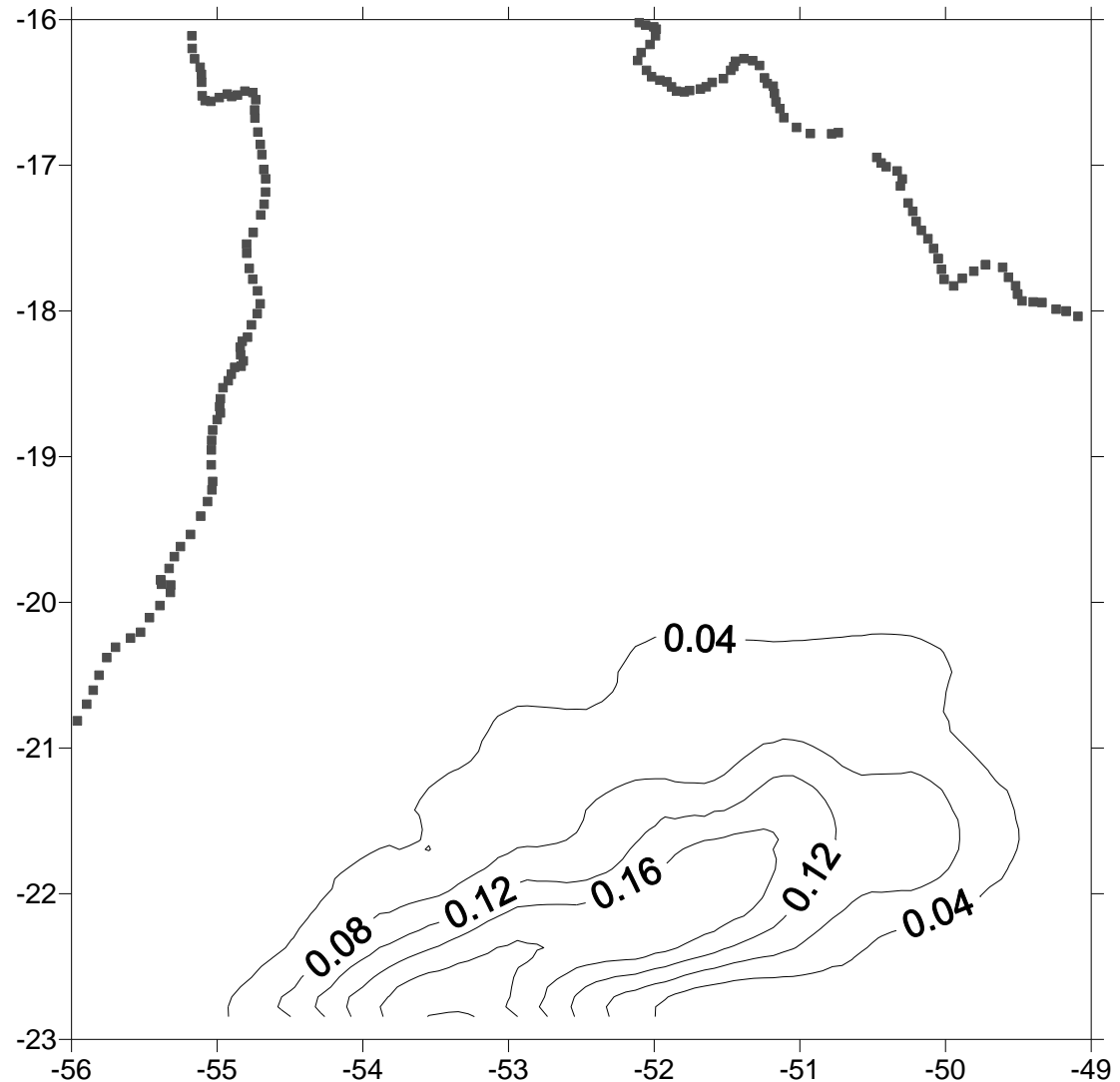
$$\rho_{\text{emb}} = 2,70 \text{ g/cm}^3 *$$

$$\rho_{\text{bau}} = 2,55 \text{ g/cm}^3 *$$

$$\Delta\rho_{\text{bau}} = -0,15 \text{ g/cm}^3$$

* (VIDOTTI; EBINGER;
FAIRHEAD, 1998)

Modificado de Milani (1997)



Apêndice 2

Profundidades da Formação Serra Geral

As profundidades estão em km

Modelo da formação Serra Geral

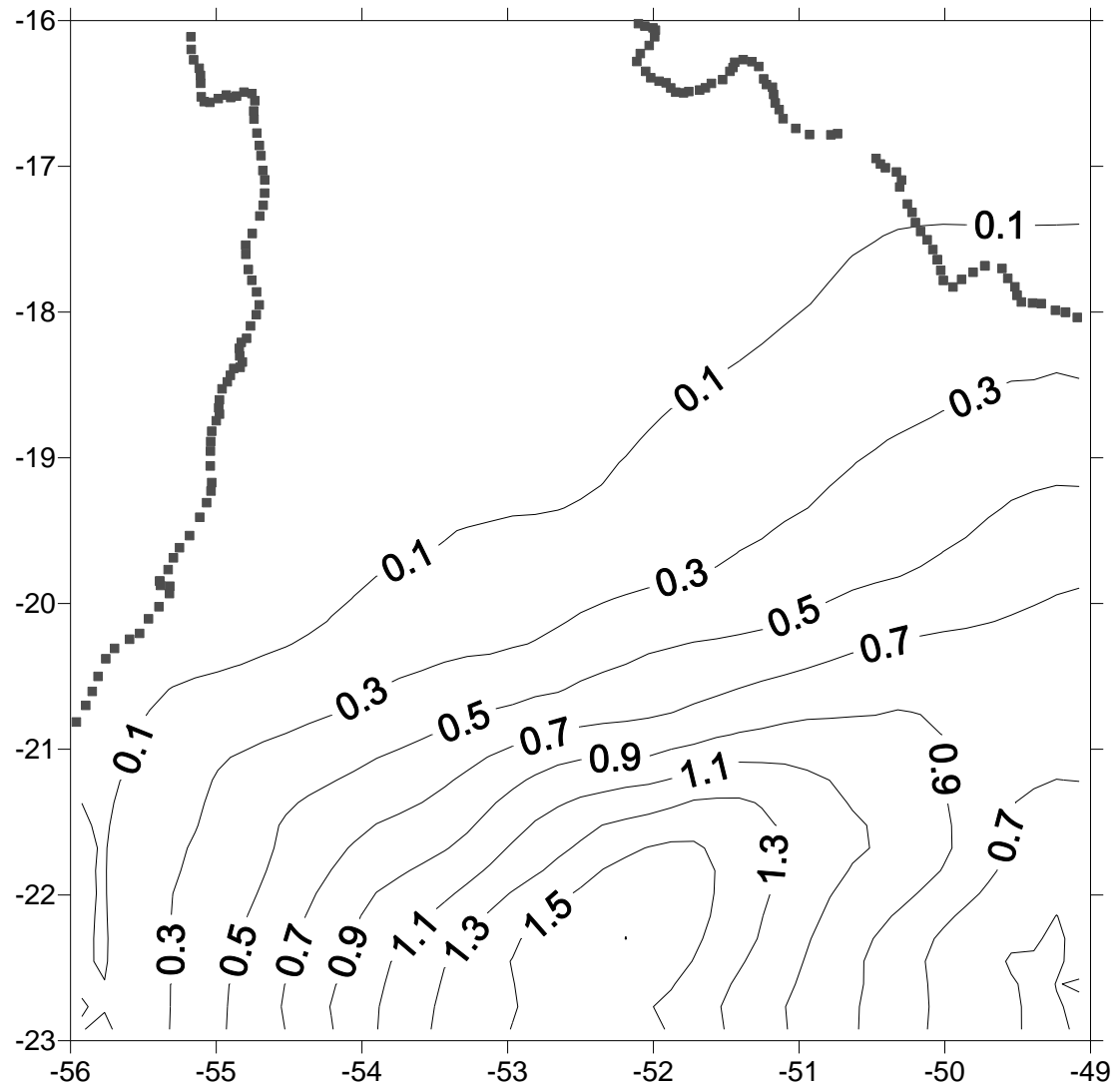
$$\rho_{\text{emb}} = 2,70 \text{ g/cm}^3 *$$

$$\rho_{\text{sg}} = 2,92 \text{ g/cm}^3 **$$

$$\Delta\rho_{\text{sg}} = +0,22 \text{ g/cm}^3$$

** (CÔNEGO et. al., 2008)

Modificado de Zalán et al. (1990)



Apêndice 2

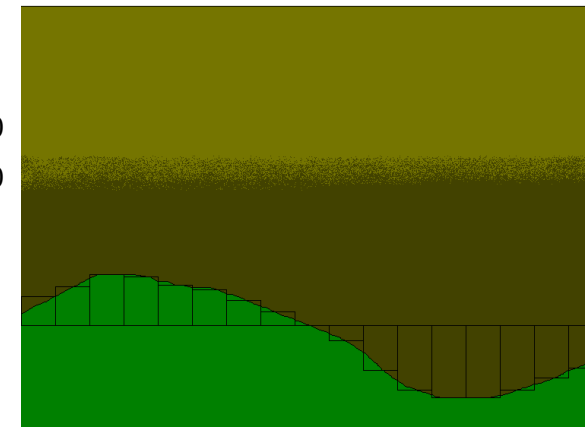
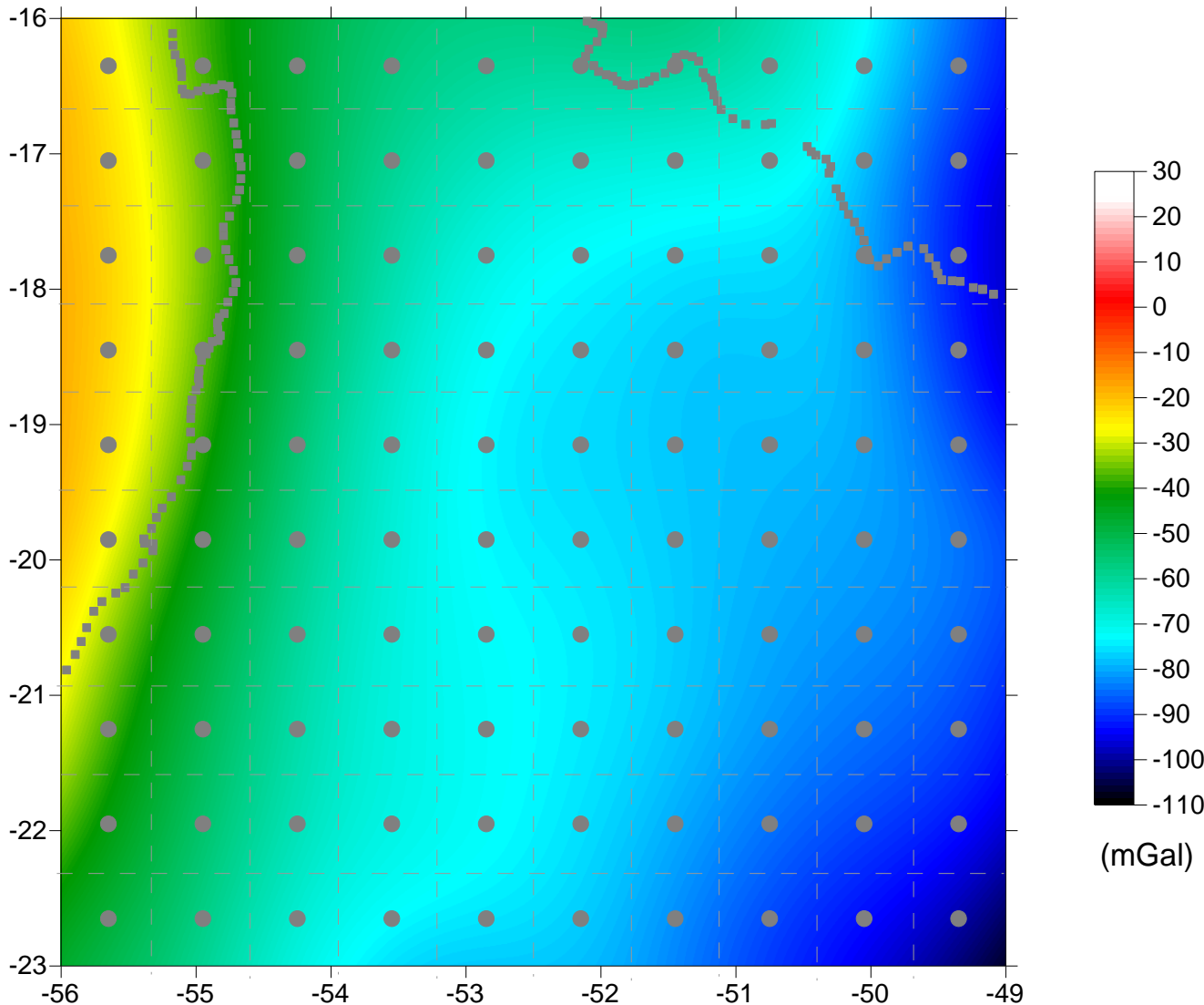
Anomalia Bouguer
sem a influência
das fontes rasas e
continuada para
cima até 100 km

$$\rho_{\text{manto}} = 3,3 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{\text{crosta}} = 2,8 \text{ g/cm}^3$$

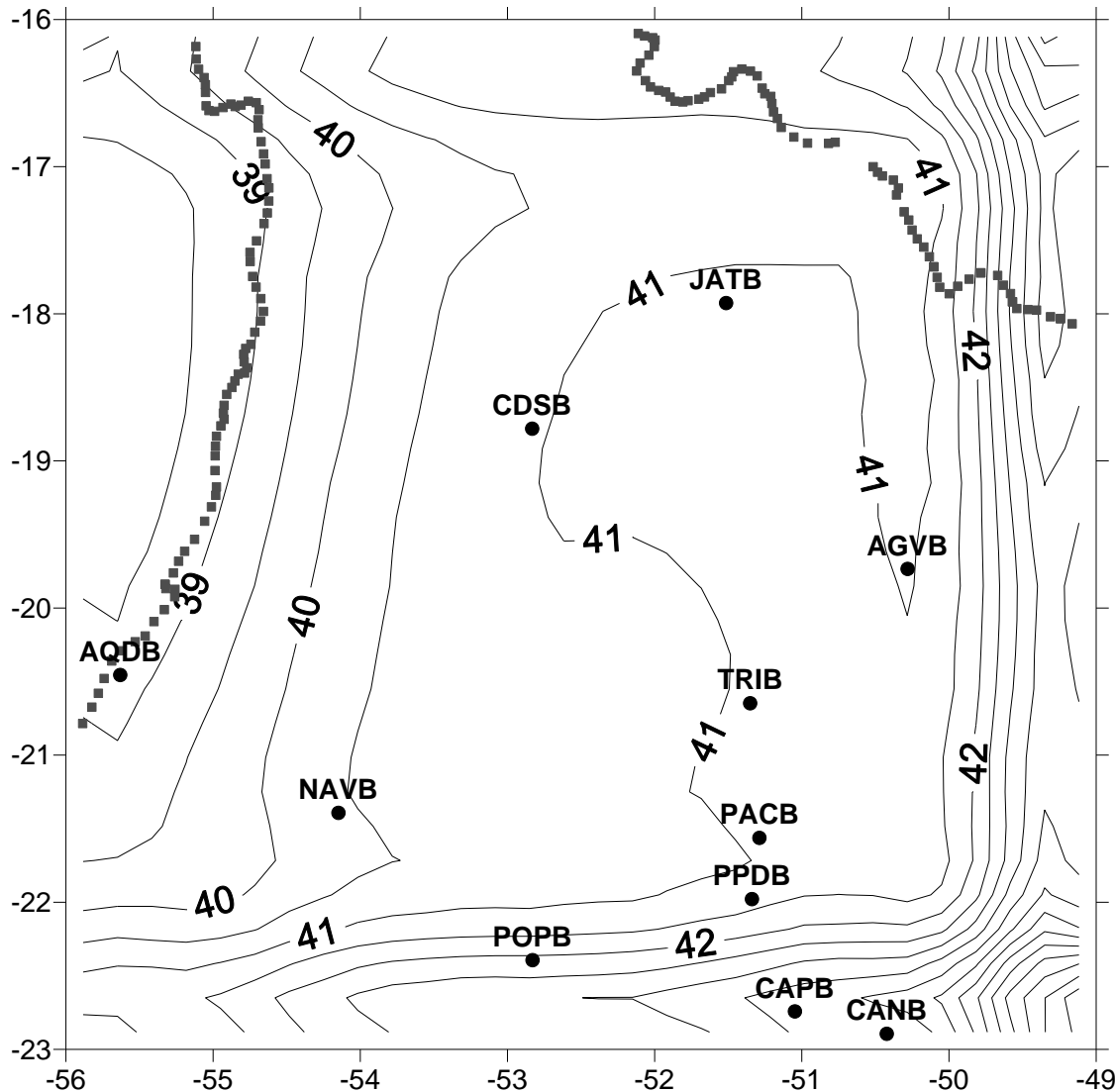
$$\Delta\rho_{\text{Moho}} = \pm 0,5 \text{ g/cm}^3$$

Nível de
referência em
37 km



Apêndice 2

Profundidades estimadas via inversão

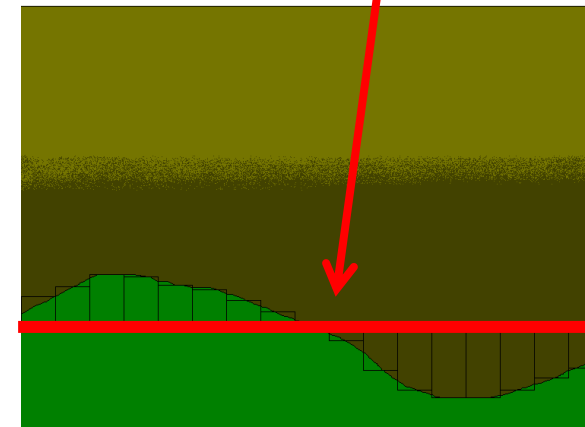


$$\rho_{\text{manto}} = 3,3 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{\text{crosta}} = 2,8 \text{ g/cm}^3$$

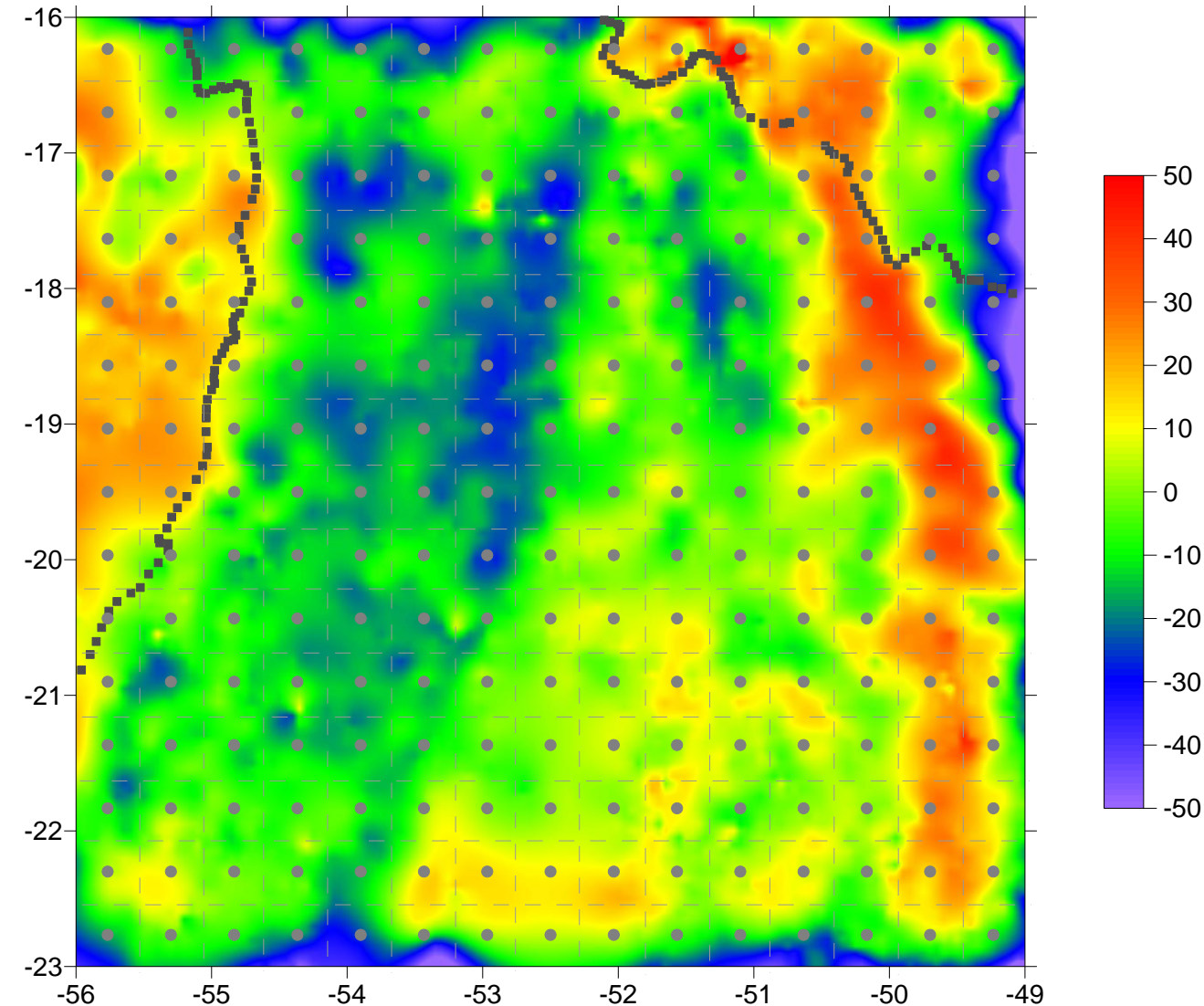
$$\Delta\rho_{\text{Moho}} = \pm 0,5 \text{ g/cm}^3$$

Nível de
referência em
37 km



Apêndice 2

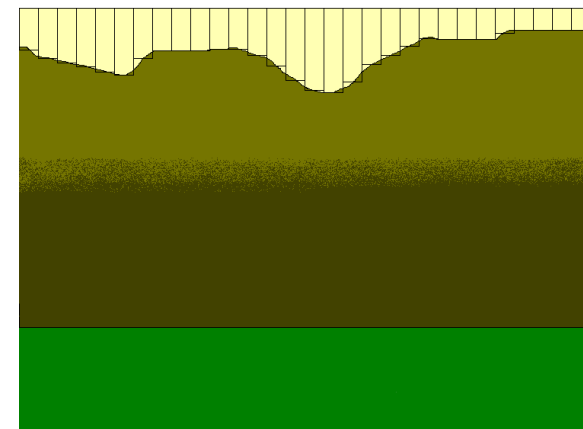
Anomalia Bouguer observada menos a influência das fontes rasas e da fonte regional (Moho)



$$\rho_{\text{embasamento}} = 2,70 \text{ g/cm}^3$$

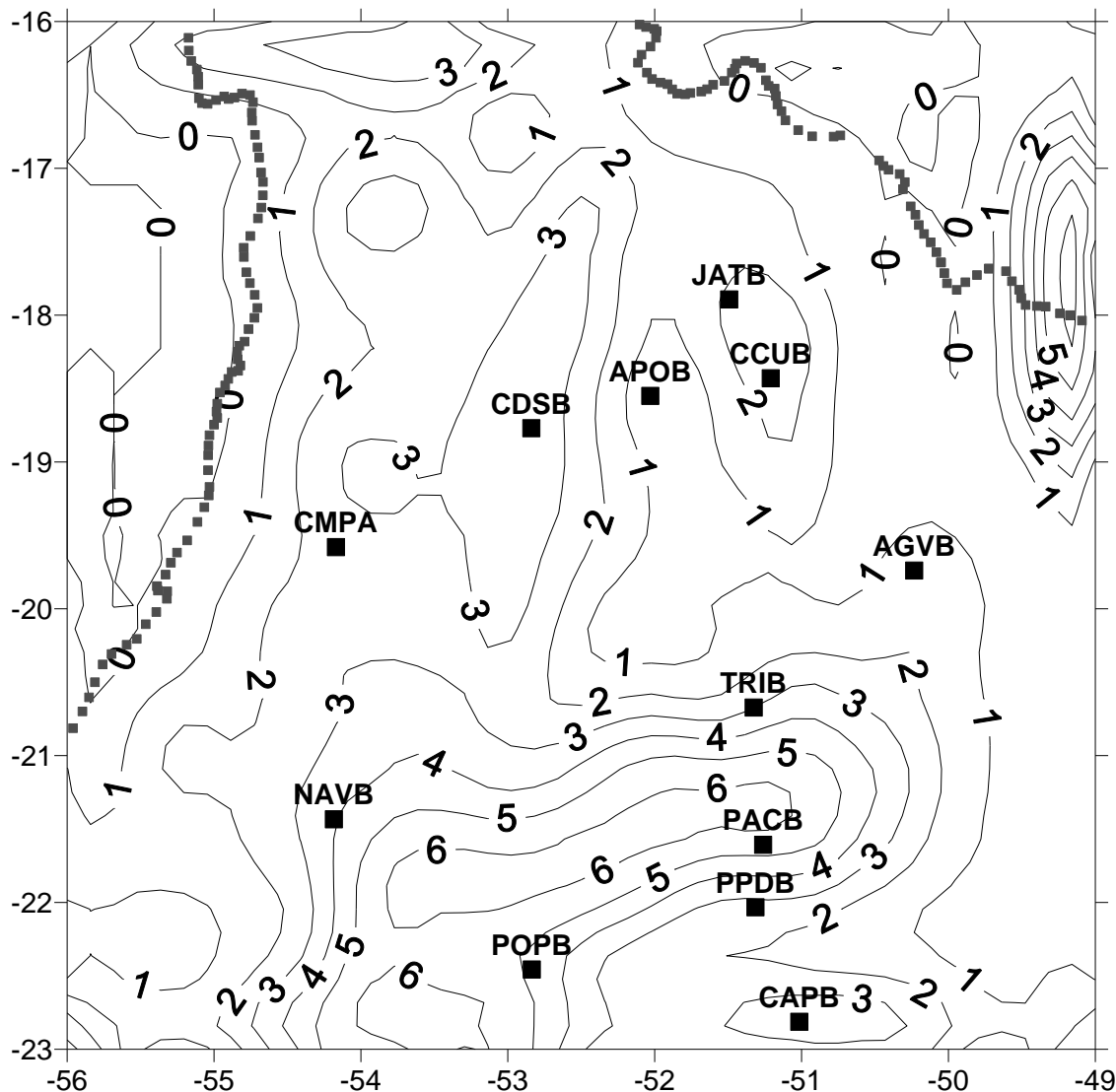
$$\rho_{\text{sedimentos}} = 2,55 \text{ g/cm}^3$$

$$\Delta\rho_{\text{sedimentos}} = -0,15 \text{ g/cm}^3$$



Apêndice 2

Profundidades estimadas via inversão

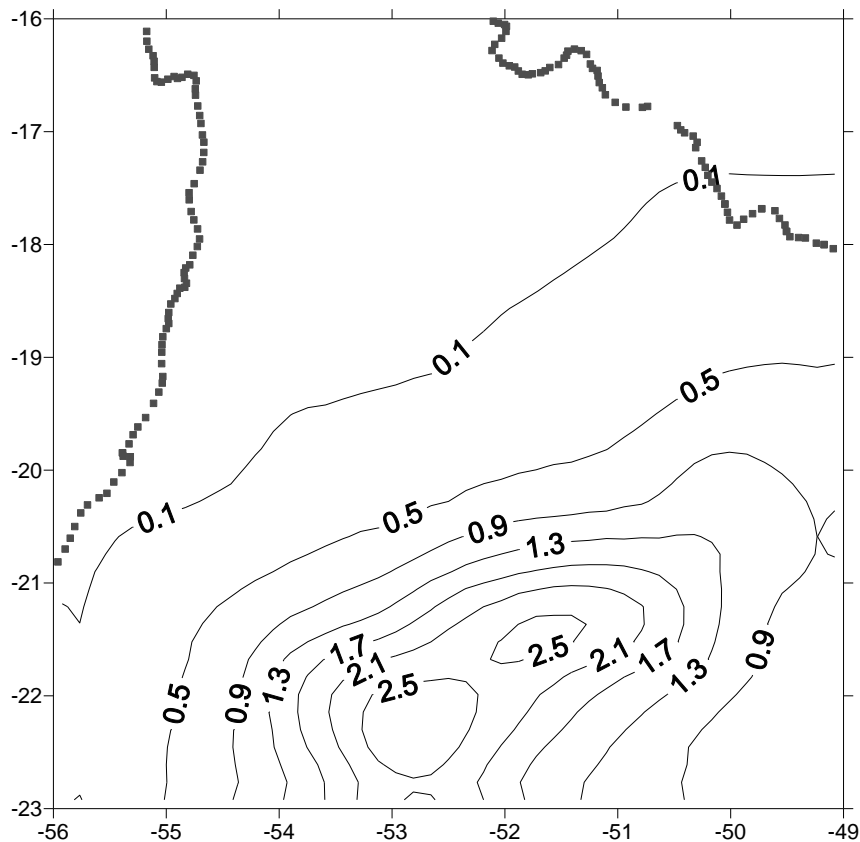


$\rho_{\text{embasamento}} = 2,70 \text{ g/cm}^3$

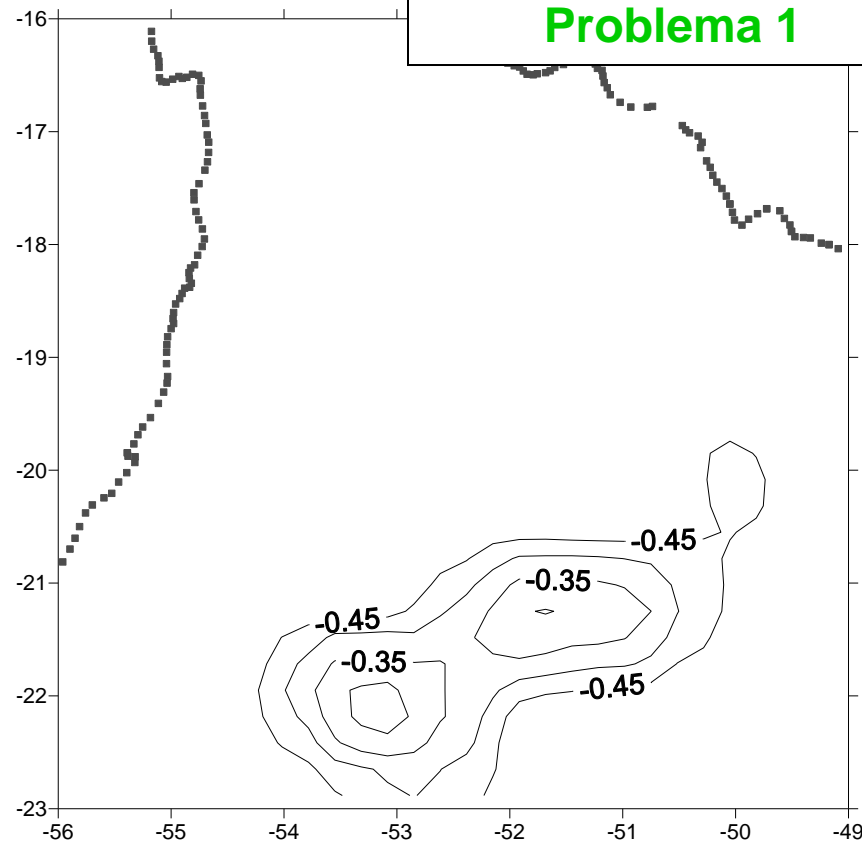
$\rho_{\text{sedimentos}} = 2,55 \text{ g/cm}^3$

$\Delta\rho_{\text{sedimentos}} = -0,15 \text{ g/cm}^3$

Apêndice 2



**Modelo Serra Geral modificado
(mais espesso)**



**Variação no $\Delta\rho_{\text{Moho}}$, que representa uma
contaminação crustal**

**Possíveis massas anômalas que
explicariam a fonte de massa adicional**

Problema 1