

Universidade Federal Fluminense

EDINEI PEREIRA DA SILVA

Estudo gravimétrico na Bacia do Tucano Sul.

Aplicação de modelagem gravimétrica.

NITERÓI

2008

EDINEI PEREIRA DA SILVA

Estudo gravimétrico na Bacia do Tucano Sul.

Aplicação de modelagem gravimétrica.

Trabalho de conclusão de curso submetido ao Programa de Graduação em Geofísica da Universidade Federal Fluminense como requisito para obtenção do título de Graduado. Área de concentração: Geofísica de Exploração.

Orientador:

Jorge Jesus Cunha Palma

Co-orientador:

Flávio Luis Fernandes

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

NITERÓI

2008

Estudo gravimétrico na Bacia do Tucano Sul.

Aplicação de modelagem gravimétrica.

EDINEI PEREIRA DA SILVA

Trabalho de conclusão de curso submetido ao Programa de Graduação em Geofísica da Universidade Federal Fluminense como requisito para obtenção do título de Graduado. Área de concentração: Geofísica de Exploração.

Aprovada por:

Dr. Jorge Jesus Cunha Palma / UFF – Orientador

Dr. Flávio Luis Fernandes / Vale E&P – Co-orientador

Dr. André Luiz Ferrari / UFF

Dra. Eliane da Costa Alves / UFF

Niterói, 19 de Dezembro de 2008.

*"Confia no Deus eterno de todo o seu coração e não se apóie na sua própria inteligência.
Lembre-se de Deus em tudo o que fizer, e ele lhe mostrará o caminho certo." (Prov. 3:5-6)*

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de prestar toda honra e louvor ao Deus eterno criador dos céus e da terra, por estar sempre ao meu lado em todos os momentos e me presentear uma família maravilhosa.

Agradeço meu pai e minha mãe por sempre me apoiar em todas as decisões, desde a escolha de cursar uma universidade, morando longe e logo depois mudar de curso, nunca deixando de me ajudar em meio às crises financeiras.

Agradeço ao meu professor Bianchi (em memória) pelas longas conversas após as aulas me incentivando a buscar sempre o melhor e “nunca parar de estudar para ser alguém na vida”.

Agradeço a professora Eliane Alves por estar do meu lado nos momentos difíceis que passei durante o curso e por fazer sempre o possível para que os horários das matérias nas quais eu tivesse de me inscrever não coincidisse, indispensável para hoje eu estar concluindo a graduação.

Agradeço ao Flávio Fernandes por montar o projeto comigo, me fornecendo os dados gravimétricos. E além de tudo ser prestativo em todos os momentos, principalmente na fase de conclusão do projeto e por me dispensar das atividades da empresa durante esta fase.

Agradeço aos meus amigos de trabalho Eric Silva, Felipe Baeta, Walter Dias pelo apoio, em especial agradeço a Luciana Félix (Tuti) o suporte no *software* de interpretação sísmica sempre após o expediente.

Agradeço aos meus amigos Felipe Melo e Carlos Jesus pela ajuda na montagem da apresentação e parte escrita.

Agradeço a COPPE/LAB2M pela permissão do uso das ferramentas Geosoft/Oasis Montaj; disponíveis naquele laboratório.

Resumo

O arcabouço estrutural da Bacia do Tucano-Sul, definido por sísmica e gravimetria, forneceu subsídios à elaboração de um modelo evolutivo através da modelagem gravimétrica desta área situada no estado da Bahia, região nordeste do Brasil.

A modelagem gravimétrica levou em consideração os corpos geológicos relevantes a este tipo de estudo, atribuindo valores de densidade aos sedimentos, ao embasamento da bacia e manto litosférico.

A partir das seções modeladas, infere-se a elevação do manto litosférico e o aldegaçamento curstal associado às regiões mais profundas da bacia. Perfis *dip* e *strike* sugerem que a Moho torna-se mais rasa em direção ao depocentro bacia, evidenciado pelas isópacas de sedimento, localizado em sua porção leste. A ascensão do manto é explicada pela compensação isostática devido ao espaço gerado pela formação da bacia, e seu preenchimento com material menos denso em relação ao embasamento, permitindo a associação com o modelo de estiramento litosférico para a origem de uma bacia sedimentar proposto por Mackenzie (1978).

Sumário

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	x
1. Introdução	1
1.1. Área de Estudo	1
2. Metodologia	3
2.1. Sísmica 2D	4
2.2. Perfis de Poço	5
2.3. Gravimetria	6
2.3.1. Filtragem	9
2.4. Modelagem Gravimétrica	10
3. Geologia	11
3.1. Evolução Tectônica	11
3.1.1. Riftes Interiores	13
3.2. Arcabouço Estrutural da Bacia do Tucano Sul	14
4. Mapas Gravimétricos	16
4.1. Anomalia Bouguer Total	16
4.2. Anomalia Bouguer Crustal	17
4.3. Primeira Derivada Horizontal Total	18
4.4. Primeira Derivada Vertical	19
4.5. Mapa Residual	21
4.5.1. Derivada Horizontal Total Residual	21
5. Interpretação Sísmica	23
6. Modelagem Gravimétrica	29
6.1. Modelagem Teórica de uma Bacia Sedimentar	29
6.2. Modelagem da Área de Estudo	32
6.2.1. Modelagem das seções <i>DIP</i>	33

6.2.2. Modelagem da Seção Strike	37
6.3. Analogia com modelo de estiramento litosférico.....	39
7. Conclusão.....	41
Referências Bibliográficas	42

Lista de Figuras

1.1.	Mapa regional das bacias do Recôncavo – Tucano – Jatobá, Magnavita ET al, 2005.....	2
2.1.	Mapa de localização da área de estudo.....	4
2.2.	Gráfico dos valores de tempo e profundidade dos poços da base de dados.....	6
2.3.	Mapa da Primeira Derivada Vertical gerado a partir dos dados brutos.....	8
2.4.	Exemplo de <i>Spikes</i> presentes no dado.....	8
2.5.	Mapa de localização das amostras.....	9
3.1.	Mapa Geológico do Rifte Reconcavo – Tucano – Jatobá (CPRM, 2003).....	12
3.2.	Mapa estrutural da Bacia do Tucano Sul, modificado de Milani, 1987.....	15
4.1.	Mapa da Bacia do Tucano Sul, Anomalia Bouguer Total <i>grid</i> 500 x 500 m.....	17
4.2.	Mapa da Bacia do Tucano Sul, Anomalia Bouguer Crustal.....	18
4.3.	Mapa interpretado da primeira derivada horizontal total na Bacia do Tucano Sul.....	19
4.4.	Mapa da Bacia do Tucano Sul, primeira derivada vertical.....	20
4.5.	Mapa da Bacia do Tucano Sul, Primeira Derivada Horizontal Total Residual.....	22
5.1.	Mapa de localização das linhas sísmicas e poços utilizados na interpretação.....	24
5.2.	Linha sísmica 0026-1743 interpretada.....	25
5.3.	Linha 0026-1753 interpretada.....	26
5.4.	Linha sísmica 0026-1067 interpretada.....	27
5.5.	Linha sísmica 0026-1049 interpretada.....	28
6.1.	Modelo gravimétrico de uma bacia sedimentar hipotética.....	30
6.2.	Modelo gravimétrico hipotético de uma litosfera com um corpo denso na base.....	31
6.3.	Modelo gravimétrico hipotético de uma bacia sedimentar com um diápiro denso na base da crosta.....	31
6.4.	Mapa das linhas modeladas.....	32
6.5.	Modelagem gravimétrica da linha 0026-1753.....	34
6.6.	Inferência de um corpo mais denso na base da litosfera na modelagem da Linha 0026-1753.....	35
6.7.	Extrapolção da modelagem gravimétrica da linha 0026-1753 além do limite estabelecido pela curva observada.....	36
6.8.	Modelagem gravimétrica da linha 0026-1067.....	37
6.9.	Modelagem gravimétrica da linha 0026-1743.....	38
6.10.	Modelagem gravimétrica da linha 0026-1743 com a inferência de ascensão da Moho....	38
6.11.	Modelo evolutivo da bacia (adaptado de Mackenzie 1978).....	39

Lista de Tabelas

1. Número de amostras totais utilizadas no processamento..... 7

Capítulo 1

Introdução

Este trabalho tem como objetivo analisar os processos tectônicos básicos responsáveis pelo desenvolvimento do rifte Recôncavo – Tucano – Jatobá e o seu relacionamento com as estruturas presentes no arcabouço, da sub-bacia do Tucano-Sul.

A escolha do tema foi motivada por vários aspectos: a área de estudo não dispõe de muitos trabalhos referentes ao tema; a análise gravimétrica de uma bacia sedimentar possui um custo baixo em relação a outros métodos geofísicos como o método da sísmica de reflexão, por exemplo; ampliar o conhecimento sobre a gênese da bacia, além de prover um conhecimento adicional à geologia do petróleo, métodos potenciais e sísmica de reflexão, sendo feita a análise de três métodos geofísicos em conjunto: gravimetria, perfil de poço e sísmica de reflexão.

Tendo em vista que a área possui uma baixa cobertura de dados de sísmica de reflexão, a maior densidade de dados gravimétricos permitiu uma melhor interpretação da geologia local.

1.1. Área de Estudo

A bacia sedimentar cretácica do Tucano-Sul localiza-se na região nordeste do Brasil, juntamente com as Bacias do Tucano Central, Tucano Norte, Jatobá e Recôncavo formam um sistema de riftes intracontinentais com cerca de 450 km de comprimento de direção norte-sul, sendo uma feição de destaque na margem leste brasileira (fig. 1).

A bacia do Tucano Sul, com uma área de aproximadamente 7.000 km², apresenta em traços gerais uma distribuição estrutural e sedimentar bem conhecida, devido à sua similaridade com a Bacia do Recôncavo, a qual vem sendo estudada desde a década de 50 quando se iniciou a exploração de hidrocarbonetos no Brasil, sendo a primeira bacia a ser prospectada no país.

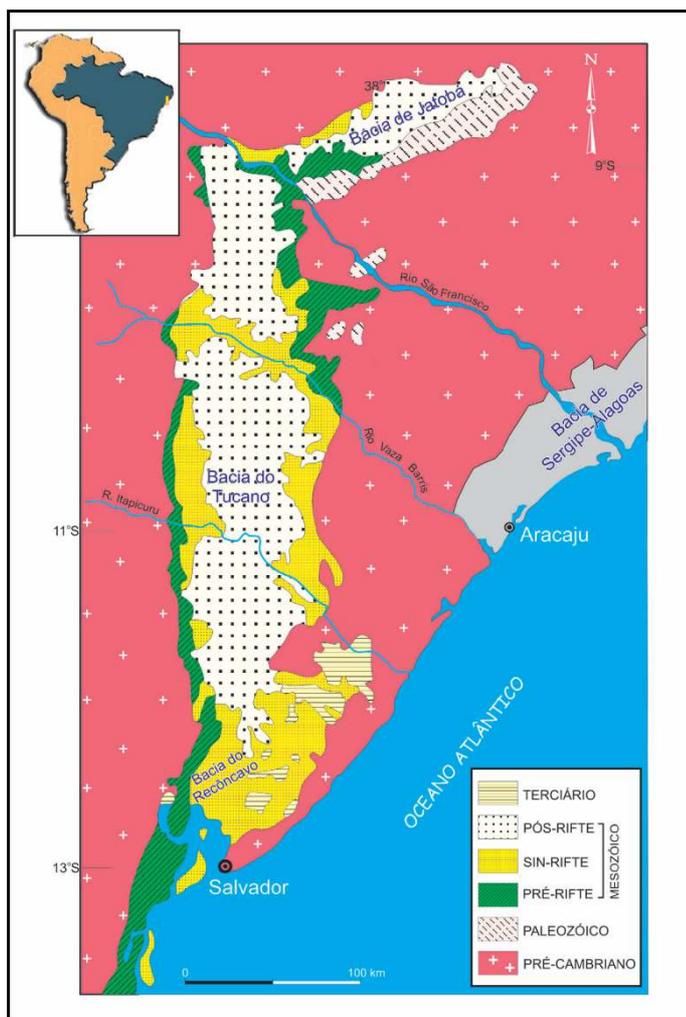


Figura 1.1- Mapa regional das Bacias do Recôncavo – Tucano – Jatobá (Magnavita *et al.*, 2005).

A bacia do Tucano apresenta um nível de conhecimento de detalhe inferior em comparação a Bacia do Recôncavo, devido a todo este contexto histórico exploratório e a não ocorrência de significativas acumulações de hidrocarboneto conhecidas. A região a ser estudada está inserida na sub-bacia do Tucano-Sul (figura 2.1).

Capítulo 2

Metodologia

A realização desta pesquisa compreendeu, em um primeiro momento, uma revisão bibliográfica da área de estudo, sobretudo a geologia do rifte abortado do nordeste brasileiro e alguns trabalhos relacionados ao tema desenvolvido. Em seguida os estudos foram concentrados no conhecimento da evolução da Bacia do Tucano Sul, que possui características semelhantes às outras bacias constituintes do rifte.

Os dados geofísicos de sísmica de reflexão e perfis de poços foram solicitados junto à ANP, os dados de gravimetria foram cedidos pela empresa PGT – *Petroleum Geoscience Technology*. Todos estes dados recobrem a região de estudo, o que permitiu uma investigação geofísica e geológica integrada das principais estruturas, visando o conhecimento da bacia e o entendimento sobre o seu comportamento geotectônico. Para isto foi necessário conhecer alguns procedimentos com softwares para compilação, organização e manutenção de bases de dados digitais. A metodologia utilizada em cada fase do projeto é descrita abaixo e será detalhada a seguir:

- ✓ Mapeamento do embasamento e das falhas que compartimentam a bacia;
- ✓ Geração de um modelo de velocidade para converter em profundidade os horizontes interpretados na sísmica em tempo;
- ✓ Determinação da geometria dos corpos geológicos que será base da modelagem, a partir dos horizontes em profundidade, utilizando o *software* GM-SYS;

- ✓ Geração da curva gravimétrica calculada a partir do modelo geológico criado no programa GM-SYS, comparando-a com curva gravimétrica observada do dado real.

2.1. Sísmica 2D

A interpretação do embasamento da bacia através das linhas sísmicas é o principal dado de entrada para a modelagem gravimétrica. Uma boa interpretação do embasamento assegura um modelo confiável em termos de geometria, assim como a distribuição espacial das falhas, diminuindo dessa forma o grau de incerteza na modelagem. A área de estudo dispõe de 10 seções sísmicas 2D (figura 2.1) cuja localização em maior detalhe, pode ser observada na Figura 5.1.

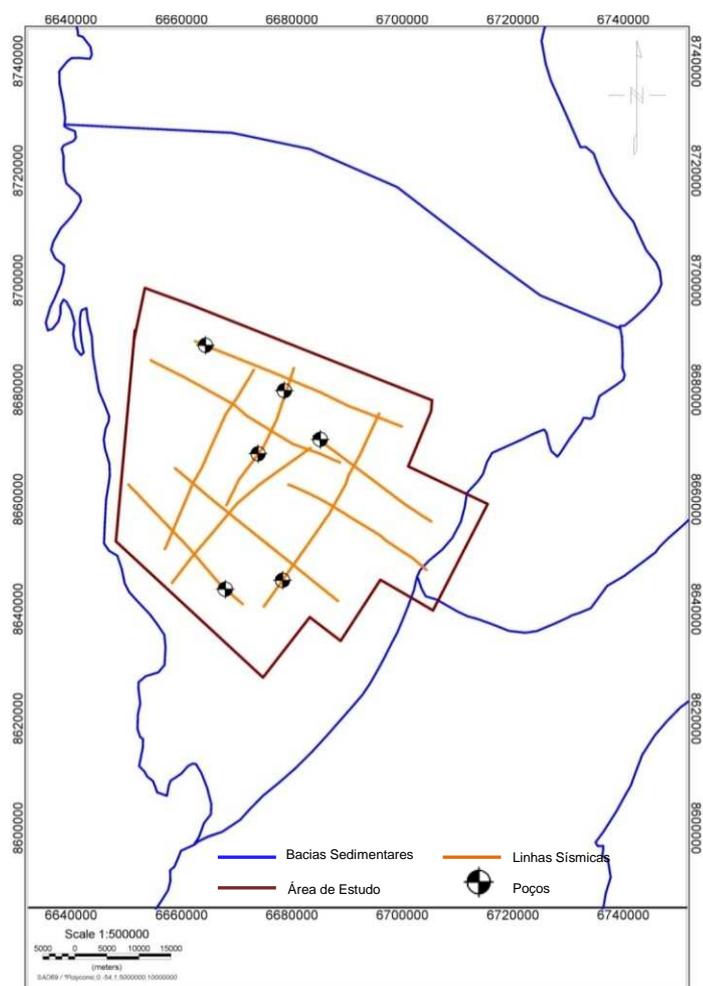


Figura 2.1- Mapa de localização da área de estudo.

2.2. Perfis de Poços

-6

A partir da análise das curvas de perfis sônicos dos 6 poços disponíveis na área (Figura 5.1), foi possível fazer uma aproximação do valor da velocidade média da onda ao percorrer o intervalo analisado. Depois de feita esta análise foi necessário converter os dados de micro segundo por pé ($\mu\text{s}/\text{ft}$) para metro por segundo (m/s) através da equação abaixo:

$$V_{mp} = \frac{304800}{DT} \quad (\text{Eq.1})$$

V_{mp} = Velocidade média no pacote (m/s)
 DT = Média do perfil no pacote ($\mu\text{s}/\text{ft}$)

Para gerar uma curva Tempo X Profundidade do poço é necessário calcular o tempo de trânsito de cada pacote; para este cálculo usa-se a equação abaixo:

$$\Delta t = \Delta h / V_{mp} \quad (\Delta h = \text{Espessura do Pacote analisado}) \quad (\text{Eq.2})$$

A curva tempo X profundidade é calculada através da soma aritmética dos tempos intervalares de cada pacote analisado.

Foram reunidos em uma única tabela os dados correspondentes a todos os perfis sintéticos gerados dos poços em que não continham *check-shot*, mais os *check-shots* dos poços 1-TBO-0001-BA e 1-FVM-0001-BA. Gerando-se um gráfico (Figura 2.2). Para que fosse feita a conversão em profundidade dos horizontes interpretados em tempo, foi ajustada uma curva no gráfico a fim de se obter uma equação que relacionasse os valores de tempo aos de profundidade através de uma equação matemática (Eq.3).

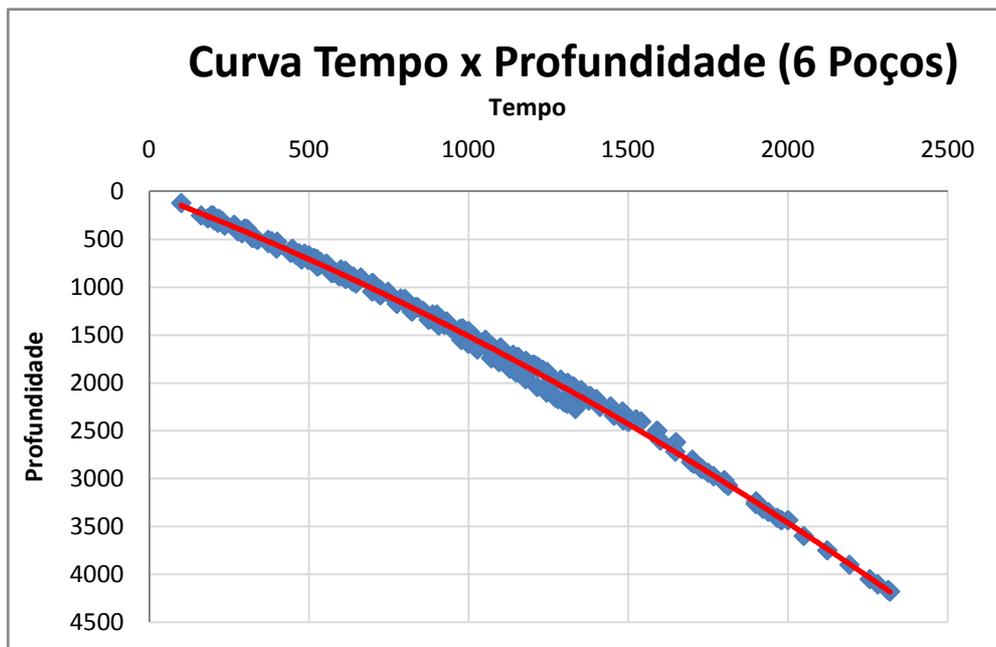


Figura 2.2 - Gráfico dos valores de tempo e profundidade dos poços da base de dados.

$$P = 2,645 \times 10^{-4} t^2 + 1,2t - 1,45 \quad (\text{Eq.3})$$

2.3. Gravimetria

O software *Geosoft Oasis Montaj*, foi a principal ferramenta utilizada para a obtenção dos mapas referentes aos dados gravimétricos. Os dados de gravimetria foram cedidos gentilmente pela empresa PGT – *Petroleum Geoscience Technology*.

Os dados referentes ao levantamento da bacia em estudo encontravam-se em uma única base de dados (GDB – *Geodata Base*) do software *Geosoft*, contendo os dados de anomalia Bouguer total referentes à toda Bacia do Tucano. Fez-se então necessária a divisão destes dados em arquivos do tipo GDB, individualizando a Bacia do Tucano Sul, através de um polígono do limite da Bacia, a fim de possibilitar a melhor manipulação e a análise dos dados. Para esta individualização, foi acrescentado a este polígono cerca de 10 a 30 % em unidades de área em relação à área da bacia, com intuito de eliminar posteriores efeitos de borda nos cálculos da interpolação e geração de dados residuais.

Inicialmente, foram realizadas análises das distâncias amostrais a fim de estabelecer o tamanho das células a serem utilizadas no processo de “*gridagem*” dos dados. O algoritmo escolhido foi o método da mínima curvatura, que apresenta melhores resultados com valores de tamanho de célula correspondente a $\frac{1}{4}$ da média das distâncias entre as amostras.

Em geral, os dados apresentavam baixa qualidade, com grande presença de ruídos (*spikes*), decorrentes de problemas durante o levantamento. Com o intuito de eliminar estes ruídos, foi gerado um *grid* com uma malha mais densa em relação à malha original, com espaçamento inferior a $\frac{1}{4}$ da distância média entre as amostras. A partir deste *grid*, foi gerado, outro *grid* correspondente à primeira derivada vertical (figura 2.3). Este tipo de *grid* realça melhor a diferença entre os valores amostrados quando há uma grande diferença de valores entre eles. A análise visual da distribuição dos valores de anomalia Bouguer permitiu identificar e remover os pontos grandes contrastes de valores e baixa correlação com os pontos de sua vizinhança (figura 2.4). Na Bacia do Tucano os ruídos estavam distribuídos de forma não homogênea. A tabela I abaixo mostra a relação dos dados utilizados.

Bacia	Amostras Analisadas	Amostras Excluídas	Total de Amostras
Tucano-Sul	32085	2672	34757

Tabela 1- Numero de amostras totais utilizadas no processamento.

O número de amostras analisadas se refere aos dados finais, que foram utilizadas na geração dos mapas. As amostras excluídas referem-se aos dados com *spykes* e o total de amostras refere-se à efetiva amostragem localizada dentro da bacia (fig. 2.5).

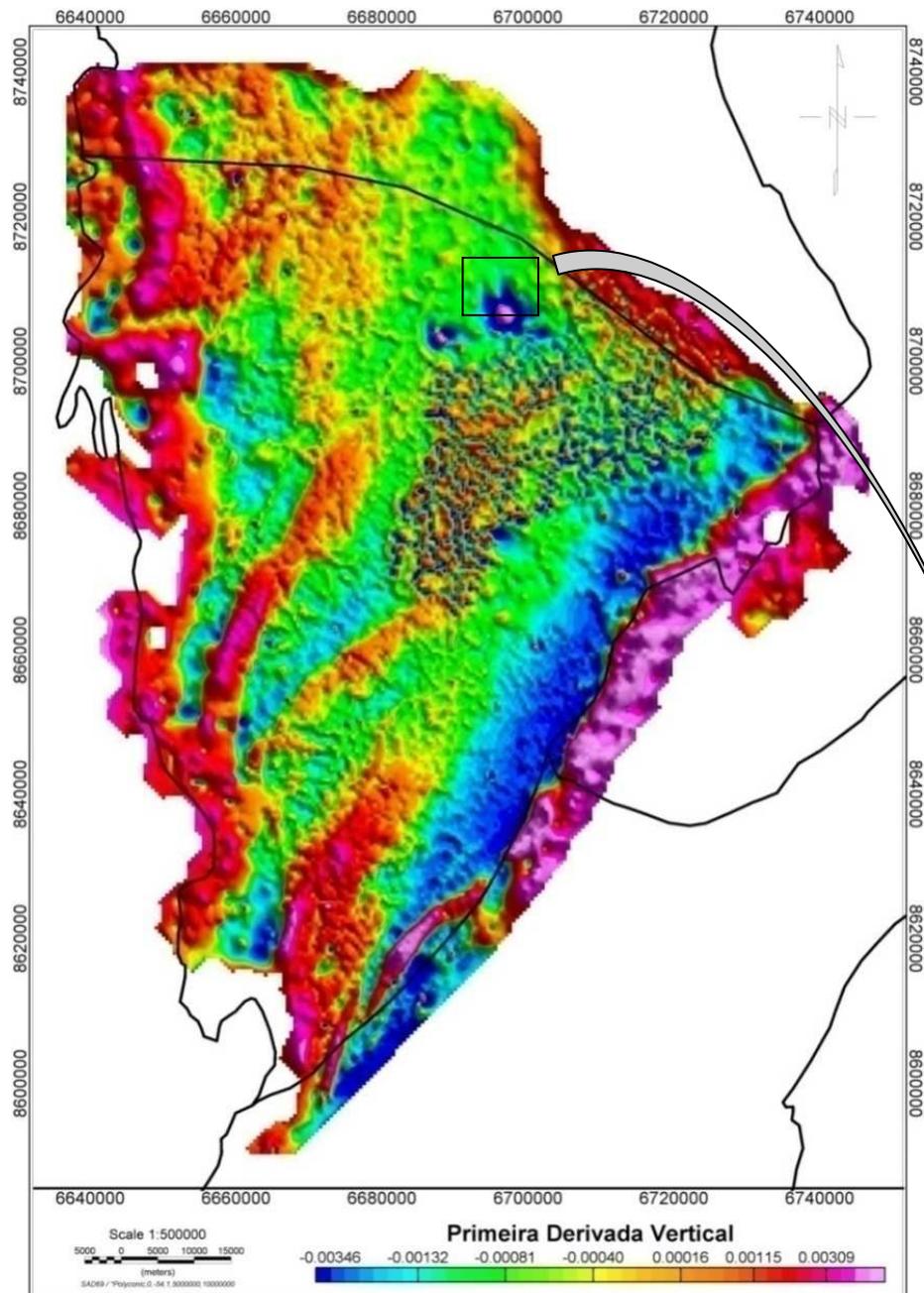


Figura 2.3- Mapa da Primeira Derivada Vertical gerado a partir dos dados brutos.

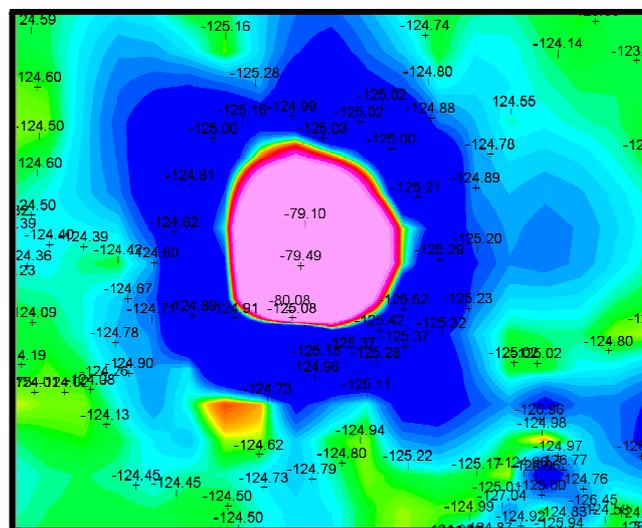


Figura 2.4- Exemplo de *Spikes* presentes no dado.

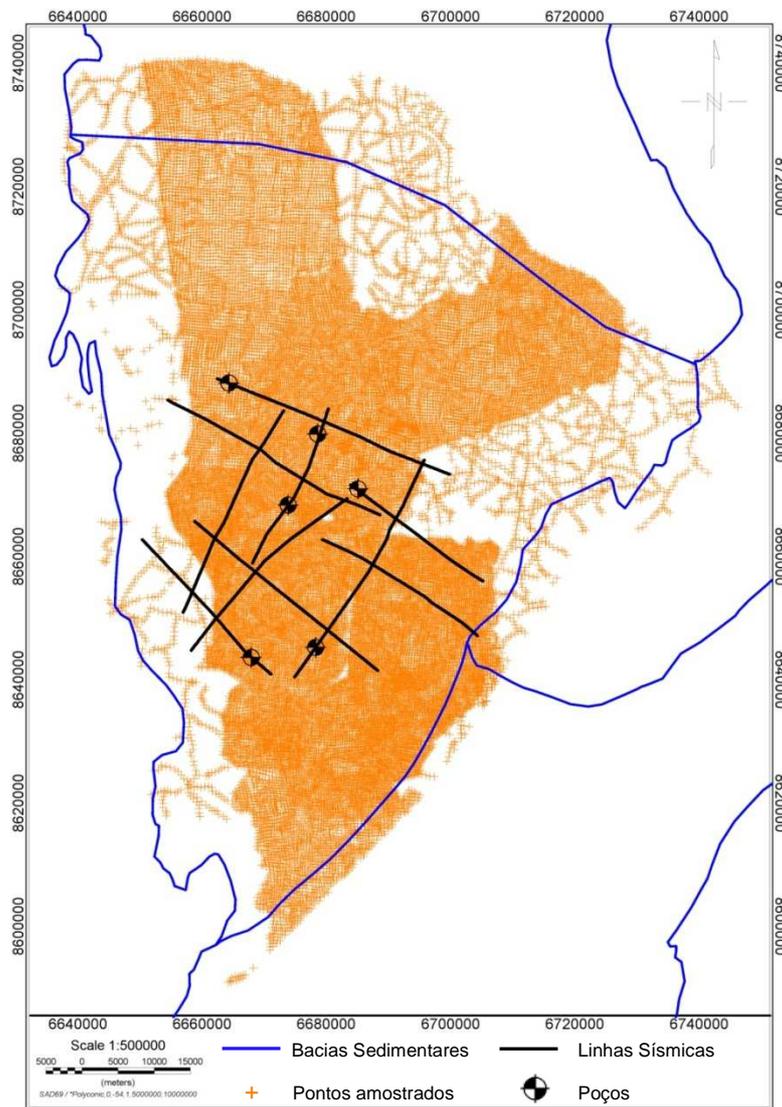


Figura 2.5 - Mapa de localização das amostras

2.3.1. Filtragem

Os filtros utilizados tiveram como objetivo eliminar o conteúdo de alta frequência incoerente, presente no espectro regional do dado. O pacote MAGMAP do *Geosoft Oasis Montaj Educational* dispõe de alguns filtros com estas características. A bacia do Tucano apresentou um bom comportamento do espectro de frequência, sendo necessária apenas a utilização do *Regional/Residual Filter*.

2.4. Modelagem Gravimétrica

A partir da importação do horizonte que delimita o embasamento em cada linha, interpretado nas seções sísmicas, foi gerado um modelo 2D de densidade, atribuindo valores de densidade para a crosta, sedimentos presentes na bacia e fontes profundas. Estes valores foram atribuídos com base em trabalhos desenvolvidos na área de estudo (GULF/GEOMAN).

O método da modelagem gravimétrica consiste no ajuste, por tentativa e erro, da curva calculada do modelo aos dados observados, estes extraídos do Mapa Bouguer Total (fig. 4.1). O ajuste foi feito através de mudança geométrica nos corpos geológicos envolvidos (embasamento e manto litosférico), dentro dos limites estabelecidos através do conhecimento da bacia.

A anomalia gravimétrica característica para o sistema de *horst* e *graben* presentes na bacia pode ser definida pelo conteúdo de média frequência. As anomalias com conteúdo de baixa frequência são geradas pelo “relevo” da descontinuidade de Mohorovicic (topo do manto litosférico).

Capítulo 3

Geologia

Os aspectos geológicos são de extrema importância no desenvolvimento deste trabalho que visa à modelagem de corpos geológicos. O conhecimento a respeito destes aspectos referentes à Bacia do Tucano sul e o seu contexto regional é descrito abaixo. A partir do conhecimento adquirido, foi possível fazer uma descrição detalhada das características dos corpos presentes na bacia, que possui um contexto geológico bastante complexo. Os mecanismos tectônicos formadores de bacias sedimentares são bastante estudados, o número crescente de trabalhos publicados na bibliografia internacional deixa claro o reconhecimento de sua importância para os diversos ramos da geologia.

3.1. Evolução Tectônica

As bacias do Recôncavo, Tucano e Jatobá estão relacionadas geneticamente ao processo de rifteamento que afetou o paleocontinente Gondwana durante o Eocretácio (Neocomiano) e constituem-se numa série de grábens assimétricos alongados da direção NE-SO, compondo um rifte intracontinental. Este sistema de riftes está implantado sobre diversos tipos de substratos litológicos, com idades variando desde o Arqueano ao Proterozóico. Tal heterogeneidade implica uma resposta deformacional diferenciada para um mesmo esforço aplicado (Gabaglia & Milani, 1991).

O arcabouço tectônico do rifte mostra uma boa correlação entre as principais estruturas formadas durante o processo de ruptura continental e os planos de fraqueza

de elementos geotectônicos mais antigos, influenciando a geometria das bacias (fig. 3.1). Os controles mais evidentes exercidos pelo embasamento são os seguintes:

- A sul, a bacia do Recôncavo é controlada pela porção NE do cinturão granulítico Atlântico, que se bifurca nas proximidades da cidade de Salvador, controlando inclusive a direção de implantação da margem continental;
- A direção N-S do rifte é evidenciada na Bacia do Tucano, alinhando-se com *greenstone belts* e lineamentos do Cráton do São Francisco;
- A Bacia do Jatobá sofre uma abrupta inflexão para ENE condicionada por discontinuidades do maciço granítico-gnáissico de Pernambuco-Alagoas, principalmente por zonas de cisalhamento relacionadas ao lineamento de Pernambuco, reativadas no Cretáceo como falhas normais que limitam a bacia ao norte (Magnavita & Cupertino, 1987).

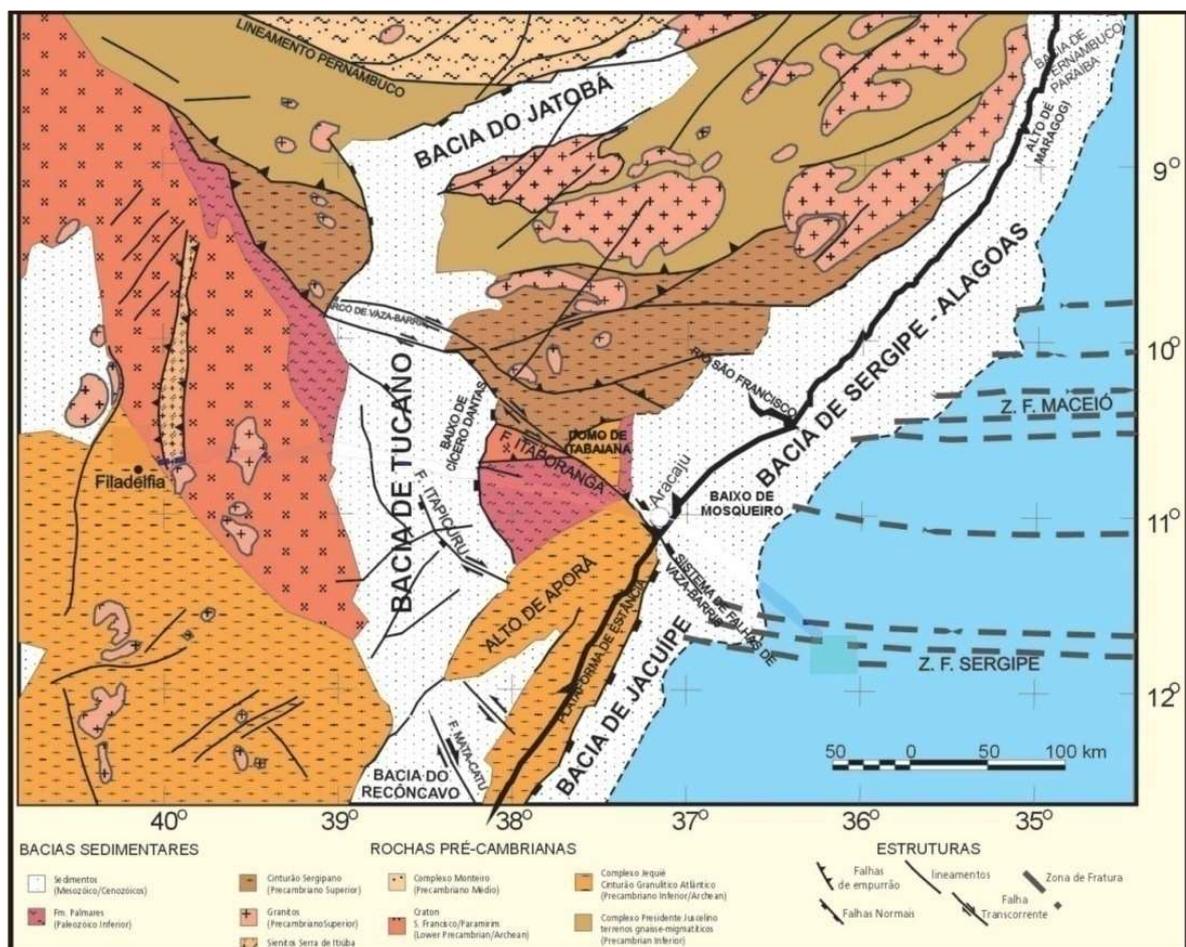


Figura 3.1 - Mapa geológico do Rifte Recôncavo - Tucano - Jatobá (CPRM,2003).

3.1.1. Riftes Interiores

A origem dos riftes é ainda um assunto controverso. De forma simplificada, eles são subdivididos em duas classes: ativos e passivos. No ativo, o rifteamento é causado pela ascensão convectiva do manto astenosférico. No passivo, ascensão do manto é consequência de um estiramento litosférico gerado pelas tensões causadas pela interação das placas.

As bacias do tipo rifte interior representam as bacias extensionais que não evoluíram até a fase de deriva. Comumente, estas bacias são alongadas e estreitas, apresentando perfil transversal assimétrico. Os processos e modelos termomecânicos aplicáveis aos riftes interiores são os mesmos discutidos nas bacias extensionais marginais do tipo atlântico.

A formação de um rifte, em essência, ocorre quando o esforço distensivo atuante na litosfera é maior que a sua resistência (*strength*) à deformação mecânica, sendo a taxa de deformação ($\dot{\epsilon}$) inversamente proporcional a resistência (equação 4). Caso a taxa de deformação seja baixa (10^{-15} a 10^{-16} s⁻¹), ocorrerá um enrijecimento local da litosfera a deformação. Para uma taxa mais elevada, por exemplo, 10^{-14} s⁻¹, haverá uma concentração de esforços com progressivo estreitamento da área afetada, resultando num aumento da razão esforço (*stress*) / resistência (*strength*). Esta condição é a mais favorável para a evolução de um rifte interior a uma margem passiva (Gabaglia & Milani, 1991).

$$\boxed{\epsilon = \frac{\text{esforço (stress)}}{\text{resistência (strength)}}} \quad (\text{Eq. 4})$$

O aborto do sistema de rifte do Recôncavo-Tucano-Jatobá e o desenvolvimento da margem passiva adjacente em Sergipe/Alagoas são explicados pela variação da taxa de deformação crustal entre estas bacias. O sistema de rifte abortado do Recôncavo - Tucano - Jatobá possuía taxa entorno de (10^{-15} s^{-1}) no período em que registrou o pulso de maior rifteamento entre 144 a 122 Ma (Rio da Serra/Aratu), enquanto Sergipe/Alagoas possuiu taxa entorno de (10^{-14} s^{-1}) registrada no período de 122 a 118 Ma (Buracica/Jiquiá) (Lana & Milani, 1986).

3.2. Arcabouço Estrutural da Bacia do Tucano Sul

A sub-bacia de Tucano Sul é estruturalmente classificada como um meio-graben basculado para sudeste, ocupando uma área triangular de aproximadamente 7.000 km². Seus limites são determinados pela falha de Inhambupe, a SE, pelo Alto de Aporá, a sul, que a separa da bacia do Recôncavo, pela zona de acomodação do rio Itapicuru, a norte, limite estruturalmente pouco definido com a sub-bacia de Tucano Central. A oeste, o limite dá-se com o embasamento cristalino, ora através de uma discordância, ora por meio de um monoclinado falhado (Magnavita et al., 2003).

A Bacia do Tucano Sul apresenta uma morfologia de meio-grábens, que constitui uma unidade tectônica fundamental para o desenvolvimento deste trabalho. Os grábens assimétricos são caracterizados por um sistema de falhas antitéticas N30°E, que mergulham para o quadrante NW (Figura 3.2). Estas falhas se tornam lítricas, com mergulhos cada vez mais suaves, em profundidade, evidenciando uma única falha para o sistema distributário de falhas (Falha de Inhambupe). Estas falhas apresentam movimentos horizontais devido ao aumento da taxa de subsidência da bacia.

O mergulho regional do embasamento é para SE, o que define uma pronunciada assimetria para estes grábens. A borda sudeste é marcada por um grande falhamento normal (Falha de Inhambupe), na borda oeste o limite geológico da bacia se dá por meio de uma zona de flexura, com falhas de pequeno rejeito, num perfil característico de semigráben. Assim, a geometria regional da bacia apresenta um grande bloco crustal basculado para SE, limitado por uma falha de direção nordeste com plano de mergulho para NW. O arcabouço do rifte é definido por um sistema de falhamentos constituindo dois conjuntos principais: o longitudinal orientado a N30°E, e o transversal de direção N65°W (Milani, 1987).

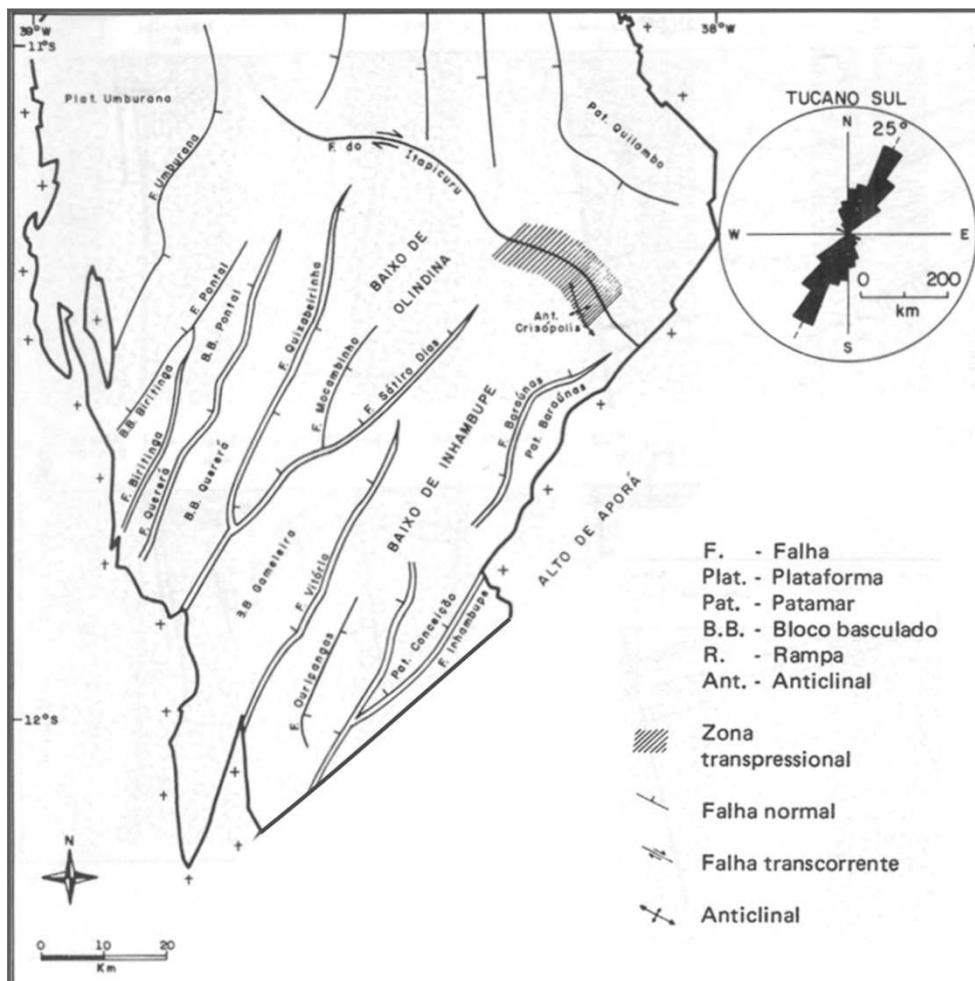


Figura 3.2 - Mapa estrutural da Bacia do Tucano Sul, modificado de Milani, 1987.

Capítulo 4

Mapas Gravimétricos

A geração de diferentes mapas gravimétricos foi de extrema importância no conhecimento do comportamento gravimétrico da bacia. Este conjunto de mapas apresenta uma ótima correlação com os mapas estruturais. A fim de obter as melhores correlações, foram gerados os seguintes mapas: Anomalia Bouguer Total, Anomalia Bouguer Crustal, Primeira Derivada Vertical, Primeira Derivada Vertical Residual, Primeira Derivada Horizontal Total e Primeira Derivada Horizontal Total Residual. As falhas principais da bacia, já mapeadas em outros trabalhos estão bem correlacionadas nos mapas gerados, foram feitas inferências de outras falhas além destas já conhecidas, através somente destes mapas gravimétricos.

4.1. Mapa da Anomalia Bouguer Total

O mapa de Anomalia Bouguer Total (fig. 4.1) corresponde à gridagem das amostras corrigidas do efeito Bouguer, o tamanho da célula de “gridagem” utilizado foi de 500 m. Este mapa auxiliou no entendimento do comportamento gravimétrico regional da bacia.

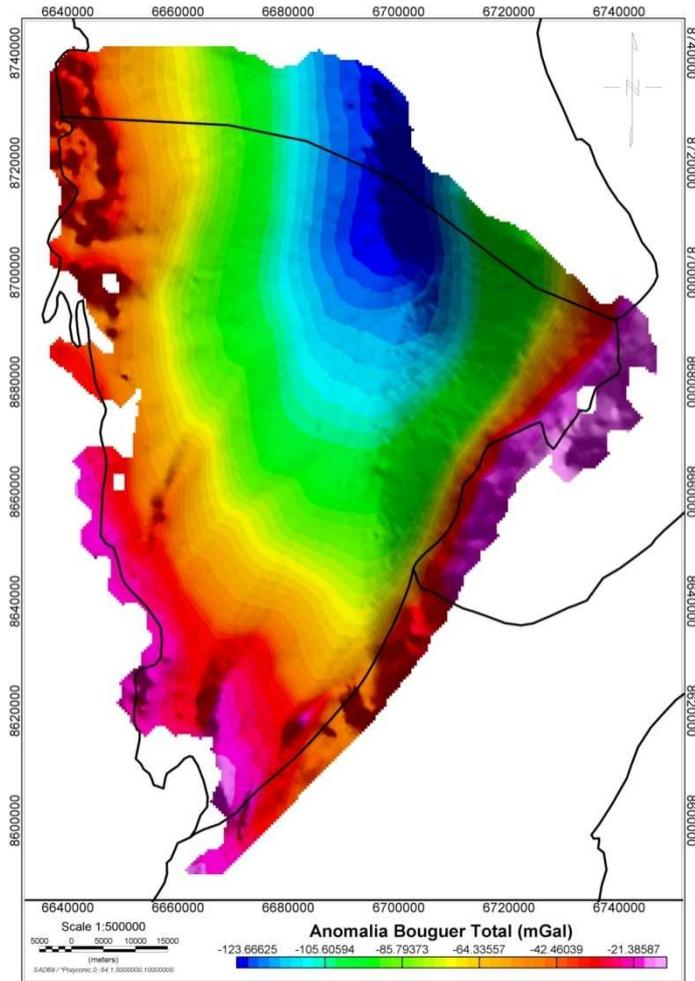


Figura 4.1 – Mapa da Bacia do Tucano Sul, Anomalia Bouguer Total *grid* 500 x 500 m.

4.2. Mapa de Anomalia Bouguer Crustal

Este mapa está apresentado na Figura 4.2. O mapa crustal é um mapa residual pela retirada de uma superfície de tendência de terceira ordem, sendo esta gerada pelo manto litosférico. Este mapa mostra as principais feições geológicas da Bacia. As regiões com elevadas anomalias, em vermelho, a SE da área, delineiam os altos estruturais relacionados à falha de borda, as suas segmentações e continuidades. A parte com baixos gravimétricos, em azul, representa o principal depocentro do rifte segmentado que compõe o sistema rifte total, formador da Bacia do Tucano Sul.

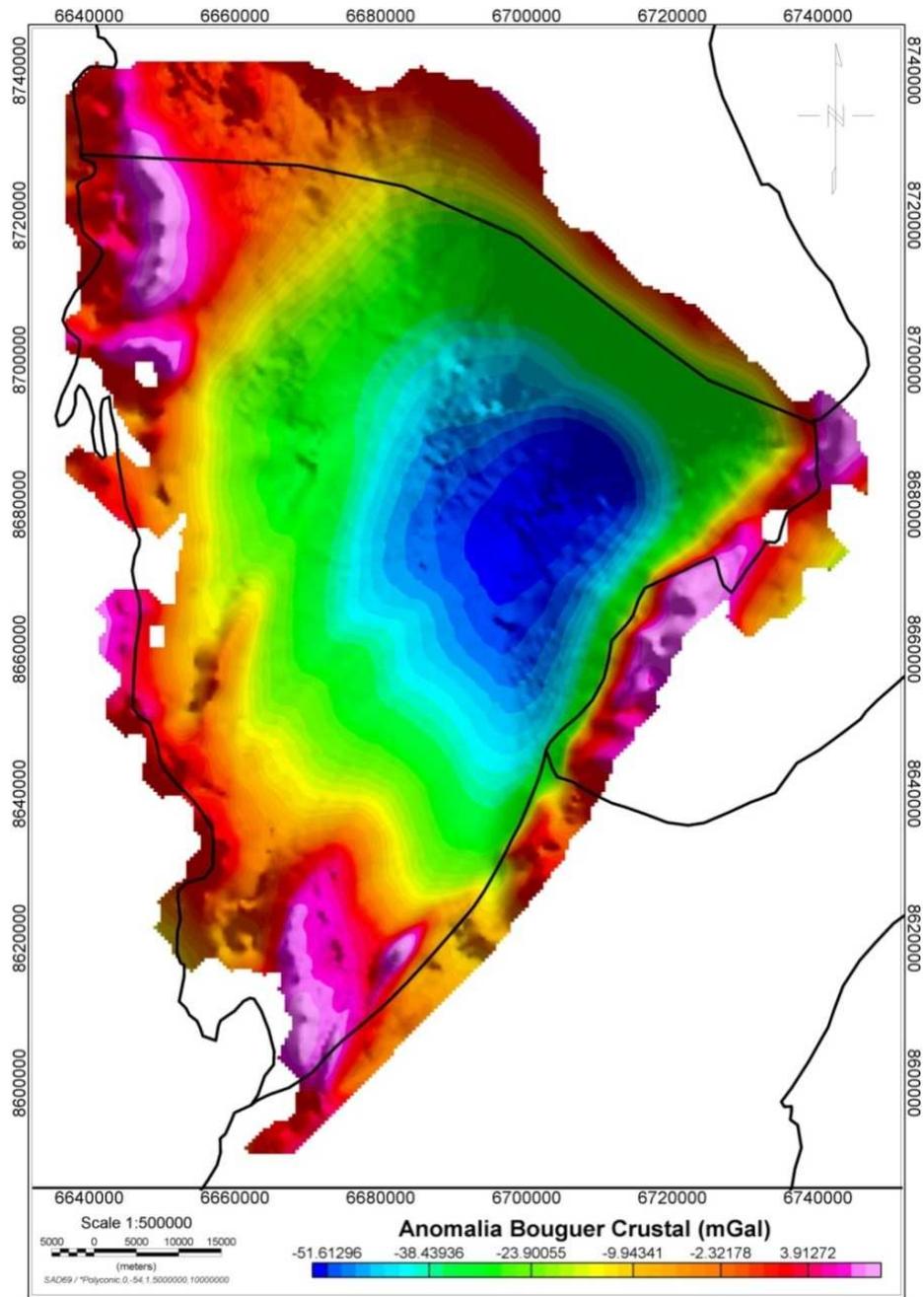


Figura 4.2 – Mapa da Bacia do Tucano Sul, Anomalia Bouguer Crustal.

4.3. Primeira Derivada Horizontal Total

Na Figura 4.3, o mapa representa a primeira derivada horizontal do mapa de anomalia Bouguer. Este mapa é gerado a partir das derivadas horizontais do mapa Bouguer na direção x e y, sendo resultado da raiz quadrada da soma dos quadrados das

derivadas horizontais x e y. Nele está evidente a segmentação do rifte pelas falhas que erigem os diversos compartimentos da Bacia do Tucano Sul. As falhas interpretadas a partir desse mapa estão evidenciadas no mapa estrutural da bacia (figura 3.2). A falha de Itapicuru, limite norte da bacia, não apresenta resposta gravimétrica, limite este estabelecido pela zona de acomodação do Rio Itapicuru.

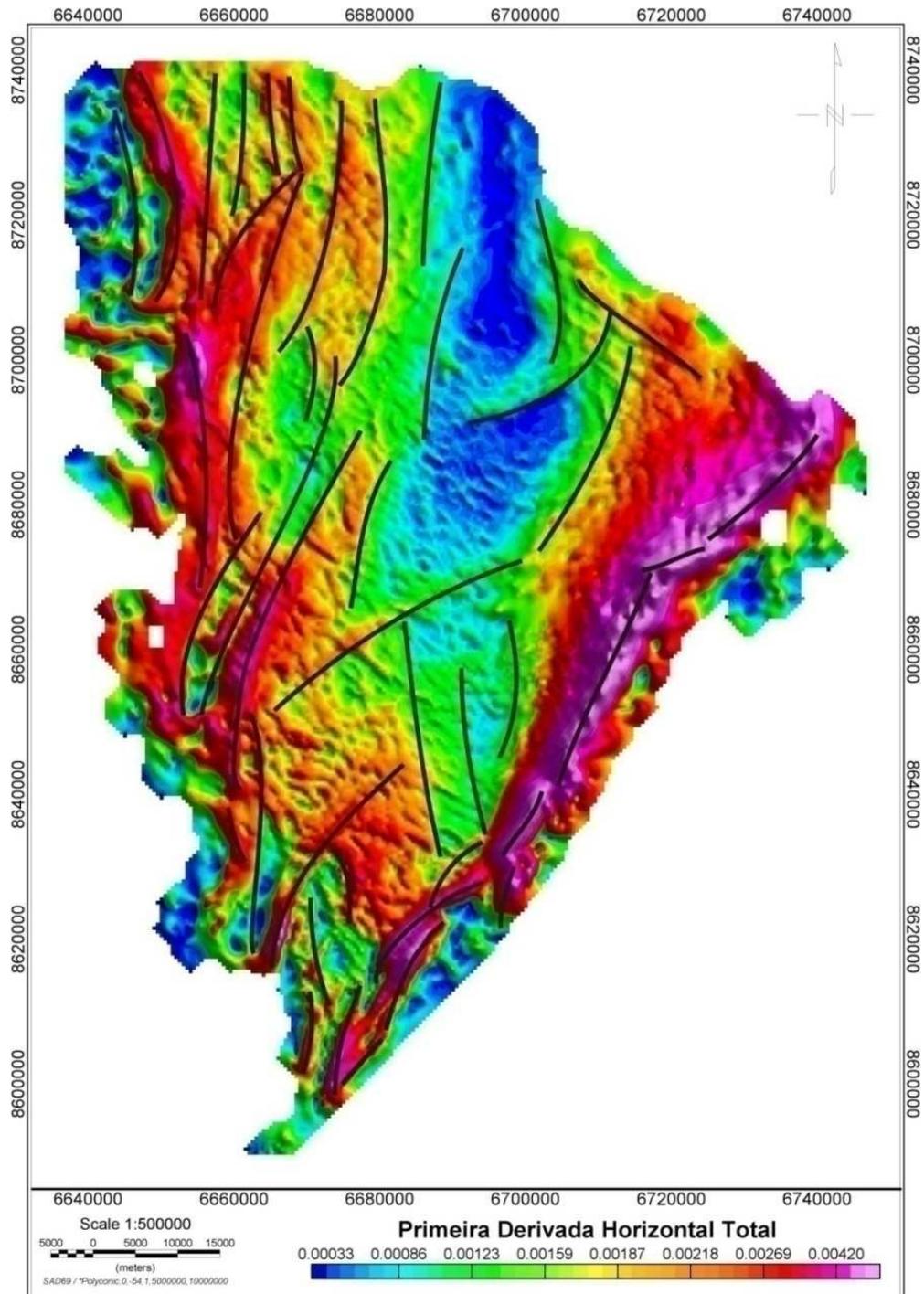


Figura 4.3 – Mapa interpretado da primeira derivada horizontal total na Bacia do Tucano Sul.

4.4. Primeira Derivada Vertical

O mapa da primeira derivada é gerado a partir da derivada do mapa Bouguer, resultando nos gradientes deste mapa. Este mapa apresenta as mesmas feições exibidas nos mapas da derivada horizontal. Entretanto, as diferenças topográficas estão visualmente mais evidenciadas. Assim, os lineamentos pretéritos, Pré-Cambrianos, bem como as falhas de borda e as interiores, do rifte (as de maiores rejeito vertical), estão mais acentuadas (Figura 4.4).

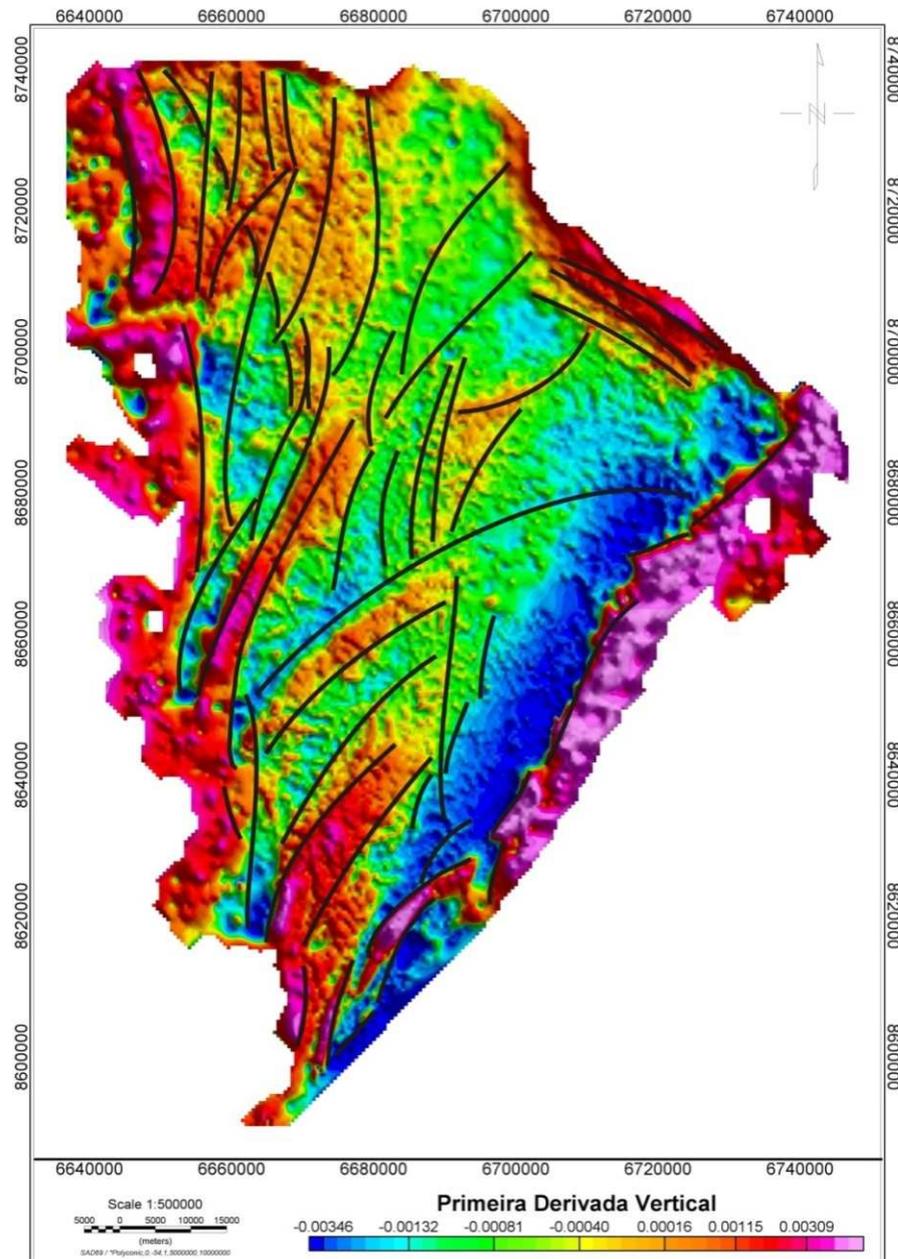


Figura 4.4 – Mapa da Bacia do Tucano Sul, primeira derivada vertical

4.5. Mapa Residual

A bacia do Tucano Sul apresenta a compartimentação dos blocos bastante complexa. A fim de melhor evidenciar as falhas que correspondem a rebaixamento de blocos e estruturas oriundas de falhas transformantes, foi gerado um grid da anomalia bouguer residual. O contraste entre blocos rebaixados se torna mais evidente a partir do contato lateral entre o embasamento de um bloco e o sedimento acima do bloco adjacente, pois a diferença entre os valores de densidade destes dois tipos litológicos é grande, sendo este efeito resultante de pequeno comprimento de onda, perceptível em mapas de anomalias residuais.

O grid da anomalia residual foi gerado a partir da subtração de dois grids correspondentes aos grids da anomalia Bouguer total menos o grid de sua continuação vertical para cima.

A continuação vertical para cima é um método que simula levantamento a diferentes alturas em relação à altura original. Este método tem com característica principal a perda de altas e médias frequências oriundas de fontes ou contrastes litológicos rasos. Para este caso foi feita uma continuação vertical para cima de 5000 metros.

Ao subtrair o grid da anomalia Bouguer residual do grid da anomalia Bouguer total, o resultado foi um grid com conteúdo de altas e médias frequências resultante de fontes e contrastes litológicos rasos. Com isso foi possível fazer uma melhor interpretação das falhas.

4.5.1. Derivada Horizontal Total Residual

A partir do grid da anomalia Bouguer residual foi gerado o mapa da derivada horizontal total residual Bouguer. Neste mapa (fig.4.5) foi possível fazer uma melhor

interpretação dos conjuntos de falhas presentes na bacia, falhas estas que só puderam ser mapeadas através deste mapa, porque, como dito anteriormente o conhecimento sobre esta bacia é de pequena expressão. A quantidade de dados sísmicos nesta bacia é muito pequena, e estes dados estão muito localizados, não abrangendo a bacia como um todo, portanto até o presente momento não há um mapa estrutural da bacia. Assim, o mapa da derivada horizontal total residual em conjunto com as seções sísmicas disponíveis foi a base para a análise estrutural da bacia.

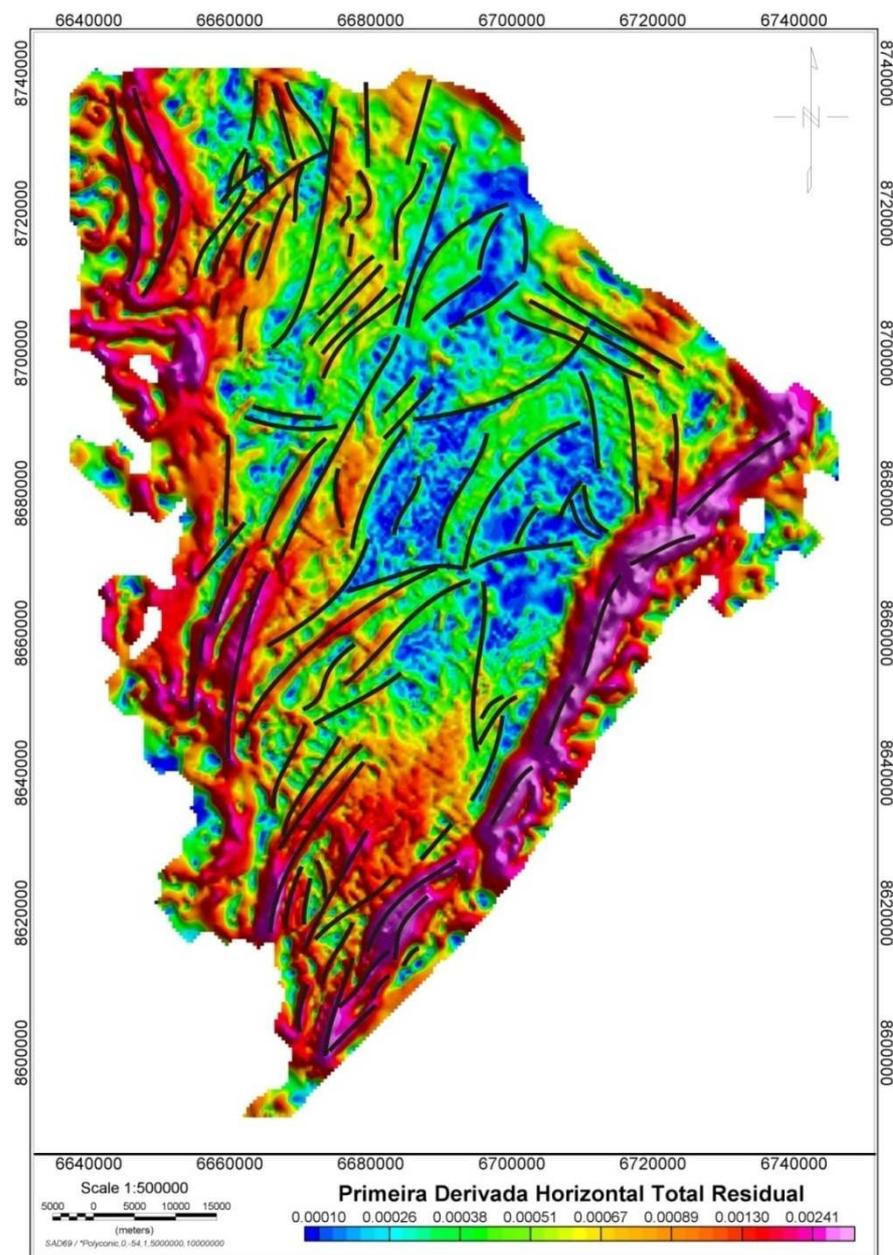


Figura 4.5 – Mapa da Bacia do Tucano Sul, Primeira Derivada Horizontal Total Residual.

Capítulo 5

Interpretação Sísmica

A amarração dos poços à sísmica exerceu papel importante na interpretação do embasamento da bacia, pois garantiu maior confiabilidade da posição dos marcadores estratigráficos. A linha 0026-1049 (fig. 5.1), localizada na parte rasa da bacia, sobre um alto estrutural serviu de base para a interpretação do embasamento da bacia. A partir dela foi feita a propagação da interpretação do embasamento através de seus cruzamentos com outras linhas e das características das curvas do poço 3-QEX-0004-BA. As linhas de modo geral não apresentavam um correto processamento, pois nas partes onde o embasamento é mais raso elas apresentavam muitas múltiplas, o que foi solucionado pela observação das curvas do poço 3-QEX-0004-BA projetado na linha 0026-1049. Além do poço 3-QEX-0004-BA, o outro poço que atingiu o embasamento da bacia (1-FCI-0001-BA) estava localizado num ponto da linha sísmica 0026-1067 que apresenta baixa resolução sísmica. O refletor sísmico correspondente ao embasamento não apresentava boa continuidade lateral, o que dificultou a propagação da interpretação para o restante das linhas (fig. 5.4).

O software *Epos 3* da *Paradigm*, foi a principal ferramenta utilizada para a interpretação das linhas sísmicas, amarração de poços, carregamento dos perfis sintéticos e marcadores estratigráficos.

A utilização de mapas gravimétricos principalmente o Mapa da Primeira Derivada Vertical auxiliou a interpretação nas linhas que apresentavam baixa resolução (fig. 4.4).

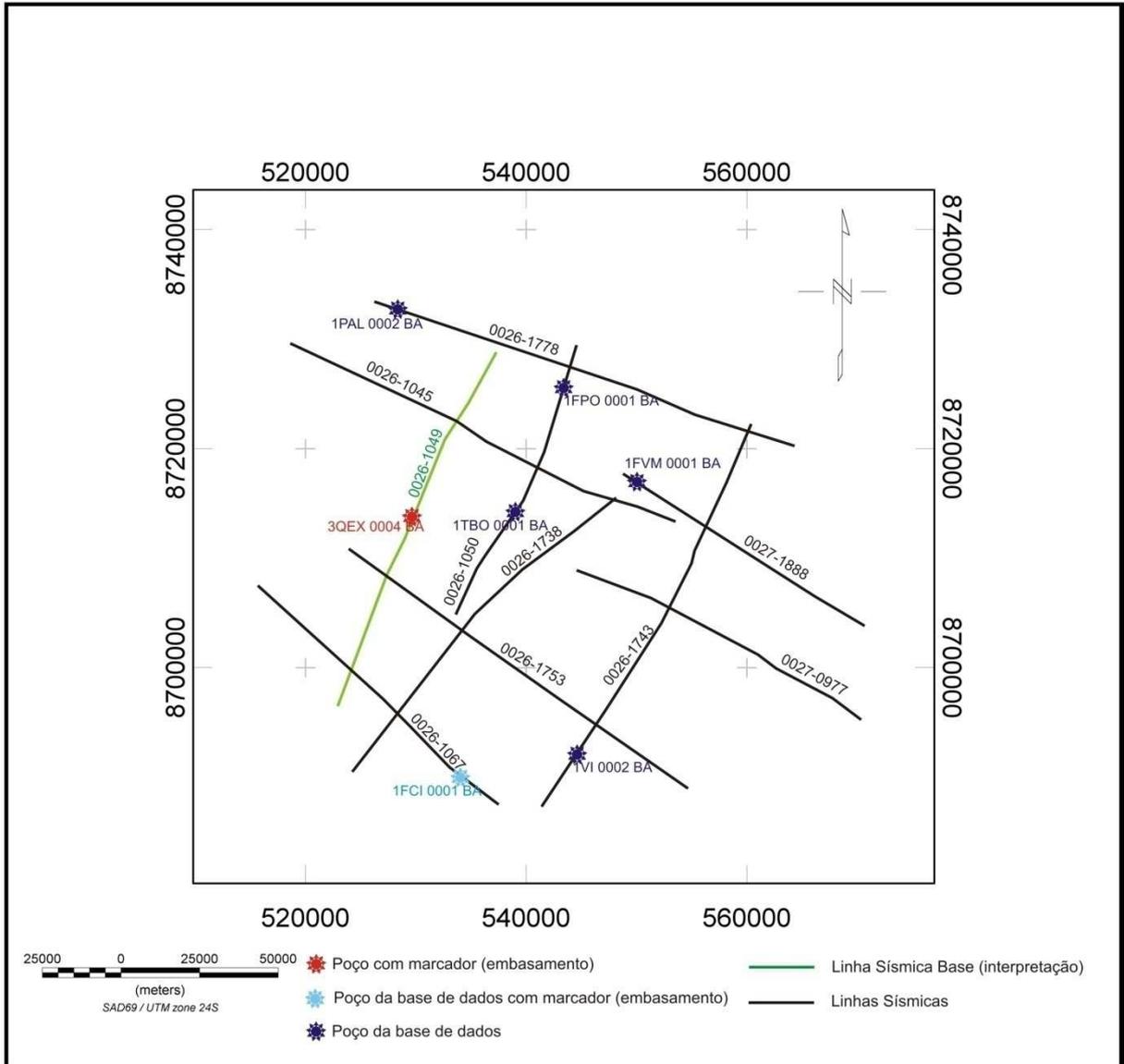


Figura 5.1- Mapa de localização das linhas sísmicas e poços utilizados na interpretação.

Após ser concluída a interpretação das linhas, os horizontes foram exportados em formato *XYZ*, a fim de serem importados pelo *Geosoft*. A conversão dos horizontes para profundidade foi realizada no *Geosoft*, segundo a equação 3 (pág. 6).

As linhas, 0026-1743, 0026-1753 e 0026-1067 após a interpretação sísmica (Figuras 5.2, 5.3 e 5.4), foram modeladas como disserto a seguir.

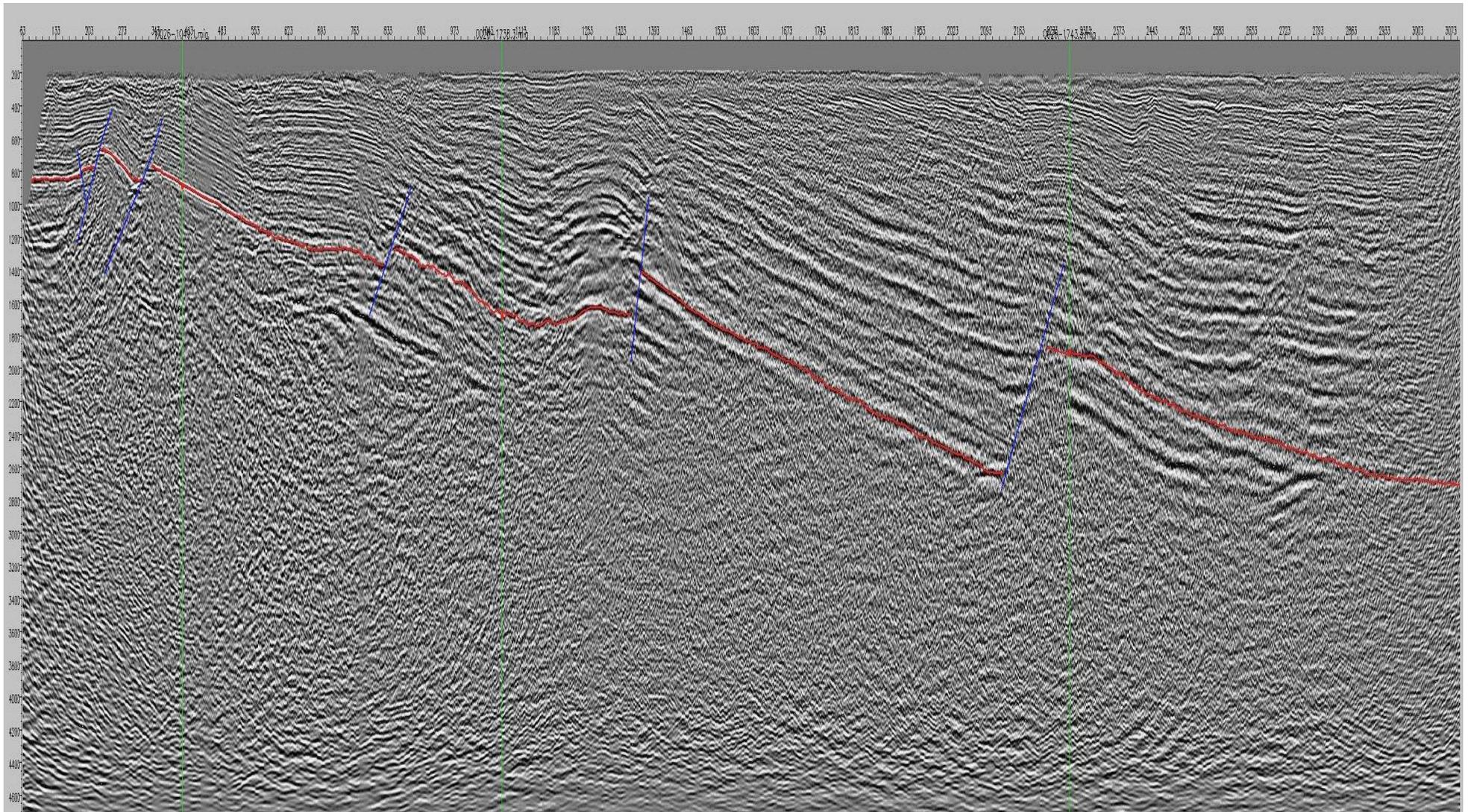


Figura 5.2- linha sísmica 0026-1743 interpretada.

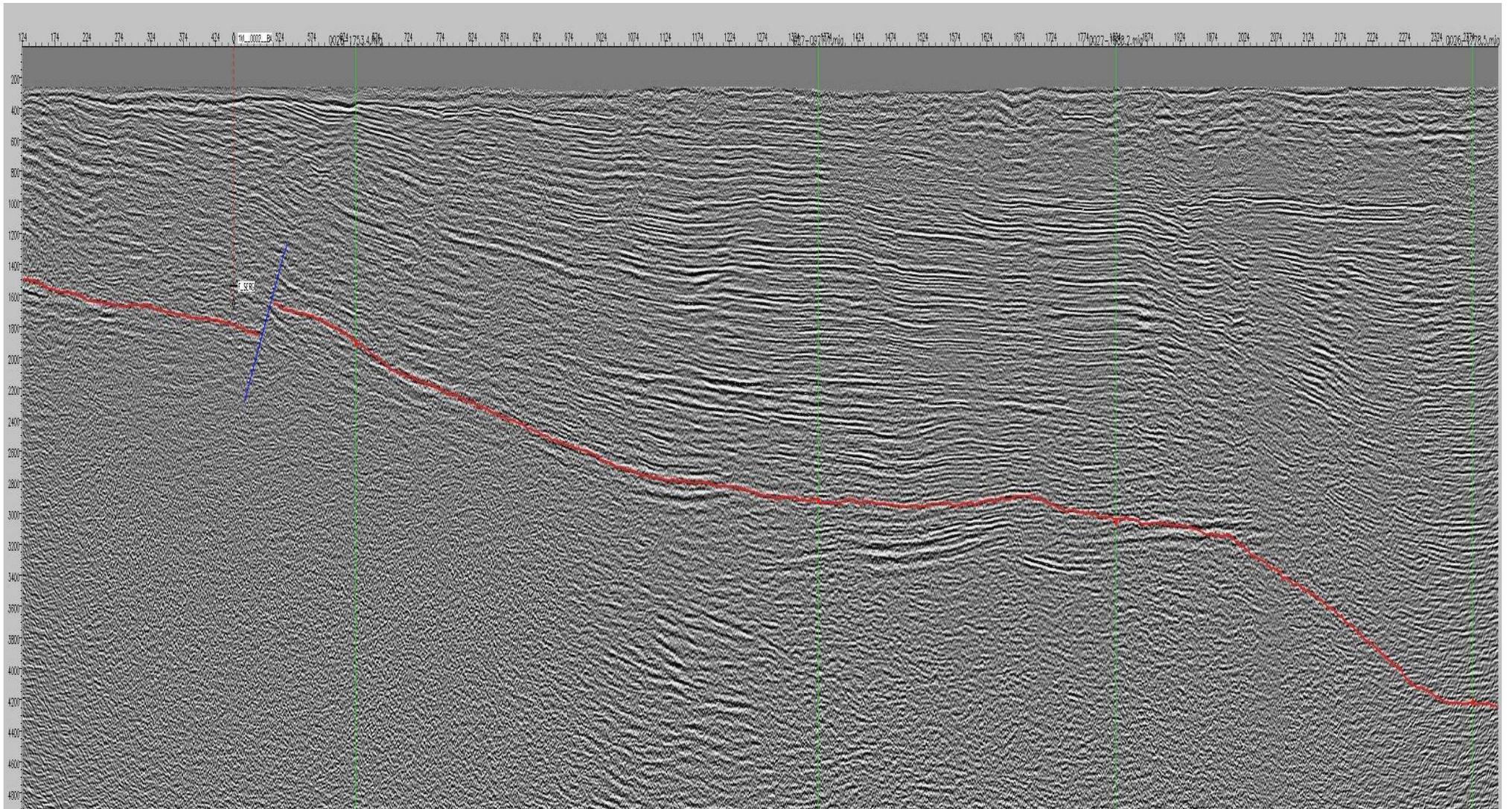


Figura 5.3 - linha 0026-1753 interpretada.

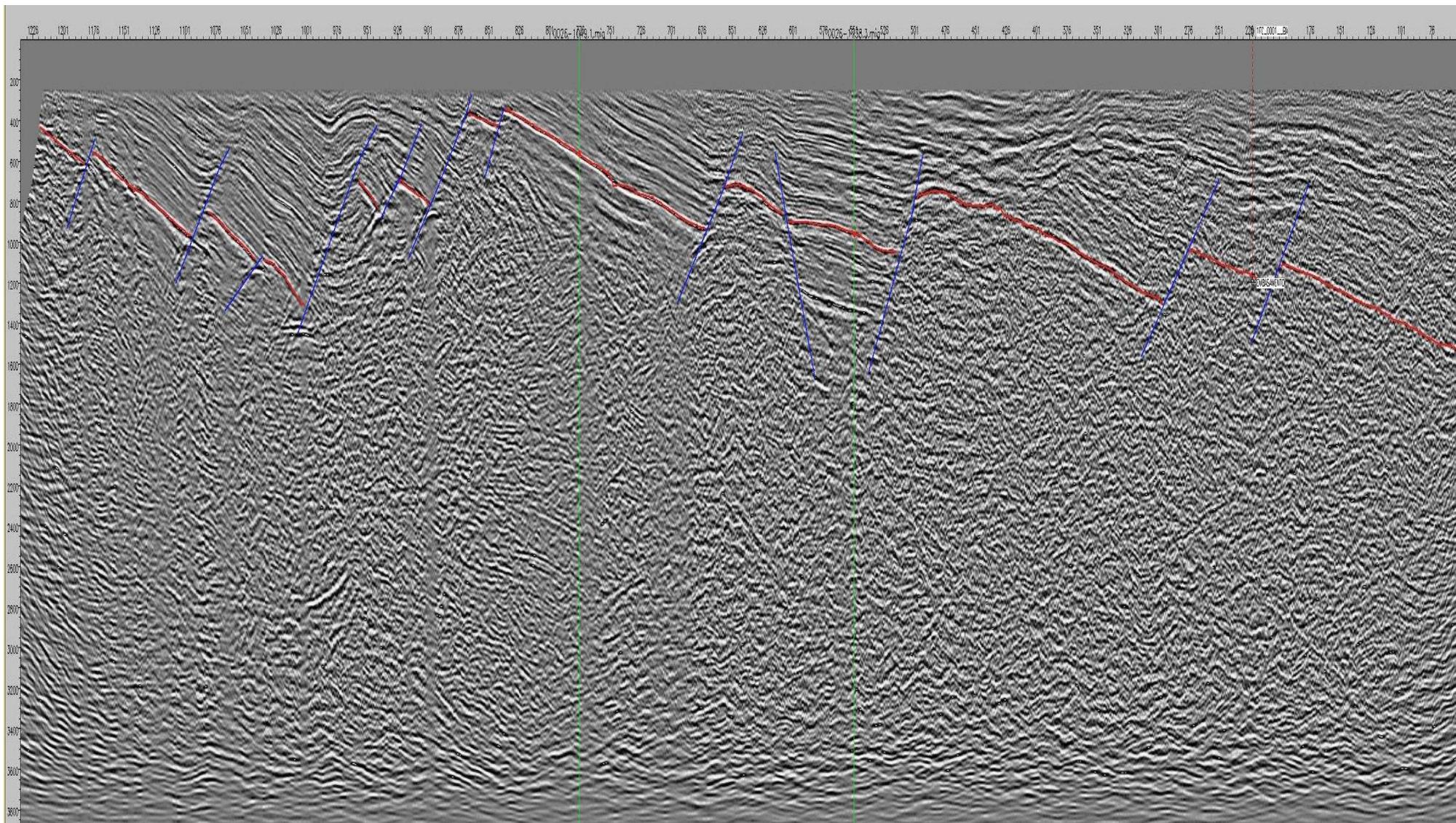


Figura 5.4 - linha sísmica 0026-1067 interpretada.

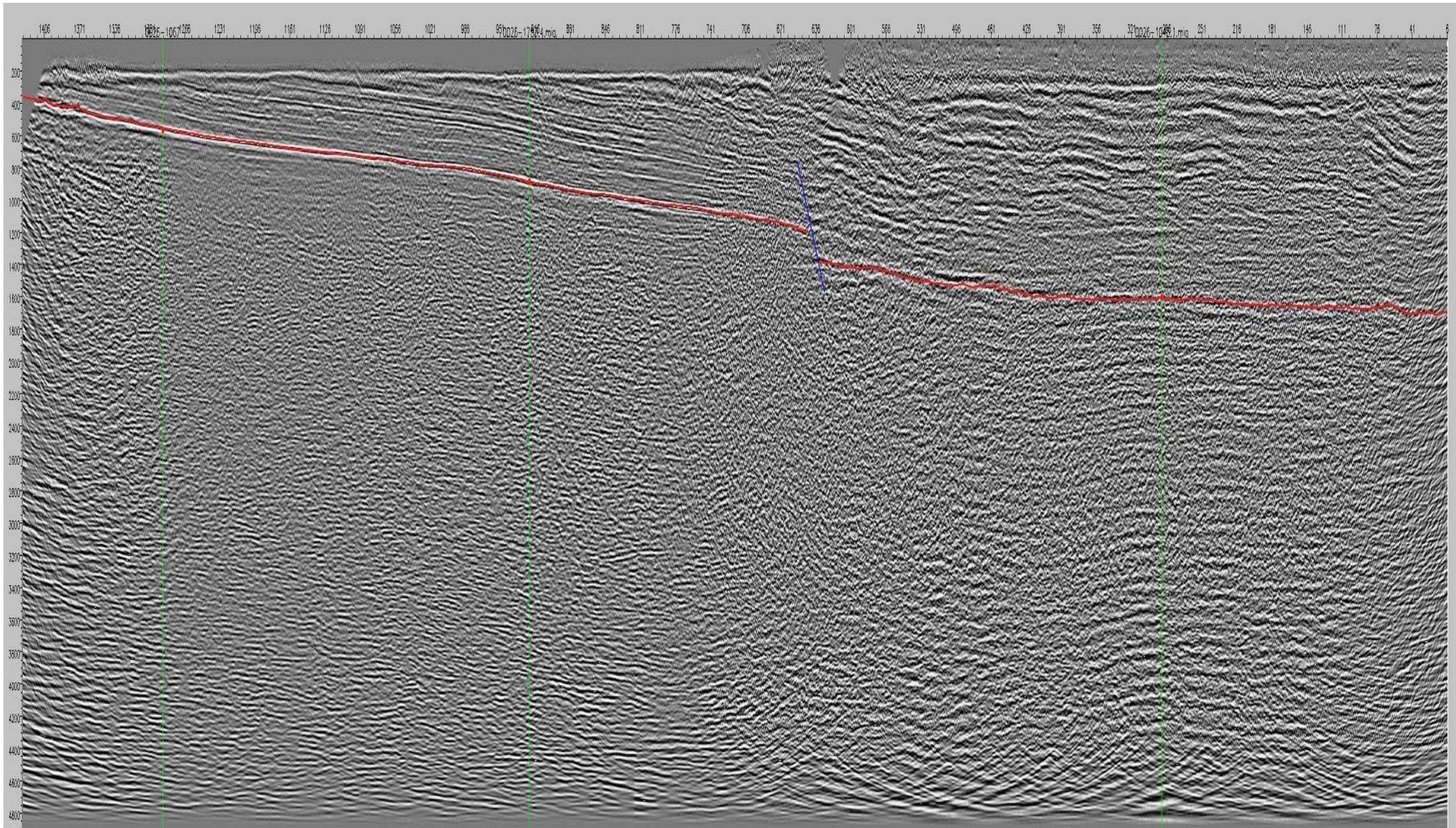


Figura 5.5 - linha sísmica0026-1049 interpretada.

Capítulo 6

Modelagem Gravimétrica

A modelagem gravimétrica foi realizada com o auxílio do GM-SYS, ferramenta do *software Geosoft Oasis Montaj* que calcula o efeito gravitacional gerado por corpos bidimensionais através de aproximações a polígonos ideais.

A partir de modelos geológicos em duas dimensões, esta técnica fornece o correspondente perfil gravimétrico (curva calculada) que, comparado ao perfil real, permite uma estimativa do grau de precisão contido no modelo proposto.

Numa determinada região, a expressão gravimétrica é função da geometria, da densidade e da posição espacial dos corpos geológicos envolvidos. A anomalia gravimétrica será o produto da interação destes fatores, cada qual contribuindo diferentemente na composição final.

6.1. Modelagem Teórica de uma Bacia Sedimentar

As figuras 6.1, 6.2 e 6.3 apresentam situações geológicas teóricas, que se assemelham ao perfil da bacia em estudo, cujas correspondentes anomalias gravimétricas foram geradas, a partir de polígonos bidimensionais. A figura 6.1 mostra o perfil esquemático de uma bacia sedimentar, estando preenchida por um material menos denso do que o embasamento, dando origem a uma anomalia gravimétrica negativa, com os menores valores correspondendo as suas porções mais profundas. Por ser uma feição

geológica rasa, a bacia gera uma anomalia cujo comprimento de onda é equivalente ao seu comprimento, e cuja forma reflete a morfologia da bacia ao nível do embasamento. Além disso, ambas as bordas situam-se num mesmo patamar de valores gravimétricos.

A figura 6.2 mostra um corpo tabular de densidade uniforme, com um corpo profundo, como um diápiro do manto na base da crosta, dando origem a uma anomalia gravimétrica de caráter regional, ou seja, que influi nos valores gravimétricos até regiões mais distantes de seu limite lateral. Uma consideração a se fazer é o fato de que quanto mais raso o corpo com contraste de densidade positivo em relação ao corpo encaixante, sua anomalia gravimétrica tem seu comprimento de onda diminuído.

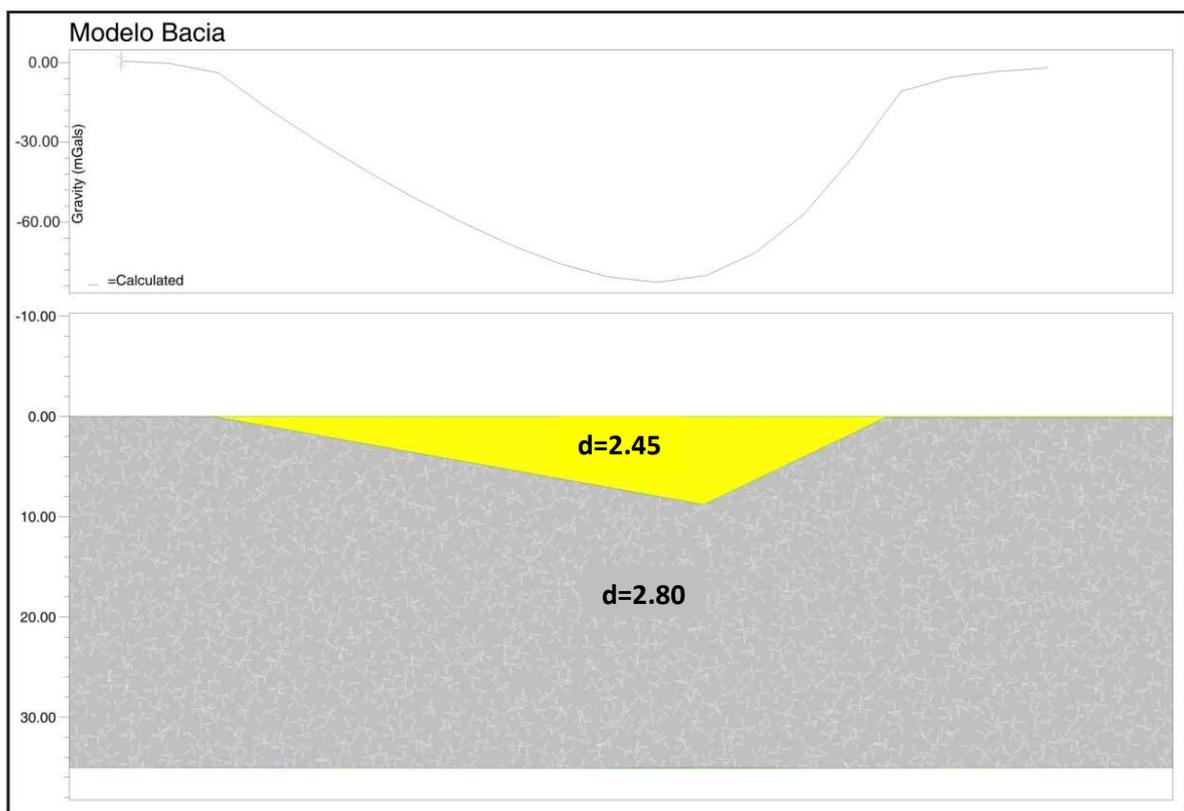


Figura 6.1 – Modelo gravimétrico de uma bacia sedimentar hipotética.

A interação das influências de ambos os corpos presentes nas figuras 6.1 e 6.2 sobre a anomalia gravimétrica é mostrada na figura 6.3, onde a anomalia gravimétrica gerada pela bacia é modificada pela presença de um corpo mais denso na parte mais profunda da bacia, fazendo com que fosse suavizado o efeito gerado pelo depocentro da

bacia, tornando os valores da anomalia mais elevados em comparação com os valores do perfil onde não há a presença do corpo mais denso.

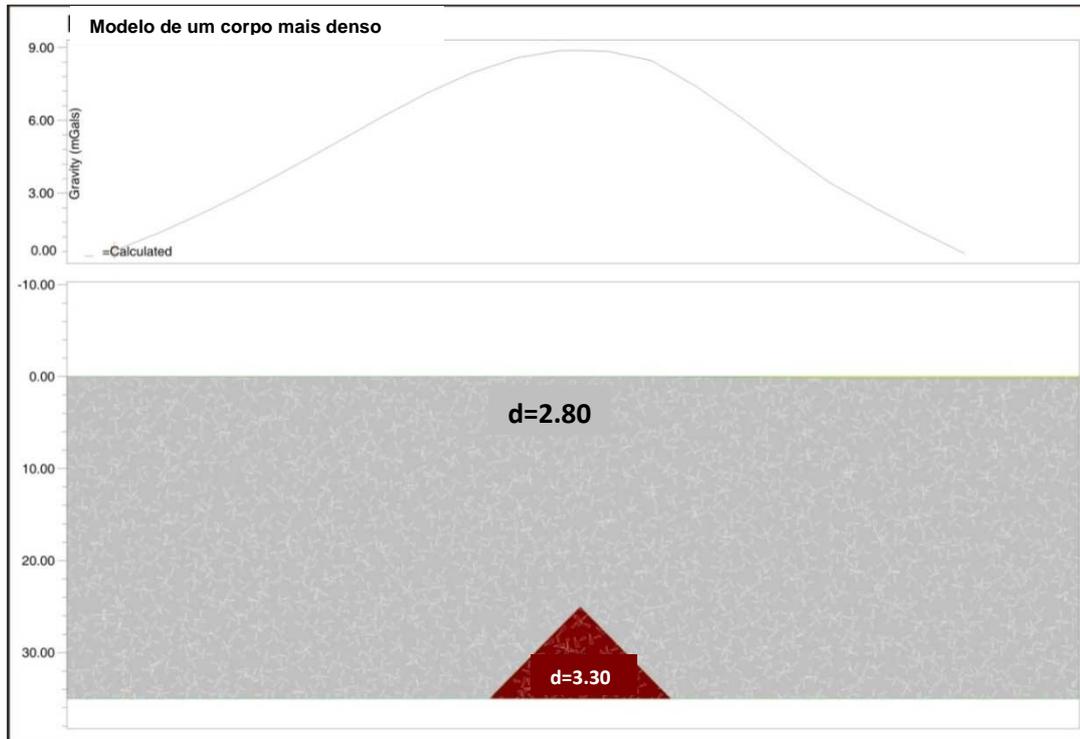


Figura 6.2 – Modelo gravimétrico hipotético de uma litosfera com um corpo mais denso na base.

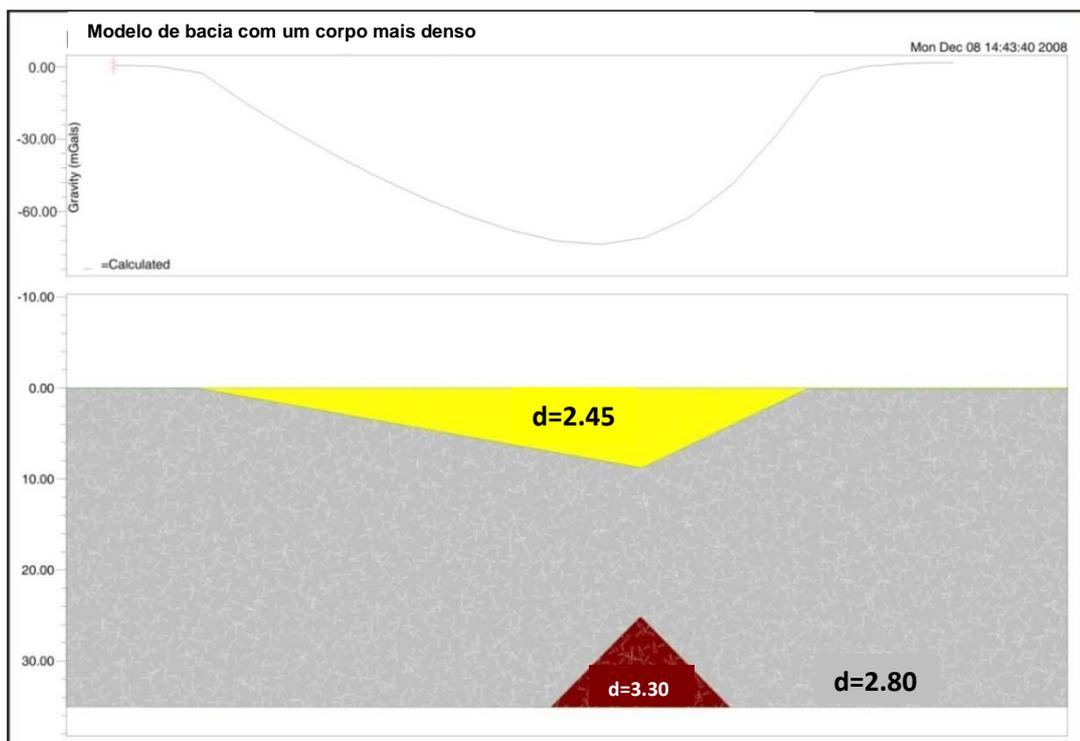


Figura 6.3 – Modelo gravimétrico hipotético de uma bacia sedimentar com um corpo mais denso na base da litosfera.

Esta técnica de modelagem de dados potenciais não possui unicidade para seus resultados, o que faz aumentar a incerteza acerca da geometria e posição real dos elementos geológicos considerados. Assim, no exemplo apresentado, se o embasamento for bem conhecido, se ganha liberdade para considerar, com menor incerteza a influência do corpo mais denso da anomalia gravimétrica observada.

6.2. Modelagem da Área de Estudo

Dez perfis cruzam a área estudada, dentre eles foram escolhidos três, os que melhor representavam a bacia, para serem modelados a partir de valores gravimétricas extraídos do mapa Bouguer da área de estudo (fig. 6.4). Os perfis coincidem em posição com as seções sísmicas, e receberam a mesma denominação. As linhas sísmicas são paralelas e transversais ao mergulho SE do embasamento.

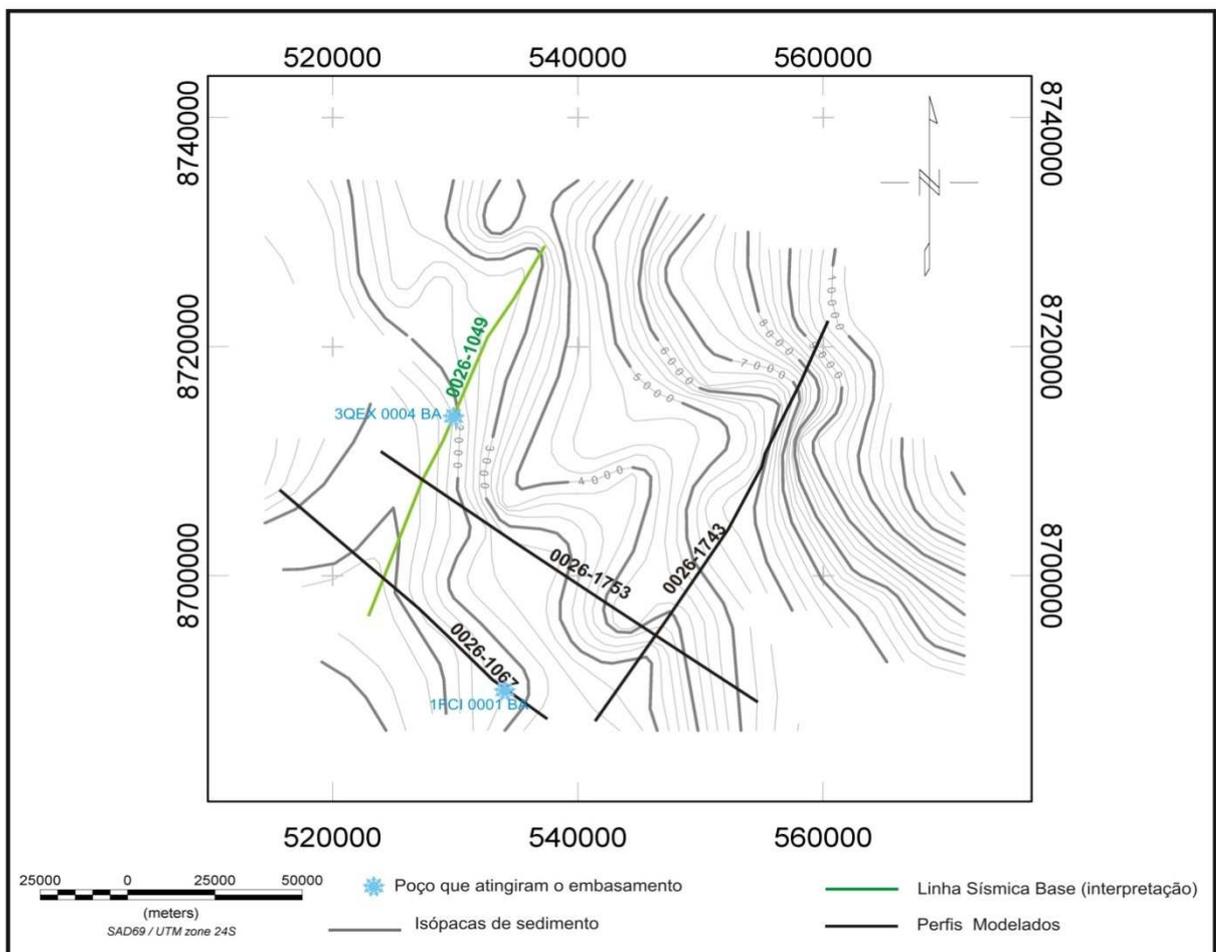


Figura 6.4 – Mapa dos perfis modelados.

A forma de melhor modelar corpos geológicos e as anomalias gravimétricas produzidas por estes corpos, consiste em delimitar de forma mais precisa os corpos geológicos envolvidos. A escolha de perfis a serem modelados coincidindo com perfis sísmicos tiveram como principal objetivo a interpretação dos corpos geológicos que pudessem representar os contrastes de densidades sensíveis as deformações do campo gravimétrico local, sendo o embasamento um dos principais responsáveis pela deformação do campo gravitacional local.

No processamento dos perfis, foram consideradas as densidades para os corpos geológicos envolvidos: sedimentos da bacia: 2,45 g/cc; embasamento (crosta): 2,80 g/cc; manto: 3,30 g/cc. Estes dados foram extraídos do relatório da GULF/GEOMAN (1981).

A interpretação das linhas *dip* visou a identificação das principais estruturas em regiões onde estas estruturas estão oblíquas à direção das linhas; foi feito um ajuste aproximado nas modelagens, com um pequeno erro que não compromete o caráter regional das conclusões delas extraídas. A falta de coincidência alcança em alguns trechos o máximo de 1 mGal, valor correspondente a 1,8 % da amplitude gravimétrica total.

6.2.1. Modelagem das seções *dip*

A figura 6.5 mostra o perfil modelado com base na Linha 0026-1753. Esta modelagem consistiu em somente atribuir valores de densidades aos principais corpos geológicos envolvidos: embasamento e os sedimentos da bacia.

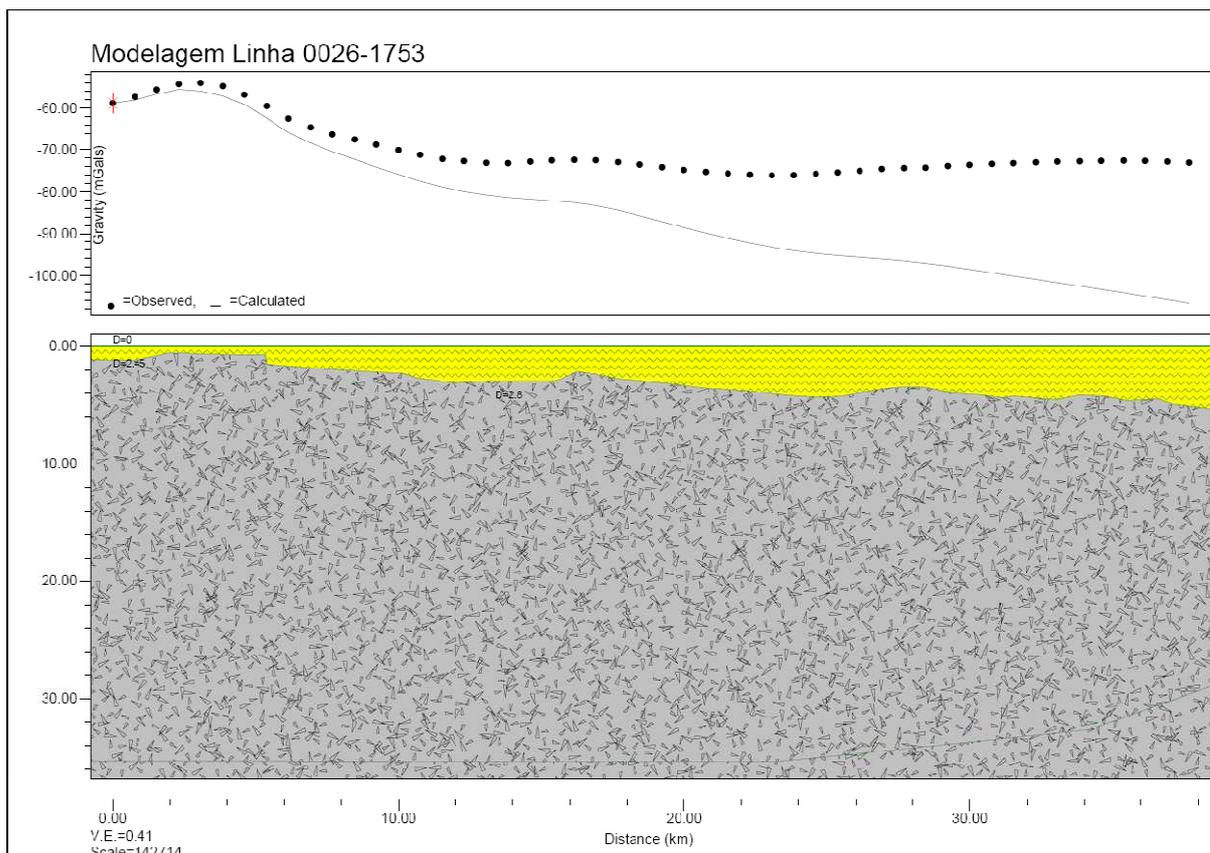


Figura 6.5 – Modelagem gravimétrica da linha 0026-1753.

A curva calculada a partir do modelo acima apresenta forma similar à curva da anomalia observada, entretanto a curva calculada afasta-se da observada à medida que o perfil aproxima-se do depocentro da bacia.

A modelagem divergência entre os perfis calculado e observado pode ser explicado pelo modelo de Mackenzie (1978) de evolução de riftes a partir do estiramento litosférico e soerguimento do manto na base da litosfera. Fazendo uma analogia com a figura 6.2 pode-se observar que a presença de um corpo mais denso em relação à encaixante na base da litosfera, gera uma anomalia positiva de grande comprimento de onda no perfil gravimétrico.

Assim, o modelo apresentado pela figura 6.3 foi refeita a modelagem da linha 0026-1743 considerando-se a presença de um material mais denso na base da litosfera, cuja geometria foi inferida a partir do melhor ajuste da curva calculada (Fig. 6.6).

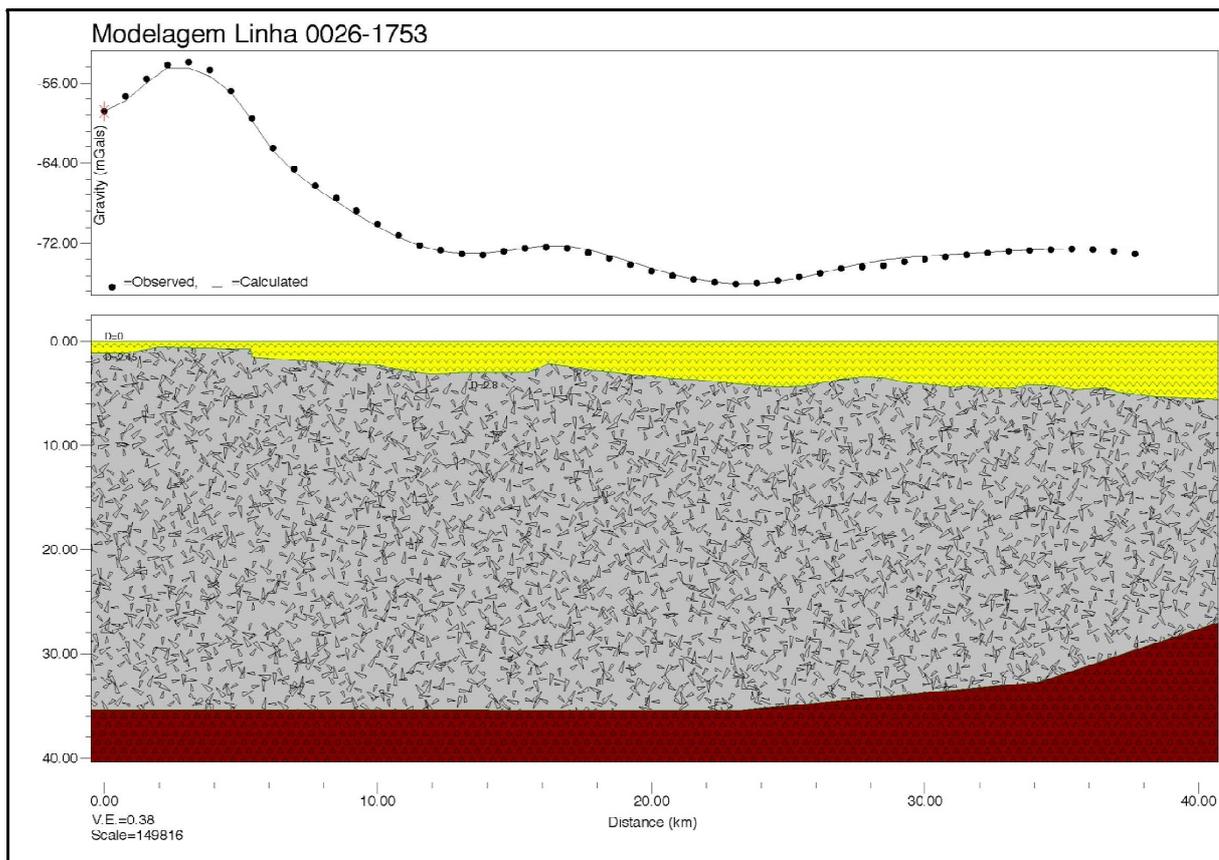


Figura 6.6 – Inferência de um corpo mais denso na base da litosfera na modelagem da Linha 0026-1753.

A falha de Inhambupe, limite SE da Bacia do Tucano Sul não foi imagiada por nenhuma seção sísmica, mas pelo fato de gerar um grande contraste lateral de densidade foi modelada, pois não era possível fazer o ajuste da curva calculada nas extremidades das linhas que bordejavam esta estrutura. A sua posição e inclinação foi inferida a partir do Mapa de Primeira Derivada Vertical da Anomalia Bouguer, A inclinação da falha foi modelada a partir do resultado mostrado pelo mapa, que apresenta uma mudança brusca dos valores positivo além dos limites da bacia e negativo próximo a borda. Com isso infere-se na figura 6.7 um modelo para a bacia, extrapolando o perfil além da falha de borda da bacia.

O perfil 0026-1067 está localizado numa região mais rasa da bacia, próximo a sua borda oeste. As anomalias de pequeno comprimento de onda são originadas pela alternância entre *horst* e gráben ao longo do perfil.

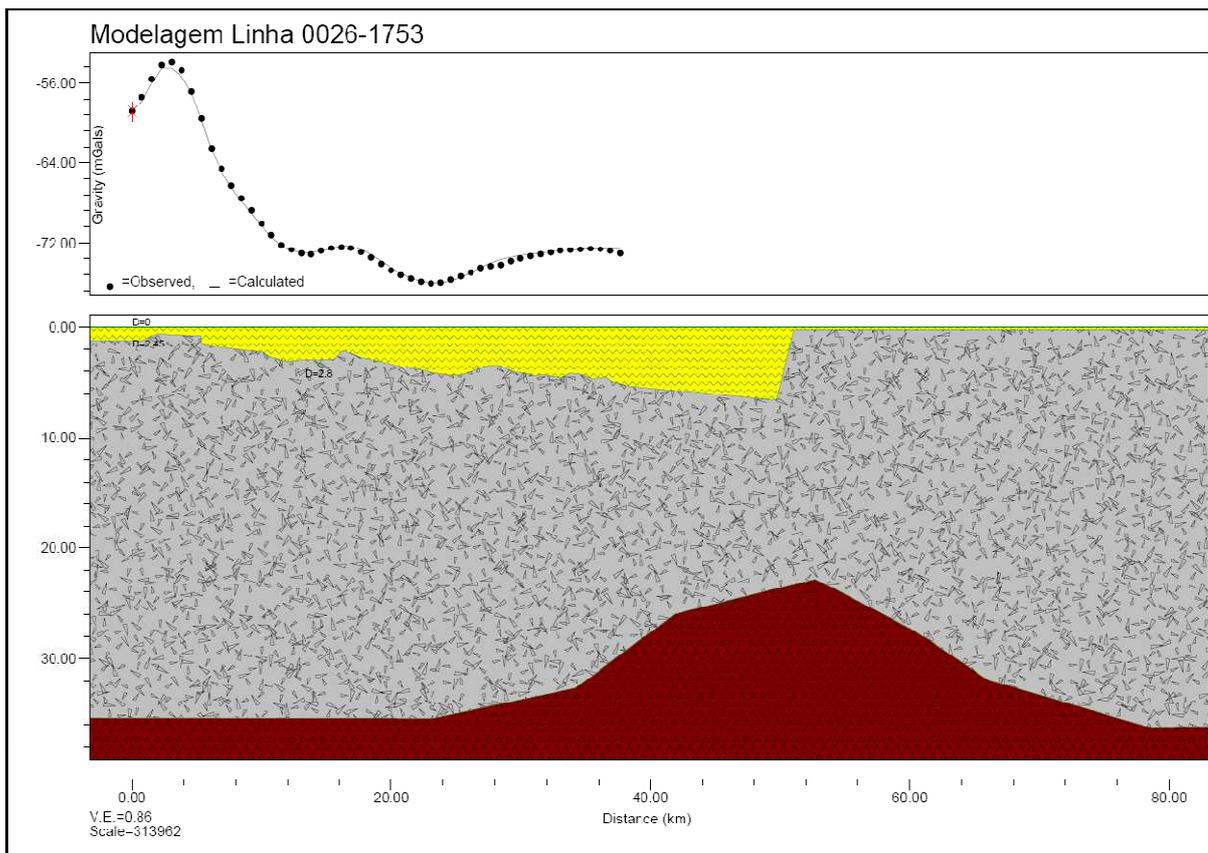


Figura 6.7 – Extrapolação da modelagem gravimétrica da linha 0026-1753 além do limite estabelecido pela curva observada.

Ao se analisar o Mapa da Primeira Derivada Vertical (fig. 4.4), foi possível verificar a presença de uma anomalia positiva adjacente à extremidade leste da linha 0026-1067. Este tipo de anomalia foi associado na bacia à presença de um *horst*. Essa associação foi feita a partir do conhecimento adquirido pela interpretação das outras linhas sísmicas disponíveis, que apresentavam respostas gravimétricas similares. Com base nesta informação, foi feita a extrapolação do perfil, inferindo, no modelo, o horst adjacente ao perfil. A presença deste *horst* modelado, mas não “amostrado” pelas estações locadas no perfil, compensou a divergência de valores na borda da curva calculada, devido ao fato do horst estar a poucas centenas de metros de profundidade (fig. 6.8). A modelagem nesta linha foi importante, pois deu maior confiabilidade da interpretação do embasamento da bacia.

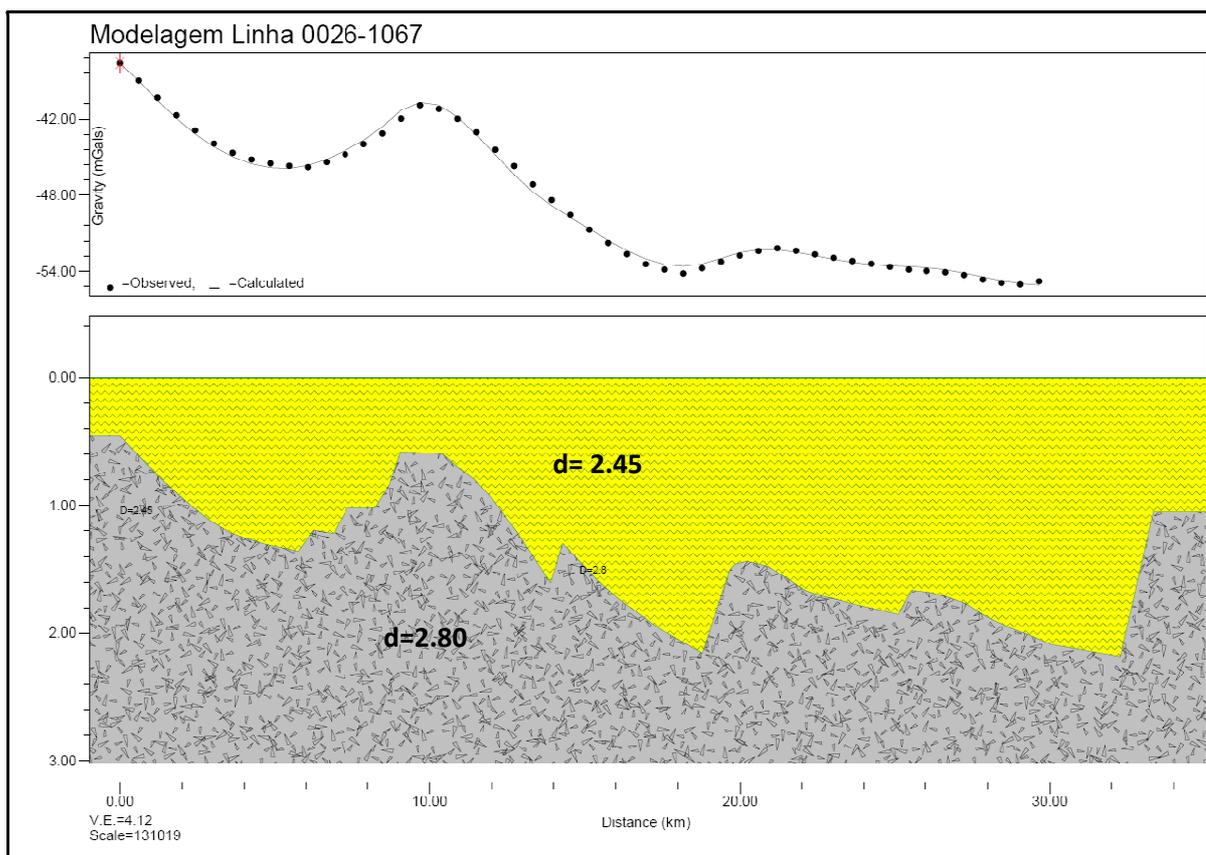


Figura 6.8 – Modelagem gravimétrica da linha 0026-1067.

6.2.2. Modelagem da seção *strike*

A linha 0026-1743 apresenta orientação NE-SW, paralela as estruturas internas da bacia. Seguindo esta tendência, esperava-se o ajuste da curva calculada em relação à curva observada somente pelo contraste de densidade entre o embasamento e os sedimentos da bacia. Ao se modelar estes dois corpos, notou-se que a curva calculada afastava-se da observada à medida que o perfil aproxima-se do depocentro da bacia (fig. 6.9). Entretanto a curva calculada apresenta similaridade em sua forma quando comparada a curva observada, mas indica um déficit de massa à medida que o perfil segue em direção ao depocentro da bacia.

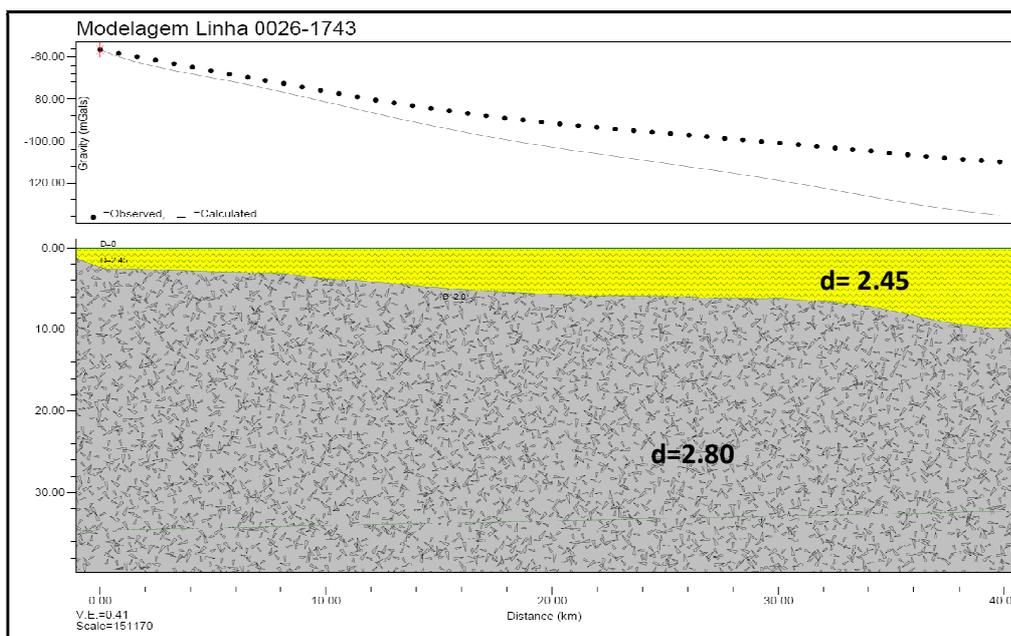


Figura 6.9 – Modelagem gravimétrica da linha 0026-1743.

Ao se analisar a curva calculada e observada nota-se que a diferença entre elas pode ser interpretada por uma anomalia de baixa amplitude e grande comprimento de onda, gerada por excesso de massa em grande profundidade. Tendo como base o modelo exemplificado na figura 6.3, foi inferida uma ascensão suave da Moho em direção ao depocentro da bacia (Figura 6.10).

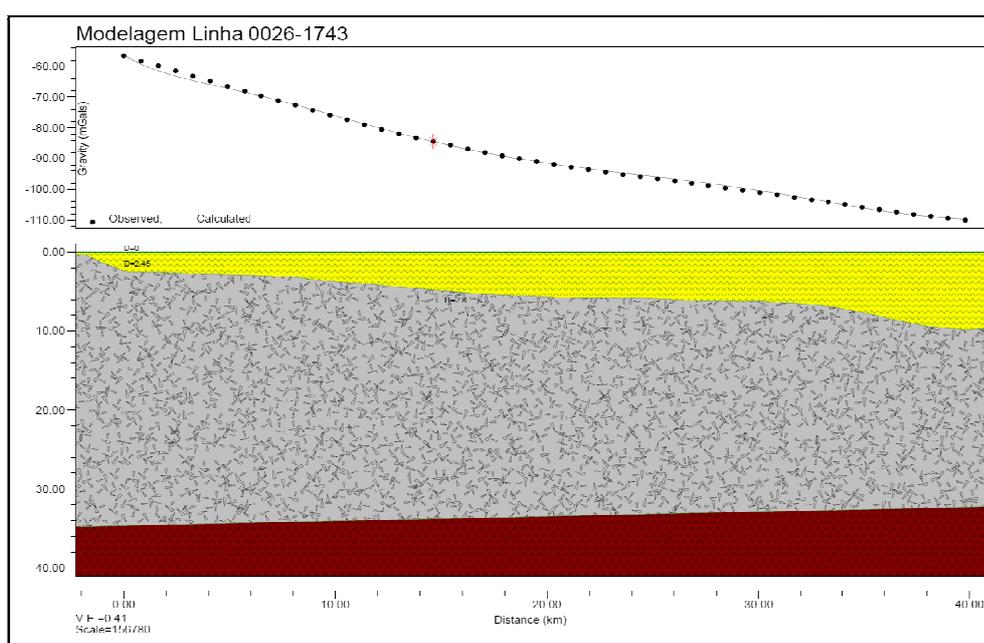


Figura 6.10 – Modelagem gravimétrica da linha 0026-1743 com a inferência de ascensão da Moho.

6.3. Analogia com modelo de estiramento litosférico.

O Rifte do Recôncavo - Tucano - Jatobá apresenta gênese e evolução controversa. Com base na modelagem gravimétrica teórica para uma bacia hipotética e aplicação deste modelo a Bacia do Tucano-Sul realizada neste trabalho, baseando-se no mecanismo de estiramento litosférico (Mackenzie, 1978), é proposto um modelo para evolução da bacia estudada (Figura 6.11), em três partes.

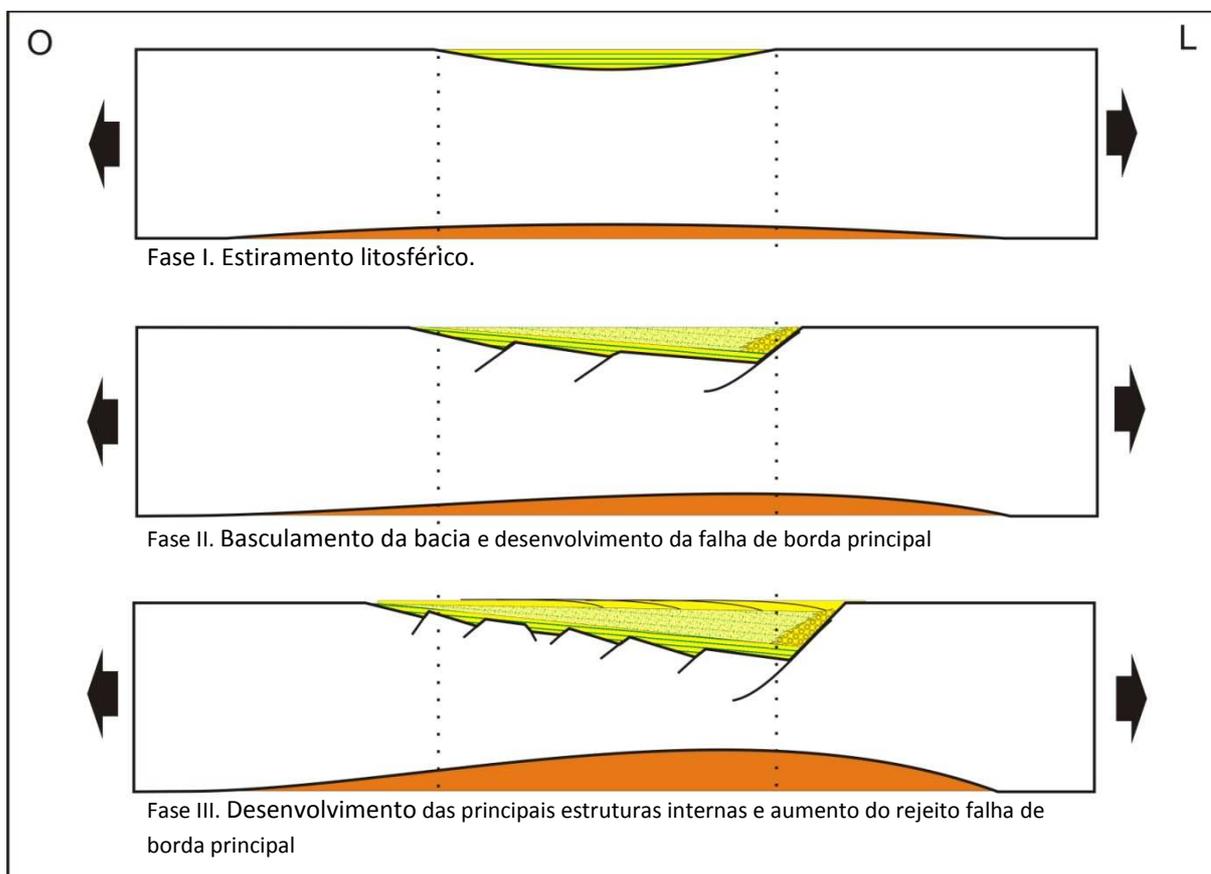


Figura 6.11 – Modelo evolutivo da bacia (adaptado de Mackenzie 1978)

A fase I está relacionada ao início da abertura do rifte abortado do Recôncavo - Tucano - Jatobá quando ocorre afinamento da crosta devido ao esforço extensional responsável pela abertura. Nesta fase o manto ascende por compensação isostática ao

espaço gerado pelo afinamento da crosta. Na fase II ocorre uma compensação isostática diferenciada na base da crosta devido ao basculamento da bacia em resposta ao desenvolvimento da falha de borda principal. Ocorre maior soerguimento do manto na direção do depocentro da bacia. A fase III é caracterizada pelo aumento da profundidade da bacia, desenvolvimento das principais estruturas e um maior soerguimento do manto na direção do depocentro da bacia.

Capítulo 7

Conclusão

A partir da análise e interpretação de dados sísmicos, gravimétricos e de poços em conjunto, foi possível construir um modelo geológico para a Bacia do Tucano-Sul, estabelecendo as densidades de 2,45 g/cm³ (sedimentos), 2.80 g/cm³ (embasamento) e 3.30 g/cm³ (manto).

Os diferentes tipos de mapas gravimétricos mostraram as características regionais da bacia: os lineamentos NE-SW do embasamento da bacia, a falha de borda principal situada a SE e o depocentro.

As seções sísmicas evidenciaram o estilo estrutural da bacia, com a presença de meio-grabéns com o embasamento mergulhando para SE, em direção ao depocentro da bacia.

A partir das seções modeladas, infere-se a elevação do manto associado às regiões mais profundas da bacia. A seção *strike* mostra uma ascensão suave em direção ao depocentro principal na porção NE da bacia, evidenciado pelas isópacas de sedimento. A ascensão do manto mais denso é explicada pela compensação isostática devido ao espaço gerado pela formação da bacia, e seu preenchimento com material menos denso em relação ao embasamento.

A modelagem das seções permitiu a associação com o modelo de estiramento litosférico para a origem de uma bacia sedimentar proposto por Mackenzie (1978).

Referências Bibliográficas

- BUENO, G. V.** 2004. Diacronismo de eventos no rifte Sul-Atlântico. *Boletim Geociências Petrobras*, Rio de Janeiro, v.12, n. 2, p. 203-229, maio/Nov.
- CUPERTINO, J. A.** 1990. Estágio exploratório das bacias do Tucano-Central, Norte e Jatobá. *Boletim Geociências Petrobras*, Rio de Janeiro, 4 (1): 45-53, jan./mar.
- DESTRO, N.** 2002. Falhas de alívio e de transferência: O significado tectônico e econômico no Rifte do Recôncavo – Tucano – Jatobá, NE Brasil. **Contribuições às Ciências da Terra – Serie D – Vol.2.** 120 p.
- FREITAS, D. F.** 2005. Análise quantitativa dos efeitos mecânicos relacionados ao rifteamento e comportamento isostático de bacias sedimentares extensionais do tipo rifte interior. Tese de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Geofísica e geologia Marinha, LAGEMAR – UFF. 84 p.
- GABAGLIA, G. P. R.; MILANI, J.** 1991. Origem e Evolução de Bacias Sedimentares. *Petrobrás, Rio de Janeiro*, 75 p.
- GULF/GEOMAN.** 1981. Exploration evaluation of the Reconcavo e Tucano Sul Basin; **report prepared for Petroleo Brasileiro S. A. Petrobras.** 75 p.
- LANA, M. C.; MILANI, J.** 1986. A microplaca do nordeste brasileiro – um elemento dinâmico no rifteamento cretáceo inferior. Goiânia, Soc. Bras. Geologia, **XXXIV Congresso (Anais)**, v. 3; 1131-1144.
- MACKENZIE, D.** 1978. Some remarks on the development of sedimentary basins. **Earth and Planetary Science Letters**, 40 (1978) 25-32.

- MAGNAVITA, L. P.; CUPERTINO, J. A.** 1987. Concepção atual sobre as Bacias do Tucano e Jatobá, nordeste do Brasil. **Boletim Geociências Petrobras**, Rio de Janeiro, 1 (2): 119-134, ago./dez.
- MAGNAVITA, L. P.; DESTRO, N.; CARVALHO, M. S. S.; MILHOMEM, P. S.; LIMA, W. S.** 2003. Bacias sedimentares brasileiras, Bacia de Tucano. **Phoenix**, ano 5, edição 52.
- MAGNAVITA, L. P.; SILVA, R. R.; SANCHES, C. P.** 2005. Guia de Campo da Bacia do Recôncavo, NE do Brasil. **Boletim Geociências Petrobras**, Rio de Janeiro, v.13, n.2, p.301-334, maio/Nov. 2005.
- MILANI, E. J.** 1987. Aspectos da evolução tectônica das Bacias do Recôncavo e Tucano Sul, Bahia, Brasil.
- MILANI, E. J.** 1985. Tectônica cisalhante na evolução do Rifte do Recôncavo – Tucano – Jatobá. **Revista Brasileira de Geociências**, Volume 15, 29-33.
- MOHRIAK, W. U.** 2003. Bacias sedimentares da margem continental brasileira. Geologia e recursos minerais do Brasil, Capítulo III. CPRM.
- USSAMI, N.; KARNER, G. D.; BOTT, M. H.P.** 1986. Crustal detachment during South Atlantic rifting and formation of Tucano – Gabon basin system. **Nature**. Vol. 322, 32 p.