



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**KARINA PALHETA GOMES**

**ADAPTAÇÃO DO MÉTODO DE BOTT PARA CONTRASTE  
DE DENSIDADE VARIANDO COM A PROFUNDIDADE**

**BELÉM  
2013**

**KARINA PALHETA GOMES**

**ADAPTAÇÃO DO MÉTODO DE BOTT PARA CONTRASTE  
DE DENSIDADE VARIANDO COM A PROFUNDIDADE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Geofísica.

Área de Concentração: Métodos Gravimétrico e Magnético

Orientadora: Darciléa Ferreira Santos.

Co-Orientador João Batista Corrêa da Silva.

**Belém - Pará  
2013**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFPA

---

Gomes, Karina Palheta

Adaptação do método de Bott para contraste de densidade variando com a profundidade / Karina Palheta Gomes - 2013.

Orientadora: Darcicléa Ferreira Santos

Coorientador: João Batista Corrêa da Silva

Dissertação (mestrado em geofísica) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Belém, 2013.

1. Bacias sedimentares (geofísica). 2. Gravimetria. 3. Relevo do embasamento. 4. Interpretação gravimétrica. 5. Placa Bouguer. 6. Contraste de densidade hiperbólico. Título.

CDD 22° ed.: 551.483

---

**KARINA PALHETA GOMES**

**ADAPTAÇÃO DO MÉTODO DE BOTT PARA CONTRASTE  
DE DENSIDADE VARIANDO COM A PROFUNDIDADE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Geofísica.

Data de aprovação: 23/08/2013  
Banca examinadora:



Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Darcicléa Ferreira Santos - Orientadora (UFPA)



Prof. Dr. João Batista Corrêa da Silva - Co-orientador (UFPA)



Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Valéria Cristina Ferreira Barbosa - Membro (ON)

*Aos meus avós Antônio Soares Palheta e Izabel Zacarias Palheta, que ao completarem 69 anos de matrimônio demonstram que um amor incondicional é capaz de perpetuar-se como fonte inesgotável de companheirismo e humildade por várias décadas.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar, a Deus por mais uma vez mostrar sua fidelidade em minha vida e iluminar o meu caminho em todas as minhas escolhas, decisões e projetos.

Agradeço aos meus pais, José Maria Nascimento Gomes e Maria do Carmo Palheta Gomes, que, com muito amor e humildade, me conduziram numa formação que foi o pilar, para as minhas conquistas. Muito obrigado pelo apoio incessante e por este amor incondicional.

A minhas irmãs Keila Palheta e Kivia Palheta Gomes que serviram de inspiração na minha vida profissional.

Ao Companheiro, Marco Aurélio Benevides Maia Figueiredo, pela dedicação, amor, constante estímulo e principalmente, pela paciência com que me acompanhou durante este percurso de muito estudo.

A Professora Dr<sup>a</sup> Darcicléa Ferreira Santos, agradeço pela sua orientação, apoio, disponibilidade fornecida, partilha de conhecimentos e amizade incondicional. Tê-la como minha orientadora foi um privilégio, afinal de contas o seu desprendimento e sua notável atenção perante as minhas dúvidas contribuíram efetivamente para realização deste trabalho. Da mesma forma, expresso meu carinho aos professores que tiveram participação em meu crescimento profissional, com os quais fiz disciplinas durante a graduação e no mestrado.

Agradeço ao meu grande amigo Raphael Di Carlo Silva dos Santos, pois em todos os momentos desta caminhada, estivemos juntos, sempre sendo o apoio, um do outro.

Às secretárias Benildes Lopes e Lucibela Cardias, amigas de todas as horas, pelo carinho e generosidade dedicados durante essa gratificante e realizadora jornada.

Por fim, agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica que me concedeu a chance de obter este título e ao CNPQ pelo suporte e investimento em forma de bolsa de estudo.

*"Apesar dos nossos defeitos, precisamos enxergar que somos pérolas únicas no teatro da vida e entender que não existem pessoas de sucesso e pessoas fracassadas. O que existem são pessoas que lutam pelos seus sonhos ou desistem deles."*

*Augusto Cury*

## RESUMO

Apresentamos um novo método para estimar o relevo do embasamento de bacias sedimentares através da extensão analítica da expressão da placa Bouguer para contraste de densidade entre o pacote sedimentar e o embasamento decrescendo monotonicamente com a profundidade de acordo com uma lei hiperbólica. O método requer ruído contido nos dados gravimétricos tenha desvio padrão inferior a 0,01 mGal. As estimativas do relevo do embasamento são obtidas nas posições espaciais localizadas diretamente abaixo de cada observação. A metodologia foi aplicada a dados sintéticos de bacias sedimentares simuladas apresentando relevo do embasamento suave. O método produziu relevo do embasamento estimado próximo do relevo simulado. O método foi também aplicado a três conjuntos de dados reais: Bacia do Recôncavo (Brasil), Graben do Büyük Menderes (Turquia) e Graben de San Jacinto (Estados Unidos). As soluções produzidas pelo método proposto apresentaram estimativas de profundidades máximas em acordo com as informações geológicas disponíveis: 6 km para Bacia do Recôncavo, 1,6 km para Vale do Büyük Menderes e 2,2 km para Graben de San Jacinto.

Palavras-Chave: Bacias sedimentares. Gravimetria. Relevo do embasamento. Interpretação gravimétrica. Placa Bouguer. Contraste de densidade hiperbólico.

## **ABSTRACT**

We present a new method to estimate the basement relief of a sedimentary basin through the analytic extension of the expression of the slab Bouguer for the case of a density contrast between the basement and the sediments decreasing monotonically with depth according to a hyperbolic law. The method requires that the noise in data have a standard deviation smaller than 0.01 mGal. The basement relief estimates are obtained at positions located directly below each observation. The methodology was applied on synthetic data from a simulated sedimentary basin presenting smooth basement relief. The method produced estimated basement topographies close to simulated basement topographies. The method was also applied to three sets of real Bouguer anomalies: Recôncavo Basin (Brazil), Büyük Menderes Graben (Turkey) and San Jacinto Graben (United States). The solutions produced by the proposed method attained maximum basement depth estimates in accordance with the available geological information: 6 km to Reconcavo Basin, 1.6 km to Büyük Menderes Valley, and 2.2 km to San Jacinto Graben.

**Key words:** Sedimentary basins. Gravimetry. Basement relief. Gravimetric interpretation. Bouguer slab. Hyperbolic density contrast.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 2.1 – (a) Anomalia gravimétrica e (b) superfície  $S$  do relevo do embasamento de uma bacia sedimentar.....17
- Figura 2.2 – Modelo interpretativo constituído de  $M$  prismas 2D retangulares justapostos.....18
- Figura 2.3 – Ilustração esquemática da estimativa da profundidade  $p_2^k$  em função do valor da estimativa da profundidade anterior  $p_2^{k-1}$  e do resíduo gravimétrico  $\Delta g_i^k$  .....21
- Figura 3.1– Ambiente I. (a) Anomalia gerada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) relevos verdadeiro (linha azul) e estimado (linha tracejada vermelha).....27
- Figura 3.2– Ambiente II. (a) Anomalias gerada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) relevos verdadeiro (linha azul) e estimado (linha tracejada vermelha).....28
- Figura 3.3– Ambiente III. (a) Anomalia gerada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) relevos verdadeiro (linha azul) e estimado (linha tracejada vermelha).....29
- Figura 4.1 – Localização, limites e arcabouço estrutural da bacia do Recôncavo, mapeado ao nível da seção pré-*rift*.....30
- Figura 4.2 – Seção geológica esquemática NW-SE, ilustrando a morfologia de meio-graben da bacia do Recôncavo.....31
- Figura 4.3 – Mapa gravimétrico devido ao relevo do embasamento da Bacia do Recôncavo mostrando a posição do perfil gravimétrico interpretado PP’ .....32
- Figura 4.4 – Bacia do Recôncavo. (a) anomalia observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha) (b) relevo do embasamento estimado (linha vermelha).....34
- Figura 4.5 – Mapa geológico do vale do Büyük Menderes. A linha tracejada em vermelho assinala a posição do perfil X-Y, transversal ao vale.....35
- Figura 4.6 – Vale do Büyük Menderes. (a) anomalias Observadas (pontos azuis) e ajustadas (linha vermelha) (b) relevo do embasamento estimado (linha vermelha) .....37
- Figura 4.7 – Graben do San Jacinto. (a) anomalias Observadas (pontos azuis) e ajustadas (linha vermelha) (b) relevo do embasamento estimado (linha vermelha).....39

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	13
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA</b>	17
<b>2.1</b>	<b>Inversão não linear</b>	18
<b>2.2</b>	<b>Alternativa ao problema não linear</b>	20
2.2.1	Abordagem teórica	20
2.2.1.1	Casos particulares	22
2.2.1.1.1	Método de Bott	22
2.2.1.1.2	Método de Granser	23
2.2.1.1.3	Método proposto	24
2.2.2	Abordagem aproximada	24
2.2.2.1	Análise do desempenho	25
<b>3</b>	<b>TESTES COM DADOS SINTÉTICOS</b>	26
<b>3.1</b>	<b>Ambiente I</b>	26
<b>3.2</b>	<b>Ambiente II</b>	27
<b>3.3</b>	<b>Ambiente III</b>	28
<b>4</b>	<b>APLICAÇÃO A DADOS REAIS</b>	30
<b>4.1</b>	<b>Bacia do Recôncavo</b>	30
4.1.1	Informações geológicas e geofísicas	30
4.1.2	Resultados	33
<b>4.2</b>	<b>Vale do Büyük Menderes</b>	35
4.2.1	Informações geológicas e geofísicas	35
4.2.2	Resultados	36
<b>4.3</b>	<b>Graben de San Jacinto</b>	38
4.3.1	Informações geológicas e geofísicas	38

4.3.2	Resultados	38
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>40</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>41</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O método gravimétrico é um dos métodos geofísicos frequentemente aplicados em um programa de exploração de óleo e gás. A interpretação gravimétrica de bacias sedimentares é usada na obtenção de informações sobre feições geológicas propícias à acumulação de óleo e gás. A identificação de feições geológicas como falhas e elevações na topografia do embasamento, que podem acumular hidrocarbonetos torna o delineamento do relevo do embasamento de uma bacia sedimentar de extrema importância para as pesquisas voltadas à exploração de petróleo.

Atualmente, as técnicas aplicadas na delimitação do relevo do embasamento a partir de dados gravimétricos geralmente utilizam métodos de inversão não linear. Estes métodos empregam um funcional matemático que relaciona o efeito gravimétrico com o modelo interpretativo, normalmente definido por um conjunto de prismas retangulares justapostos (BARBOSA; SILVA; MEDEIROS, 1999; CHAKRAVARTHI; RAGHURAM; SINGH, 2002; MARTINS et al., 2011) para produzir a anomalia teórica. O problema de inversão não linear consiste na estimação das espessuras dos prismas, considerando o contraste de densidade entre os sedimentos e o embasamento, constante ou variável apenas com a profundidade. O problema não linear é resolvido por procedimentos iterativos comumente resolvendo-se um sistema linear de equações em cada uma das iterações. A solução do sistema linear com dimensão igual ao número de parâmetros (SILVA; COSTA; BARBOSA, 2006; MARTINS et al, 2011) eleva o tempo computacional necessário para obter as estimativas dos parâmetros a cada iteração.

A redução do tempo computacional necessário para delimitar o relevo do embasamento pode ser alcançada utilizando-se procedimentos iterativos já desenvolvidos anteriormente com base na expressão da anomalia gravimétrica da placa Bouguer com contraste de densidade constante (BOTT, 1960; CORDELL; HENDERSON, 1968). Estes procedimentos iterativos não invertem matrizes em cada iteração, o que reduz substancialmente o tempo computacional para obter as correções das estimativas dos parâmetros. Estes métodos iterativos requerem uma aproximação inicial das estimativas de profundidades e, a partir da segunda iteração as estimativas da iteração anterior são corrigidas. O método de Bott (BOTT, 1960), por exemplo, produz a profundidade do relevo do embasamento localizado abaixo de cada observação

utilizando a relação matemática entre a observação gravimétrica e a espessura de uma placa Bouguer com contraste de densidade constante. Na primeira iteração o método utiliza a própria anomalia observada e a partir da segunda iteração corrige as estimativas, somando a elas correções proporcionais ao resíduo entre as observações e o ajuste obtido na iteração anterior. Cordell e Henderson (1968), por sua vez, obtêm uma solução do relevo do embasamento calculando na primeira iteração a mesma estimativa da primeira iteração do método de Bott (1960) e obtendo, nas iterações posteriores, estimativas de profundidades multiplicando as estimativas anteriores pela razão entre a anomalia observada e a ajustada na iteração anterior.

O uso de contrastes de densidade constantes, no entanto, não é adequado, uma vez que, ao longo do tempo geológico, os sedimentos que preenchem a bacia sofrem soterramento e compactação, elevando dessa maneira a densidade do pacote sedimentar à medida que a profundidade de soterramento aumenta. Logo, procedimentos que admitem contrastes de densidade decrescendo monotonicamente com a profundidade de acordo com uma lei matemática pré-definida (e.g. CORDELL, 1973; BHASKARA RAO, 1986; GRANSER, 1987; RAO; PRAKASH; BABU, 1990) são mais adequados aos ambientes geológicos reais. À exceção do método de Cordell (1973), que será discutido mais abaixo, procedimentos iterativos e computacionalmente efetivos para delinear o relevo do embasamento de bacias sedimentares que apresentam variação do contraste de densidade com a profundidade utilizam expressões associadas à placa Bouguer. Estes procedimentos podem ser divididos em dois grupos: i) aqueles que empregam expressões analíticas da anomalia gravimétrica de uma placa Bouguer com contraste de densidade variável de acordo com uma lei matemática pré-estabelecida (GRANSER, 1987) e ii) expressões aproximadas da anomalia gravimétrica obtidas pela substituição do contraste de densidade constante pelo contraste de densidade variável na expressão da anomalia gravimétrica de uma placa Bouguer com contraste de densidade constante (BHASKARA RAO, 1986; RAO; PRAKASH; BABU, 1990).

Cordell (1973) produz as estimativas das profundidades na primeira iteração utilizando uma expressão analítica derivada da placa Bouguer com contraste de densidade variando exponencialmente com a profundidade. Para as demais iterações é empregado um conjunto de placas com dimensões horizontais finitas ao longo da direção do perfil. A expressão resultante não permite uma forma explícita para a estimativa do relevo em termos da anomalia gravimétrica, e é resolvida, portanto, através do Método do Ponto Fixo. Adicionalmente, o

método exige o conhecimento da anomalia gravimétrica e do seu gradiente vertical, o que complica a implementação e onera o tempo computacional exigido para obter a solução.

Neste trabalho propomos delinear o relevo do embasamento de bacias sedimentares admitindo diminuição do contraste de densidade com a profundidade do pacote sedimentar através de um procedimento iterativo utilizando uma expressão analítica. Esta expressão foi derivada da expressão da anomalia gravimétrica de uma placa Bouguer com variação hiperbólica do contraste de densidade com a profundidade. Ela relaciona a profundidade da base da placa Bouguer com a profundidade do topo, com os parâmetros que controlam a variação de densidade e com o resíduo entre a anomalia observada e aquela produzida por uma solução tentativa. Elaboramos um algoritmo iterativo similar ao algoritmo do método de Bott (1960), aplicando a expressão desenvolvida neste trabalho em todas as iterações.

Para produzir soluções estáveis o método proposto, da mesma forma que o método de Bott (1960), deve ser aplicado a dados gravimétricos contaminados com ruído aleatório cujo desvio padrão deve ser no máximo de 0,01 mGal. O delineamento do relevo do embasamento é obtido calculando-se a profundidade da base de uma placa Bouguer situada diretamente abaixo de uma observação gravimétrica, utilizando a expressão analítica desenvolvida. Na primeira iteração utilizamos os dados observados e fixamos o topo da placa Bouguer na superfície terrestre para estimar a profundidade do embasamento,  $h_i$ , abaixo de cada observação. Geramos a anomalia gravimétrica teórica, utilizando a expressão teórica da observação gravimétrica produzida por um conjunto de prismas 2D, retangulares justapostos, com contraste de densidade decrescendo em profundidade de acordo com a lei presumida. A espessura de cada prisma é dada pela estimativa  $h_i$ . A partir da segunda iteração, o método produz a estimativa do relevo do embasamento através da mesma expressão analítica, substituindo a anomalia pela diferença entre a anomalia observada e a calculada com a aproximação do relevo da iteração anterior.

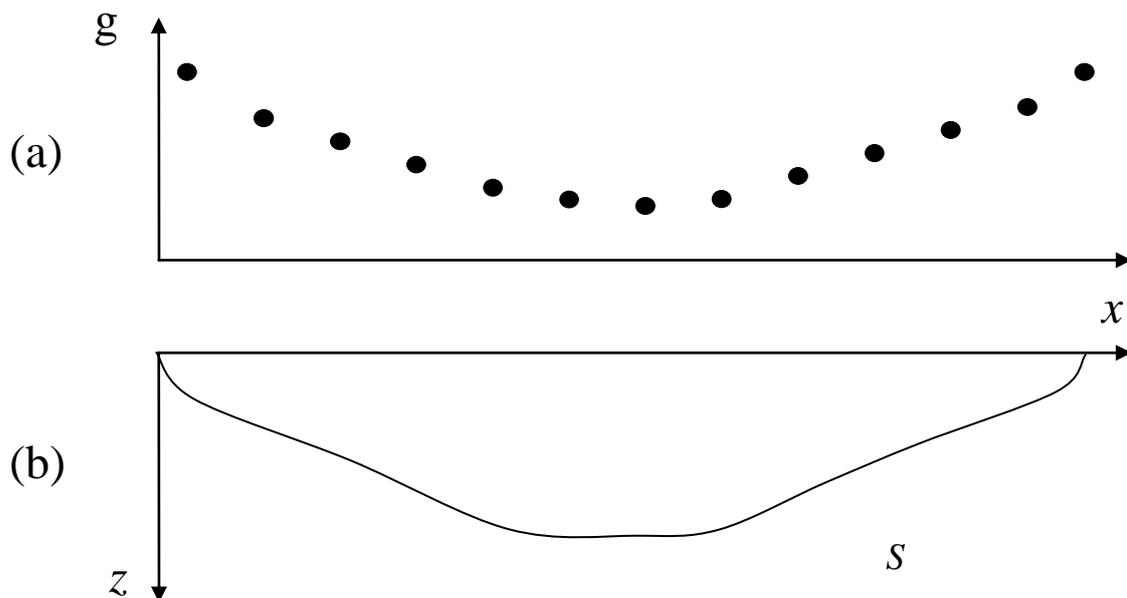
Aplicamos o método proposto em anomalias gravimétricas sintéticas produzidas por bacias sedimentares simuladas que apresentam relevo do embasamento predominantemente suave. Os testes com dados sintéticos mostraram que o método proposto delineou um relevo de embasamento próximo ao relevo do embasamento verdadeiro dos ambientes geológicos simulados. O método também foi aplicado aos seguintes conjuntos de dados reais: Bacia do Recôncavo (Brasil), Vale do Büyük Menderes (Turquia) e Graben de San Jacinto (Estados Unidos). As soluções produzidas pelo método proposto aproximaram-se das profundidades

máximas previstas por informações dos ambientes geológicos: 6 km para Bacia do Recôncavo, 1,6 km para Vale do Büyük Menderes e 2,2 km para Graben de San Jacinto.

## 2 METODOLOGIA

Seja  $g^o$  um conjunto de  $N$  observações gravimétricas (Figura 2.1a) produzido por uma bacia sedimentar bidimensional (Figura 2.1b). A densidade das rochas sedimentares da bacia é presumida variar monotonicamente com a profundidade de acordo com uma lei hiperbólica (LITINSKY, 1989). A dimensão infinita da bacia sedimentar 2D coincide com o eixo  $y$  e os dados são obtidos ao longo do eixo  $x$  de um sistema destro de coordenadas, transversal a essa direção da bacia.

Figura 2.1 – (a) Anomalia gravimétrica e (b) superfície  $S$  do relevo do embasamento de uma bacia sedimentar.



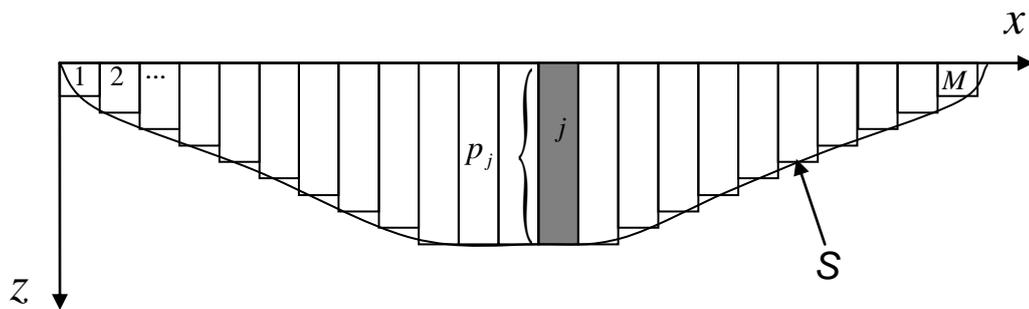
Fonte: Da autora

Deseja-se estimar o relevo do embasamento da bacia (linha  $S$  na Figura 2.1b) pressupondo conhecidos os dados gravimétricos  $g^o$  e o contraste de densidade,  $\Delta\rho$ , entre o pacote sedimentar e o embasamento, que diminui com a profundidade segundo uma lei hiperbólica (LITINSKY, 1989)

$$\Delta\rho \equiv \Delta\rho(z) = \frac{\Delta\rho_0\beta^2}{(z + \beta)^2}, \quad (2.1)$$

em que  $\beta$  é o fator que controla a diminuição do contraste de densidade com a profundidade, expresso em unidades de comprimento e  $\Delta\rho_0$  é o contraste de densidade na superfície. Os parâmetros  $\Delta\rho_0$  e  $\beta$  são constantes e conhecidos. Presume-se ainda que o relevo do embasamento pode ser aproximado por um modelo interpretativo formado por um conjunto de  $M$  prismas 2D retangulares justapostos (Figura 2.2), com topos na superfície, extensões constantes ao longo da direção  $x$ , estabelecidas pelo intérprete, e infinitos na direção  $y$ .

Figura 2.2 – Modelo interpretativo constituído de  $M$  prismas 2D retangulares justapostos.



Fonte: Da autora

## 2.1 Inversão não linear

As espessuras dos prismas,  $p_j$ ,  $j = 1, \dots, M$ , são os parâmetros a serem estimados e estão relacionados à observação gravimétrica  $g_i$  através da relação não linear

$$\mathbf{g} \equiv \{g_i\} = g(x_i, \mathbf{p}, \Delta\rho) = \sum_{j=1}^M F(x_i, p_j, \Delta\rho), \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (2.2)$$

em que  $\mathbf{g}$  é o vetor  $N$ -dimensional de anomalias gravimétricas teóricas com  $i$ -ésimo elemento  $g_i$ ,  $\mathbf{p}$  é o vetor  $M$ -dimensional contendo as espessuras  $p_j$  e  $F(x_i, p_j, \Delta\rho)$  é uma função não linear que fornece a observação gravimétrica teórica produzida na posição  $x_i$  por um prisma

com espessura  $p_j$ . A função  $F(x_i, p_j, \Delta\rho)$  é apresentada por Visweswara Rao, Chakravarthi e Raju (1994).

As estimativas das  $M$  espessuras  $\hat{\mathbf{p}}$  são geralmente obtidas minimizando a norma da diferença entre os vetores  $\mathbf{g}^o$  e  $\mathbf{g}$ , através do procedimento iterativo de Gauss-Newton modificado pelo Método de Marquardt, que exige uma estimativa inicial  $\hat{\mathbf{p}}^k$  para determinar o novo vetor de parâmetros  $\hat{\mathbf{p}}^{k+1}$  utilizando a seguinte expressão

$$\hat{\mathbf{p}}^{k+1} = \Phi(\hat{\mathbf{p}}^k, \lambda, \mathbf{I}, \mathbf{A}^k, \Delta\mathbf{g}^k), \quad (2.3)$$

em que  $\lambda$  é um escalar positivo modificado em cada iteração denominado de parâmetro de Marquardt (MARQUARDT, 1963),  $\mathbf{I}$  é a matriz identidade de dimensão  $M \times M$ ,  $\mathbf{A}^k$  é a matriz Jacobiana de dimensão  $N \times M$  da observação gravimétrica teórica  $\mathbf{g}$  (equação 2.2) avaliado em  $\hat{\mathbf{p}}_k$  e  $\Delta\mathbf{g}^k$  é o vetor do resíduo gravimétrico  $N$ -dimensional definido pela diferença entre os vetores  $\mathbf{g}^o$  e  $\mathbf{g}$  avaliado em  $\hat{\mathbf{p}}_k$ . O elemento  $a_{ij}^k$  da matriz Jacobiana  $\mathbf{A}^k$  é definido por

$$a_{ij}^k = \left. \frac{\partial g_i}{\partial p_j} \right|_{p_j = \hat{p}_j^k}. \quad (2.4)$$

A expressão 2.3 pode ser redefinida por

$$\hat{\mathbf{p}}^{k+1} = \hat{\mathbf{p}}^k + \Delta\hat{\mathbf{p}}^k, \quad (2.5)$$

em que  $\Delta\hat{\mathbf{p}}^k$  é o vetor-correção na  $k$ -ésima iteração definido por

$$\Delta\hat{\mathbf{p}}^k = \left[ (\mathbf{A}^k)^T \mathbf{A}^k + \lambda \mathbf{I} \right]^{-1} (\mathbf{A}^k)^T \Delta\mathbf{g}^k, \quad (2.6)$$

em que o sobrescrito  $\mathbf{T}$  indica transposição matricial.

A estimativa do novo vetor de parâmetros  $\hat{\mathbf{p}}^{k+1}$  exige uma estimativa pré-existente  $\hat{\mathbf{p}}^k$  e um vetor-correção  $\Delta\hat{\mathbf{p}}^k$ , equação 2.5. A construção da matriz  $\mathbf{A}^k$  e o cálculo da matriz inversa em cada iteração, equação 2.6, são responsáveis pelo elevado custo no tempo computacional para obter a estimativa  $\hat{\mathbf{p}}^{k+1}$  utilizando o método de Gauss-Newton modificado pelo Método de Marquardt.

A convergência do processo iterativo é aceita quando o vetor  $\hat{\mathbf{p}}^{k+1}$  não difere substancialmente da estimativa do vetor  $\hat{\mathbf{p}}^k$  (solução da expressão 2.5 da iteração anterior).

## 2.2 Alternativa ao problema não linear

### 2.2.1 Abordagem teórica

Uma alternativa para reduzir o tempo de processamento é evitar a inversão de uma matriz em cada iteração obtendo o  $i$  – ésimo elemento  $\Delta\hat{p}_i^k$ , através da relação entre a  $i$  – ésima observação gravimétrica, o topo ( $p_1$ ) e a base ( $p_2$ ) de uma placa infinita nas coordenadas horizontais. O efeito gravimétrico  $g_i$  devido a essa placa é expressa por:

$$g_i = 2\pi\gamma \int_{p_1}^{p_2} \Delta\rho dz, \quad (2.7)$$

em que  $\gamma$  é a constante gravitacional e  $\Delta\rho$  é uma função que define a variação do contraste de densidade entre as profundidade  $p_1$  e  $p_2$  da placa. A expressão da observação  $g_i$  pode ser escrita formalmente como:

$$g_i = f(p_1, p_2, \Delta\rho), \quad (2.8)$$

em que  $f$  é uma função que relaciona a anomalia  $g_i$  com a função do contraste de densidade  $\Delta\rho$  e as profundidades do topo ( $p_1$ ) e da base ( $p_2$ ) da placa Bouguer. A partir da expressão (2.8) obtemos um procedimento iterativo para aproximar a profundidade do relevo do embasamento (na coordenada  $x_i$  da observação  $g_i$ ), através da estimativa da base da placa na  $k$ -ésima iteração, definida por

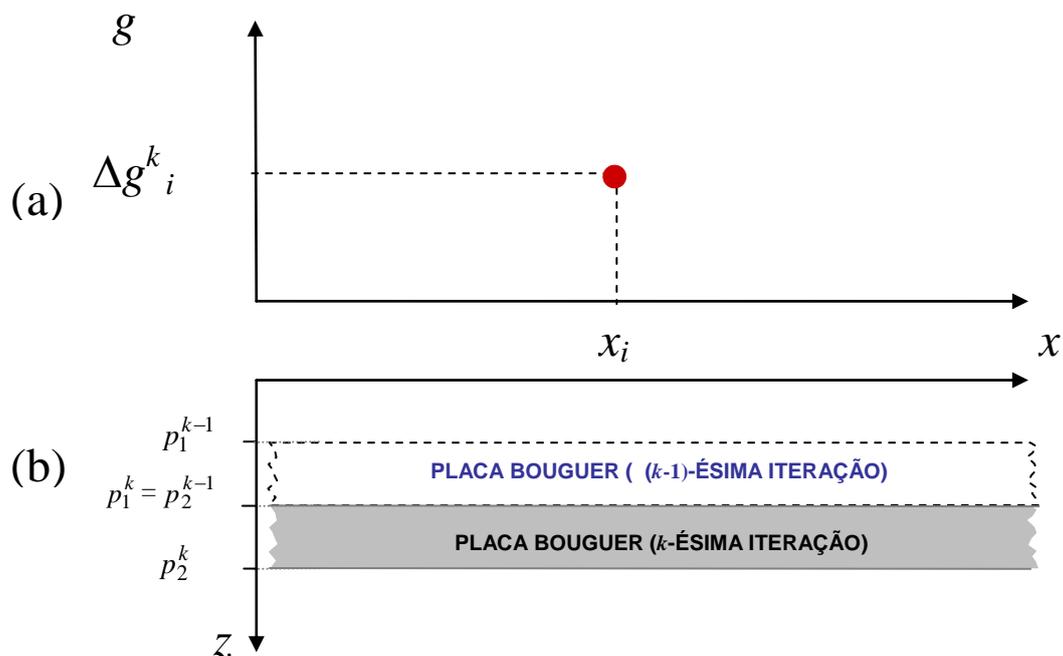
$$\hat{p}_2^k = \Psi(\hat{p}_1^k, \Delta g_i^k, \Delta \rho), \quad (2.9)$$

em que  $\hat{p}_1^k$  é a estimativa do topo da placa Bouguer e  $\Delta g_i^k$  é o  $i$ -ésimo elemento do vetor do resíduo gravimétrico  $\Delta \mathbf{g}^k$ . Na  $k$ -ésima iteração a profundidade do topo  $\hat{p}_1^k$  da placa Bouguer será a estimativa da profundidade da base da placa Bouguer obtida na iteração anterior ( $\hat{p}_2^{k-1}$ ) (V. Figura 2.3). Assim a expressão (2.9) pode ser escrita para a iteração  $k+1$  como

$$\hat{\mathbf{p}}^{k+1} \equiv \{\hat{p}_i^{k+1}\} = \Psi(\hat{p}_i^k, \Delta g_i^k, \Delta \rho), \quad (2.10)$$

em que  $\hat{p}_i^k$  e  $\hat{p}_i^{k+1}$  são as estimativas das profundidades das bases da placas empregadas nas  $k$ -ésima e  $k$ -ésima primeira iterações, localizadas na coordenada  $x_i$ .

Figura 2.3 – Ilustração esquemática da estimativa da profundidade  $p_2^k$ , equação (2.9), em função do valor da estimativa da profundidade anterior  $p_2^{k-1}$  e do resíduo gravimétrico  $\Delta g_i^k$  na posição  $x_i$ .



Fonte: Da autora

Os métodos que delineiam o relevo do embasamento através da expressão (2.10) produzem estimativas das espessuras dos prismas presumindo:

- (i) observações  $g_i$  (que compõem o vetor  $\mathbf{g}^o$ ) equidistantes entre si ao longo do eixo  $x$ .
- (ii) centros dos prismas do modelo interpretativo (Figura 2.2) localizados abaixo de cada observação.
- (iii) vetor  $\hat{\mathbf{p}}^{k+1}$   $N$ -dimensional cujo  $i$ -ésimo elemento é definido na equação (2.10).
- (iv) topos das placas Bouguer (cada placa associada à posição de uma observação) localizados na superfície na primeira iteração.

Similarmente, ao método de inversão não linear, a convergência do processo iterativo é aceita quando o vetor  $\hat{\mathbf{p}}^{k+1}$  não difere substancialmente da estimativa do vetor  $\hat{\mathbf{p}}^k$ .

### 2.2.1.1 Casos particulares

Os métodos de Bott (BOTT, 1960), de Granser (GRANSER, 1987) e o desenvolvido neste trabalho adotam a abordagem acima descrita para obter a equação 2.10.

#### 2.2.1.1.1 Método de Bott

O método de Bott (1960) obtém a seguinte relação entre o efeito gravimétrico de uma placa com contraste de densidade constante  $\Delta\rho_c$ , topo  $p_1$  e base  $p_2$

$$g_i = 2\pi\gamma \Delta\rho_c (p_2 - p_1). \quad (2.11)$$

O emprego desta relação produz o procedimento iterativo do método de Bott (1960) utilizando a seguinte relação para a estimativa da profundidade  $\hat{p}_i^{k+1}$

$$\hat{p}_i^{k+1} = \hat{p}_i^k + \frac{\Delta g_i^k}{2\pi\gamma \Delta\rho_c}, \quad i = 1, \dots, N. \quad (2.12)$$

### 2.2.1.1.2 Método de Granser

O método de Granser (GRANSER, 1987) utiliza uma lei matemática do contraste de densidade variando exponencialmente com a profundidade definida por

$$\Delta\rho \equiv \{\Delta\rho(p_i^k)\} = \Delta\rho_0 e^{-\lambda_1 p_i^k}, \quad (2.13)$$

em que  $\Delta\rho_0$  é o contraste de densidade na superfície e  $\lambda_1$  é o fator de variação do contraste de densidade com a profundidade expressa por  $\text{km}^{-1}$ . Este método produz uma relação entre o efeito gravimétrico e as profundidades do topo e da base da placa Bouguer dada por

$$g_i = 2\pi\gamma \Delta\rho_0 \frac{e^{-\lambda_1 p_1} - e^{-\lambda_1 p_2}}{\lambda_1}. \quad (2.14)$$

A aplicação desta relação gera o procedimento iterativo do método de Granser (1987) que utiliza a expressão da estimativa  $\hat{p}_i^{k+1}$  dada por

$$\hat{p}_i^{k+1} = \frac{1}{\lambda} \ln \left( \frac{2\pi\gamma \Delta\rho_0 e^{-\lambda_1 \hat{p}_i^k} - \lambda_1 \Delta g_i^k}{2\pi\gamma \Delta\rho_0} \right), \quad (2.15)$$

esta equação de  $\hat{p}_i^{k+1}$  pode também ser expressa por

$$\hat{p}_i^{k+1} = \hat{p}_i^k - \frac{1}{\lambda} \ln \left( 1 - \frac{\lambda_1 \Delta g_i^k}{2\pi\gamma \Delta\rho_0 e^{-\lambda_1 \hat{p}_i^k}} \right). \quad (2.16)$$

As estimativas das profundidades na  $k$  – ésima primeira iteração dos métodos de Bott (1960) e de Granser (1987) podem ser descritas similarmente à expressão das estimativas iterativas das profundidades empregada no procedimento do método de Gauss-Newton, expressão 2.5, definida por

$$\hat{p}_i^{k+1} = \hat{p}_i^k + \Delta p_i^k, \quad (2.17)$$

em que o  $i$ -ésimo elemento dos vetores-correção dos métodos de Bott (1960) e de Granser (1987) são respectivamente

$$\Delta \hat{p}_i^k = \frac{\Delta g_i^k}{2\pi\gamma \Delta\rho_c}, \quad (2.18)$$

e

$$\Delta \hat{p}_i^k = -\frac{1}{\lambda} \ln \left( 1 - \frac{\lambda_1 \Delta g_i^k}{2\pi\gamma \Delta\rho_0 e^{-\lambda_1 \hat{p}_i^k}} \right). \quad (2.19)$$

Nota-se que apenas no método de Bott (1960) as correções  $\Delta \hat{p}_i^k$  das estimativas da profundidade do relevo do embasamento não dependem individualmente das profundidades do topo e da base da placa, mas apenas da diferença entre elas.

### 2.2.1.1.3 Método proposto

A adaptação do método de Bott (1960) para contraste de densidade variando hiperbolicamente com a profundidade (LITINSKY, 1989) produz o seguinte efeito gravimétrico

$$g_i = 2\pi\gamma \Delta\rho_0 \beta^2 \frac{p_2 - p_1}{(p_1 + \beta)(p_2 + \beta)}. \quad (2.20)$$

A partir desta relação desenvolvemos um procedimento iterativo produzindo a estimativa  $\hat{p}_i^{k+1}$  através da expressão

$$\hat{p}_i^{k+1} = \beta \left[ \frac{2\pi\gamma \Delta\rho_0 \beta \hat{p}_i^k + \Delta g_i^k (\hat{p}_i^k + \beta)}{2\pi\gamma \Delta\rho_0 \beta^2 - \Delta g_i^k (\hat{p}_i^k + \beta)} \right]. \quad (2.21)$$

O método proposto não utiliza explicitamente uma expressão da correção de variação de profundidade  $\Delta \hat{p}_i^k$  diferindo assim dos métodos de Bott (1960) e de Granser (1987) que apresentam expressões explícitas das correções das profundidades (equações 2.18 e 2.19, respectivamente).

### 2.2.2 Abordagem aproximada

Os métodos de Bhaskara Rao (1986) e Rao, Prakash e Babu (1990) diferem dos demais métodos descritos acima por não empregarem a derivação teórica mas sim uma *aproximação* para obter as estimativas  $\hat{p}_i^{k+1}$ . Estes métodos empregam:

(i) a lei matemática quadrática da variação do contraste de densidade com a profundidade,

$$\Delta\rho \equiv \{\Delta\rho(p_i^k)\} = \Delta\rho_0 + \lambda_2 p_i^k + \lambda_3 (p_i^k)^2, \quad (2.22)$$

em que  $\lambda_2$  e  $\lambda_3$  são constantes que controlam o decréscimo do contraste de densidade com a profundidade expressas respectivamente por  $\text{g.cm}^{-3}.\text{km}^{-1}$  e  $\text{g.cm}^{-3}.\text{km}^{-2}$ .

(ii) uma modificação da expressão 2.12 para o método de Bott (1960) substituindo diretamente o contraste de densidade constante,  $\Delta\rho_c$ , pela lei de variação quadrática, equação 2.22.

Assim, os métodos de Bhaskara Rao (1986) e Rao, Prakash e Babu (1990) consistem em um procedimento simples e efetivo baseado no método de Bott (1960) para densidade constante.

#### 2.2.2.1 Análise do desempenho

Testes em anomalias sintéticas (não mostrados neste trabalho) mostraram que o método de Bott (1960) produz excelentes estimativas do relevo do embasamento de bacias sedimentares, mesmo daquelas associadas a contrastes de densidade decrescendo com a profundidade. No entanto o método de Bott (1960) aplicado a este tipo de bacia sedimentar requer um número muito grande de iterações uma vez que a correção,  $\Delta\hat{p}_i^k$ , é pequena porque o resíduo,  $\Delta g_i^k$ , é dividido por um fator constante. Para tornar o procedimento iterativo mais eficiente Bhaskara Rao (1986) e Rao, Prakash e Babu (1990) substituíram na expressão de  $\Delta\hat{p}_i^k$  do método de Bott (1960) a densidade constante  $\Delta\rho_c$  por  $\Delta\rho$  definida na equação 2.22. Desse modo, a correção modificada  $\Delta\hat{p}_i^k$  de Bhaskara Rao (1986) e de Rao, Prakash e Babu (1990) torna-se maior que a correção de Bott (1960) uma vez que  $\Delta\rho \leq \Delta\rho_c$ . Conseqüentemente, o procedimento de Bhaskara Rao (1986) e de Rao, Prakash e Babu (1990) convergirá em um número menor de iterações em relação ao método de Bott (1960) .

### 3 TESTES COM DADOS SINTÉTICOS

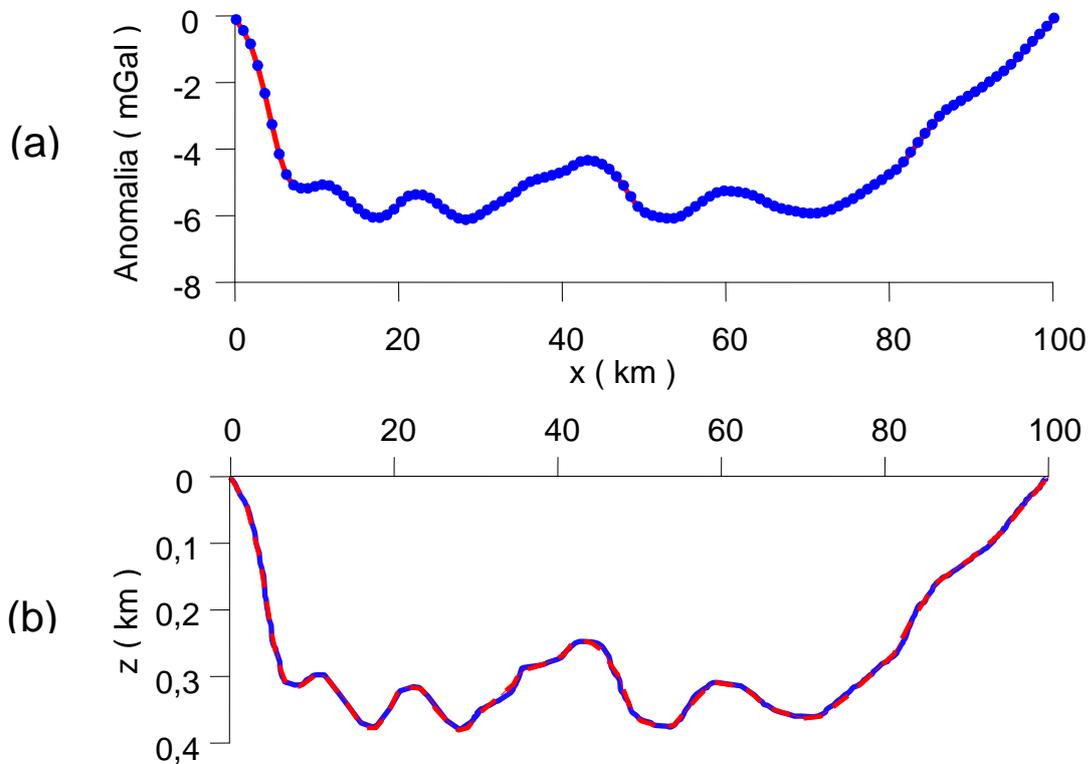
Nesta seção avaliamos o desempenho do método proposto, aplicado-o a dados gravimétricos sintéticos produzidos por três ambientes de bacias sedimentares simuladas que apresentam contraste de densidade variando com a profundidade. Na aplicação do método proposto presumimos conhecidos os parâmetros do contraste de densidade na superfície ( $\Delta\rho_0$ ) e do fator de variação do contraste de densidade com a profundidade ( $\beta$ ), expressão 2.1, que produziram as anomalias gravimétricas dos três ambientes simulados. Para testar a estabilidade das soluções adicionamos aos três conjuntos de dados sintéticos ruído pseudo-aleatório Gaussiano com média nula e desvio padrão de 0,01 mGal.

#### 3.1 Ambiente I

A Figura 3.1a mostra em pontos azuis um conjunto de 100 observações gravimétricas produzidas por uma bacia simulada cujo relevo do embasamento (linha azul na Figura 3.1b) apresenta elevações locais e profundidade máxima de 380 m. O contraste de densidade entre os sedimentos e o embasamento é presumido diminuir com a profundidade de acordo com a equação 2.1 utilizando  $\Delta\rho_0 = -0,45 \text{ g/cm}^3$  e  $\beta = 2,5 \text{ km}$ . O modelo interpretativo consiste de 115 prismas regularmente espaçados ao longo do perfil que apresenta extensão horizontal de 100 km.

Utilizando o método proposto com os mesmos parâmetros  $\Delta\rho_0$  e  $\beta$ , que geraram a anomalia gravimétrica da Figura 3.1a (pontos azuis), produzimos uma solução que apresentou um excelente delineamento do relevo do embasamento (linha tracejada vermelha na Figura 3.1b). A Figura 3.1a mostra em linha vermelha um ajuste aceitável nos dados. Portanto, os resultados apresentados nas Figuras 3.1a e b (linhas vermelhas) mostram a eficácia do método para delinear relevo do embasamento de bacias sedimentares similares ao ambiente I.

Figura 3.1 – Ambiente I. (a) Anomalia gerada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) relevos verdadeiro (linha azul) e estimado (linha tracejada vermelha).



Fonte: Da autora

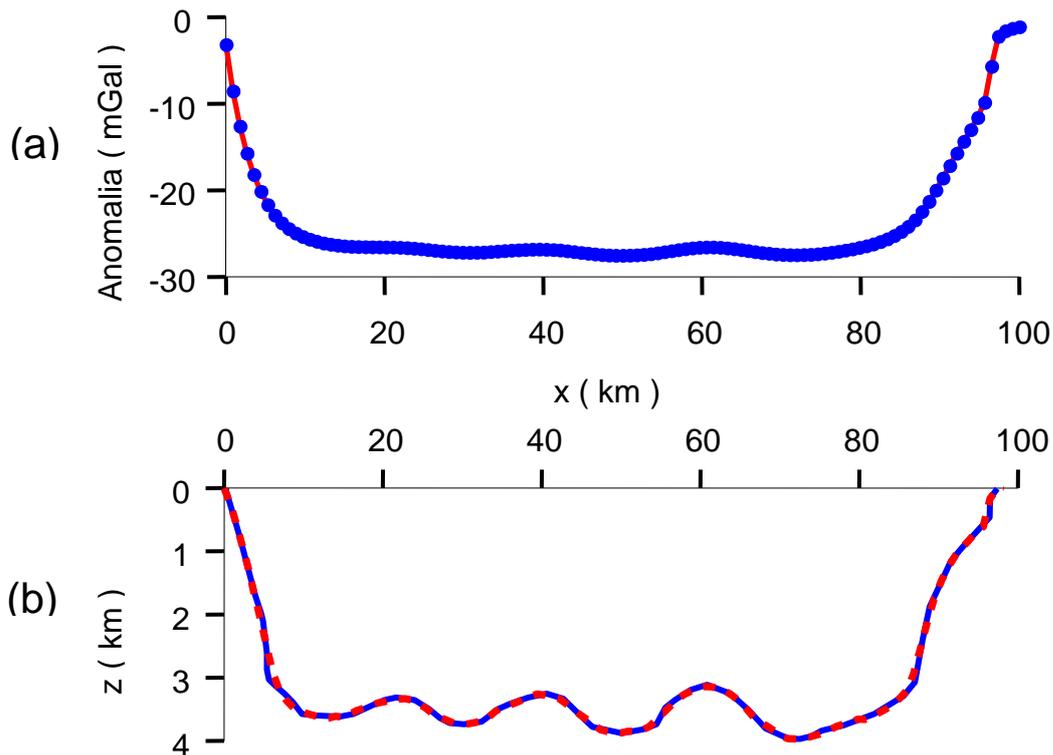
### 3.2 Ambiente II

A Figura 3.2a mostra em pontos azuis um conjunto de 100 observações gravimétricas produzidas por uma bacia simulada (linha azul na Figura 3.2b) que apresenta elevações locais e profundidade máxima de 4 km no relevo do embasamento. O contraste de densidade entre os sedimentos e o embasamento é presumido diminuir com a profundidade de acordo com a equação 2.1 utilizando  $\Delta\rho_0 = -0,45 \text{ g/cm}^3$  e  $\beta = 2,5 \text{ km}$ . O modelo interpretativo consiste de 115 prismas regularmente espaçados ao longo do perfil que apresenta extensão horizontal de 100 km.

A solução produzida pelo método proposto com os mesmos parâmetros  $\Delta\rho_0$  e  $\beta$ , que geraram a anomalia gravimétrica da Figura 3.2a (pontos azuis), apresentou um excelente delineamento do relevo do embasamento (linha tracejada vermelha na Figura 3.2b). A Figura

3.2a mostra em linha vermelha um ajuste aceitável nos dados. Portanto, os resultados apresentados nas Figuras 3.2a e b (linhas vermelhas) mostram a eficácia do método para delinear relevo do embasamento de bacias sedimentares similares ao ambiente II.

Figura 3.2 – Ambiente II. (a) Anomalias gerada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) relevos verdadeiro (linha azul) e estimado (linha tracejada vermelha).



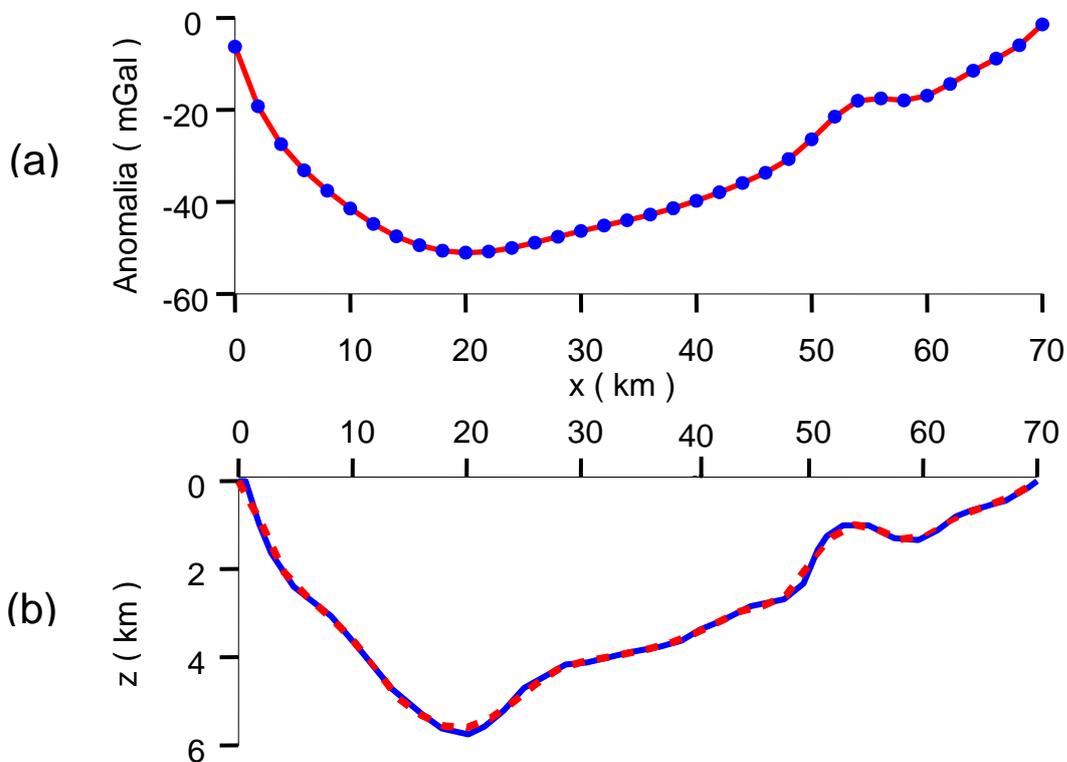
Fonte: Da autora

### 3.3 Ambiente III

A Figura 3.3a mostra em pontos azuis um conjunto de 31 observações gravimétricas produzidas por uma bacia simulada (linha azul na Figura 3.3b), cujo relevo do embasamento apresenta profundidade máxima de 6 km e uma elevação na posição 53 km onde o pacote sedimentar apresenta espessura de 1 km. O contraste de densidade entre os sedimentos e o embasamento é presumido diminuir com a profundidade de acordo com a equação 2.1 utilizando  $\Delta\rho_0 = -0,35 \text{ g/cm}^3$  e  $\beta = 16\text{km}$ . O modelo interpretativo consiste de 36 prismas regularmente espaçados ao longo do perfil que apresenta extensão horizontal total de 70 km.

O método proposto produziu solução com os mesmos parâmetros  $\Delta\rho_0$  e  $\beta$ , que geraram a anomalia gravimétrica da Figura 3.3a (pontos azuis), apresentando um bom delineamento do relevo do embasamento (linha tracejada vermelha na Figura 3.3b). A Figura 3.3a mostra em linha vermelha um ajuste aceitável nos dados. Portanto, os resultados apresentados nas Figuras 3.3a e b (linhas vermelhas) mostram a eficácia do método para delinear relevo do embasamento de bacias sedimentares similares ao ambiente III.

Figura 3.3 – Ambiente III. (a) Anomalia gerada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) relevos verdadeiro (linha azul) e estimado (linha tracejada vermelha).



Fonte: Da autora

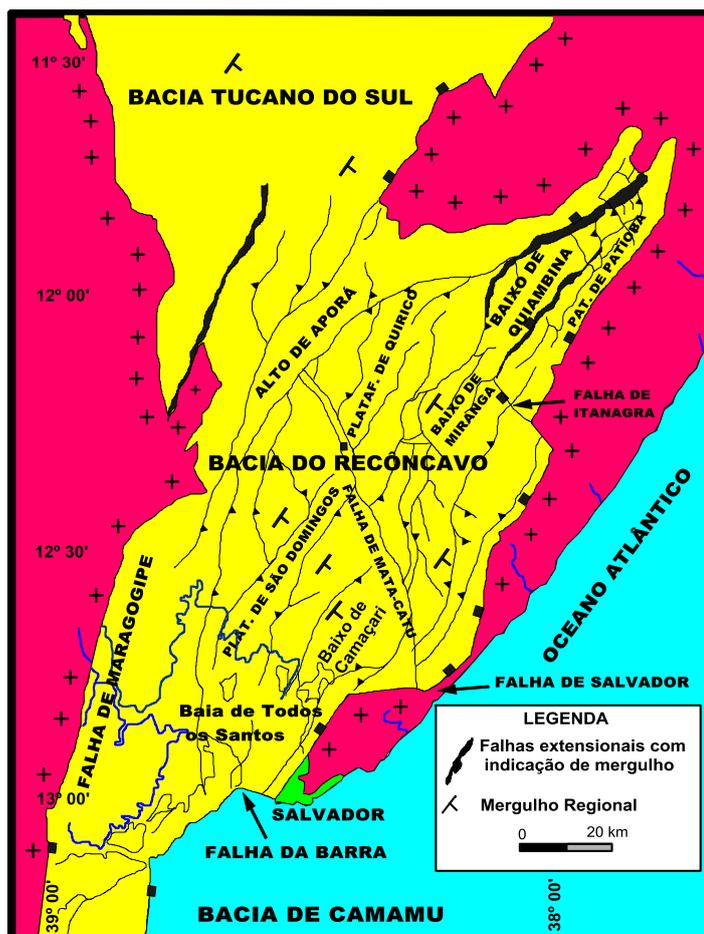
## 4 APLICAÇÃO A DADOS REAIS

Nesta seção verificamos a eficiência do método proposto, aplicando-o a três conjuntos de dados gravimétricos reais. O primeiro, da bacia do Recôncavo, está localizado no estado da Bahia. O segundo, do graben de San Jacinto, situado na Califórnia, Estados Unidos e o terceiro, do graben do Büyük Menderes, localizado na Turquia ocidental.

### 4.1 Bacia do Recôncavo

#### 4.1.1 Informações geológicas e geofísicas

Figura 4.1 – Localização, limites e arcabouço estrutural da bacia do Recôncavo, mapeado ao nível da seção pré-rift.

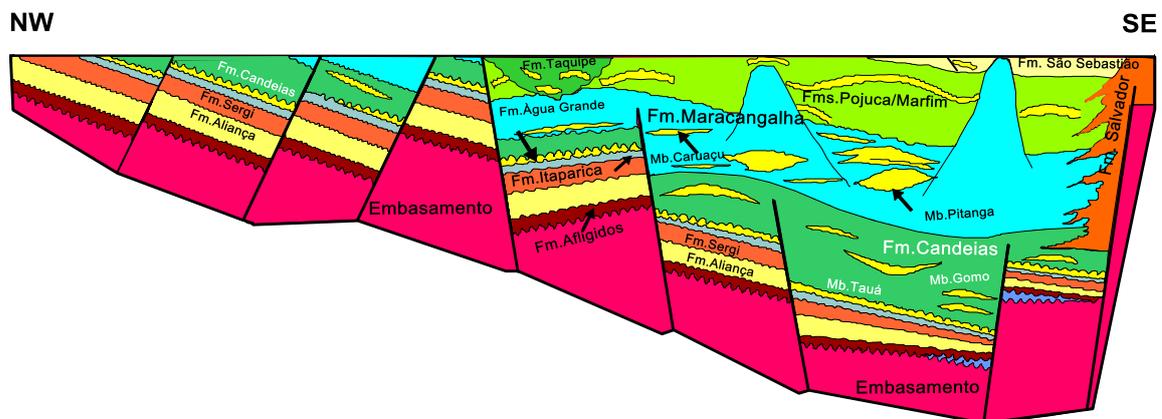


Fonte: Milhomem et al. (2003).

A Bacia do Recôncavo localiza-se no estado da Bahia, nordeste do Brasil e ocupa uma área de aproximadamente 11 500 km<sup>2</sup>. Limita-se com a Bacia do Tucano, ao norte, pelo Alto de Aporá, e com a Bacia de Camamu, ao sul, por uma zona de transferência E-W (Falha da Barra). Os limites leste e oeste da bacia são afloramentos pré-cambrianos oriundos, respectivamente, dos sistemas de falhas de Salvador e de Maragogipe (Figura 4.1).

A Bacia do Recôncavo evoluiu a partir da ruptura do continente Gondwana no final do Jurássico. O arcabouço estrutural da Bacia do Recôncavo é definido por um hemi-graben com orientação NE-SW e falha de borda a leste (sistema de falhas de Salvador). O depocentro principal da Bacia do Recôncavo, Baixo de Camaçari, apresenta espessura sedimentar de aproximadamente 6 900 m segundo Milhomem et al. (2003).

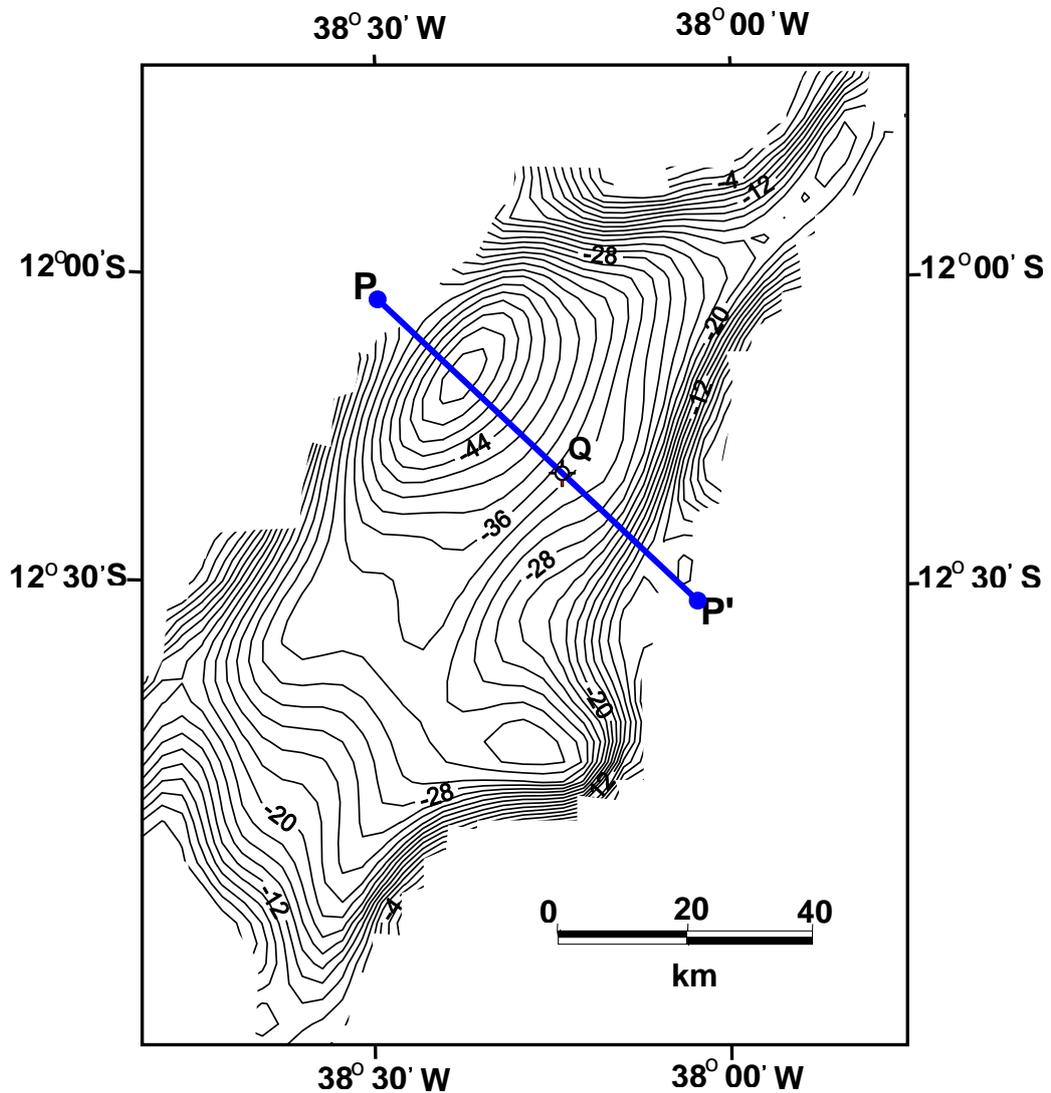
Figura 4.2 – Seção geológica esquemática NW-SE, ilustrando a morfologia de meio-graben da bacia do Recôncavo, cujo depocentro situa-se a leste.



Fonte: Milhomem et al. (2003).

As principais acumulações de petróleo desta bacia relacionam-se aos depósitos fluvio-eólicos das formações Sergi e Água Grande. O relevo do embasamento apresenta sistemas de falhas escalonadas, associadas às fases rift e pré-rift (Figura 4.2).

Figura 4.3 – Mapa gravimétrico devido ao relevo do embasamento da Bacia do Recôncavo mostrando a posição do perfil gravimétrico interpretado PP'. Intervalo de contorno: 2 mGal.



Fonte: Leão et al. (1996)

A Figura 4.3 mostra o mapa de anomalias Bouguer corrigido dos efeitos da variação do nível da Moho e de fontes intra-sedimentares (LEÃO et al., 1996). Na direção NW-SE, transversal à bacia, apresentamos o perfil gravimétrico PP' (linha azul na Figura 4.3) localizado na região do baixo de Alagoinha.

As informações sobre os parâmetros  $\Delta\rho_0$  (contraste de densidade na superfície) e  $\beta$  (fator que controla a diminuição do contraste de densidade com a profundidade), deste ambiente geológico, não são conhecidas. Para determinar os parâmetros  $\Delta\rho_0$  e  $\beta$  usaremos o

método da busca sistemática (SILVA; COSTA; BARBOSA, 2006) e das informações sobre a profundidade do relevo do embasamento de:

(1) 2,88 km referente a um furo de sondagem na posição de 39,7 km ao longo do perfil PP' (Ponto Q na Figura 4.3) e

(2) aproximadamente 6 km referente à profundidade máxima da bacia (MILANI; DAVISON, 1988) .

Aplicando esse procedimento estimamos os valores  $-0,35 \text{ g/cm}^3$  e 16 km respectivamente para  $\Delta\rho_0$  e  $\beta$  .

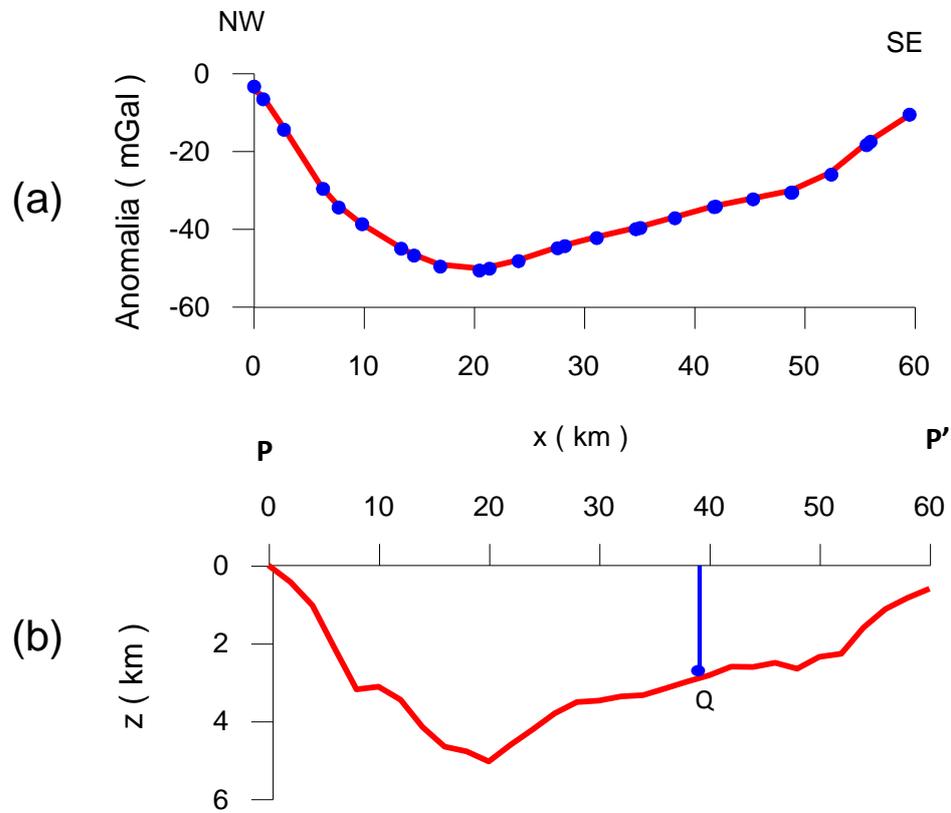
#### 4.1.2 Resultados

A anomalia gravimétrica observada ao longo do perfil PP' é apresentada na Figura 4.4a em pontos azuis. O modelo interpretativo consiste de 36 prismas justapostos regularmente espaçados ao longo do perfil que apresenta extensão horizontal total de 70 km.

A solução obtida com o método proposto apresenta um delineamento do relevo do embasamento (Figura 4.4b) utilizando os valores de  $\Delta\rho_0 = -0,35 \text{ g/cm}^3$  e  $\beta = 16 \text{ km}$ . A anomalia ajustada é mostrada na linha vermelha da Figura 4.4a.

A Figura 4.4 b mostra que a profundidade do relevo estimado pelo método proposto é próxima à profundidade estimada através do furo de sondagem no ponto Q. A estimativa máxima da profundidade de 6 km localiza-se, aproximadamente na posição  $x = 19,5 \text{ km}$ , no baixo de Alagoinha (Figura 4.4b), o que está de acordo com as informações geológicas da área.

Figura 4.4 – Bacia do Recôncavo. (a) anomalias observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha) (b) relevo do embasamento estimado (linha vermelha).



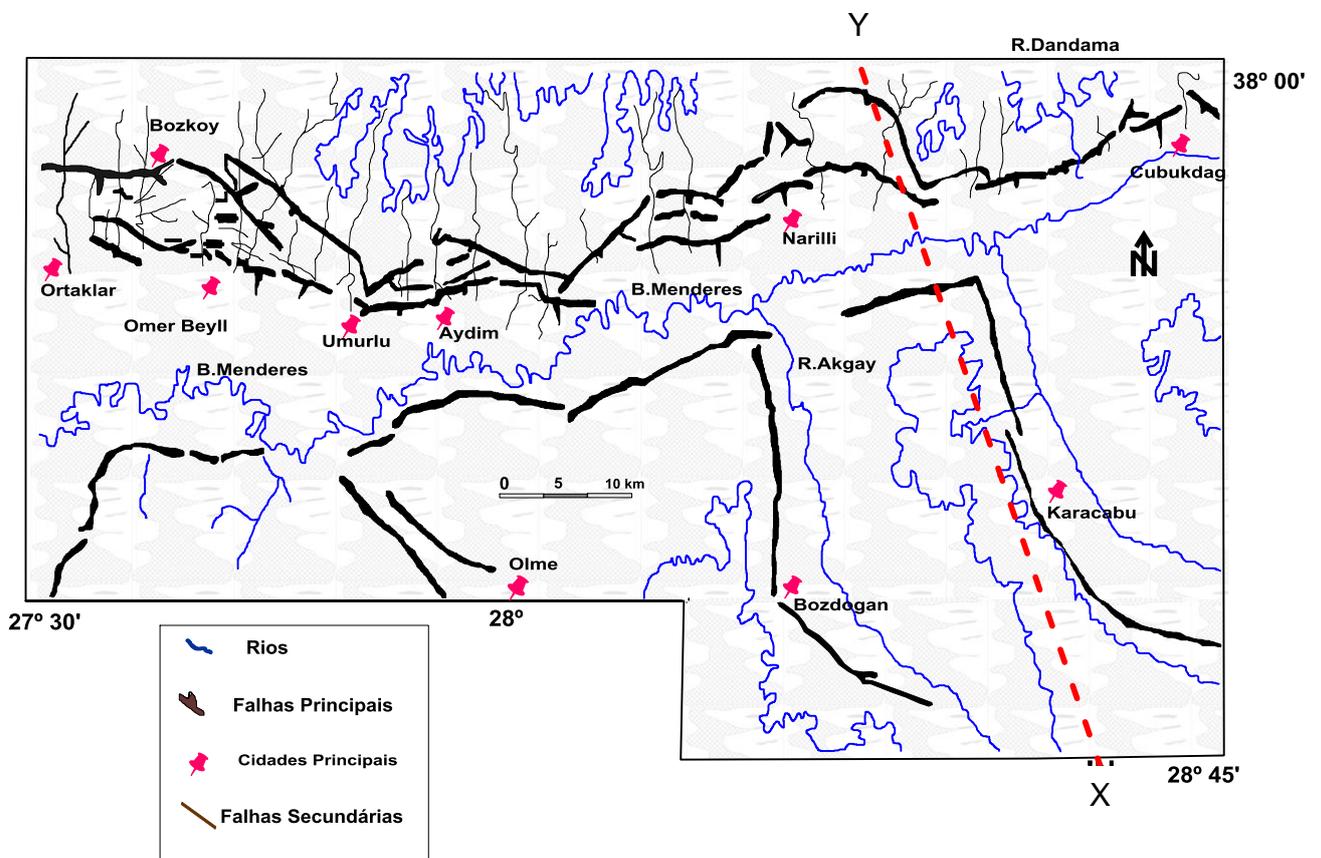
Fonte: Da autora

## 4.2 Vale do Büyük Menderes

### 4.2.1 Informações geológicas e geofísicas

O vale do rio Büyük Menderes (Figura 4.5) situa-se na Turquia ocidental, onde predominam regiões com deformações ativas e que nos últimos anos sofreram a ação de diversos terremotos em decorrência da atuação de forças distensoras.

Figura 4.5 – Mapa geológico do vale do Büyük Menderes. A linha tracejada em vermelho assinala a posição do perfil X-Y, transversal ao vale.



Fonte: Paton (1992)

Os grabens do Büyük Menderes e de Gediz são os maiores grabens intra-continetais da Turquia ocidental. Os grabens desta região, inclusive o do Büyük Menderes, são assimétricos, apresentando pequenas falhas antitéticas. O graben do Büyük Menderes tem direção E-W e apresenta a sua principal falha de alto ângulo situada no lado norte do vale (PATON, 1992).

O graben do Büyük Menderes apresenta 150 km de extensão e 10-20 km de largura. A parte central do graben localiza-se entre as cidades de Ortaklar, a oeste, e Cubukdag, a leste. Neste trabalho utilizamos o perfil gravimétrico XY de direção SSE-NNW transversal ao vale de Büyük Menderes, linha tracejada vermelha Figura 4.5. O perfil XY está localizado na região onde o pacote sedimentar apresenta sua principal falha com alto ângulo situada no lado norte do vale (PATON, 1992).

Sari e Salk (2002), usando dados de poço, estimaram os valores  $-0,98 \text{ g/cm}^3$  e  $2,597 \text{ km}$  para os parâmetros  $\Delta\rho_0$  e  $\beta$ , respectivamente, da lei hiperbólica de decréscimo do contraste de densidade com a profundidade, equação 2.1.

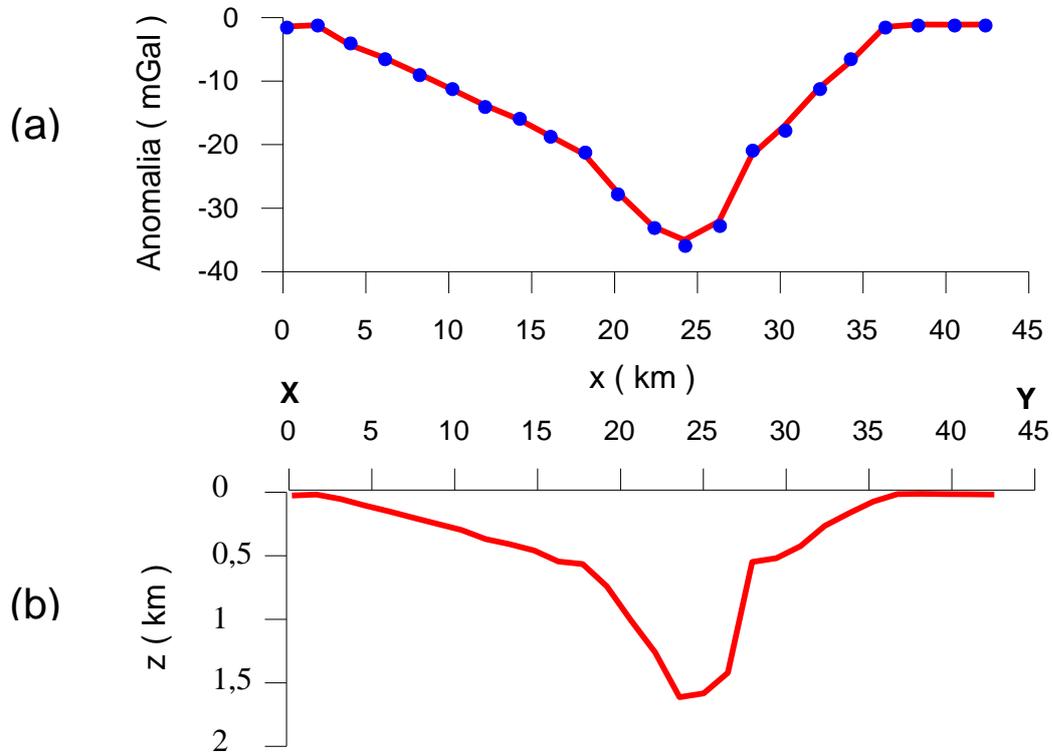
#### 4.2.2 Resultados

Aplicamos o método proposto na anomalia gravimétrica observada do perfil XY, de direção SSE-NNW, apresentada em pontos azuis na Figura 4.6a. O modelo interpretativo consiste de 36 prismas justapostos regularmente espaçados ao longo do perfil de 45 km de extensão horizontal.

Na Figura 4.6b apresentamos o relevo do embasamento estimado aplicando o método proposto com os valores de  $\Delta\rho_0 = -0,98 \text{ g/cm}^3$  e  $\beta = 2,597 \text{ km}$  (SARI; SALK, 2002). A anomalia ajustada é mostrada em linha vermelha na Figura 4.6a.

O relevo do embasamento estimado (Figura 4.6b) apresenta bordas Sul e Norte suaves do graben com ângulos de mergulho de aproximadamente  $10^\circ$  e  $30^\circ$ , respectivamente. A profundidade máxima estimada é de 1,6 km.

Figura 4.6 – Vale do Büyük Menderes. (a) anomalias observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha) (b) relevo do embasamento estimado (linha vermelha).



Fonte: Da autora

### 4.3 Graben de San Jacinto

#### 4.3.1 Informações geológicas e geofísicas

O graben de San Jacinto localiza-se no sul da Califórnia e apresenta 24 km de extensão com largura entre 2 a 4 km (LEE et al., 1996). Informações de dados sísmicos mostram profundidade máxima deste graben de aproximadamente 2,4 km (FETT, 1968). O embasamento do graben de San Jacinto é constituído por xistos e gnaisses pré-Terciários junto com tonalitos e granodioritos do Cretáceo (CORDELL, 1973). A densidade do embasamento cristalino é aproximadamente  $2,7 \text{ g/cm}^3$ . As rochas sedimentares deste graben são detríticas e alúvios holocênicos e pleistocênicos (CORDELL, 1973).

O perfil gravimétrico transversal ao graben de San Jacinto na direção SW-NE (pontos azuis na Figura 4.7) está localizado onde o pacote sedimentar apresenta-se limitado por falhas normais de grandes rejeitos.

Neste trabalho utilizamos os valores  $-0,63 \text{ g/cm}^3$  e  $3,0 \text{ km}$  para os parâmetros  $\Delta\rho_0$  e  $\beta$ , respectivamente, na lei de variação hiperbólica do contraste de densidade, equação 2.1, adotados por Lima (2009).

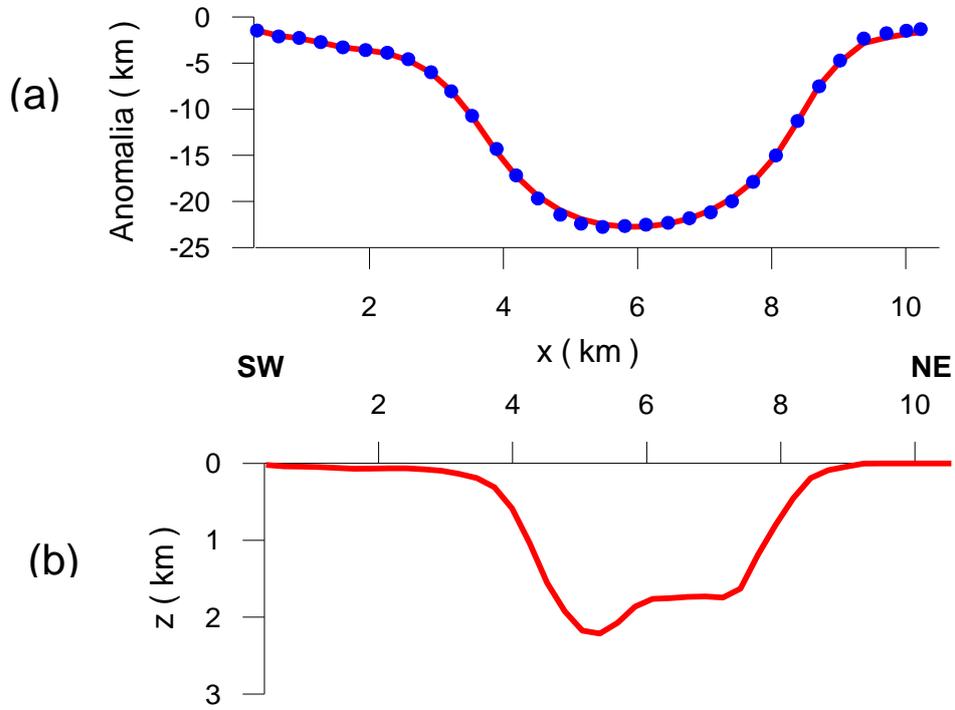
#### 4.3.2 Resultados

A anomalia gravimétrica observada ao longo do perfil SW-NE é apresentada na Figura 4.7a em pontos azuis. O modelo interpretativo consiste de 40 prismas justapostos, regularmente espaçados ao longo do perfil que apresenta extensão horizontal total de 12 km.

Na Figura 4.7b apresentamos a solução produzida pelo método proposto usando os valores estimados de  $\Delta\rho_0 = -0,63 \text{ g/cm}^3$  e  $\beta = 3,0 \text{ km}$  (LIMA, 2009). A anomalia ajustada é mostrada em linha vermelha na Figura 4.7a.

O relevo do embasamento estimado (Figura 4.7b) reproduziu uma topografia suave do embasamento apresentando ângulos de mergulho de aproximadamente  $55^\circ$  em ambas as bordas do graben. Entre as posições 6,5 km e 7,2 km o relevo do embasamento estimado apresenta um patamar na profundidade de 1,7 km. A profundidade máxima estimada é de aproximadamente 2,2 km.

Figura 4.7 – Graben do San Jacinto. (a) anomalias observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha) (b) relevo do embasamento estimado (linha vermelha).



Fonte: Da autora

## 5 CONCLUSÕES

Apresentamos um método para estimar o relevo do embasamento suave de bacias sedimentares, utilizando uma placa infinita e presumindo um contraste de densidade conhecido decrescendo hiperbolicamente com a profundidade. O método produz o delineamento do relevo do embasamento através de um procedimento iterativo usando uma expressão analítica.

Assim como os métodos anteriores, que utilizam a expressão da placa horizontal infinita, o método proposto é de fácil implementação. O procedimento apresentado neste trabalho produz estimativas de profundidades a partir de correções implícitas que dependem do resíduo entre a observação e o ajuste pela aproximação corrente e da lei de variação hiperbólica do contraste de densidade com a profundidade.

Testes em perfis de dados sintéticos, cuja amplitude máxima das anomalias são superiores a 6 mGal em valor absoluto, mostraram a eficácia do método para delinear o relevo do embasamento. O método foi também aplicado a três perfis gravimétricos reais: Bacia do Recôncavo (Brasil), Graben do Büyük Menderes (Turquia) e Graben de San Jacinto (Estados Unidos). Em todos os testes de dados reais obtivemos resultados satisfatórios produzindo delineamentos dos relevos do embasamento de acordo com as informações geológicas disponíveis.

O método foi aplicado em perfis, dados 1D, porém não há restrição teórica para extensão do método para dados 2D. Neste caso, o método apresentará uma redução no tempo computacional perceptível em relação ao método não linear devido ao aumento do número de parâmetros e de observações podendo reduzir o tempo computacional em até uma ordem de grandeza. O método pode também ser modificado para produzir soluções estabilizadas através do regularizador de Tikhonov de primeira ordem. Essa modificação permitirá a sua aplicação a dados cujo ruído, contido nas observações, tenha desvio padrão superior a 0,01 mGal.

## REFERÊNCIAS

- BARBOSA, V. C. F.; SILVA, J. B. C.; MEDEIROS, W. E. Gravity inversion of a discontinuous relief stabilized by weighted smoothness constraints on depth. *Geophysics*. v.64, n.5, p.1429-1437, 1999.
- BHASKARA RAO, D. Modelling of sedimentary basins from gravity anomalies with variable density contrast. *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, v. 84, n.1, p. 207-121, 1986.
- BOTT, M. H. P. The use of rapid digital computing methods for direct gravity interpretation of sedimentary basins. *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, v.3, n.1, p. 63-67, 1960.
- CHAKRAVARTHI, V.; RAGHURAM, H., M.; SINGH, S., B.; 3-D forward gravity modelling of basement interfaces above which the density contrast varies continuously with depth. *Computers & Geosciences*, v.28, n.1, p.53-57, 2002.
- CORDELL, L. Gravity analysis using an exponential density-depth function—San Jacinto Graben, California. *Geophysics*, v.38, n. 4, p. 684-690, 1973.
- CORDELL, L.; HENDERSON, R. G. Iterative three-dimensional solution of gravity anomaly data using a digital computer. *Geophysics*, v.33, n. 4, p. 596-601, 1968.
- FETT, J. D. *Geophysical investigations of the San Jacinto Valley, Riverside Country* . 1968. 87f. (Masters Thesis) - Univ. California at Riverside, California, 1968. (unpubl. )
- GRANSER, H. Three-dimensional interpretation of gravity data from sedimentary basins using an exponential density-depth function. *Geophysical Prospecting*, v. 35, n. 9, p. 1030–1041, 1987.
- LEÃO, J. W. D.; MENEZES, P. T. L.; BELTÃO, J. F.; SILVA, J. B. C. Gravity inversion of basement relief constrained by the knowledge of depth at isolated points. *Geophysics*, v. 61, n. 6, p. 1702-1714, 1996.
- LEE, T. -C.; BIEHLER, S.; PARK, S. K.; STEPHENSON, W. J. A seismic refraction and reflection study across the central San Jacinto Basin, Southern California. *Geophysics*, v. 61, n. 5, p. 1258-1268, 1996.
- LIMA, W. A. *Inversão gravimétrica do relevo de bacias extencionais através da variação total*. 2009. 54f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2009.
- LITINSKY, V. A. Concept of effective density: Key to gravity determinations for sedimentary basins. *Geophysics*, v. 54, n. 11, 1474-1482. 1989
- MARQUARDT, D. W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal Of The Society For Industrial And Applied Mathematics*. v. 11, n. 2, p. 431-441.1963.

MARTINS, C. M.; LIMA, W. A.; BARBOSA, V. C. F.; SILVA, J. B. C. Total variation regularization for depth-to-basement estimate: Part 1 – mathematical details and applications. *Geophysics*, v. 76, n. 1, p. I1-I12, 2011.

MILANI, E. J.; DAVISON, I. Basement control and transfer tectonics in the Recôncavo-Tucano-Jatobá rift, Northeast Brazil. *Tectonophysics*. v. 154, p. 41-70, 1988.

MILHOMEM, P. S.; DE MAMAN, E. J.; OLIVEIRA, F. M.; CARVALHO, M. S. S.; SOUZA-LIMA, W. *Bacias sedimentares Brasileiras: Bacia do Recôncavo*. Disponível em: < [http://www.phoenix.org.br/Phoenix51\\_Mar03.html](http://www.phoenix.org.br/Phoenix51_Mar03.html) >, n. 51. Acesso em: 20 jan. 2003.

PATON, S. Active normal faulting, drainage patterns and sedimentation in southwestern Turkey. *Journal of the Geological Society*, v.149, n. 6, p.1031-1044, 1992.

RAO, D. B.; PRAKASH, M. J.; BABU, N. R. 3D and 2½ D modelling of gravity anomalies with variable density contrast. *Geophysical Prospecting*, v. 38, n. 4, p. 411 – 422, 1990.

SARI, C.; SALK, M. Analysis of gravity anomalies with hyperbolic density contrast: an application to the gravity data of Western Anatolia. *Journal of the Balkan Geophysical Society*, v. 5, n. 3, p. 87-96, 2002.

SILVA, J. B. C.; COSTA, D. C. L.; BARBOSA, V. C. F. Gravity inversion of basement relief and estimation of density contrast variation with depth. *Geophysics*. v. 71, n. 5, p. 151-158, 2006.

VISWESWARA RAO, C.; CHAKRAVARTHI, V.; RAJU, M. L. Forward modelling: Gravity anomalies of twodimensional bodies of arbitrary shape with hyperbolic and parabolic density functions. *Computers & Geosciences*. Amisterdam. Elsevier, v. 20, n. 5, p. 873-880, 1994.