



## Inversão de Dados Gravimétricos 2D da Bacia Sergipe-Alagoas.

Rafael Abreu de Cristo\* (CPGG/UFBA), Alanna Costa Dutra (CPGG/LFNA/IF-UFBA), e Roberto Max de Argollo (LFNA/IF-UFBA)

Copyright 2015, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica.

This paper was prepared for presentation during the 14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 3-6, 2015.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 14th 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

The present work proposes a 2D gravity inversion from the basin Sergipe and Alagoas. The field gravity data were provided by ANP under the concession to the GEOTERM-SE-AL project. Before to do the inversion was made regional-residual separation of the gravity data by the method last square. Two gravity synthetic models were calculated from the depth model that represents the basement relief of a sedimentary basin. The result of the gravity data inversion of these synthetic models reached an error around of 0,31% to the model 1 and around 0,92% to the model 2. Three gravity profiles from the residual data were used in the inversion. The depth solutions of this inversion were compared with the depth measures from boreholes, the results obtained were closed to the true values to the basement depth on different localizations of the Sergipe and Alagoas basin.

### Introdução

Este trabalho tem por objetivo estimar parâmetros de profundidade do relevo do embasamento, usando a anomalia gravimétrica como informação sobre o relevo do embasamento da bacia. No estudo de bacias sedimentares, a interpretação de anomalias gravimétricas assume grande importância. No entanto, devido ao fato dessas anomalias serem resultantes da soma total dos efeitos produzidos por todos os contrastes de densidade em subsuperfície, foi necessário separar os efeitos de feições mais profundas e obter a anomalia produzida somente pelo relevo do embasamento. Essa separação residual-regional foi feita pela remoção de uma superfície polinomial de ordem três obtida através do método de mínimos quadrados.

Após a separação residual-regional foram tomados três perfis do dado gravimétrico para estimar soluções de profundidade do relevo do embasamento da Bacia. A obtenção dessas soluções está sujeito ao critério de ajuste dos dados gravimétricos verdadeiros com os dados gravimétricos produzido por prismas verticais justapostos. Também foi realizado uma inversão de dados gravimétricos sintéticos calculados a partir de um modelo de profundidade que representa o modelo de

embasamento de uma Bacia sedimentar para validar o método de inversão utilizado neste trabalho.

### Método

#### Modelagem Direta

A modelagem direta parte de um conjunto inicial de parâmetros construído por informações a priori, baseadas na geologia. O dado calculado é gerado e comparado com a dado observado, caso estes dados não se ajustem os parâmetros são reajustados novamente até que o dado calculado se ajuste ao dado observado (Blakely,1996).

Na modelagem gravimétrica, a geologia é aproximada por prismas verticais 2D (Soares, 2013) ou por prismas verticais 3D (Talwani e Ewing, 1960). O ajuste dos parâmetros, como densidade e/ou profundidade, são realizados até que a anomalia gravimétrica calculada se ajuste com a anomalia gravimétrica observada.

As equações da modelagem direta, equações (1),(2) e (3) são do trabalho de (Last e Kubik, 1983), os quais afirmam que o campo gravitacional no  $i$ -ésimo bloco, de um modelo 2D discretizado é:

$$g_i = \sum_{j=1}^M a_{ij}\rho_j + e_i, i = 1 \dots N \quad (1)$$

onde  $\rho_j$  é a densidade do  $j$ -ésimo bloco e  $e_i$  o ruído associado com a  $i$ -ésima observação, o qual no presente trabalho foi considerado zero. A expressão para  $a_{ij}$  é dado por:

$$a_{ij} = 2\gamma [(x_i - x_j + d/2) \log(r_2 r_3 / r_1 r_4) + d \log(r_4 / r_3) - (z_j + h/2)(\theta_4 - \theta_2) + (z_j - h/2)(\theta_3 - \theta_1)] \quad (2)$$

onde,

$$\begin{aligned} r_1^2 &= (z_j - h/2)^2 + (x_i - x_j + d/2)^2; \\ r_2^2 &= (z_j + h/2)^2 + (x_i - x_j + d/2)^2; \\ r_3^2 &= (z_j - h/2)^2 + (x_i - x_j - d/2)^2; \\ r_4^2 &= (z_j + h/2)^2 + (x_i - x_j - d/2)^2; \\ \theta_1 &= \arctan(x_i - x_j + d/2) / (z_j - h/2); \\ \theta_2 &= \arctan(x_i - x_j + d/2) / (z_j + h/2); \\ \theta_3 &= \arctan(x_i - x_j - d/2) / (z_j - h/2); \\ \theta_4 &= \arctan(x_i - x_j - d/2) / (z_j + h/2). \end{aligned} \quad (3)$$

onde a profundidade do topo ( $Z_t$ ) é:  $Z_t = z_j - h/2$  e a profundidade da base ( $Z_b$ ) é:  $Z_b = z_j + h/2$ .  $z_j$  é a

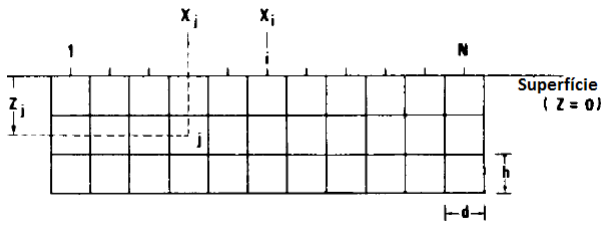


Figura 1: Figura esquemática de um modelo 2D de blocos retangulares mostrando o ponto de observação  $i$  e o bloco  $j$ .  $d$  e  $h$  representam as dimensões horizontais e verticais dos blocos retangulares. (Modificado de Last e Kubik, 1983)

profundidade do centro de cada bloco retangular e  $h/2$  é a meia altura de cada bloco.

### Inversão de Dados Gravimétricos

A inversão gravimétrica tem a função de determinar o vetor contraste de densidade  $\rho$  e/ou os valores de profundidade  $z$  a partir das anomalias do campo gravitacional. No presente trabalho, foi escolhido um método iterativo para se encontrar valores de profundidade a partir das anomalias observadas utilizando uma inversão gravimétrica 2D proposta por Bott (1960).

Bott (1960) propôs um método iterativo para calcular a profundidade do embasamento a partir da anomalia observada.

- Inicialmente supõe uma aproximação inicial para o relevo como uma placa Bouguer e as profundidades iniciais são calculadas a partir da fórmula  $z_j = \frac{g_{obs_j}}{2\pi\gamma\Delta\rho}$ ,  $j = 1 \dots N$  onde  $j$  é o número de estações,
- um modelo calculado é gerado a partir dessas profundidades através da modelagem 2D proposta utilizando as equações (1),(2) e (3),
- A anomalia calculada é comparada com a anomalia observada produzindo um resíduo  $res_j = g_{obs_j} - g_{calc_j}$ ,
- uma atualização da profundidade é feita a partir da expressão  $z_{j+1} = z_j + \frac{g_{obs_j} - g_{calc_j}}{2\pi\gamma\Delta\rho}$ ,
- o processo é reiterado até que a anomalia calculada se ajuste a anomalia observada, ou seja,  $g_{obs_j} - g_{calc_j} \approx 0$

### Critério de Parada

O método de inversão utilizado no trabalho não tem um critério bem definido de parada então para isso foi necessário definir um erro quadrático médio a partir das anomalias calculadas e observadas. O erro do dado foi definido como:

$$\epsilon_{rms}^d = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (g_{obs_j} - g_{calc_j})^2}{\sum_{j=1}^N g_{obs_j}^2}} \times 100, \quad (4)$$

também nos dados sintéticos, exclusivamente, foi feito o erro do modelo que é definido por:

$$\epsilon_{rms}^m = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (z_{verd_j} - z_{est_j})^2}{\sum_{j=1}^N z_{verd_j}^2}} \times 100. \quad (5)$$

## Resultados.

### Separação Residual-Regional

A separação residual-regional dos dados foi feita através do ajuste polinomial pelo método dos mínimos quadrados. Inicialmente foram construídos três perfis no mapa de anomalia Bouguer Figura (2). O dado foi continuado para

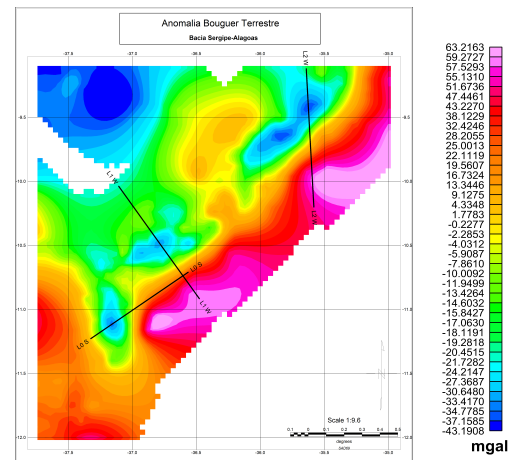


Figura 2: Três perfis realizados no dado observado para fazer a separação residual-regional.

cima com o intuito de eliminar as altas frequências e destacar a tendência do regional. A partir da continuação a 40 km o dado não sofre nenhuma alteração. A partir daí comparou-se com o regional dos mínimos quadrados de ordem 3, pois o regional de ordem 1 e 2 não apresentava feições concordantes. O melhor regional foi o de ordem 3 do método dos mínimos quadrados.

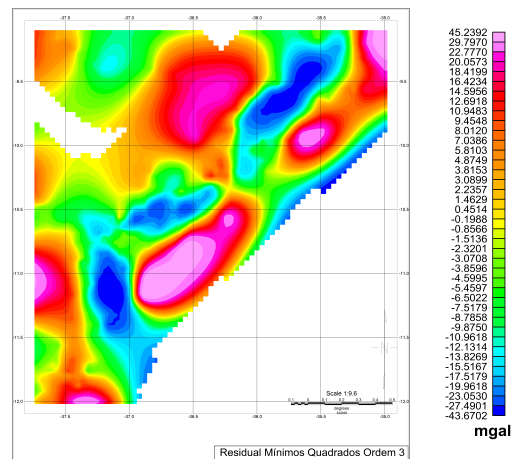


Figura 3: Residual mínimos quadrados de ordem 3 utilizado na modelagem e inversão gravimétrica do dado real.

*Inversão dos Dados Sintéticos*

Os dois modelos sintéticos de profundidade utilizados na modelagem foram retirados do modelo de profundidade 3D do trabalho de Mojica e Bassrei, 2014 figura (4).

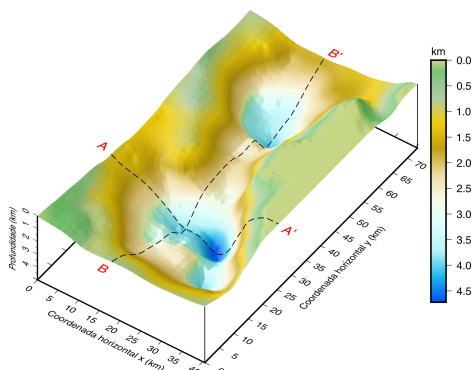


Figura 4: Modelo 3D de profundidade para a criação dos modelos sintéticos. O perfil A-A' foi modelado com 28 prismas e o perfil B-B' foi modelado com 50 prismas. (Adaptado de Mojica e Bassrei, 2014)

O modelo 1 foi o A-A' e o modelo 2 foi B-B' figuras (5) e (6), respectivamente. As figuras a seguir mostram o modelo de profundidade e o ajuste entre anomalia observada e calculada figura (7) e figura (11).

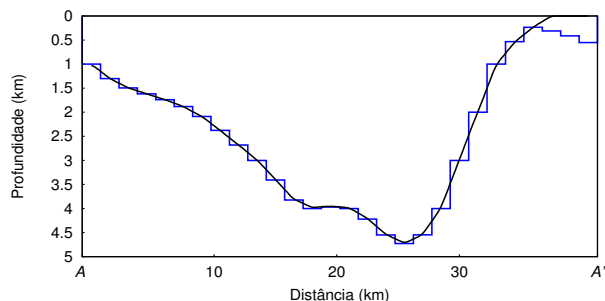


Figura 5: Modelo 1 de profundidade constituído de 28 prismas. Perfil A-A'

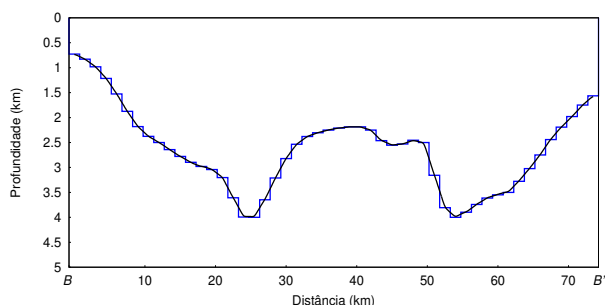


Figura 6: Modelo 2 de profundidade constituído de 50 prismas. Perfil B-B'

A inversão dos modelos sintéticos atingiram o critério de parada de um erro do dado de 0,01% para o modelo 1 (A-A') figura (9) e 0,001% para o modelo 2 (B-B') figura (13), respectivamente. O modelo de profundidade encontrado para o perfil A-A' e para o perfil B-B', estão próximos aos modelos verdadeiros. Podemos constatar estes resultados

na figuras (8) e (12). Na figura (10) e (14) os erros dos modelos ficaram em torno de 0,31% para o modelo A-A' e 0,92% para o modelo B-B' erros aceitáveis em inversões gravimétricas. Na figura (14) nota-se que com o aumento do número de iterações o erro aumenta, isso se deve a uma limitação do método de inversão que com o aumento do número de iterações o gradiente de convergência piora.

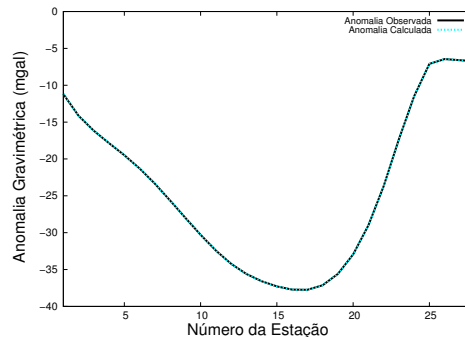


Figura 7: Figura da comparação entre a anomalia observada (preto) e a anomalia calculada (azul) para o modelo 1.

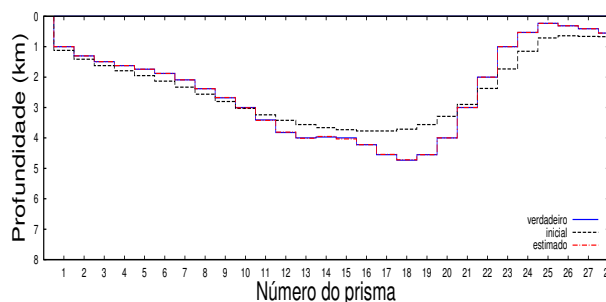


Figura 8: Inversão do modelo 1 sintético de 28 prismas.

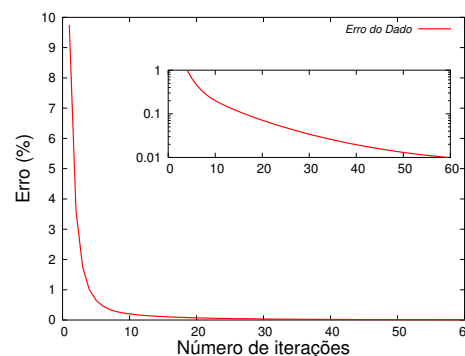


Figura 9: Erro da anomalia gravimétrica-Modelo 1. A estimativa inicial começa com um erro maior do que 9,7 %.

*Inversão dos Dados Reais.*

Os dados reais foram fornecidos pela ANP (Agência Nacional de Petróleo) para o projeto GEOTERM/SE-AL, os quais foram processados e corrigidos e conseqüentemente utilizados no presente trabalho. Para realizar a inversão dos dados reais empregaram-se três perfis do residual de ordem 3 do método dos mínimos quadrados figura (15). O datum de referência foi o SAD69. A distância entre as estações foi de aproximadamente 4,4 km.

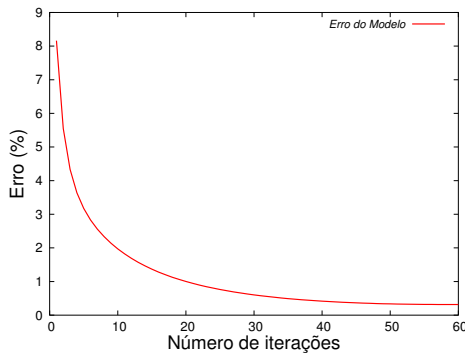


Figura 10: Erro do modelo de profundidade- Modelo 1. Após atingir o critério de parada o erro do modelo ficou em torno de 0,31 %.

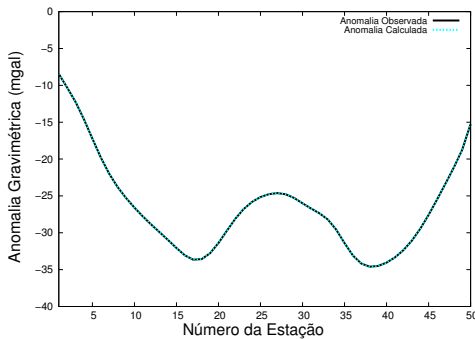


Figura 11: Figura da comparação entre a anomalia observada (preto) e a anomalia calculada (azul) para o modelo 2.

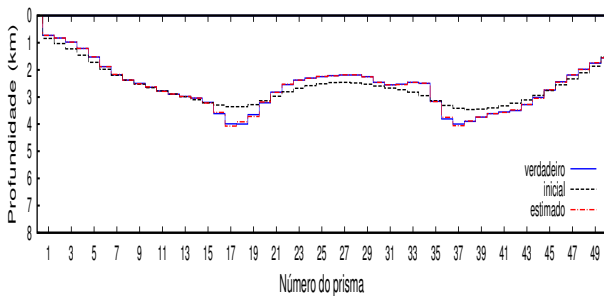


Figura 12: Inversão do modelo 2 sintético de 50 prismas.

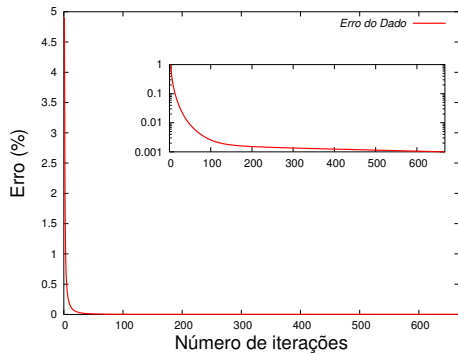


Figura 13: Erro do dado-Modelo 2. A estimativa inicial começa com um erro maior do que 4,9 %.

*Inversão Perfil-L0*

O perfil L0 contém 31 estações gravimétricas e por isso foram utilizados 31 prismas. Na modelagem utilizada

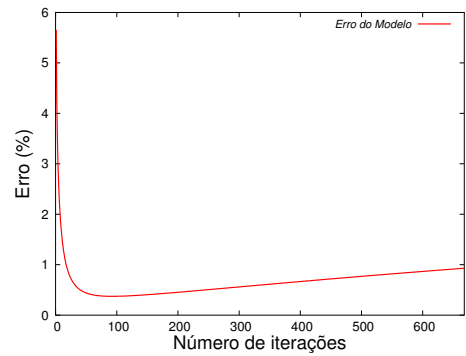


Figura 14: Erro do modelo de profundidade- Modelo 2. Após atingir o critério de parada o erro do modelo ficou em torno de 0,92 %.

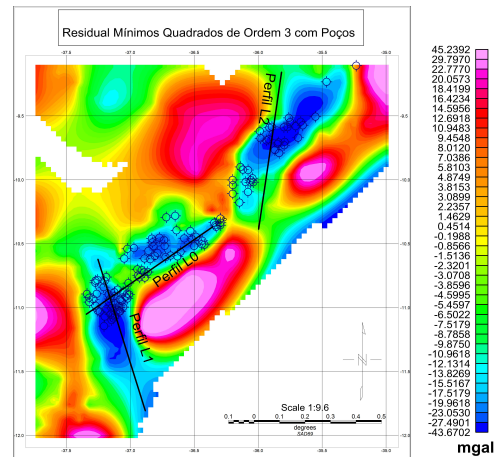


Figura 15: Residual de ordem 3 do método de mínimos quadrados. Três perfis foram tomados para realizar a inversão e os valores de profundidade encontrados pela inversão foram comparados com os valores verdadeiros de profundidade encontrado nos poços (azul) como mostra a figura.

para inverter o dado real utilizou-se um contraste de densidade de  $-0,25g/cm^3$  e obtiveram-se valores máximos de profundidade de  $2,9km$ , figura (17). A inversão utilizou como critério de para um erro do dado menor que 0,001%, figura (18). Na inversão do perfil L0 percebe-se que a convergência é rápida precisando apenas de 22 iterações para que o erro seja menor que 0,001%. O modelo de profundidade encontrado na inversão do perfil-L0 apresenta uma correspondência com a anomalia observada.

*Inversão Perfil-L1*

A inversão do perfil L1 ocorreu também com um contraste de densidade de  $-0,25g/cm^3$ . O critério de parada considerado foi um erro de 0,001% para o ajuste dos dados, figura(21). O perfil L1 apresenta 32 estações gravimétricas e a inversão ocorreu também com 32 prismas e obteu-se valores máximos de profundidade de  $4 km$ , figura (20). No perfil L1 foram necessárias 39 iterações para que o erro do ajuste fosse menor do que 0,001%. O modelo de profundidade encontrado na inversão do perfil-L1 também apresenta uma correspondência com a

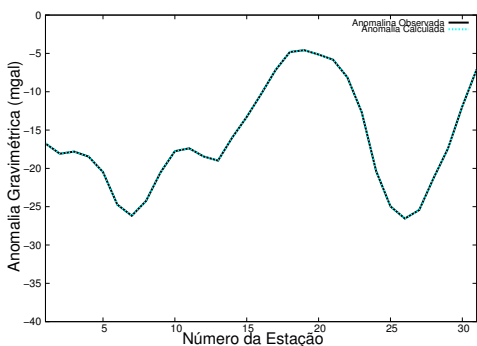


Figura 16: Comparação entre a anomalia observada (preto) e a anomalia calculada (azul) para o perfil L0.

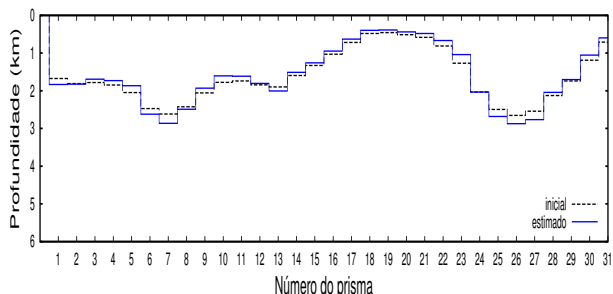


Figura 17: Modelo de profundidade encontrado para o perfil L0.

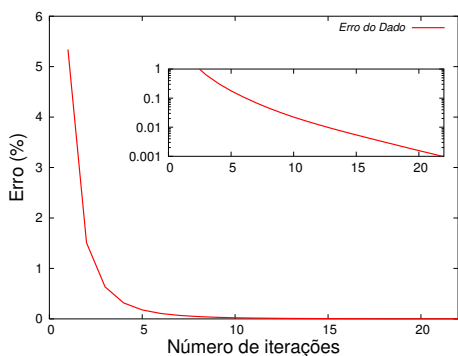


Figura 18: Erro do dado para o perfil L0.

anomalia observada.

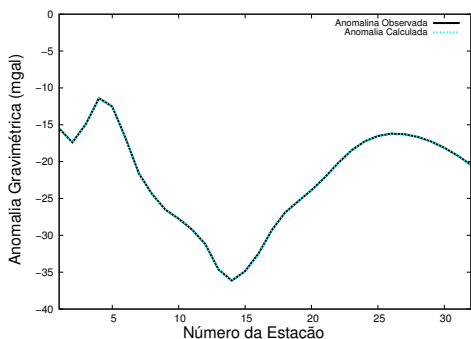


Figura 19: Ajuste entre a anomalia observada (preto) e a anomalia calculada (azul) para o perfil L1.

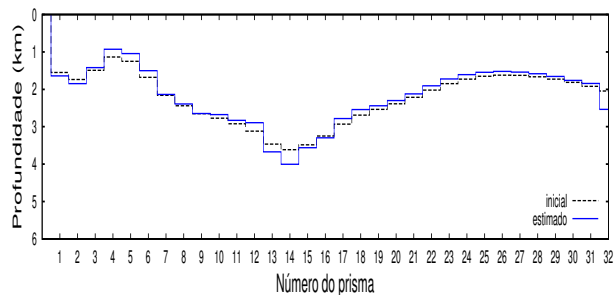


Figura 20: Modelo de profundidade encontrado para o perfil L1.

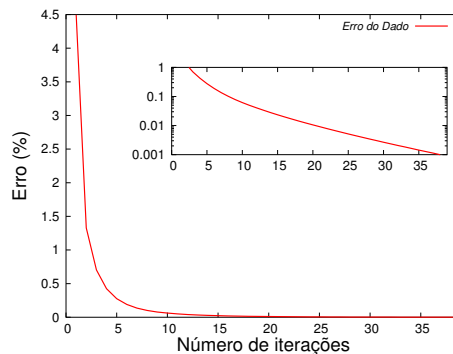


Figura 21: Erro do dado para o perfil L1.

*Inversão Perfil-L2*

A inversão do perfil L2 ocorreu também com um contraste de densidade de  $-0,25g/cm^3$  o critério de parada considerado foi um erro do ajuste sendo menor que 0,001%, figura (24). O perfil L2 apresenta 32 estações gravimétricas e a inversão ocorreu também com 32 prismas e obteve-se valores máximos de profundidade de 3,2 km, figura(23). No perfil L2 foram necessárias 22 iterações para que o erro do ajuste fosse menor do que 0,001%.

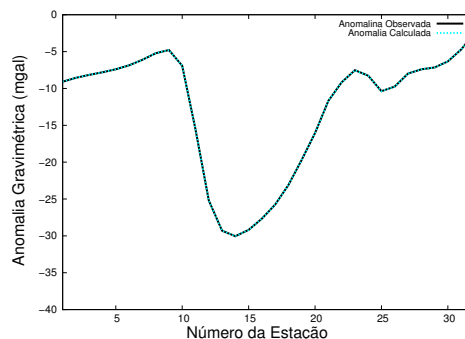


Figura 22: Comparação entre a anomalia observada (preto) e a anomalia calculada (azul) para o perfil L2.

Com o intuito de validar a inversão dos dados gravimétricos da Bacia Sergipe e Alagoas, foram feitas comparações pontuais entre as soluções de profundidade obtidas pela inversão com medidas de poços da profundidade do embasamento. As tabelas (1),(2) e (3) mostram os pontos onde se conhece a profundidade verdadeira e a profundidade estimada encontrada pela inversão. Os resultados encontrados apresentam uma

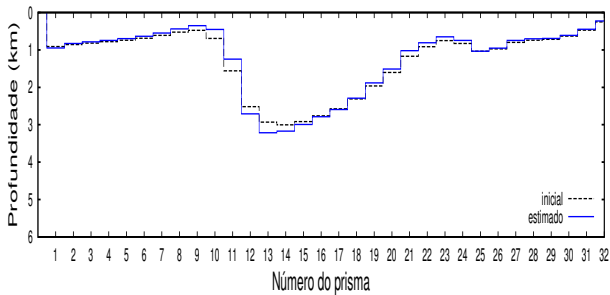


Figura 23: Modelo de profundidade encontrado para o perfil L2.

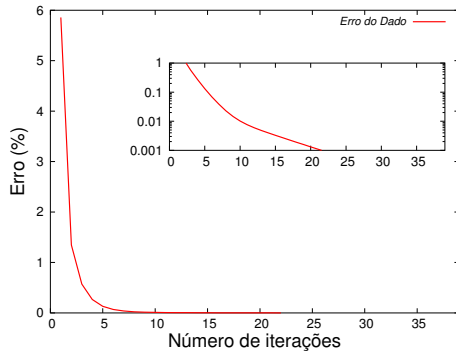


Figura 24: Erro do dado para o perfil L2.

Tabela 1: Profundidades para o Perfil L0.

Long.	Lat.	Verd.(km)	Ini.(km)	Est.(km)
-36,68	-10,59	1,81	1,73	1,61
-37,12	-10,91	2,57	2,49	2,67

Tabela 2: Profundidades para o Perfil L1.

Long.	Lat.	Verd.(km)	Ini.(km)	Est.(km)
-37,16	-10,89	2,74	2,44	2,39
-37,12	-11,00	2,50	2,92	2,83

Tabela 3: Profundidades para o Perfil L2.

Long.	Lat.	Verd.(km)	Ini.(km)	Est.(km)
-35,89	-9,58	2,66	2,51	2,70
-35,91	-9,68	3,19	3,00	3,17

diferença mínima de 20 m e máxima de 300 m. Baseado no método de inversão o resultado se mostrou aceitável já que o mesmo apresenta limitações, as quais são contraste de densidade constante, um gradiente de convergência ruim com o aumento do número de iterações, que por sua vez impossibilitaram de encontrar valores mais próximos dos valores reais.

**Conclusões**

Após a separação regional-residual foi feita uma modelagem gravimétrica 2D e uma posterior inversão utilizando o método de Bott (1960). A modelagem e o método de Bott (1960) se mostraram eficazes para se obter o delineamento do relevo do embasamento adotando o contraste de densidade de  $-0,25g/cm^3$ .

O resultado para os dois modelos sintéticos invertidos no trabalho foram satisfatórios, visto que o relevo estimado e o relevo verdadeiro apresentaram um erro em torno de 1%. A inversão dos modelos reais convergiu em um pequeno número de iterações e os valores de profundidade estimados ficaram relativamente próximos dos valores verdadeiros de profundidade.

**Agradecimentos**

Os autores agradecem ao Centro de Pesquisas em Geofísica e Geologia-(CPGG/UFBA), Laboratório De Física Nuclear Aplicada-(LFNA/IF-UFBA), e à Agência Nacional de Petróleo (ANP) pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

**Referências**

Blakely, R. J. (1996) Potential theory in gravity and magnetic applications, Cambridge University Press.

Bott, M. (1960) The use of rapid digital computing methods for direct gravity interpretation of sedimentary basins, *Geophysical Journal International*, **3**(1):63-67.

Last, B. e Kubik, K. (1983) Compact gravity inversion, *Geophysics*, **48**(6):713-721.

Mojica, O. F. e Bassrei, A. (2014) Critério da validação cruzada generalizada na seleção do parâmetro ótimo de regularização na inversão paralelizada de dados gravimétricos 3d de bacias sedimentares com densidade variavel, VI Simpósio Brasileiro de Geofísica.

Soares, D. L. d. S. S. (2013) Inversão de Dados Gravimétricos 2-D pelos Métodos de Levenberg-Marquardt Resfriamento Simulado Muito Rápido e Híbrido, Dissert. de Mestrado, Universidade Federal Da Bahia.

Talwani, M. e Ewing, M. (1960) Rapid computation of gravitational attraction of three- dimensional bodies of arbitrary shape, *Geophysics*, **25**(1):203-225.