



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOFÍSICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

NELSON DE LIMA RIBEIRO FILHO

**ANOMALIA GRAVIMÉTRICA RESIDUAL DA BACIA DE BARREIRINHAS
OBTIDA A PARTIR DA MODELAGEM CRUSTAL GEMMA**

**BELÉM – PARÁ
2017**

NELSON DE LIMA RIBEIRO FILHO

**ANOMALIA GRAVIMÉTRICA RESIDUAL DA BACIA DE BARREIRINHAS
OBTIDA A PARTIR DA MODELAGEM CRUSTAL GEMMA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Geofísica, do Instituto de Geociências
da Universidade Federal do Pará para a obtenção do
grau de Bacharel em Geofísica.
Orientador: Prof. Dr. Cristiano Mendel Martins

BELÉM – PARÁ

2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca do Instituto de Geociências/SIBI/UFPA

Ribeiro Filho, Nelson de Lima, 1990 -

Anomalia gravimétrica residual da Bacia de Barreirinhas obtida a partir da modelagem Crustal GEMMA / Nelson de Lima Ribeiro Filho. – 2017.

51 f. : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Cristiano Mendel Martins

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geofísica, Belém, 2016.

1. Prospecção - Métodos geofísicos. 2. Bacias sedimentares. 3. Geofísica I. Título.

CDD 22. ed.622.15

NELSON DE LIMA RIBEIRO FILHO

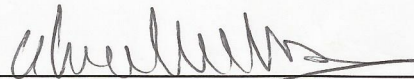
ANOMALIA GRAVIMÉTRICA RESIDUAL DA BACIA DE BARREIRINHAS OBTIDA A
PARTIR DA MODELAGEM CRUSTAL GEMMA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Geofísica do
Instituto de Geociências da Universidade
Federal do Pará, como requisito parcial à
obtenção de grau de Bacharel em
Geofísica.

Data da defesa: 03 de março de 2017.

Conceito: Bxc

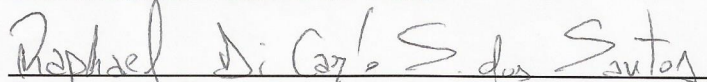
Banca Examinadora:



Prof. Cristiano Mendel Martins - Orientador
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará



Prof. Afonso César Rodrigues Nogueira - Membro
Doutor em Geociências
Universidade Federal do Pará



Raphael Di Carlo Silva dos Santos
Mestre em Geofísica
Universidade Federal do Oeste do Pará

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela oportunidade de concluir esta graduação.

Agradeço também à minha família, por toda a educação e suporte oferecidos ao longo desses anos de vida. Meus pais Nelson e Rosana, e minha irmã Fernanda.

Agradeço à minha companheira Marília Rocha, por todo o carinho e companheirismo que me foi dado durante essa longa caminhada. Por cuidar do meu coração em todos os momentos.

Aos meus amigos que, embora distantes, torceram para que esta etapa pudesse ser concluída. Sou grato a vocês pela amizade em todos esses anos.

Gostaria de agradecer aos amigos de curso, em especial aqueles que foram fundamentais para a minha permanência, me auxiliando e ajudando sempre que necessário. Da turma de 2013: Felipe Louzeiro, Jéssica Pinheiro, Matias Sousa, René Jacob e Tarciana Farias. Da turma de 2012: Adriano Valente, Adriany Reis, Crislene Moreira e Raissa Baldez. Da turma de 2011: Caio Perdigão. Da turma de 2009: Jéssica Lia. Agradeço também aos demais colegas.

Ao professor Cristiano Mendel, pela orientação e paciência no desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso, e por todas as suas palavras, as quais me inspiraram a buscar novos horizontes.

Agradeço também aos companheiros do Grupo de Gravimetria e Magnetometria, Boris Freimann e Renata Sena.

Agradeço ao corpo docente e funcionários da Faculdade de Geofísica, pelo aprendizado e conhecimento, em especial ao Kléberson Moura e à Maria do Socorro Santos Silva. Aos professores da Faculdade de Geologia, que foram importantíssimos para o meu aprimoramento enquanto estudante.

Agradeço ainda ao técnico do Instituto de Geociências, Afonso Quaresma, que me auxiliou precisamente durante a realização da pesquisa de campo, indispensável para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Programa de Educação Tutorial (PET-Geofísica), que proporcionou diversas oportunidades para ensino e pesquisa durante o período de graduação.

Ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional de Petróleo (PRH06/ANP), que confiou a este trabalho uma bolsa de pesquisa primordial para realização.

Por fim, agradeço a todos que participaram de forma direta e indiretamente desta etapa.

“Cada sonho que é deixado para trás é um pedaço de seu futuro que deixa de existir!”

(Steve Jobs)

RESUMO

Neste trabalho, é apresentado um procedimento de separação regional-residual para a interpretação de dados gravimétricos em bacias sedimentares a partir da modelagem crustal. Foi realizada a modelagem a partir de dados disponíveis do modelo crustal GEMMA, que informa os valores de profundidade de topo e base da crosta e a distribuição de densidade discretizada verticalmente em camadas e horizontalmente associadas a províncias geológicas. A anomalia gravimétrica da crosta modelada foi avaliada nos mesmos pontos de observação de dados gravimétricos disponíveis. Foi selecionada a área correspondente à porção continental da Bacia de Barreirinhas. Os dados gravimétricos utilizados são provenientes de quatro diferentes fontes: 1) dados gravimétricos terrestres públicos do Banco de Dados de Exploração e Produção (BDEP/ANP); 2) do Banco de Dados Geodésicos (IBGE); 3) dados gravimétricos adquiridos em coleta de campo; 4) e dados gravimétricos satelitais provenientes das missões espaciais da ESA, disponíveis na plataforma online do ICGEM. Uma vez computado o sinal gravimétrico devido à Moho da região selecionada, presumimos que o sinal residual é obtido através da diferença entre os sinais observados e este regional calculado. Adicionalmente, para fins de comparação, foram utilizadas outras metodologias de separação regional-residual, especificamente a Análise Espectral e o Ajuste Polinomial Robusto. Essas duas técnicas não se mostraram efetiva para delinear o sinal gravimétrico referente à bacia de Barreirinhas. Por outro lado, o procedimento apresentado baseado na modelagem crustal se mostrou eficaz para selecionarmos o sinal residual presumivelmente da Bacia de Barreirinhas. Este procedimento pode ser aplicado para a interpretação de anomalias residuais em qualquer bacia sedimentar.

Palavras-chave: Anomalia gravimétrica. Bacia de Barreirinhas. Modelagem crustal. Modelo GEMMA. Separação regional-residual.

ABSTRACT

In this work, a regional-residual separation procedure is presented for the interpretation of gravity data in sedimentary basins through the crustal modeling. A modeling was performed from available data of the GEMMA crustal model, which informs the top and bottom depth values of the crust and the distribution of density vertically and horizontally discretized in layers and associated with geological provinces. The gravity anomaly of the modeled crust was evaluated at the same observation points of available gravity data. The area corresponding to the continental portion of the Barreirinhas Basin was selected. The gravity data used come from four different sources: 1) public ground gravity data from the Exploration and Production Database (BDEP / ANP); 2) of the Geodetic Database (IBGE); 3) gravity data acquired in field survey; 4) and satellite gravity data from ESA space missions, available on the ICGEM online platform. Once the gravity signal is computed due to the Moho of the selected region, we assume that the residual signal is obtained by the difference between the observed signals and the calculated regional. Additionally, other regional-residual separation methodologies were used for comparison purposes, specifically the Spectral Analysis and the Robust Polynomial Fitting. These two techniques were not effective delineating the gravity signal for the Barreirinhas Basin. However, the presented procedure based on crustal modeling proved effective to select the residual signal presumed to the Barreirinhas Basin. This procedure can be applied for the interpretation of residual anomalies in any sedimentary basins.

Key-words: Gravity anomaly. Barreirinhas Basin. Crustal modeling. GEMMA Model. Regional-residual separation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 -	Modelos de isostasia: a) Pratt; b) Airy; c) modelo Flexural.....	15
Figura 02 -	Modelos de rigidez da litosfera: A) Placa com alta rigidez; B) Placa com baixa rigidez; C) Placa sem rigidez, equivalente ao modelo de Airy.....	16
Figura 03 -	Ilustração do modelo gravimétrico direto: a) Modelo interpretativo de discretização da crosta em M prismas; b) Detalhes de um prisma retangular 3D de dimensões conhecidas para a avaliação do sinal gravimétrico.....	18
Figura 04 -	Perfil do sinal gravimétrico de um prisma retangular com dimensões horizontais e verticais conhecidas e contraste de densidade positivo.....	19
Figura 05 -	Mapa 3D em profundidade com empilhamento das camadas de sedimento médio e superior e crosta, obtidas a partir do modelo crustal GEMMA para a área de estudo.....	22
Figura 06 -	Mapa de localização geográfica da região de estudo, envolvendo os estados do Maranhão, Piauí e a parte noroeste do estado do Ceará, a partir dos dados da Base Cartográfica da CPRM.....	23
Figura 07 -	Mapa geológico simplificado da região de estudo, correspondente à porção onshore da Bacia de Barreirinhas, a partir dos dados da Base Cartográfica da CPRM.....	25
Figura 08 -	Mapa com as localizações das estações gravimétricas do Banco de Dados do IBGE e das estações gravimétricas coletadas em campanha de campo, sobrepostas ao mapa de modelo digital de terreno.....	28
Figura 09 -	Mapa com a distribuição das estações gravimétricas do BDEP/ANP sobrepostas ao mapa de modelo digital de terreno.....	29
Figura 10 -	Mapa de anomalia Bouguer de observação gravimétrica satelital obtido a partir da plataforma online do ICGEM, com resolução de 0,02°.....	30
Figura 11 -	Topografia utilizada retirado do modelo ETOPO1. a) Mapa de relevo da topografia, linha em cor preta representa a atual linha de costa; b) Mapa 3D de elevação e batimetria.....	33

Figura 12 -	Mapa de anomalia gravimétrica Free-air da região da Bacia de Barreirinhas, indicando contorno positivo correspondente à zona de falhas e fraturas existentes. Grid de aproximadamente 2 km.....	34
Figura 13 -	Arranjo topo e base da crosta produzindo um típico sinal de lobos negativo e positivo na anomalia free-air associados à região de transição plataforma talude.....	35
Figura 14 -	Mapa de anomalia Bouguer completa com todas as observações gravimétricas utilizadas continuadas verticalmente para uma mesma cota. A linha em cor branca representa a atual linha de costa. Curvas de contorno com valor de 10 mGal.....	36
Figura 15 -	Mapa de anomalia Bouguer completa com destaque para a localização de altos e baixos gravimétricos.....	37
Figura 16 -	Separação regional residual utilizando a técnica da Análise Espectral. Linha em cor preta representa a atual linha de costa. Curvas de contorno para 20 e 10 mGal para os sinais regional e residual, respectivamente.....	39
Figura 17 -	Separação regional residual utilizando o método do ajuste polinomial robusto para o polinômio ajustado em grau 2. Linha em cor preta representa a atual linha de costa. Curvas de contorno para 10 e 5 mGal para os sinais regional e residual, respectivamente.....	41
Figura 18 -	Separação regional residual utilizando o método do ajuste polinomial robusto para o polinômio ajustado em grau 3. Linha em cor preta representa a atual linha de costa. Curvas de contorno para 20 e 10 mGal para os sinais regional e residual, respectivamente.....	42
Figura 19 -	Separação regional residual utilizando o método do ajuste polinomial robusto para o polinômio ajustado em grau 6. Linha em cor preta representa a atual linha de costa. Curvas de contorno para 20 e 10 mGal para os sinais regional e residual, respectivamente.....	44
Figura 20 -	Separação regional residual utilizando a modelagem crustal. Linha em cor branca representa a atual linha de costa. Curvas de contorno para 10 e 5 mGal para os sinais regional e residual, respectivamente.....	46

Figura 21 - Destaque do mapa residual referente à bacia de Barreirinhas, indicando as regiões de existência de falhas e fraturas. Linha tracejada em cor azul representa a curva de 0 mGal da anomalia residual. Escala de cor demarcada para o mapa central com intervalo de -100 a 70 mGal..... 48

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 ISOSTASIA NA MARGEM CONTINENTAL	14
2.1 Modelos de Compensação Isostática	14
3 METODOLOGIA	18
3.1 Modelo Gravimétrico Direto	18
3.2 Análise Espectral	20
3.3 Ajuste Polinomial Robusto	21
3.4 Descrição do Modelo GEMMA	21
4 ÁREA DE ESTUDO E GEOLOGIA LOCAL	23
5 DADOS GRAVIMÉTRICOS DISPONÍVEIS	26
5.1 Dados Coletados	26
5.2 Banco de Dados Geodésicos (IBGE)	27
5.3 Banco de Dados de Exploração e Pesquisa (ANP)	27
5.4 Banco de Dados Satelitais (ICGEM)	30
5.5 Processamento dos Dados	31
5.5.1 Modelo ETOPO1	32
6 APLICAÇÃO EM DADOS REAIS	34
7 RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
8 CONCLUSÃO	49
REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

A gravimetria é um dos métodos mais utilizados na geofísica, sendo capaz de auxiliar o interprete na identificação de alguns tipos de estruturas e feições de interesse em bacias sedimentares, inclusive para fins de prospecção de hidrocarbonetos. Devido ao contraste de densidade entre o pacote sedimentar e o embasamento cristalino, um sinal gravimétrico consistente com a geometria de uma bacia é produzido e técnicas de interpretação e modelagem podem ser utilizadas a fim de obter as informações geológicas contidas no sinal gravimétrico observado. Porém na prática o sinal gravimétrico observado é resultado do somatório dos efeitos gravimétricos produzidos por todas as fontes próximas e não somente por uma fonte única, especificamente apenas da bacia sedimentar.

A anomalia gravimétrica de bacias sedimentares por sua vez presumivelmente se apresenta como negativa, uma vez que o contraste de densidade entre o pacote sedimentar e a crosta é, em geral, negativo. Entretanto, outra fonte que influencia o sinal gravimétrico observado sobre a bacia pode torná-lo positivo. Principalmente, esta outra fonte é devido à superfície que separa crosta e manto, denominada Descontinuidade de Mohorovicic ou Moho, uma vez que o contraste de densidade entre o manto e a crosta é positivo. Isto torna a interpretação do sinal gravimétrico observado dependente da separação dos diferentes sinais que o compõem. Desse modo, usualmente denominamos o sinal gravimétrico da bacia como residual e o sinal gravimétrico devido à Moho como regional, sendo a separação entre os dois sinais um procedimento necessário para a interpretação de bacias sedimentares.

Em geral os métodos de separação regional-residual podem ser agrupados como os que tratam de separar o conteúdo espectral (SPECTOR; GRANT, 1970) ou os que ajustam polinômios (BELTRÃO, 1991). Uma terceira possibilidade é a de incorporar a modelagem crustal para se obter informações a respeito da contribuição gravimétrica regional, a fim de retirá-la do dado observado e assim, finalmente, obter o sinal residual, que presumivelmente é referente à bacia sedimentar.

Aplicamos a modelagem gravimétrica ao modelo crustal de distribuição de densidade, províncias geológicas e o relevo da Moho do projeto GEMMA (GOCE Exploitation for Moho Modeling and Application), proposto por Reguzzoni e Sampietro (2015). Especificamente, selecionamos para aplicar os métodos de separação regional residual o conjunto de dados referente à porção continental da Bacia de Barreirinhas, nordeste do Estado do Maranhão, margem equatorial brasileira. Além da modelagem gravimétrica crustal do modelo GEMMA,

também, procedemos com a Análise Espectral (SPECTOR; GRANT, 1970) e o Ajuste Polinomial Robusto (BELTRÃO, 1991).

No entanto, devido o relevo da superfície da Moho ser uma fonte gravimétrica intensa e o fato da Bacia de Barreirinhas estar localizada junto à margem continental, a sobreposição da geometria do topo e da base da crosta produz um sinal gravimétrico característico com forma de dois lóbulos, um negativo e outro positivo (adaptado de ALLEN; ALLEN, 2013). Devido a esta circunstancia tanto a Análise Espectral quanto o Ajuste Polinomial Robusto não se mostraram efetivos para delinear o sinal gravimétrico presumivelmente referente à bacia de Barreirinhas. Por sua vez, como no modelo crustal GEMMA a estimativa da profundidade da Moho inclui informações independentes da gravimetria (REGUZZONI; SAMPIETRO, 2015), e como todos os atributos geométricos do topo e base da crosta estão presentes na modelagem, este procedimento baseado na modelagem crustal se mostrou efetivo para selecionar o sinal gravimétrico referente à Bacia de Barreirinhas.

2 ISOSTASIA NA MARGEM CONTINENTAL

As teorias de Airy e Pratt estimularam discussões a respeito da reação da litosfera devido às cargas topográficas, e levaram a formulação do conceito de isostasia a partir das tentativas de definir a forma da Terra e as implicações de relevos muito elevados, permitindo a compreensão dos fenômenos de epirogênese na região continental e oceânica (adaptado de WATTS, 2001). Define-se Isostasia como o processo de ajuste da carga produzida pela massa associada à topografia, de modo a alcançar a mesma pressão em uma região profunda. Os modelos mais comuns para descrever esse conceito são os de Airy e Pratt no século XIX e de Vening-Meinesz no século XX, que introduziu um novo conceito neste escopo, o de flexura crustal.

Na evolução das pesquisas relacionadas à isostasia, se notou que taxas de erosão ou remoção de gelo em áreas glaciais devido às mudanças climáticas e surgimento ou desaparecimento de um grande lago afetariam o relevo de uma região de forma substancial. No entanto, uma possível alteração térmica no manto também produziria grandes modificações na topografia. Realizar a distinção das fontes causadoras é uma tarefa difícil, pois as causas estão mutuamente relacionadas e provocam efeitos profundos a partir de eventos superficiais. A compreensão das anomalias crustais que geram efeitos topográficos pode ser feita a partir de observações sísmicas profundas, de observações gravimétricas e de observações magnéticas. Geralmente, a resposta gravimétrica e a relação com o relevo da litosfera permitem ao intérprete deduzir informações a respeito da espessura elástica que sustenta a carga e suas características distintas a partir da imposição de excesso de massa ou ausência de massa (OLIVEIRA, 2008).

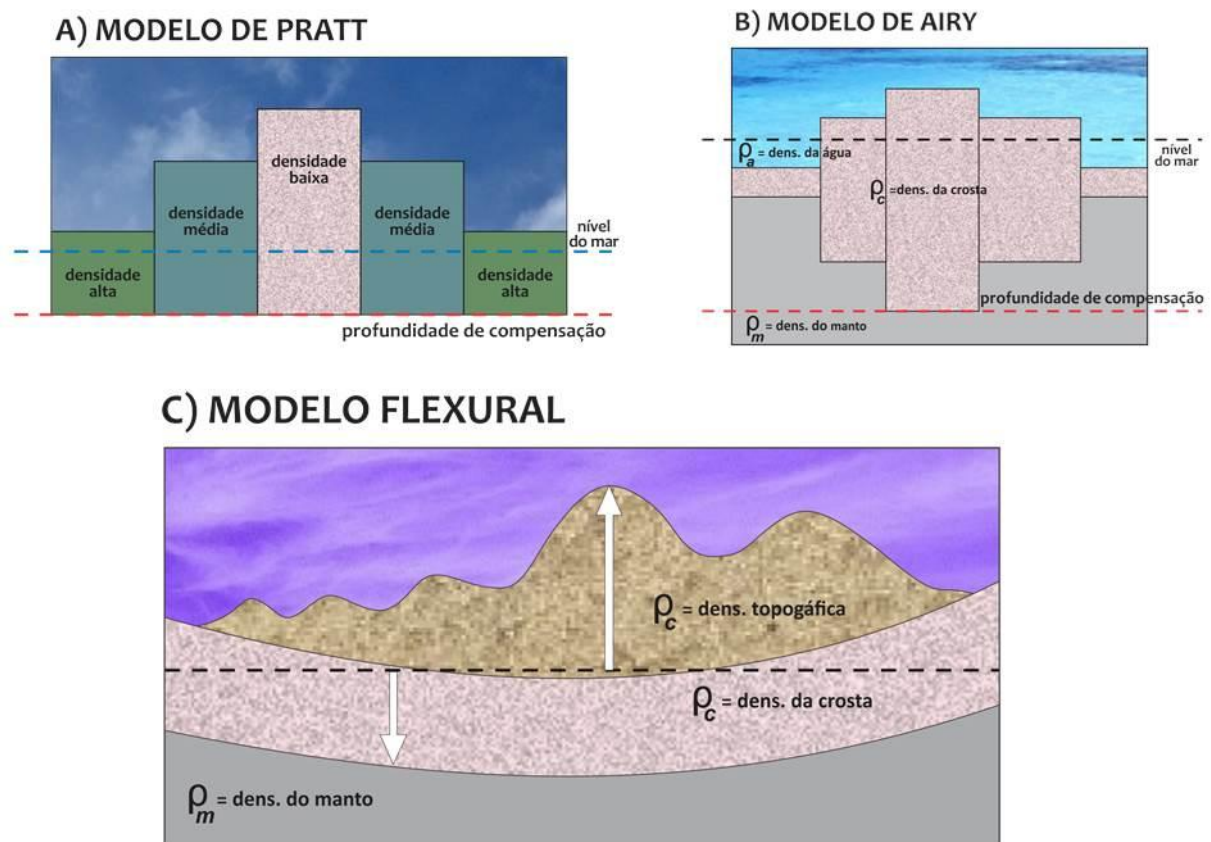
2.1 Modelos de Compensação Isostática

No modelo de Pratt, a densidade média da crosta se mostra menor em regiões montanhosas em comparação às regiões de planícies. Esse modelo indica que variações laterais de densidade em subsuperfície causam forças compensatórias devido ao desequilíbrio, e que massas topográficas são compensadas em um nível médio de profundidade constante (Figura 1-a). Por sua vez, o modelo de Airy descreve a crosta com densidade constante e mais espessa abaixo de regiões com elevada topografia do que nas regiões de planícies. Esse modelo indica a existência de uma fina camada de crosta sobreposta a uma camada mais densa, de modo que para compensar a elevação na topografia, a crosta produz uma raiz

profunda na camada inferior (Figura 1-b). Entretanto, o modelo de Airy implica que a crosta não suporta esforços verticais, sem a existência de propriedades elásticas.

No modelo de flexura proposto por Vening-Meinesz, a compensação das feições na superfície da Terra não era necessariamente local, mas podendo também ocorrer de forma regional. Nesse caso, a litosfera reage aos carregamentos como uma placa elástica repousando sobre um fluido fraco (WATTS 2001), em que as cargas de superfície são compensadas pelo espessamento da crosta, porém inclui também a sua resistência lateral (Figura 1-c).

Figura 01 – Modelos de isostasia: a) Pratt; b) Airy; c) modelo Flexural.



Fonte: Do autor.

Devido à alta ou baixa rigidez da litosfera, uma carga de mesma intensidade produz uma deformação de pequena amplitude e grande comprimento de onda para uma litosfera rígida e deformação de alta amplitude e comprimento de onda menor para uma litosfera pouco rígida, ou mais flexível. A equivalência ao modelo de Airy ocorre no caso de uma litosfera sem rigidez alguma, onde não ocorre resistência quanto à carga e a compensação se dá por um grande espessamento da placa (Figura 02).

Figura 02 – Modelos de rigidez da litosfera: **a)** placa com alta rigidez; **b)** placa com baixa rigidez; **c)** Placa sem rigidez, equivalente ao modelo de Airy.

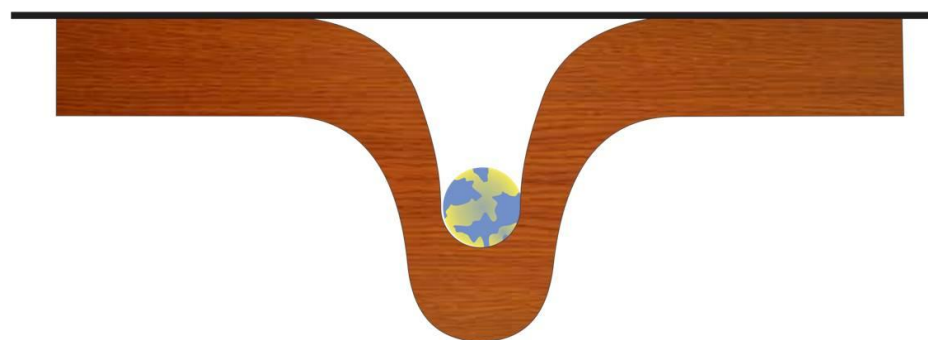
A) RIGIDEZ FLEXURAL ALTA



B) RIGIDEZ FLEXURAL BAIXA



C) MODELO AIRY



Fonte: Adaptado de Oliveira, 2008.

No entanto, embora não seja possível observar a superfície da flexura de forma direta, as respostas flexurais associadas aos eventos geológicos causadores de suspensão ou rebaixamento crustal podem ser estudadas através da anomalia gravimétrica Free-air. Por ser um dado facilmente obtido, a anomalia Free-air é utilizada para as estimativas das propriedades mecânicas da litosfera oceânica e de margem continental. No entanto, esta anomalia gravimétrica representa a soma de dois efeitos: um referente à topografia e outro

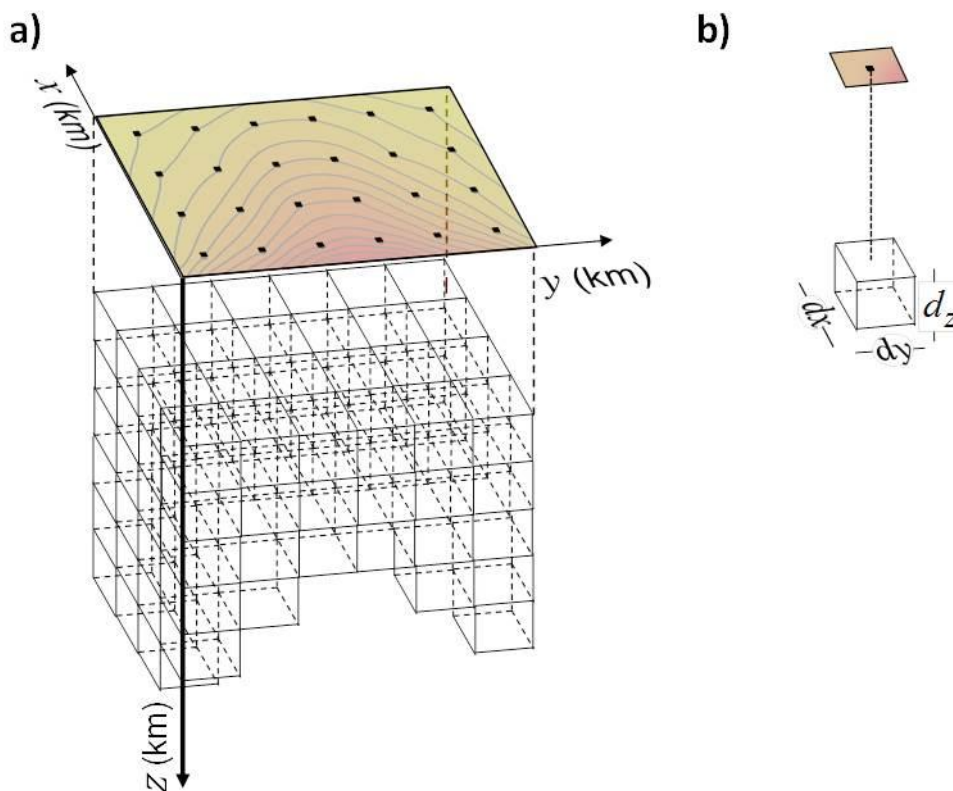
referente à compensação (WATTS, 2001). Para o modelo de Airy, a compensação topográfica no fundo mar ocorre por variações laterais na espessura da crosta oceânica, com densidade aproximadamente uniforme. No modelo flexural, a compensação ocorre ao longo de uma larga região, assumindo três importantes condições: a crosta deve possuir a mesma densidade que a carga sobreposta; o preenchimento da flexura deve ter a mesma densidade que a crosta; e a crosta deve assumir densidade uniforme.

3 METODOLOGIA

3.1 Modelo Gravimétrico Direto

Seja uma crosta heterogênea sobreposta sobre um manto homogêneo. Delimitamos uma região finita no plano horizontal $x - y$ que contenha a região correspondente à crosta, e delimitamos o volume total da crosta definindo a espessura crustal entre o topo e a base. Discretizamos este volume contendo M prismas elementares retangulares 3D distribuídos com m_x e m_y prismas justapostos nas direções horizontais x e y e m_z prismas sobrepostos na vertical z até que toda a espessura crustal seja preenchida, como mostra a Figura 03-a. Como mostra a Figura 03-b, as dimensões dx , dy e dz desses prismas são conhecidas. Presumimos que o contraste de densidade entre um prisma elementar da crosta e o manto é conhecido, sendo homogêneo dentro de cada um dos prismas, mas podendo variar de prisma para prisma.

Figura 03 – Ilustração do modelo gravimétrico direto: **a)** Modelo interpretativo de discretização da crosta em M prismas; **b)** Detalhes de um prisma retangular 3D de dimensões conhecidas para a avaliação do sinal gravimétrico.



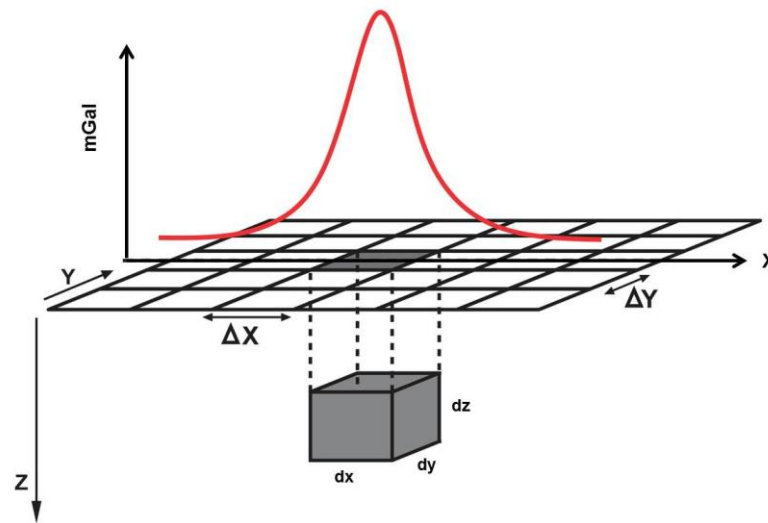
Fonte: Adaptado de Martins, 2009.

A função f_i que calcula a componente vertical do sinal gravimétrico avaliado no i -ésimo ponto de observação (x_i, y_i, z_i) produzida por um único prisma retangular 3D com densidade constante ρ e dimensões conhecidas dx , dy e dz , com o centro localizado no ponto (x_j, y_j, z_j) , é dada por Blakely (1996) como:

$$f_i = \gamma \rho \int_{z_1}^{z_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{x_1}^{x_2} \frac{z - z'}{[(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2]^{\frac{3}{2}}} dx' dy' dz' \quad (1)$$

sendo γ a constante gravitacional de Newton, $x = x_i - x_j$, $y = y_i - y_j$ e $z = z_i - z_j$, $x_1 = x - (dx/2)$, $y_1 = y - (dy/2)$ e $z_1 = z - (dz/2)$, $x_2 = x + (dx/2)$, $y_2 = y + (dy/2)$ e $z_2 = z + (dz/2)$, x' , y' e z' as coordenadas do centro de um prisma de volume infinitesimal dv' , de modo que $dv' = dx'dy'dz'$, dentro do volume do prisma (Figura 04).

Figura 04 – Perfil do sinal gravimétrico de um prisma retangular com dimensões horizontais e verticais conhecidas e contraste de densidade positivo.



Fonte: Do autor.

Para um conjunto de M prismas o valor da componente vertical calculada no i -ésimo ponto de observação g_{zi} , é dado pelo somatório:

$$g_{z_i} = \sum_{j=1}^M f_i(x_j, y_j, z_j) \quad (2)$$

com $j = 1, \dots, M$ e sendo $f_i(x_j, y_j, z_j)$ a função dada pela equação 1.

A solução algébrica-algorítmica desta integral da equação 1 foi definida por PLOUFF (1976) como

$$f_i(x_i, y_i, z_i) = \gamma \Delta \rho_j \sum_{k=1}^2 \sum_{l=1}^2 \sum_{m=1}^2 \mu_{klm} \left[z_m \arctan \frac{x_k y_l}{z_m R_{klm}} - x_k \log(R_{klm} + y_l) - y_k \log(R_{klm} + x_l) \right] \quad (3)$$

sendo os valores $R_{klm} = \sqrt{x_k^2 + y_l^2 + z_m^2}$, $\mu_{klm} = (-1)^k (-1)^l (-1)^m$, $x_1 = (x_i - x_j) - dx/2$, $x_2 = (x_i - x_j) + dx/2$, $y_1 = (y_i - y_j) - dy/2$, $y_2 = (y_i - y_j) + dy/2$, $z_1 = z_j$ e $z_2 = z_j$.

3.2 Análise Espectral

A análise espectral é uma ferramenta utilizada para separar as diferentes componentes espectrais existentes em sinal observado, constituindo uma forma de identificar, descrever e analisar sinais. Consiste na transformação dos dados de um sinal através da utilização da transformada de Fourier do domínio do espaço para o domínio do número de ondas, a fim de se obter o espectro, permitindo a identificação de sinais correspondentes a certo comprimento de onda e permitindo também a eliminação de sinais referentes às fontes de interferência coerentes (SPECTOR; GRANT, 1970).

Para realizar a separação regional-residual da anomalia gravimétrica, o método espectral é um método rápido e pouco subjetivo. A separação realizada ocorre através de processos de filtragem, onde são aplicados filtros passa-baixa ou passa-alta, filtros de continuação para cima e filtros iterativos para a determinação do sinal regional. Porém, a superposição de espectros das componentes regional e residual nem sempre permite uma completa e/ou efetiva separação destes sinais.

Neste trabalho, a análise espectral foi realizada com o software Oasis Montaj (Geosoft), que oferece uma ferramenta de filtragem espectral interativa na qual os conteúdos associados às altas ou baixas frequências são modificados pelo usuário, a fim de se obter os parâmetros que definem uma filtragem eficiente, sem que ocorra a perda do sinal gravimétrico residual.

3.3 Ajuste Polinomial Robusto

O método do Ajuste Polinomial Robusto proposto por BELTRÃO (1991) se mostra bastante eficaz na separação regional-residual de dados gravimétricos e foi utilizado em estudos de Ribeiro e Mantovani (2011), Santos et al. (2011) e Vasconcelos (2007). Este método leva em consideração a informação a priori de que todos os valores de uma mesma anomalia devem ter o mesmo sinal, reduzindo a ocorrência de pseudo-anomalias no campo residual, o que comumente ocorre em métodos que utilizam o ajuste por mínimos quadrados.

Neste método, dado o grau do polinômio, os coeficientes deste polinômio são estimado através de sucessivas iterações, com a aplicação de pesos para resíduos de valor elevado. Os valores elevados de resíduos acabam exercendo pouca influência no cálculo do campo regional. O algoritmo é encerrado na iteração em que é atingida a estabilidade na mediana dos valores absolutos de resíduos. Este método permite a utilização de polinômios de ordens altas, minimizando o aparecimento de pseudo-anomalias. Adicionalmente, cabe ao intérprete a seleção do grau do polinômio que melhor representa o sinal regional e residual utilizando-se de informações geológicas a priori, como contorno horizontal da fonte responsável pelo sinal gravimétrico residual.

3.4 Descrição do Modelo GEMMA

O Projeto GEMMA apresenta um modelo crustal global da profundidade e o relevo da Moho, bem como da distribuição de densidade crustal, com variações tanto horizontais como verticais da densidade. Embora para algumas regiões apresente valores aproximados, e para outras regiões valores não realistas, para a profundidade da Moho, globalmente este modelo pode fornecer informações importantes acerca do comportamento da Terra (REGUZZONI; SAMPIETRO, 2015).

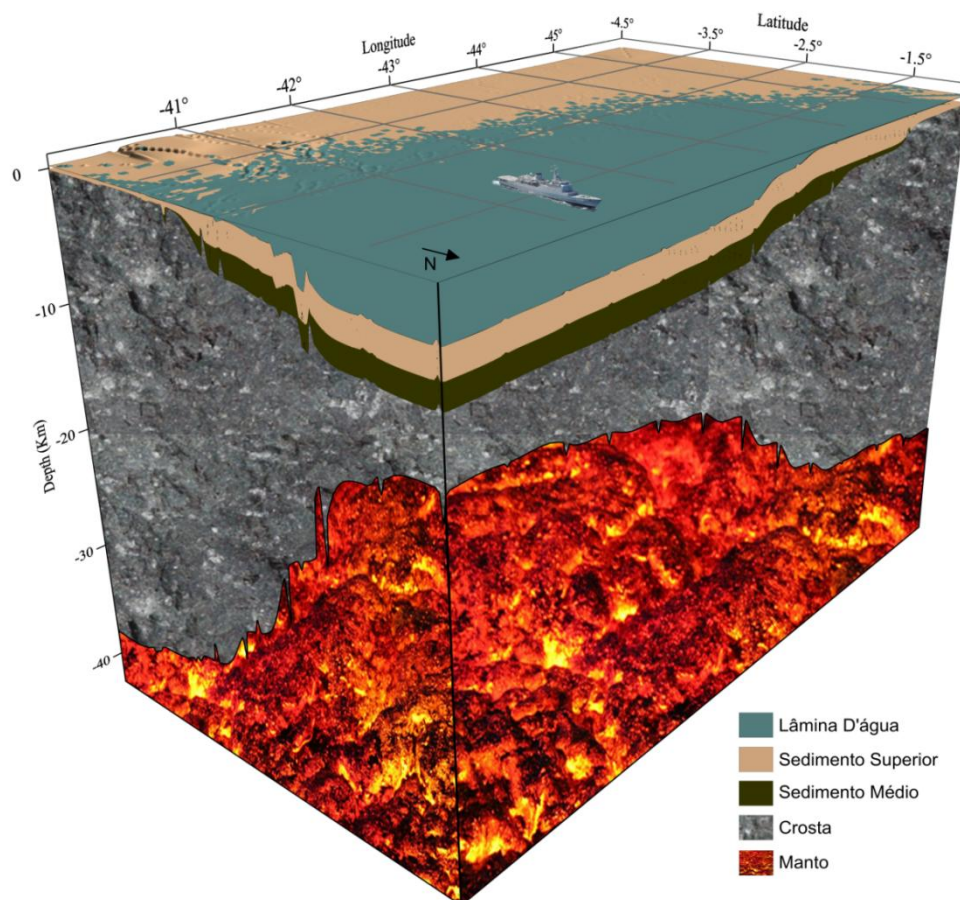
Este modelo crustal é obtido a partir de dados gravimétricos satelitais da missão GOCE (DRINKWATER et al., 2003). Também é baseado numa descrição precisa da estrutura crustal através do potencial gravitacional normal calculado para uma distribuição de massa em um elipsóide de referência, com informações a respeito da densidade referente às camadas de gelo, batimetria, crosta e manto. Além disso, utiliza informações oriundas de tomografia sísmica para definir tanto a profundidade da Moho como para definir a densidade crustal.

Os parâmetros modelados são resultantes de aproximações em termos de harmônicos esféricos, com resolução horizontal de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. Os parâmetros de fronteiras de gelo, batimetria e topografia são extraídas do modelo ETOPO1, $1^\circ \times 1^\circ$. A densidade do manto

superior é obtida de SIMMONS et al. (2010). O modelo de distribuição de densidade da crosta é baseado no modelo de camadas horizontais, identificando oito possíveis províncias geológicas diferentes.

A plataforma online <http://goceedata.com.polimi.it> permite acesso aos parâmetros e dados de todo o modelo crustal GEMMA, para todas as camadas disponíveis, disponibilizando informações a respeito da profundidade de topo e base de cada camada, da respectiva distribuição de densidade bem como o efeito gravitacional da camada expresso pela segunda derivada vertical. Para isso, o usuário define a região de interesse, seleciona a camada de dados desejada e a resolução horizontal. As camadas disponíveis são: batimetria; placas de gelo; sedimentos superiores, sedimentos médios e sedimentos inferiores; crosta cristalina; manto superior. O modelo de profundidade das camadas para a área de estudo está mostrado na Figura 05, sendo que especificamente para esta região não existem as camadas de placas de gelo e as camadas de sedimentos inferiores.

Figura 05 - Mapa 3D em profundidade com empilhamento das camadas de sedimento médio e superior e crosta, obtidas a partir do modelo crustal GEMMA para a área de estudo.

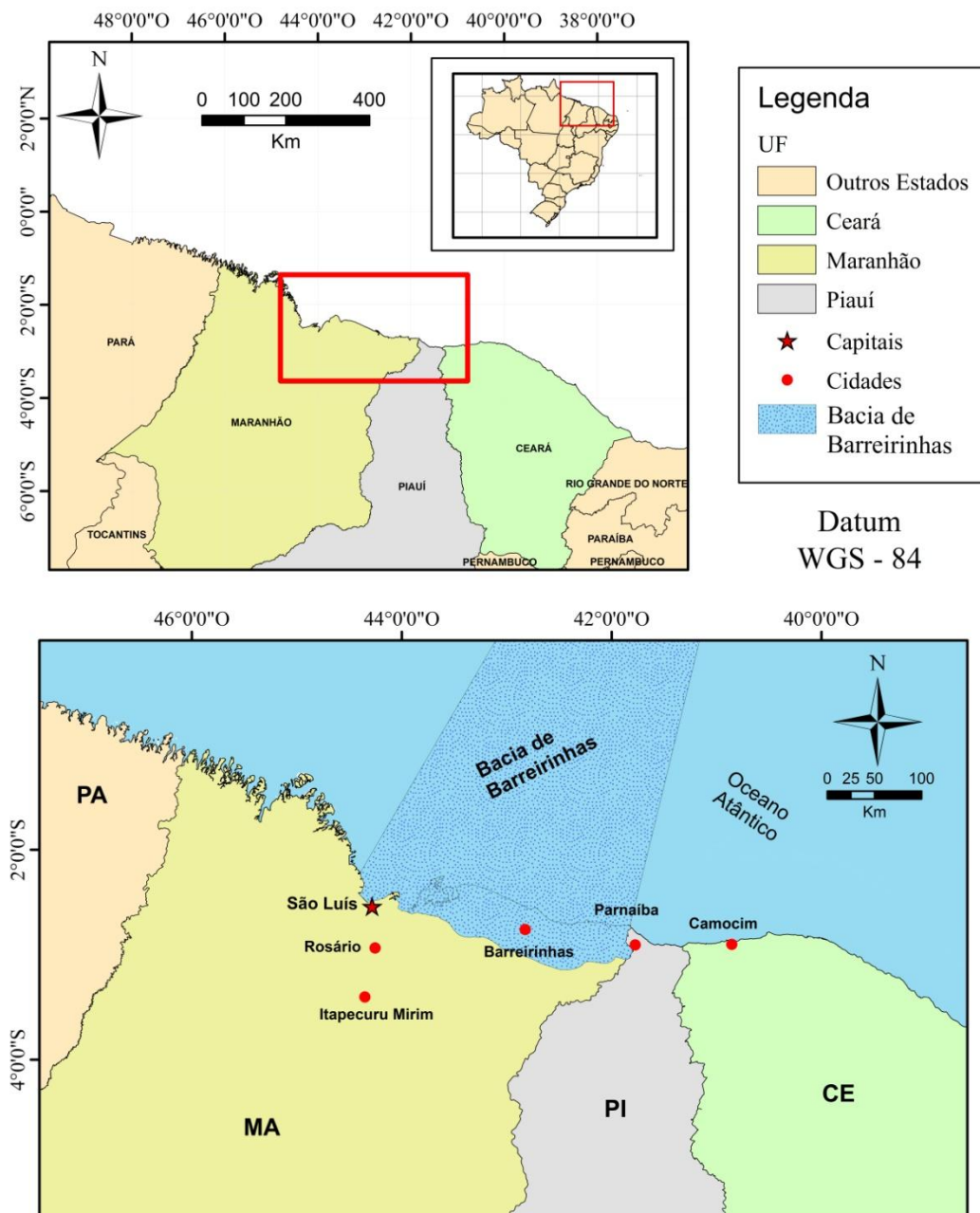


Fonte: Do autor.

4 ÁREA DE ESTUDO E GEOLOGIA LOCAL

A área de estudo e de aplicação das metodologias propostas corresponde à porção continental da Bacia de Barreirinhas. Esta bacia, no entanto, está incluída no grupo de bacias denominadas como “nova fronteira petrolífera”, e situa-se na porção da margem equatorial brasileira, correspondente à costa do estado do Maranhão e adjacências (Figura 06).

Figura 06 – Mapa de localização geográfica da região de estudo, envolvendo os estados do Maranhão, Piauí e a parte noroeste do estado do Ceará, a partir dos dados da Base Cartográfica da CPRM.



Fonte: Adaptado de Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM).

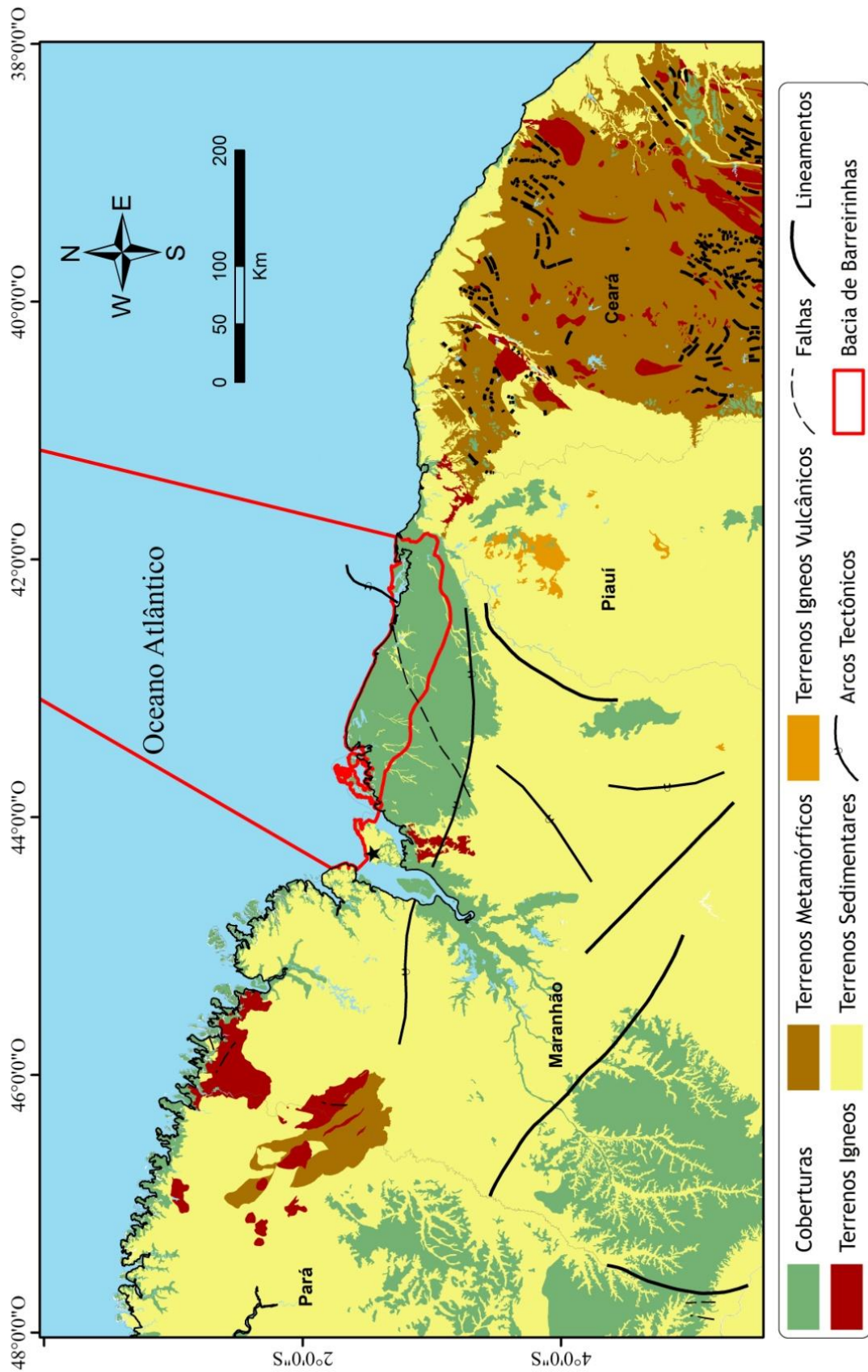
A Bacia de Barreirinhas estende-se por uma área total de aproximadamente 85 mil km², sendo boa parte de sua área submersa com profundidade máxima estimada entre 5 e 6 km (adaptado de SOARES JUNIOR et al., 2008). Os limites da bacia são dados pelo Alto de Tutóia a leste, e pelas plataformas da Ilha de Santana e Sobradinho a oeste e sul, respectivamente. Para noroeste, seu limite é arbitrário, por não existir feições geológicas bem definidas que possam justificar a separação entre as bacias de Barreirinhas e Pará-Maranhão.

Estudos de Soares Jr. (2011) mostram que a formação da bacia sedimentar de Barreirinhas está relacionada aos diversos eventos distensivos ocorridos a partir do Neotriássico, resultando na separação dos continentes Africano e Sul-americano. No decorrer deste período, ocorreu a fragmentação continental e formação do Oceano Atlântico, juntamente com a formação de outras bacias sedimentares localizadas na margem equatorial brasileira, como as bacias da Foz do Amazonas, Ceará e Pará-Maranhão. Entretanto, embora essas bacias tenham passado por diversos estágios de evolução e diferentes ambientes de sedimentação, algumas tiveram seu desenvolvimento interrompido, enquanto as bacias restantes evoluíram para a fragmentação e margem passiva.

Trosdorf Júnior et al. (2007) descrevem o desenvolvimento da Bacia de Barreirinhas sobre a Bacia do Parnaíba, com embasamento definido em três principais elementos: o Cráton São Luís, de idade parcialmente Arqueana; Faixa Gurupi, com idade Neoproterozóica; e a Província Borborema. Esse embasamento é constituído de rochas cristalinas pré-cambrianas, metamórficas e vulcânicas básicas pertencentes ao Cretáceo inferior. A Bacia forma um sistema de grabens profundos, limitados por falhas normais orientadas preferencialmente na direção NW-SE. Estas falhas estão situadas sobre as rochas ígneas e metamórficas do Cráton São Luis e localizadas a Norte de arcos tectônicos (VEIGA JUNIOR, 2000).

No que diz respeito à geologia da região, a porção onshore da Bacia de Barreirinhas cobre aproximadamente 13 mil km² e tem sido estudada por levantamentos gravimétricos e sísmicos. Estudos de Trosdorf Júnior et al. (2007) mostram que a esta região é completamente coberta por sedimentos do Terciário, embora exista predominância de sedimentação eólica recente, com a existência de um pacote sedimentar de espessura estimada entre 5 e 6 km, depositado a partir do Albiano (Figura 07). Na região porção oceânica da Bacia, Feijó (1994) por outro lado descreve a constituição do preenchimento da Bacia por sedimentos provenientes de depósitos de leques deltaicos, plataformas carbonáticas de alta e baixa energia e de ambiente marinho profundo. Há predominância de folhelhos, arenitos finos, médios e grossos, além da presença de carbonatos em menor quantidade.

Figura 07 – Mapa geológico simplificado da região de estudo, correspondente à porção onshore da Bacia de Barreirinhas, a partir dos dados da Base Cartográfica da CPRM.



Fonte: Adaptado de Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM).

5 DADOS GRAVIMÉTRICOS DISPONÍVEIS

Para este trabalho, selecionamos os dados gravimétricos de quatro diferentes fontes:

- i. dados gravimétricos coletados em aquisição de campo, sendo parte deles exclusivamente para o desenvolvimento deste trabalho e outra parte utilizada em Jorge (2013);
- ii. dados gravimétricos terrestres públicos referentes às Estações Gravimétricas (EG) e estações de Referência de Nível (RN), ambas pertencentes ao Banco de Dados Geodésicos do IBGE (<http://www.ibge.gov.br>);
- iii. dados gravimétricos terrestres públicos do Banco de Dados de Exploração e Pesquisa da Agência Nacional de Petróleo (BDEP/ANP), interpolados e projetados principalmente sobre a malha de estradas e rios, distribuídos sobre a área continental da Bacia de Barreirinhas;
- iv. dados gravimétricos satelitais referentes às missões espaciais GOCE, GRACE e LAGEOS, disponíveis na plataforma online do ICGEM (International Centre for Global Earth Models – <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/>).

5.1 Dados Coletados

A campanha de aquisição de dados gravimétricos na região de Barreirinhas para fins de realização deste trabalho foi financiada pela Agência Nacional de Petróleo, no âmbito do Programa de Recursos Humanos da ANP, convênio ANP/UFPA/PRH-06.

Coletamos um conjunto de dados gravimétricos terrestres e de altimetria de precisão durante a campanha de aquisição. Foram utilizados: um gravímetro relativo Lacoste & Romberg, modelo G628, de propriedade da Faculdade de Geofísica da Universidade Federal do Pará; um conjunto de GPS Geodésico (dGPS), de precisão vertical centimétrica, modelo R8 TRIMBLE, também de propriedade da Universidade Federal do Pará, campus Bragança.

Os dados foram coletados com espaçamento aproximado de 10 km entre as estações, sobre o trecho Itapecuru Mirim – Barreirinhas – Parnaíba. Foram realizadas três leituras em cada estação, a fim de validar a precisão do equipamento. Como estação base, foram utilizadas as Estações Gravimétricas e de Referência de Nível do IBGE, com valor de gravidade absoluta, em mGal, e altitude ortométrica, totalizando 4 estações base. Em todas as estações, foram calculadas as posições geográficas e altitude ortométrica através do GPS

Diferencial. Foram realizadas, ao total, 70 estações gravimétricas durante sete dias de atividade de campo.

Também utilizamos os dados gravimétricos terrestres referentes ao estudo de Jorge (2013), coletados em com o mesmo gravímetro relativo (Lacoste & Romberg). Os valores de coordenadas de localização e altitude altimétrica foram obtidos através de GPS comum. Para a conversão da altitude altimétrica em ortométrica, utilizamos o software MapGeo, do IBGE, disponível na plataforma online do Instituto. Foram realizadas 295 estações gravimétricas sobre rodovias no trajeto Rosário (MA) – Camocim (CE), passando pelos municípios de Barreirinhas (MA) e Parnaíba (PI). As localizações de todas as estações gravimétricas coletadas utilizadas para este trabalho estão mostradas na Figura 08.

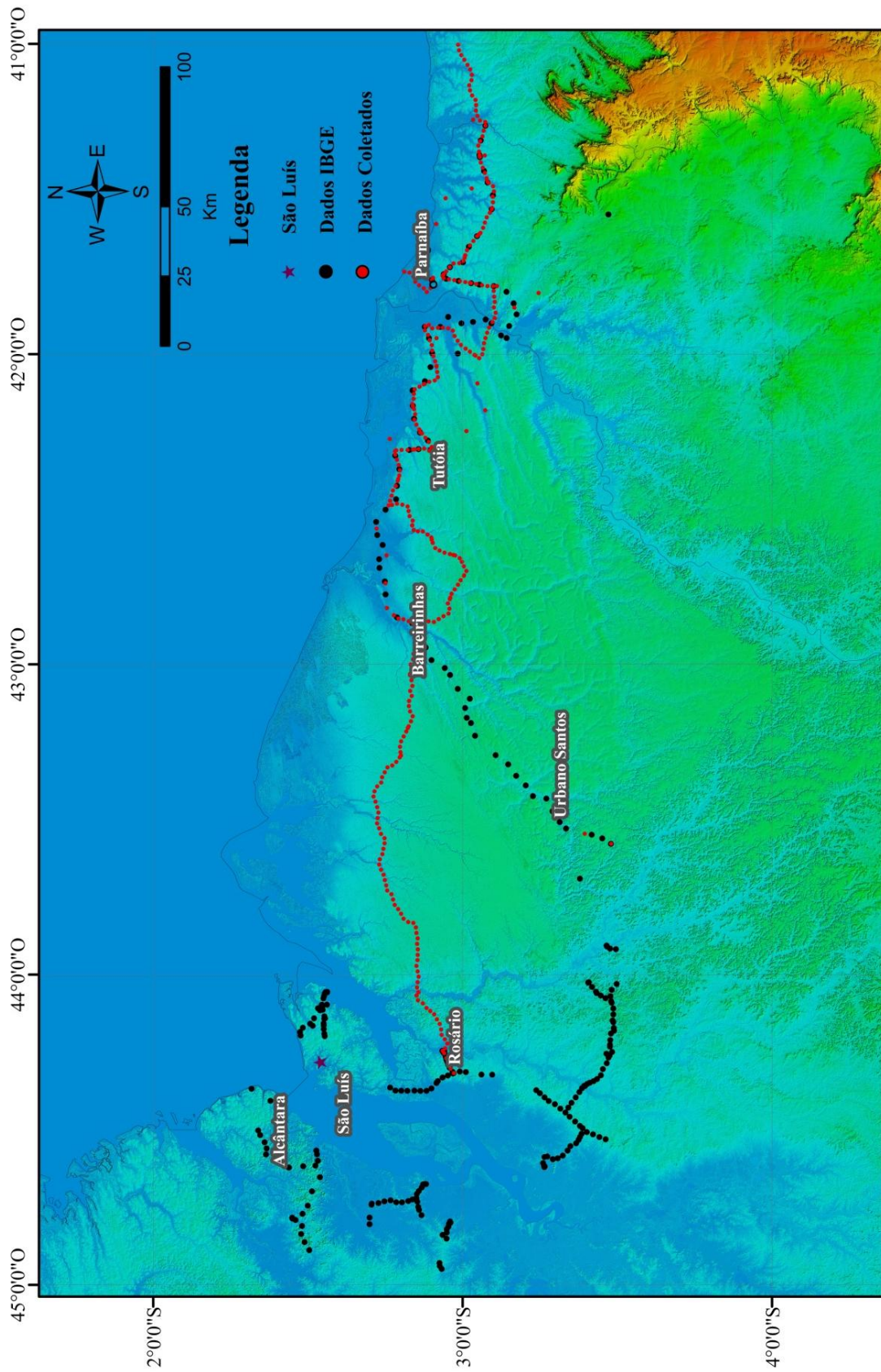
5.2 Banco de Dados Geodésicos (IBGE)

O Banco de Dados Geodésicos do IBGE possui uma rede gravimétrica estabelecida para o território nacional. Para a região estudada, foram adquiridos diretamente da plataforma online do IBGE um total de 277 relatórios tanto de Estação Geodésica (EG) quanto de Estações de Referência de Nível (RN). Neste relatório, dentre outras informações, são informados a localização geográfica, altitude ortométrica e o valor da gravidade absoluta local. Estes valores de Estação Geodésica e de Referência de Nível foram utilizados para a confirmação dos dados adquiridos durante o trabalho de campo. As localizações das estações do IBGE também estão mostradas na Figura 08.

5.3 Banco de Dados de Exploração e Pesquisa (ANP)

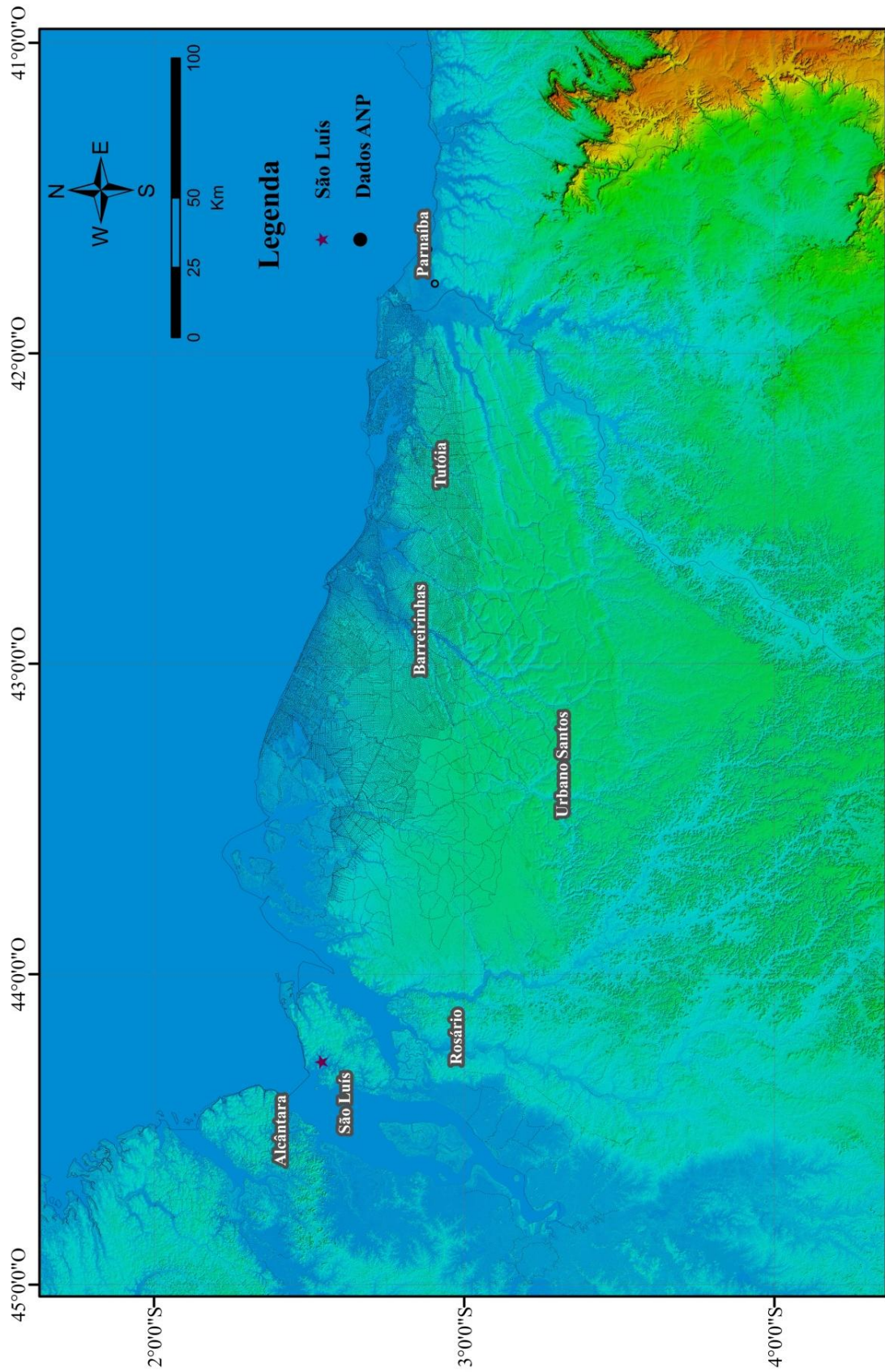
O Banco de Dados de Exploração e Pesquisa da Agência Nacional de Petróleo (BDEP) dispõem de um amplo acervo de dados geofísicos. Dentre eles, estão os dados gravimétricos públicos interpolados principalmente sobre a malha de estradas e rios da região continental e margem oceânica da Bacia de Barreirinhas. A Figura 09 mostra a localização dos pontos de dados gravimétricos do BDEP/ANP utilizados para este trabalho.

Figura 08 – Mapa com as localizações das estações gravimétricas do Banco de Dados do IBGE e das estações gravimétricas coletadas em campanha de campo, sobrepostas ao mapa de modelo digital de terreno.



Fonte: Do autor.

Figura 09 – Mapa com a distribuição das estações gravimétricas do BDEP/ANP sobrepostas ao mapa de modelo digital de terreno.



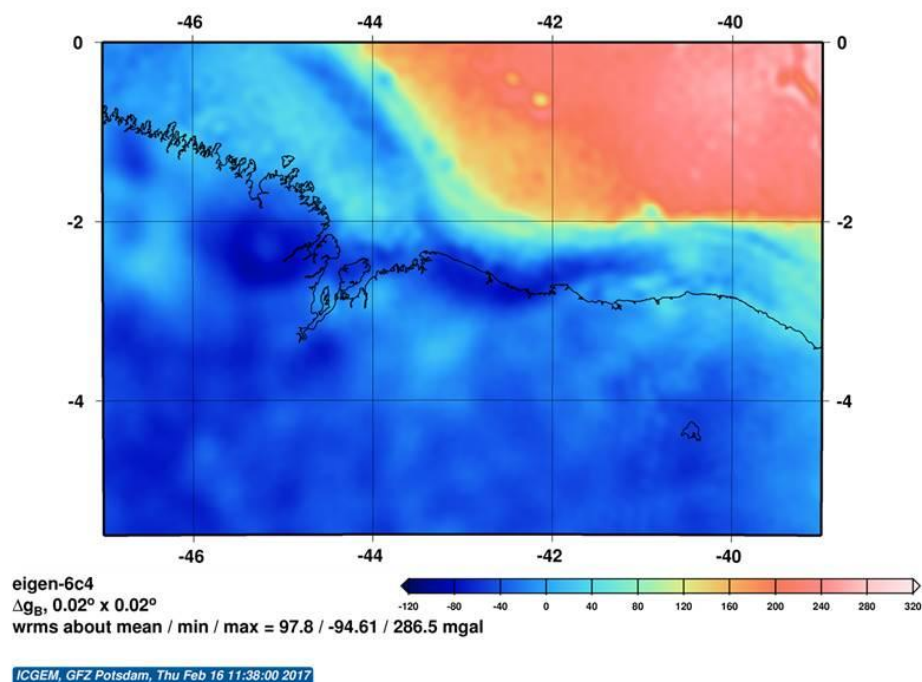
Fonte: Do autor.

5.4 Banco de Dados Satelitais (ICGEM)

Utilizamos também os dados gravimétricos satelitais provenientes das missões GOCE, GRACE e LAGEOS, sendo a primeira delas a missão mais recente da Agência Nacional Européia (ESA). Estes dados são organizados no site ICGEM (<http://icgem.gfz-postadam.de/ICGEM/>) em diferentes modelos funcionais. Para este trabalho, selecionamos o modelo EINGEN-6C4. Este modelo é definido através da combinação de dados referentes às missões satelitais citadas e dados aéreos e terrestres, sendo o modelo mais atual e que utiliza o mais elevado grau de ajuste em harmônicos esféricos, o de grau 2080.

A plataforma online do ICGEM fornece o arquivo de dados em coordenadas geográficas de localização, valores de altitude de observação e valor do funcional escolhido, além do arquivo de imagem mostrando o funcional escolhido. Para este trabalho, utilizamos os funcionais: gravidade, anomalia Free-air e anomalia Bouguer. Os dados se encontram em uma malha regularmente espaçadas, a partir do espaçamento escolhido pelo usuário. Neste trabalho, utilizamos o espaçamento de 0.02° . Além disso, os dados obtidos possuem precisão de 1 mGal para os valores de gravidade e anomalias, e estão disponíveis para qualquer área do planeta na plataforma online do ICGEM. O mapa da Figura 10 mostra a distribuição dos valores de gravidade obtidos a partir da plataforma online do ICGEM.

Figura 10 – Mapa de anomalia Bouguer de observação gravimétrica satelital obtido a partir da plataforma online do ICGEM, com resolução de $0,02^\circ$.



Fonte: ICGEM.

5.5 Processamento dos Dados

Ao utilizarmos o gravímetro relativo Lacoste & Romberg, obtemos apenas informações correspondentes à diferença de valores entre as estações gravimétricas. O cálculo final das anomalias de gravidade em cada estação leva em consideração as medidas da gravidade local, altitude, o efeito da maré sólida e o valor teórico da gravidade para o geóide de referência, e, portanto demanda correções temporais e espaciais. As correções temporais incluem as correções de drift instrumental e de maré. As correções espaciais incluem: correção de latitude, correção Free-air, correção Bouguer e correção de terreno.

As correções temporais foram feitas computacionalmente. Para a correção de drift do instrumento, os dados de entrada são: o modelo do gravímetro utilizado e o fator de escala para conversão. O maior valor obtido para as correções de drift instrumental foi de aproximadamente 0,07 mGal. Para a correção do efeito da maré sólida, que faz presente em todas as medidas gravimétricas (LONGMAN, 1959), foram consideradas as interações gravimétricas Terra-Lua e Terra-Sol, e os dados de entrada considerados são a data e o horário das leituras e a latitude da observação. A amplitude máxima de contribuição dos astros pode chegar a valores em torno de 0,227 mGal, sendo especificamente para este trabalho o valor de 0,107 mGal a máxima amplitude verificada.

As correções gravimétricas também levaram em consideração o valor teórico da gravidade calculado para o elipsóide de referência a fim de se descontar as variações referentes à latitude, devido à força centrífuga e ao achatamento dos polos. O sistema de referência geodésico utilizado para as correções de latitude foi o GRS67, definido pela Associação Internacional de Geodésia (tradução para International Association of Geodesy – IAG) em 1967, onde o valor teórico da gravidade é dado por

$$\gamma = 978031.846(1 + 0,005278895 \sin^2(\varphi) + 0,000023462 \sin^4(\varphi)) \quad (4)$$

sendo γ o valor calculado da gravidade teórica, em mGal, e φ o valor da latitude de observação, em radianos.

A correção free-air representa a correção devida ao decréscimo da gravidade em função do aumento de elevação no ponto de medida, e serve para tornar comparáveis entre si os valores observados em diferentes níveis, ou superfícies equipotenciais, em relação ao potencial de gravidade. Esta correção é calculada em mGal e dada por

$$C_{fa} = -0,3086 h \quad (5)$$

sendo h a diferença de elevação entre o nível de referência (nível do mar) e a altitude da observação.

A anomalia Bouguer simples é calculada de forma análoga a anomalia free-air e serve para tornar comparáveis entre si os valores observados em diferentes cotas de altitude de observação. Para isso, o termo de correção Bouguer representa o efeito de massa existente entre nível de medida e o nível de referência para o qual esta altura é realocada. Este termo é dependente da densidade do material que compõem este excesso de massa. O valor da correção Bouguer é escrito como

$$C_b = 0,04191\rho h \quad (6)$$

sendo ρ a densidade do material em g/cm^3 . Para este trabalho, utilizamos o valor médio padrão de densidade da crosta, igual a $\rho = 2,67\text{g/cm}^3$.

A correção de terreno, também denominada correção topográfica, é realizada de forma computacional, utilizando seções de anéis cilíndricos concêntricos que definem uma zona com densidade ρ , raios predefinidos no modelo de correção e altura igual a diferença entre o nível da estação e o nível médio do terreno da seção do anel cilíndrico. A anomalia Bouguer completa é então escrita por

$$G_{Bouguer} = \Delta G - C_{fa} - C_B - C_t \quad (7)$$

sendo C_t a correção de terreno.

Os valores de altitude utilizados para as correções espaciais foram adquiridos do Modelo Digital de Elevação ETOPO1.

5.5.1 Modelo ETOPO1

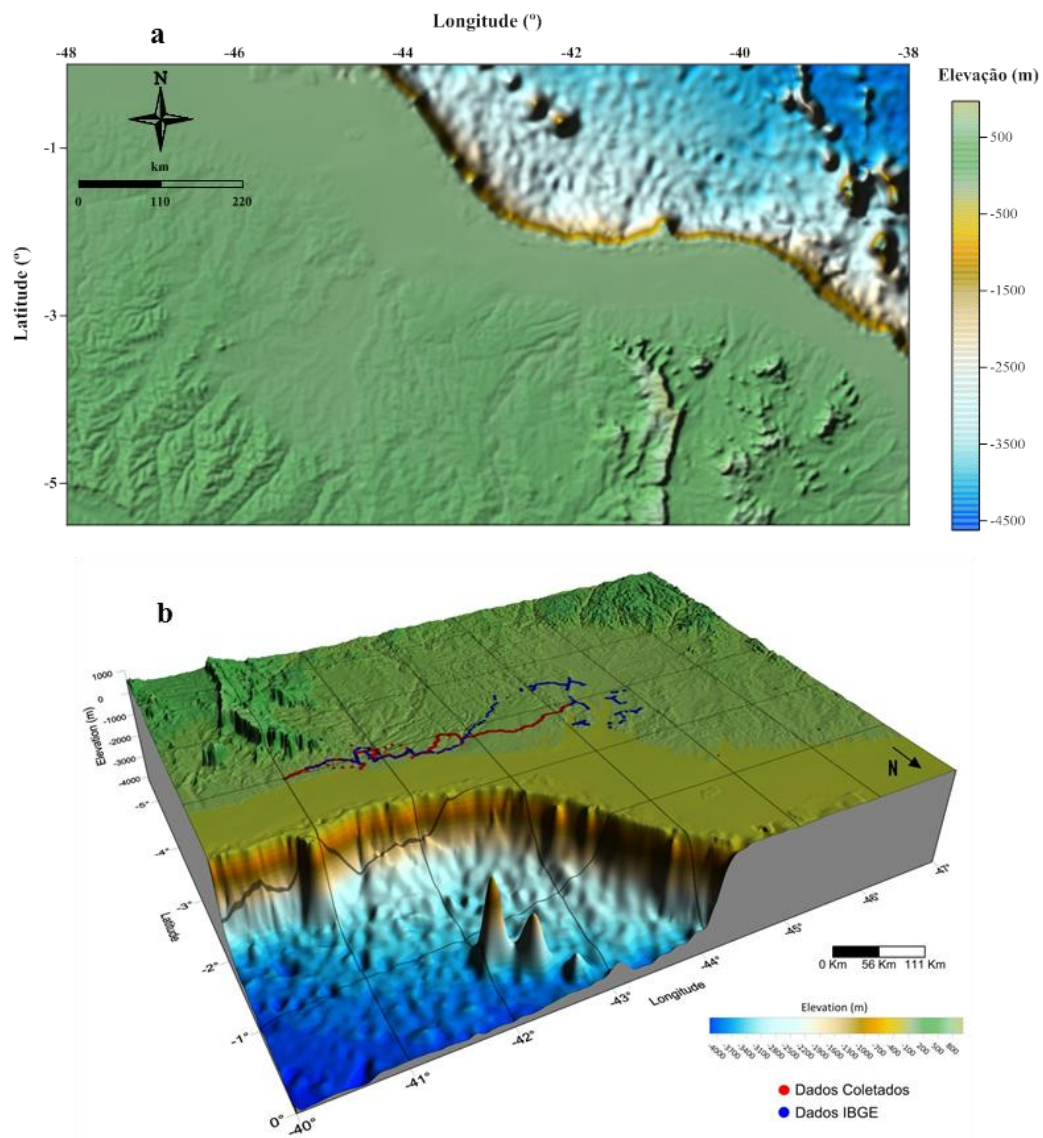
O Modelo Global de Relevo ETOPO1 (tradução para *ETOPO1 Global ReliefModel*) foi desenvolvido pelo Centro Nacional de Dados Geofísicos (NGDC), em 2008, para melhorar a resolução topográfica e foi projetado para auxiliar: em medições dos efeitos de eventos tsunami; na modelagem de circulação oceânica; na visualização da Terra; na verificação das elevações dos níveis dos mares associadas ao aquecimento global. Este modelo fornece cobertura topográfica e batimétrica global em toda extensão do globo (AMANTE e EAKINS, 2009).

Os conjuntos de dados topográficos usados na construção do modelo ETOPO1 foram inicialmente referenciados ao nível do mar e foram obtidos através de três plataformas: do NGDC (*National Geographic Data Center*), da NASA e do Centro Nacional de Dados de Neve e Gelo dos Estados Unidos (*National Snow and Ice Data Center*). Os dados referentes à cobertura topográfica foram processados em bancos de dados de resolução de 3 segundos de

arco, distribuído através do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). Segundo AMANTE e EAKINS (2009), a referência geodésica para o modelo é o Geóide WGS84, semelhante ao SRTM30 (*Shuttle Radar Topography Model*).

Para este trabalho, os valores de elevação variam entre 0 e 950 m, embora boa parte da área possua topografia relativamente plana. Consideramos o valor 0 m como sendo o nível médio dos mares. O valor máximo de 954 m é referente a Serra do Ibiapaba (Serra Grande), englobando parte da região sudeste do estado do Piauí. O mapa de elevação e topografia correspondente utilizado para as correções espaciais é mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Topografia utilizada retirado do modelo ETOPO1. **a)** Mapa de relevo da topografia, linha em cor preta representa a atual linha de costa; **b)** Mapa 3D de elevação e batimetria.

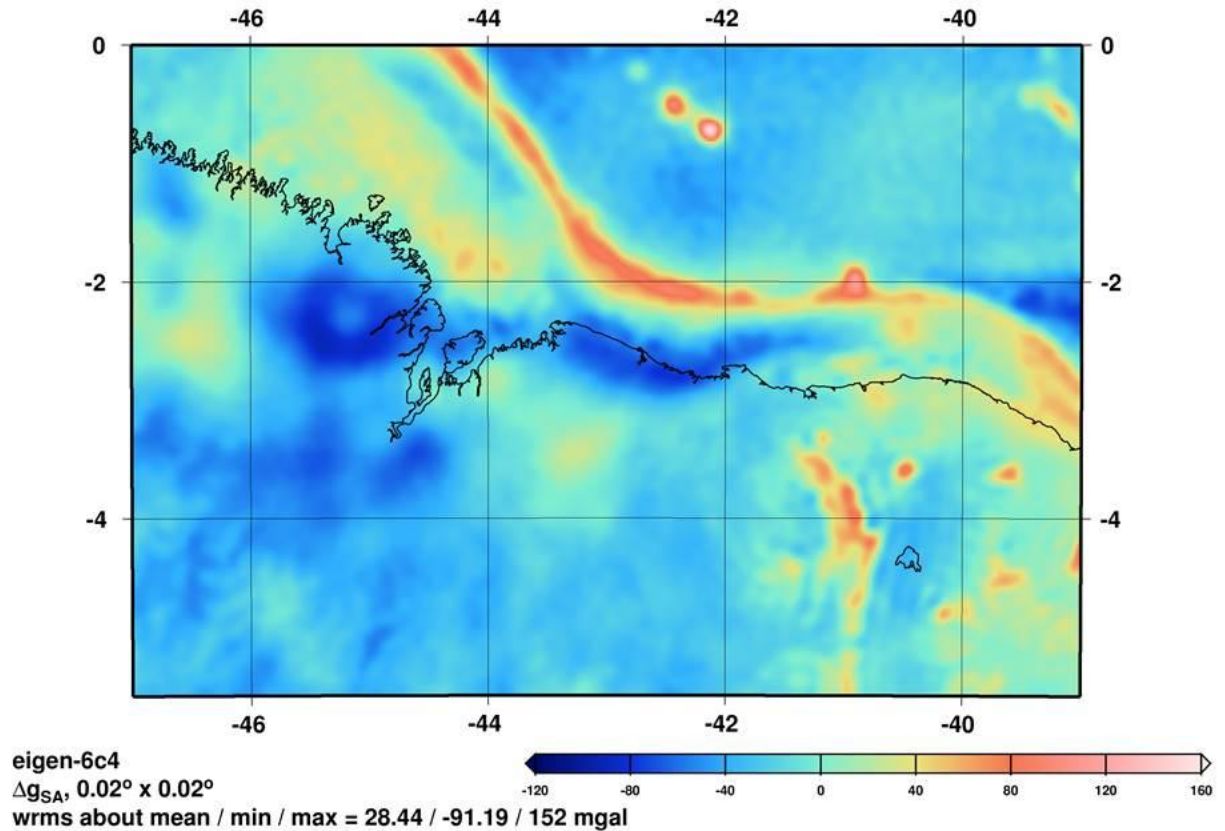


Fonte: Do autor.

6 APLICAÇÃO EM DADOS REAIS

Na região de aplicação das metodologias propostas neste trabalho, correspondente à margem continental, o mapa de anomalia Free-air mostra uma sequência de dois lobos contínuos (Figura 12), um negativo com valores entre -20 e -60 mGal e outro positivo com valores entre 40 e 80 mGal, localizados próximo a região de alto gradiente na batimetria (Figura 11) nos limites da plataforma continental. Esta assinatura bilobular no sinal é presumivelmente produzida devido o arranjo geométrico topo da crosta com relevo abrupto e base da crosta com relevo suave (WATTS, 2001).

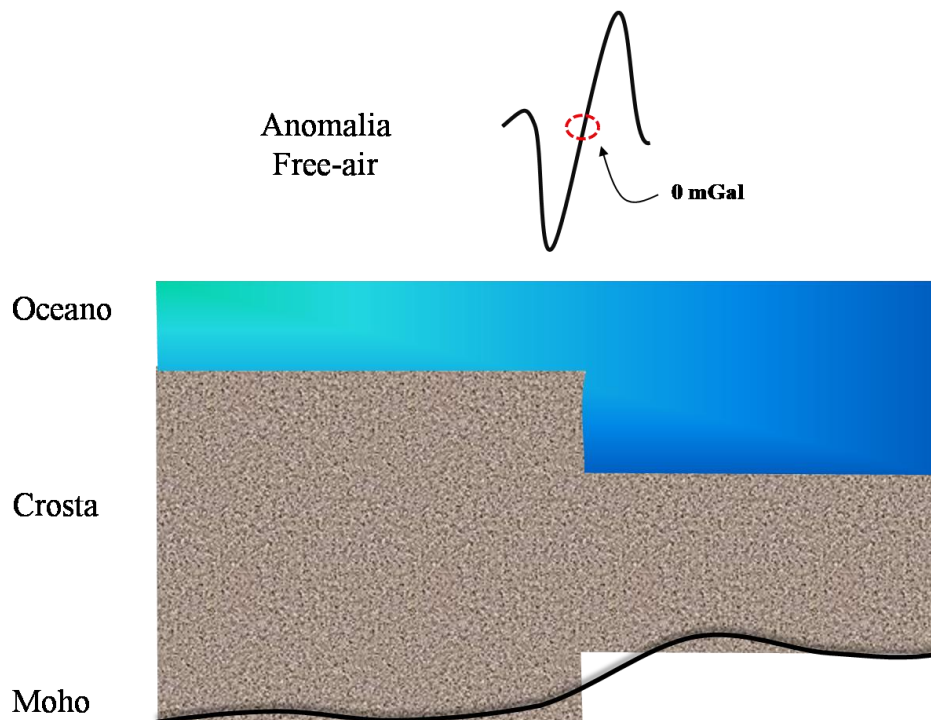
Figura 12 – Mapa de anomalia gravimétrica Free-air da região da Bacia de Barreirinhas, indicando contorno positivo correspondente à zona de falhas e fraturas existentes. Grid de aproximadamente 2 km.



Fonte: ICGEM.

A falta e o excesso de massa respectivamente associados a uma Moho suave consequente de uma crosta flexível (Vening-Meinesz) ao invés de uma Moho com compensação abrupta consequente de uma crosta rúptil (Airy) é que produz este sinal bilobular na anomalia gravimétrica Free-air na região da transição margem talude. A Figura 13 ilustra este sequencia de dois lobos, um positivo e um negativo, associados ao arranjo geométrico e de distribuição de massa explicado acima.

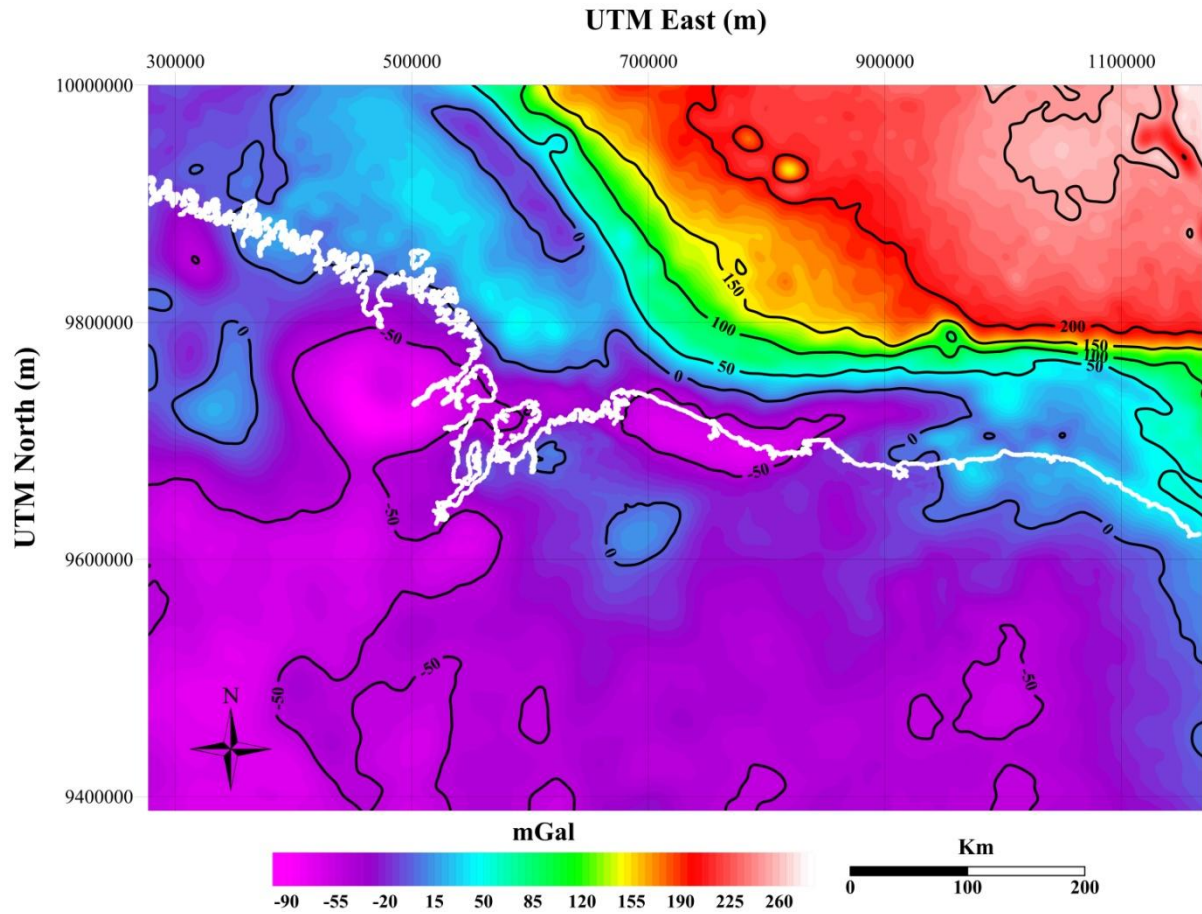
Figura 13 – Arranjo topo e base da crosta produzindo um típico sinal de lobos negativo e positivo na anomalia free-air associados à região de transição plataforma talude.



Fonte: Do autor.

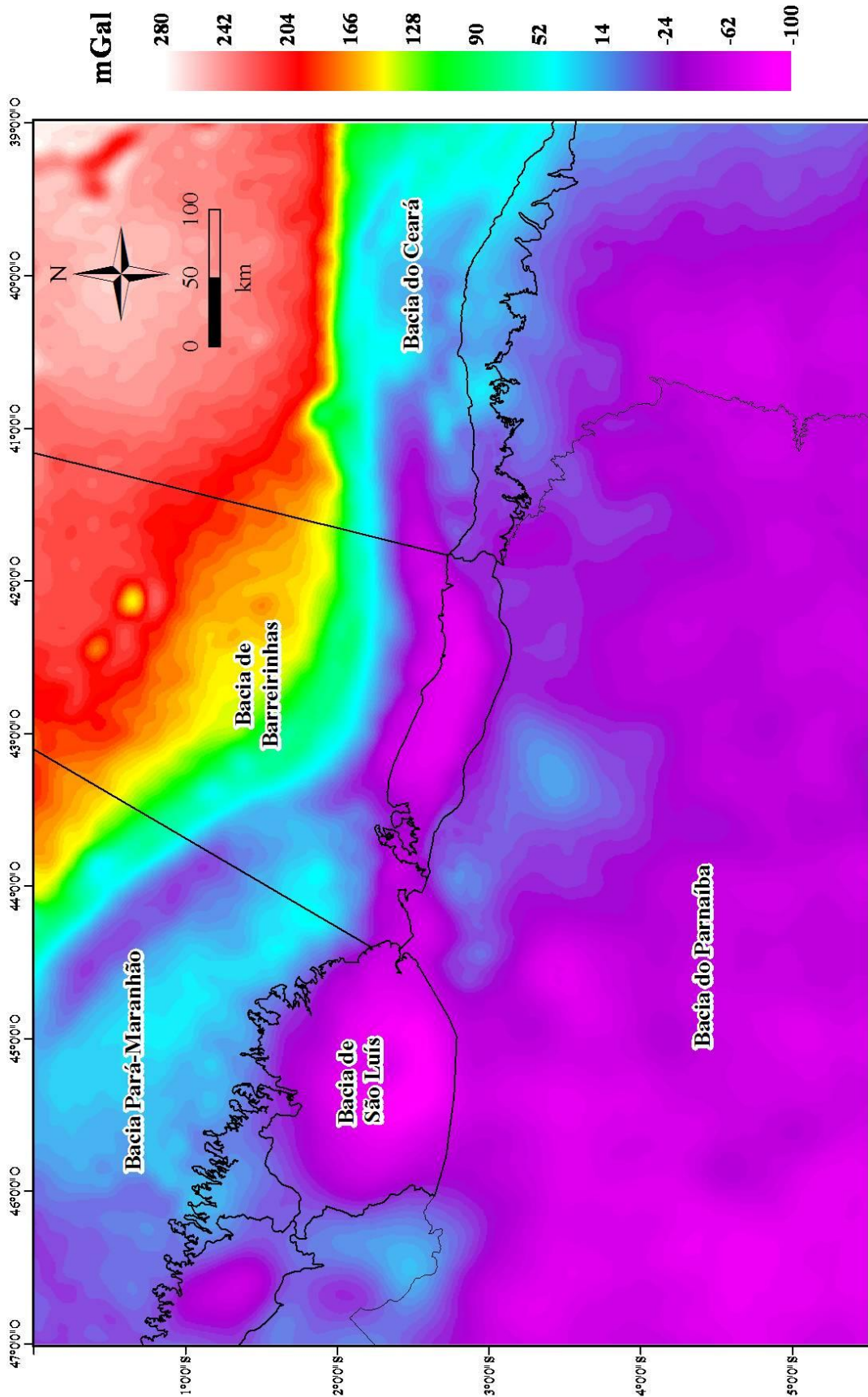
Os dados referentes à anomalia Bouguer foram selecionados a partir de todas as diferentes plataformas de dados: dados coletados; dados BDEP/ANP; dados IBGE; e dados gravimétricos satelitais. Estes dados foram interpolados pelo método da *Krigagem*, com espaçamento de 1 km entre as estações e continuados para cima de tal modo que todas as observações apresentam mesma cota vertical igual a 1 km de altitude ortométrica (Figura 14). A janela de localização e cobertura deste dado gravimétrico abrange as porções centrais dos estados do Maranhão e Piauí, a região nordeste do estado do Pará e a região noroeste do estado do Ceará.

Figura 14 – Mapa de anomalia Bouguer completa com todas as observações gravimétricas utilizadas continuadas verticalmente para uma mesma cota. A linha em cor branca representa a atual linha de costa. Curvas de contorno com valor de 10 mGal.



A anomalia Bouguer apresenta amplitude predominantemente negativa na região continental e nas zonas de transição para o oceano e amplitudes positivas na direção NE. As anomalias positivas existentes no continente referem-se ao cráton São Luis, à Bacia do Ceará e aos arcos que delimitam as regiões com ocorrência de falhas. As anomalias negativas no continente são referentes à: Bacia do Parnaíba; borda leste da Bacia de Bragança-Viseu; bacia de São Luís; e a porção continental da Bacia de Barreirinhas (Figura 15). Por sua vez, na região oceânica e porção off-shore da Bacia, aqueles lobos negativos localizados próximos à transição entre plataforma e talude, dos quais foi chamada a atenção no mapa de anomalia Free-air (Figura 12), ainda persistem na anomalia Bouguer (Figura 14).

Figura 15 – Mapa de anomalia Bouguer completa com destaque para a localização de altos e baixos gravimétricos.

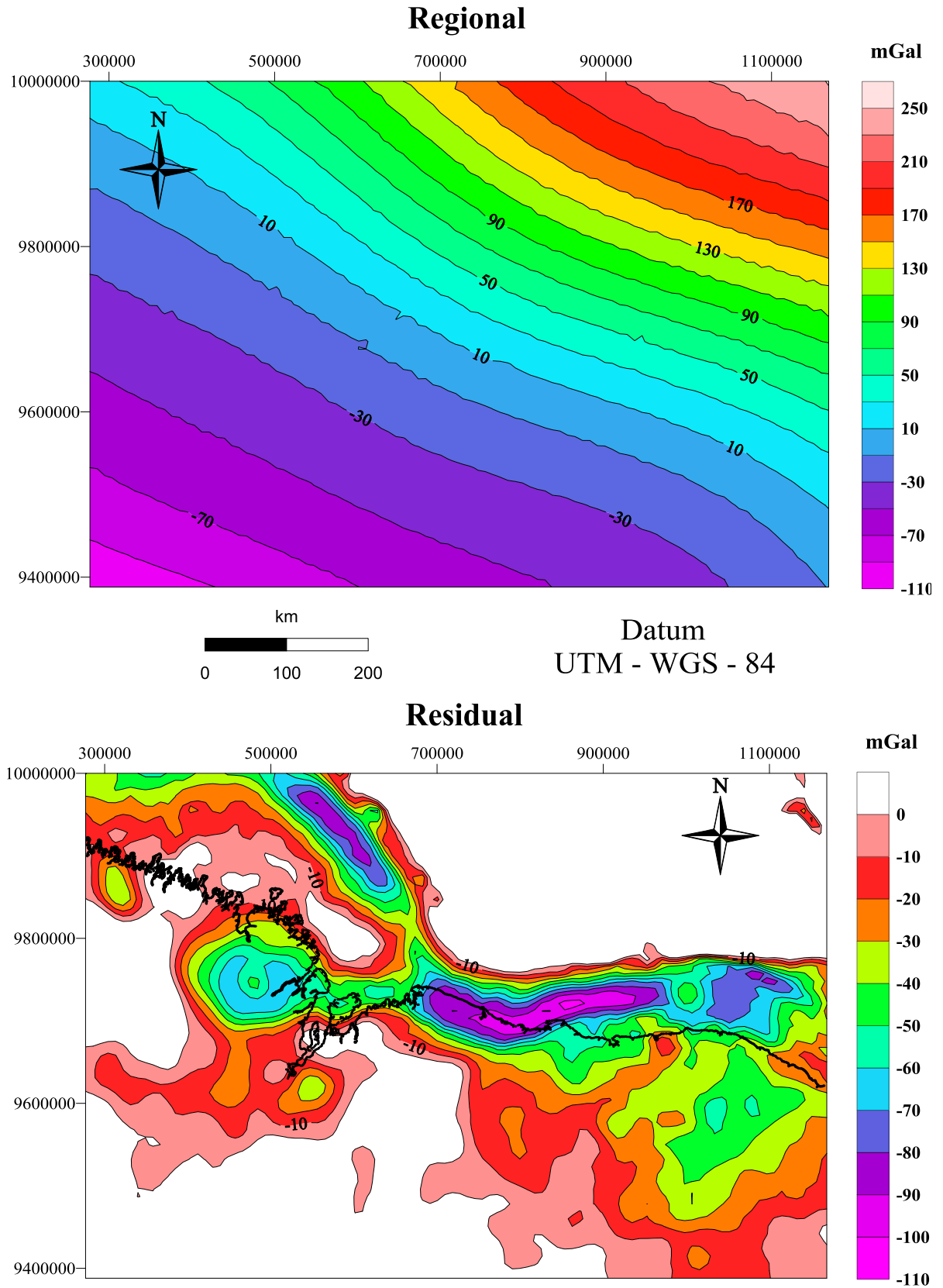


Fonte: Do autor.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Aplicamos a técnica da Análise Espectral proposta por SPECTOR e GRANT (1970) utilizando o procedimento de filtragem interativo do software Geosoft e realizamos a separação regional-residual a partir dos dados de anomalia gravimétrica Bouguer da região da Bacia de Barreirinhas e obtivemos o sinal regional referente à Moho e o sinal residual presumido para a bacia (Figura 16). Utilizamos dois filtros em sequência para análise do espectro do sinal: primeiro o filtro passa banda e depois o filtro Gaussiano de Separação Regional-Residual. Com o filtro passa-banda, recortamos do sinal o conteúdo do espectro referente às altas frequências, a fim de reduzir a conteúdo de ruídos. Com o filtro Gaussiano de Separação Regional-Residual, aplicamos propriamente a separação regional-residual nos dados já filtrados e supostamente livres de ruído. A separação dos sinais foi encerrada utilizando o critério simultâneo de melhor aproximação para o sinal gravimétrico coerente ao que se presume do relevo da Moho e de melhor aproximação para o sinal gravimétrico coerente ao que se presume para o contorno da bacia.

Figura 16 – Separação regional residual utilizando a técnica da Análise Espectral. Linha em cor preta representa a atual linha de costa. Curvas de contorno para 20 e 10 mGal para os sinais regional e residual, respectivamente.

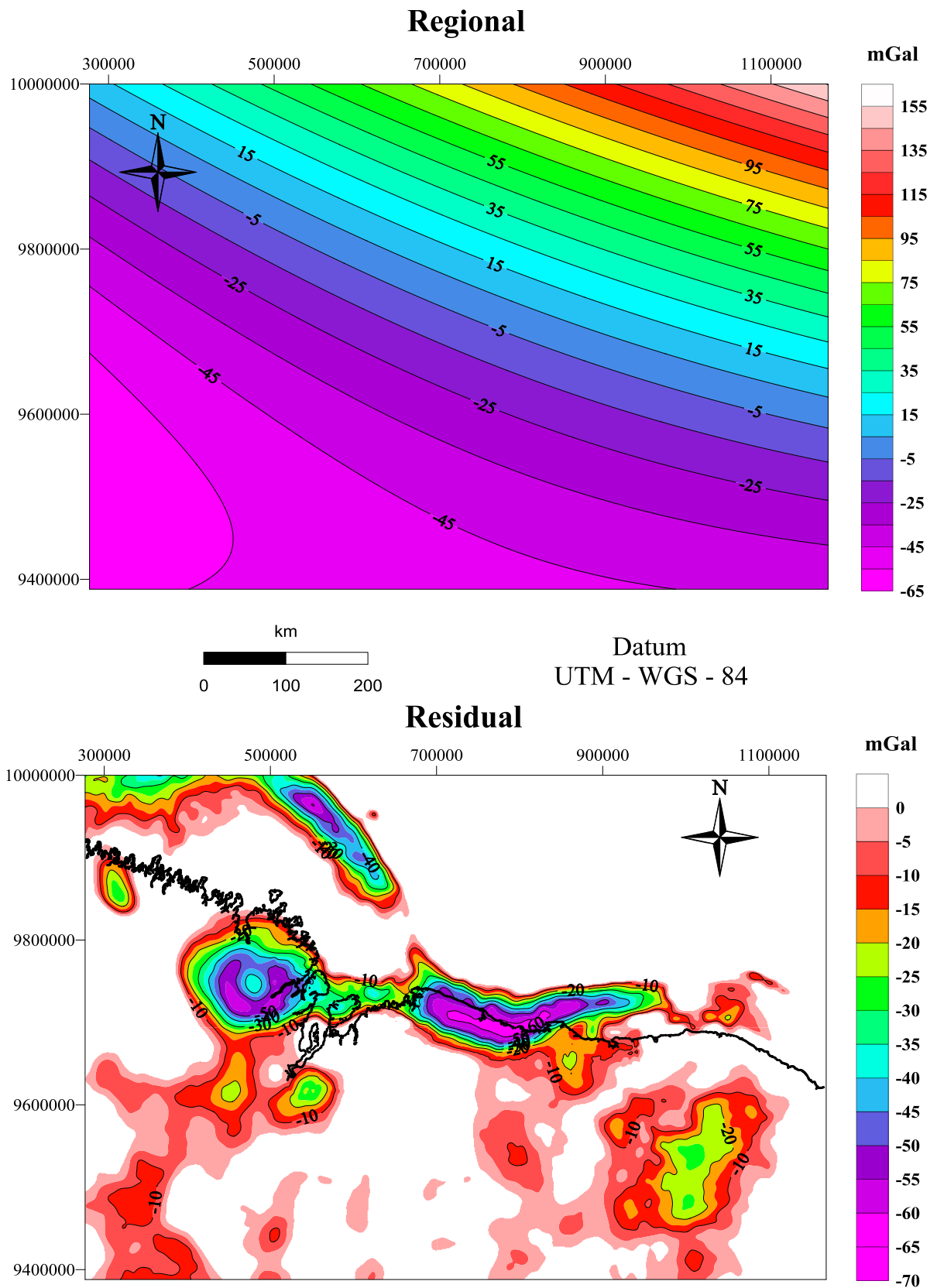


Fonte: Do autor.

É possível notar que baixos gravimétricos confundíveis a grabens e localizados próximos à transição plataforma-talude foram delineados na anomalia residual, e um destes, o mais a paralelo a direção oeste-leste, está conjugado ao que se espera ser a anomalia devida apenas à Bacia de Barreirinhas.

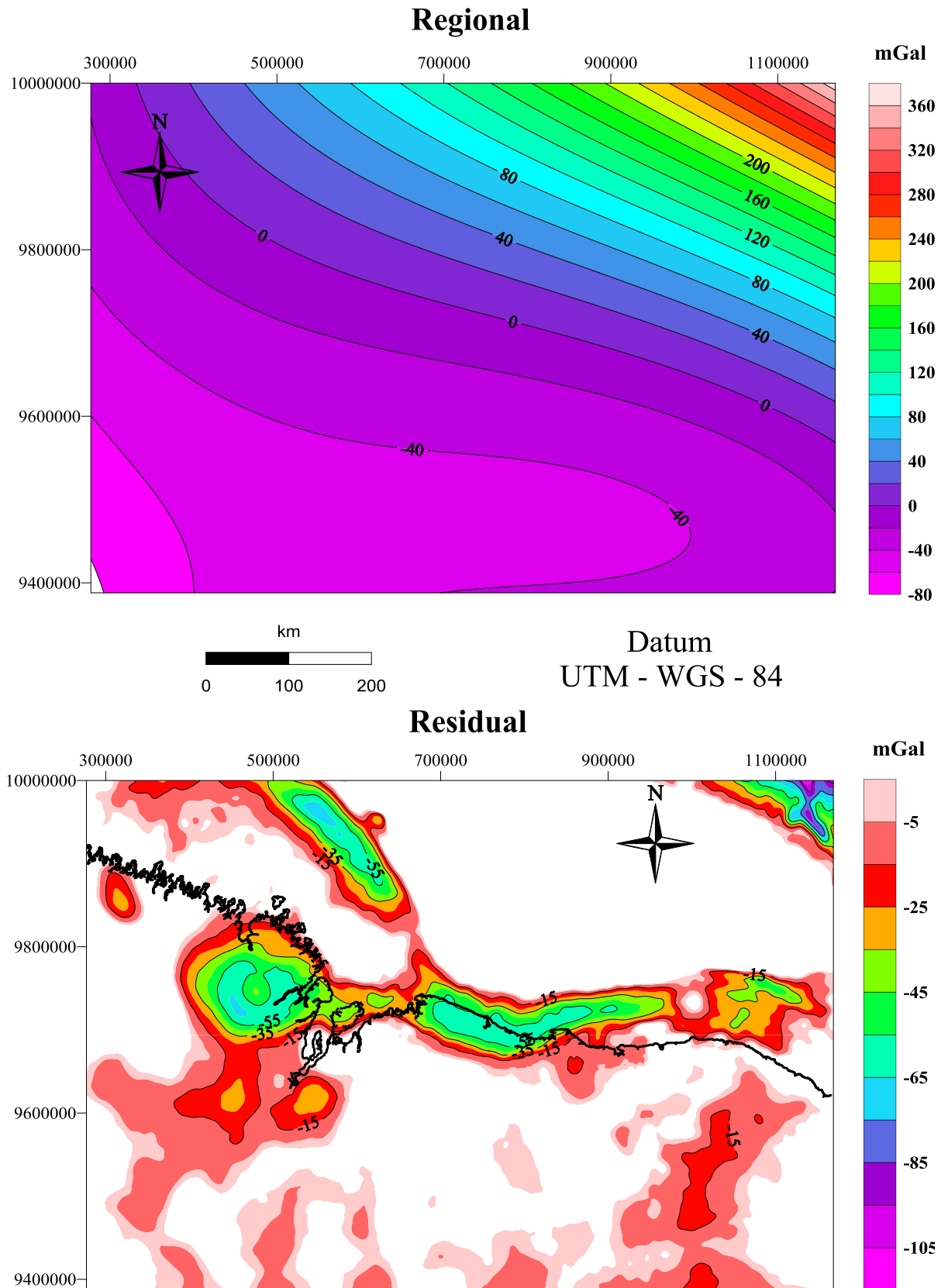
Para o método do Ajuste Polinomial Robusto (BELTRÃO, 1991), realizamos a separação regional-residual para os polinômios de ordem 1 até 9. Novamente selecionamos as melhores soluções baseados no critério simultâneo de melhor sinal presumivelmente devido ao relevo da Moho e de melhor sinal presumivelmente devido ao contorno da bacia. Apresentamos a seguir as soluções com os polinômios de grau 2, 3 e 6, por serem aquelas que mais se aproxima de atender, ao menos parcialmente, os critérios estabelecidos, embora apresentem amplitudes das anomalias um tanto discrepantes entre si. O polinômio de segundo grau foi o que mostrou um sinal regional mais semelhante ao da solução Análise Espectral com amplitude máxima de 160 mGal, mas não foi capaz de ajustar o contorno da bacia (Figura 17). O polinômio de grau 3 mostrou solução muito semelhante à da solução de grau 2, porém com amplitudes relativamente maiores (Figura 18).

Figura 17 – Separação regional residual utilizando o método do ajuste polinomial robusto para o polinômio ajustado em grau 2. Linha em cor preta representa a atual linha de costa. Curvas de contorno para 10 e 5 mGal para os sinais regional e residual, respectivamente.



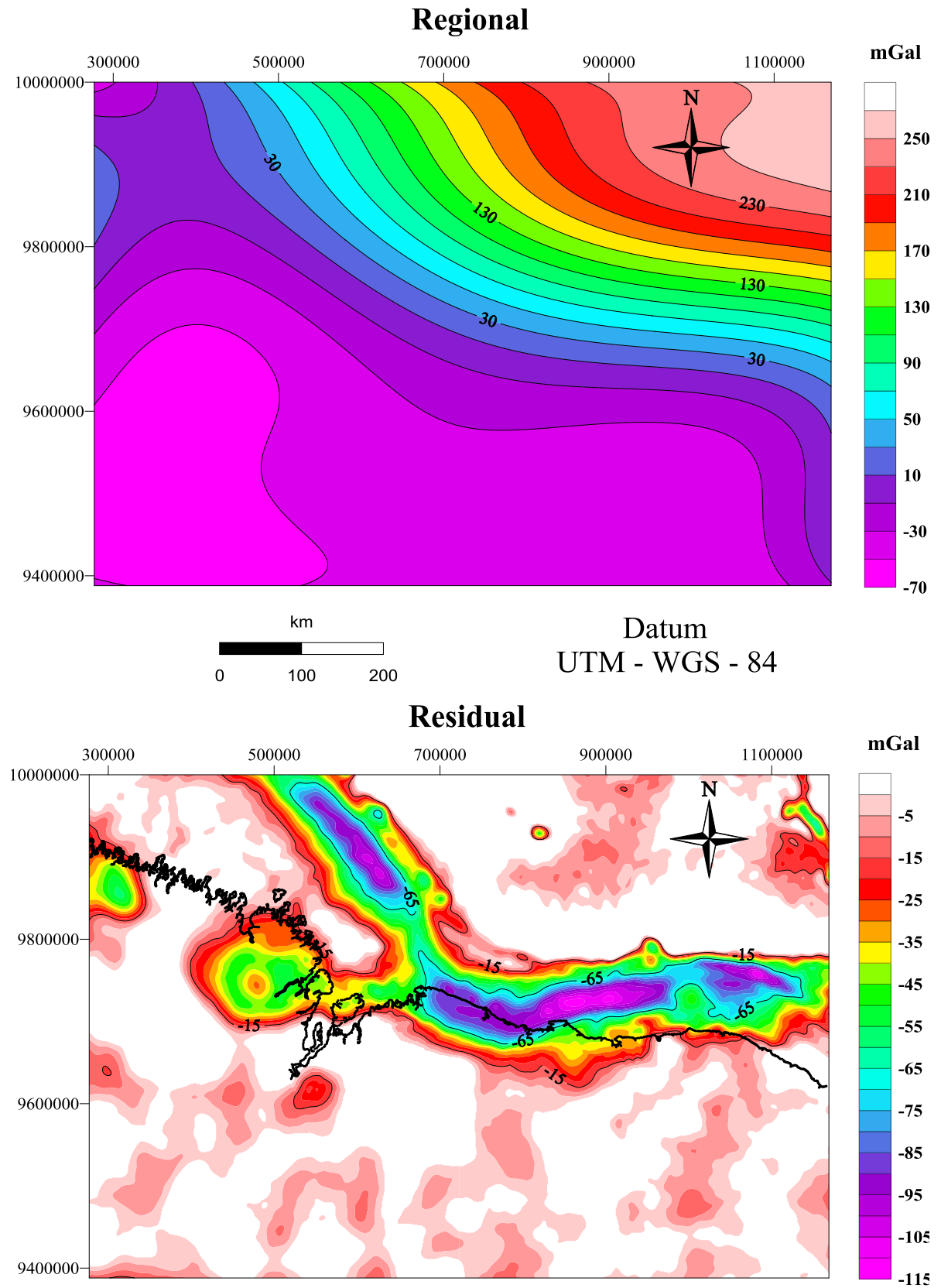
Fonte: Do autor.

Figura 18 – Separação regional residual utilizando o método do ajuste polinomial robusto para o polinômio ajustado em grau 3. Linha em cor preta representa a atual linha de costa. Curvas de contorno para 20 e 10 mGal para os sinais regional e residual, respectivamente.



O polinômio de sexto grau apresentou um sinal regional com menor amplitude que os da solução com os polinômios de grau 2 e 3 (Figura 19), porém também não foi capaz de isolar a anomalia presumivelmente apenas da bacia. Os polinômios de ordem superior a 6 se mostraram parcialmente equivalentes, apresentando forma semelhante para o sinal regional e para o sinal residual, porém sem obterem melhores resultados que aquele.

Figura 19 – Separação regional residual utilizando o método do ajuste polinomial robusto para o polinômio ajustado em grau 6. Linha em cor preta representa a atual linha de costa. Curvas de contorno para 20 e 10 mGal para os sinais regional e residual, respectivamente.

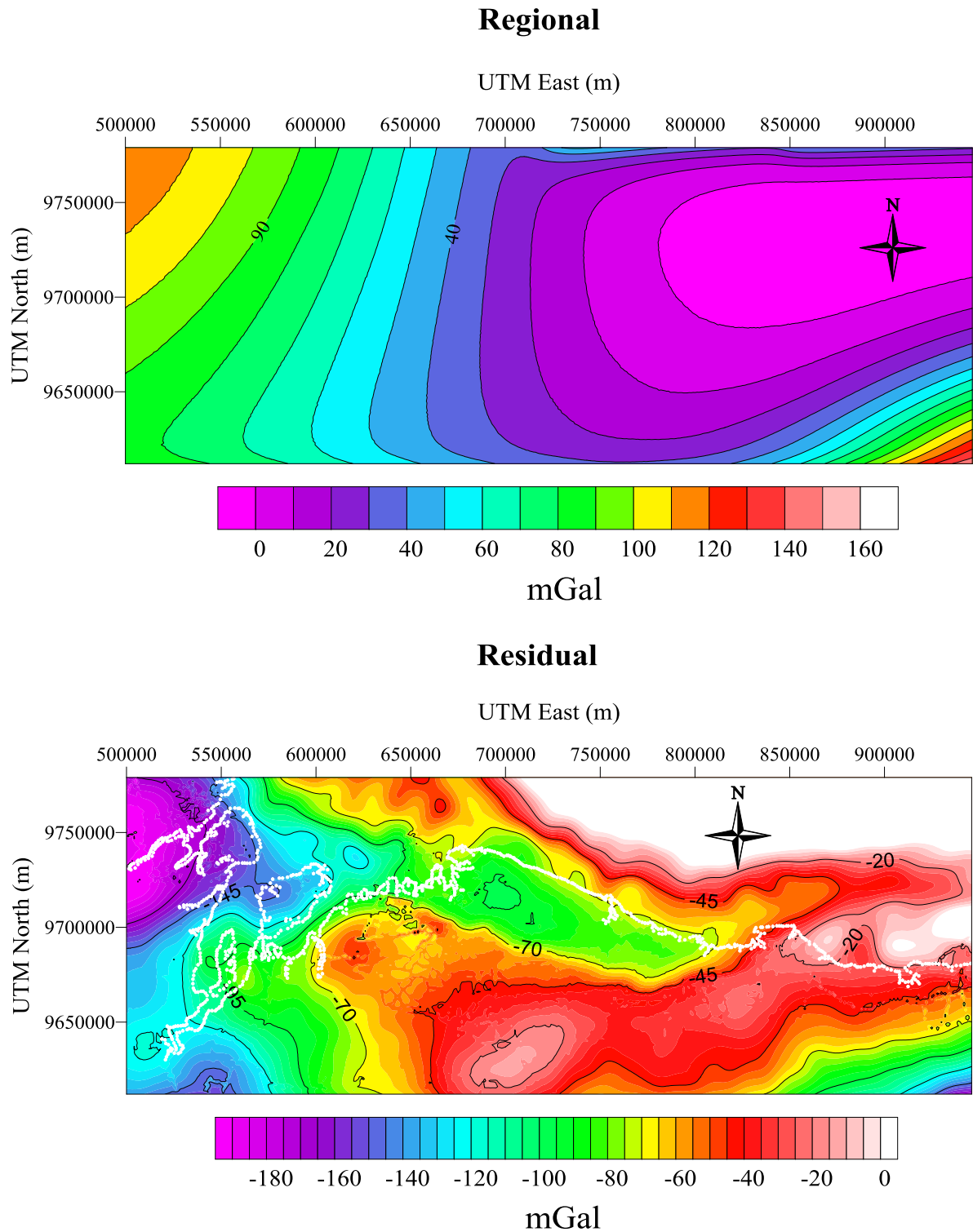


Fonte: Do autor.

É possível notar que em todos os casos, os baixos gravimétricos localizados próximos à transição plataforma-talude continuam sendo delineados na anomalia residual, inclusive aquele conjugado ao que se espera ser a anomalia devida apenas à Bacia de Barreirinhas.

No que diz respeito à separação regional-residual utilizando a modelagem crustal a partir do modelo GEMMA, avaliamos o sinal gravimétrico crustal utilizando os parâmetros geométricos e de densidade fornecidos pelo modelo citado. A Figura 20 mostra a anomalia Bouguer devido à crosta modelada. Presumimos que este sinal seja representativo da fonte gravimétrica regional e assim o subtraímos do sinal gravimétrico observado (Figura 14) e finalmente obtivemos o sinal gravimétrico residual (Figura 20).

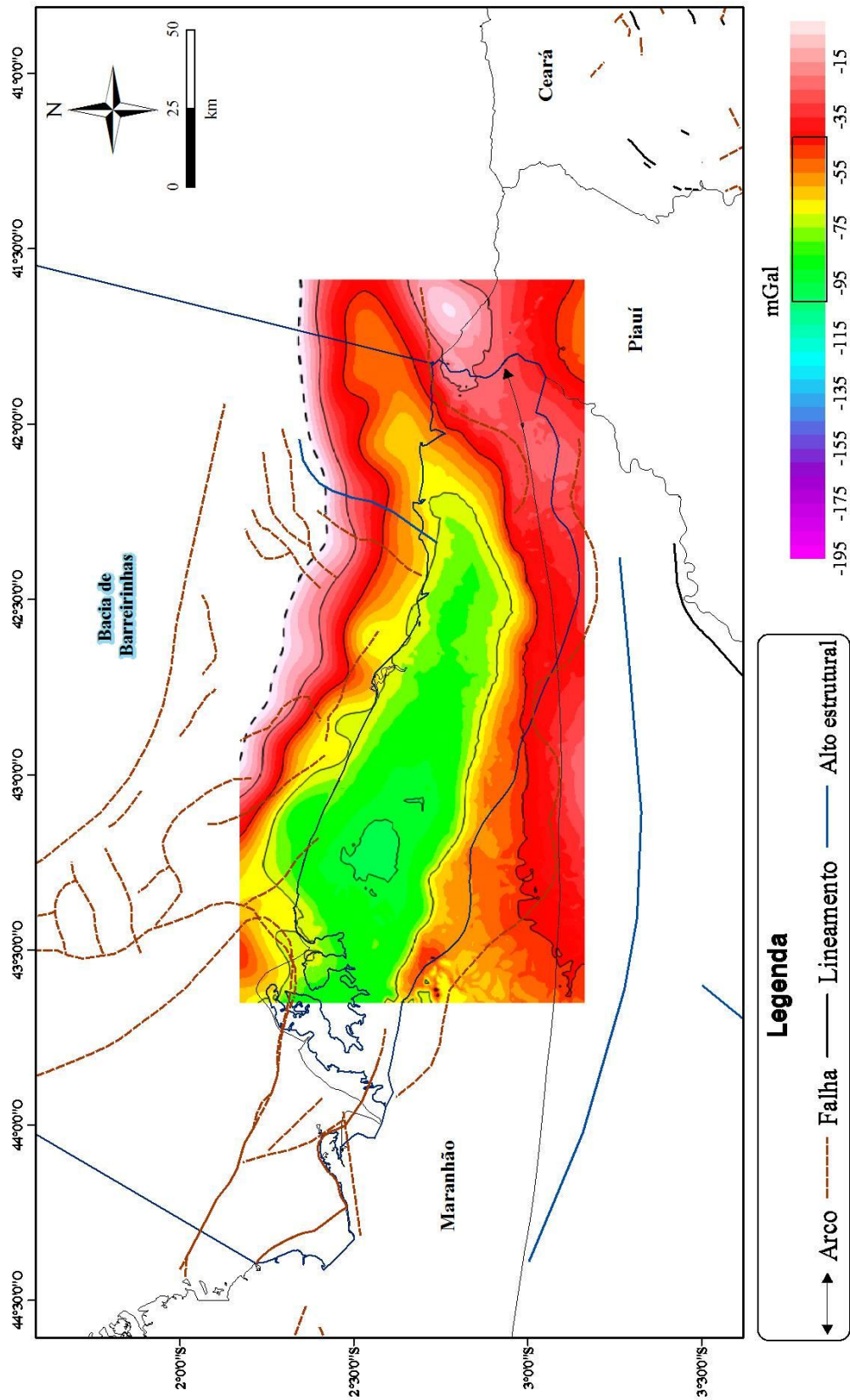
Figura 20 – Separação regional residual utilizando a modelagem crustal. Linha em cor branca representa a atual linha de costa. Curvas de contorno para 10 e 5 mGal para os sinais regional e residual, respectivamente.



Fonte: Do autor.

É possível notar que o mapa residual obtido através da modelagem crustal delimita com maior eficácia o contorno presumivelmente da Bacia de Barreirinhas. A anomalia gravimétrica correspondente está confinada pelas falhas estruturais conhecidas existentes na região da porção terrestre da Bacia, as variações na forma desta anomalia em relação às curvas de contorno estão associadas às posições das falhas e a possível região mais profunda da região continental da Bacia encontra-se um pouco mais a Oeste, diferente de estudos anteriores já apresentados (Figura 21). É possível notar também que a forma do sinal gravimétrico devido a Moho é muito distinta dos selecionados nos métodos de Análise Espectral e Ajuste Polinomial Robusto. O sinal da Moho destes métodos apresentava variação predominantemente Sul-Norte enquanto que o sinal da Moho obtida através do modelo GEMMA tem variação predominantemente Oeste-Leste. Este fator principal explica o melhor desempenho na seleção do sinal residual. O relevo da Moho estimada pelo modelo GEMMA é também compatível com a estimada por Uieda e Barbosa (2017).

Figura 21 – Destaque do mapa residual referente à bacia de Barreirinhas, indicando as regiões de existência de falhas e fraturas. Linha tracejada em cor azul representa a curva de 0 mGal da anomalia residual. Escala de cor demarcada para o mapa central com intervalo de -100 a 70 mGal.



Fonte: Do autor.

8 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi apresentado um procedimento para a separação regional-residual de modo a auxiliar a interpretação de anomalias gravimétricas em bacias sedimentares, baseado na obtenção do sinal gravimétrico a partir da modelagem gravimétrica crustal, especificamente a partir de dados do modelo GEMMA.

A fim de se obter o sinal gravimétrico residual presumido para a Bacia de Barreirinhas, também procedemos com a separação regional-residual utilizando técnicas já consagradas como a Análise Espectral e o Ajuste Polinomial Robusto. Porém estes métodos não se mostraram eficazes para selecionar o sinal gravimétrico residual presumido para a Bacia, embora ambos os métodos tenham isolado anomalias negativas.

A separação regional residual a partir da modelagem crustal se mostrou mais eficaz sendo capaz de isolar a anomalia gravimétrica residual presumida para a bacia sedimentar de barreirinhas delimitada por falhas e fraturas já mapeadas. Por outro lado, o sinal gravimétrico devido a Moho do modelo GEMMA se mostrou compatível com o relevo da Moho mostrado por trabalhos recentes.

A principal dificuldade dos outros métodos testados reside na peculiaridade do sinal observada imposta pela forma geométrica da crosta na zona em que a Bacia de Barreirinhas se encontra. Em ambientes assim, o melhor procedimento a ser adotado deve ser aquele que contemplem os atributos geométricos da crosta, quanto à forma de seu topo e base, modelando-a para se calcular o sinal residual. A modelagem gravimétrica crustal contribui para a interpretação de anomalias gravimétricas em bacias sedimentares pelo fato de levar em consideração os atributos geométricos de topo e base da crosta.

Para a prospecção de hidrocarbonetos, a modelagem gravimétrica crustal também se mostrou eficaz para a região que compreende a porção onshore da Bacia de Barreirinhas, localizando o depocentro da Bacia levemente deslocado para Oeste e indicando a possível ocorrência de falhas estruturais existentes, entretanto ainda não mapeadas. No mais, o procedimento adotado neste trabalho pode ser aplicado em qualquer bacia sedimentar sem restrição quanto à zona que se encontre. Assim, recomendamos adotá-lo para as demais Bacias Brasileiras, uma vez que o modelo GEMMA é disponível e gratuito para qualquer área.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, Philip A.; ALLEN, John R. **Basin analysis: Principles and application to petroleum play assessment**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013.
- AMANTE, Christopher; EAKINS, B. W. **ETOPO1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis**. [S.l.]: National Oceanic and Atmospheric Administration Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. 2009.
- BELTRAO, J. F.; SILVA, J. B. C.; COSTA, J. C. Robust polynomial fitting method for regional gravity estimation. [S.l.]: **Geophysics**, v. 56, n. 1, p. 80-89, 1991.
- BLAKELY, R. J. **Potential theory in gravity and magnetic applications**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1996.
- DRINKWATER, M. R. et al.. **GOCE: ESA's first Earth Explorer Core mission**. In: **Earth gravity field from space-From sensors to earth sciences**. Netherlands: Springer, 2003. p. 419-432.
- FEIJÓ, F. J. Bacia de Barreirinhas. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, v. 8, n. 1, p. 103-109, 1994.
- LONGMAN, I. M. Formulas for computing the tidal accelerations due to the moon and the sun. **Journal of Geophysical Research**, v. 64, n. 12, p. 2351-2355, 1959.
- MARTINS, Cristiano Mendel; BARBOSA, Valéria Cristina Ferreira. **Inversão gravimétrica do relevo 3D de bacias sedimentares e da variação da densidade usando informação a priori sobre o ambiente geológico**. 2009. 130f. Tese (Doutorado em Geofísica) – Observatório Nacional, Rio de Janeiro, 2009.
- OLIVEIRA, Roberto Gusmão de. **Arcabouço geofísico, isostasia e causas do magmatismo cenozóico da província Borborema e de sua margem continental (Nordeste do Brasil)**. 2008.415 f. Tese (Doutorado em Geodinâmica; Geofísica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.
- PLOUFF, Donald. Gravity and magnetic fields of polygonal prisms and application to magnetic terrain corrections. [S.l.]: **Geophysics**, v. 41, n. 4, p. 727-741, 1976.
- REGUZZONI, M.; SAMPIETRO, D. **GEMMA: An Earth crustal model based on GOCE satellite data**. [S.l.]: **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 35, p. 31-43, 2015.
- RIBEIRO, Vanessa Biondo; MANTOVANI, Marta Silvia Maria. Campo gravimétrico do Complexo Alcalino de Tapira (MG): Comparação entre técnicas de interpolação e de separação regional-residual. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 29, n. 3, 2011.

SANTOS, Raphael Di Carlo Silva dos; SANTOS, Darcicléa Ferreira; SILVA, João Batista Corrêa da. Interpretação gravimétrica da Bacia do Recôncavo utilizando inversão não linear. In:INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY & EXPOGEF, 12th., 2011, Rio de Janeiro, Brazil. **Expanded abstracts**. Rio de Janeiro, Brazil: Society of Exploration Geophysicists and Brazilian Geophysical Society, 2011. p. 572-577.

SIMMONS, N.A.; FORTE, A.M.; BOSCHI, L.; GRAND, S.P.. 2010. **GyPSuM**: a joint tomographic model of mantle density and seismic wave speeds. J. Geophys. Res.: Solid Earth 115 (B12), 1978–2012.

SOARES JUNIOR, Adilson Viana; COSTA, João Batista Sena; HASUI, Yociteru. **Evolução da margem atlântica equatorial do Brasil**: Três fases distensivas. **Geociências**, p. 427-437, 2008.

SOARES JÚNIOR, Adilson Viana et al. **Evolução do rifteamento e paleogeografia da margem Atlântica Equatorial do Brasil**: Triássico ao Holoceno. **Geociências**, p. 669-692, 2011.

SPECTOR, A.; GRANT, F. S. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. **Geophysics**, v. 35, n. 2, p. 293-302, 1970.

TROSDTORF JR, I.; ZALÁN, P. V.; FIGUEIREDO, J. J. P.; SOARES, E. F. 2007. **Bacia de Barreirinhas**. Boletim de Geociencias da PETROBRAS, 15(2), 331-339. 2007.

UIEDA, Leonardo; BARBOSA, Valéria CF. Fast nonlinear gravity inversion in spherical coordinates with application to the South American Moho. [S.l.]: **Geophysical Journal International**, v. 208, n. 1, p. 162-176, 2017.

VASCONCELOS, Marcos Alberto Rodrigues. **Caracterização geofísica da estrutura de impacto de Araguinha, MT/GO**. 2007. xvii, 157f. Tese (Doutorado em Geofísica) - Universidade de São Paulo, 2007.

VEIGA JÚNIOR, José Pessoa (org.). **São Luís NE/SE. Folhas SA. 23-X e SA. 23-Z**. Brasília, DF: CPRM, 2000. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil).

WATTS, Anthony Brian. **Isostasy and flexure of the lithosphere**. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.