



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOFÍSICA

VICTOR HUGO ROCHA LOPES

**MODELAGEM SÍSMICA DE ALVO EXPLORATÓRIO EM
BACIAS PALEOZÓICAS**

BELÉM
2008



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOFÍSICA

VICTOR HUGO ROCHA LOPES

**MODELAGEM SÍSMICA DE ALVO EXPLORATÓRIO EM
BACIAS PALEOZÓICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Geofísica.

Orientadora: Ellen de N. S. Gomes

BELÉM
2008

VICTOR HUGO ROCHA LOPES

**MODELAGEM SÍSMICA DE ALVO EXPLORATÓRIO EM
BACIAS PALEOZÓICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Geofísica.

Data de aprovação em ____/____/____,

Conceito: _____

Banca examinadora:

Profa. Dra. Ellen de N. S. Gomes - Orientadora
Doutora em Geofísica
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Prof. Dr. Roberto Vizeu Lima Pinheiro - Membro
Phd em Geologia
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Cícero Roberto Teixeira Régis - Membro
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará

Aos meus pais, Luiz Otávio Lopes e Elite Lopes

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu Deus, refúgio forte em momentos de dificuldades e com quem tenho o prazer de compartilhar todas as minhas vitórias.

Agradeço aos meus pais pelo empenho e esforço aplicados em meu desenvolvimento educacional, tanto intelectual como espiritual.

Agradeço aos meus familiares que mesmo em alguns casos estando longe, foram importantíssimos para a minha vitória.

Agradeço aos meus amigos, pela amizade sincera e apoio incondicional.

Agradeço a minha orientadora pela confiança, amizade e respeito, dedicados a mim durante todo esse período na universidade.

Agradeço a PETROBRAS, na pessoa do Dr. Eduardo Faria por autorizar a divulgação deste trabalho.

Agradeço a Unidade UN-BSOL, na pessoa do Dr. Celso Murakami pela liberação dos dados usados neste trabalho.

Em fim, agradeço a todos aqueles que colaboraram de forma amigável, buscando o aperfeiçoamento deste trabalho.

”Desejo ainda que você seja tolerante,
Não com os que erram pouco, porque isso é fácil,
Mas com os que erram muito e irremediavelmente,
E que fazendo bom uso dessa tolerância,
Você sirva de exemplo aos outros.”

Victor Hugo

RESUMO

O imageamento sísmico abaixo das soleiras de diabásio é um grande desafio para a sísmica de reflexão em bacias paleozóicas, ocasionando o aumento do risco exploratório na região. Vários fatores contribuem para essa dificuldade como a alta refletividade na interface entre o topo do diabásio e o pacote sedimentar, múltiplas de curto período devido a heterogeneidade dentro do diabásio e o espalhamento de energia devido a rugosidade na topografia do diabásio. Para se obter um melhor entendimento acerca da propagação de ondas sísmicas neste tipo de ambiente, construímos um modelo acústico 3D representativo de alvo exploratório de uma bacia paleozóica. Em seguida inserimos propriedades físicas no modelo através de dados de poços, simulamos uma aquisição 3D e 2D usando diferenças finitas e apresentamos o resultado para uma seção 2D na região de maior espessamento do diabásio. Descrevemos os procedimentos utilizados para a construção do modelo 3D analisando as características dos dados obtidos pela modelagem sísmica 3D e o resultado do imageamento sísmico em tempo e em profundidade de uma seção 2D. Os eventos de *pull-up* são observados abaixo da soleira de diabásio como resultado do imageamento.

Palavras Chaves: Modelagem Sísmica. Diabásio. Bacia Paleozóica.

ABSTRACT

Seismic imaging under diabase sills is a challenge for seismic exploration in paleozoic basins, causing a raise in the explorational hazard in this region. Several factors contribute to this problem such as the high reflectivity at the interface between the top of the diabase and sediment package, short period multiples due heterogeneity in the diabase and the scattering of energy due roughness in the topography of the diabase. To get a better understanding about the propagation of seismic waves in this kind of environment, we build a 3D representative acoustic model of explorational target of a paleozoic basin. Then we insert physical properties in that model using data from wells, we simulate 3D and 2D acquisition using finite differences and present the results for a 2D section in the region of greater thickness of the diabase. We describe the procedures used to build the 3D model analysing the characteristics of the data obtained by 3D seismic modelling and the result of seismic imaging in time and in depth from a 2D section.

keywords: Seismic Modeling. Diabase sills. Paleozoic Basin.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 Posição relativa da América do Sul e África durante a abertura do Oceano Atlântico Sul e o magmatismo associado. (modif. Mizusaki et al., 1998, p.53)	17
Figura 2.2 Escala global das bacias do Paleozóico Inferior. Os círculos em vermelho representam as áreas produtoras de hidrocarbonetos, já as de áreas demarcadas com círculo preto não são produtoras de hidrocarbonetos. Fonte: Geólogo Roberto Souza, apresentação da ANP por Magda Chambriard	18
Figura 2.3 Distribuição esquemática das principais áreas cratônicas, bacias sedimentares intracontinentais e bacias sedimentares marginais. Destacam-se enxames de diques basálticos e corpos alcalinos e bacias com eventos vulcânicos pós-paleozóicos (modif. de Almeida, 1986, p.326)	19
Figura 2.4 Seção esquemática da Bacia do Solimões. Wanderley et al., 2006. A-B - As soleiras (em vermelho), na Bacia do Solimões, estão essencialmente na seqüência evaporítica.	20
Figura 2.5 Seção esquemática da Bacia do Amazonas. Wanderley et al., 2006. C-D - As soleiras (em vermelho), na Bacia do Amazonas, ocorrem tanto na seqüência evaporítica quanto na clástica.	21
Figura 2.6 Seção geológica da Bacia do Parnaíba. (Modificado de Góes et al., 1993)	22
Figura 2.7 Seção Geológica da Bacia do Paraná. Modificado de Raffaelli et al., 1996 (em Milani e Zalán, 1998).	23
Figura 3.1 Seções sísmicas interpretadas em profundidade, 3.1a a 3.1e. Nestas figuras a distância e a profundidade são apresentadas em metros. O maior espessamento do diabásio é mostrado na seção 4, assinalado pelo pontilhado em preto. O reservatório está a uma profundidade de 2,1 km aproximadamente, mostrado na seção 4 pela região compreendida pelas setas vermelhas.	26
Figura 3.2 Área esquemática do levantamento com a localização das seções e dos poços.	27
Figura 3.3 Posição relativa das seções sísmicas.	27
Figura 3.4 Perfis de velocidade obtidos dos perfis sísmicos medidos nos poços 1 (4a), 2 (4b) e 3 (4c). O poço 1 apresenta a maior quantidade de informação, indo até 3.500 m de profundidade aproximadamente.	29

Figura 3.5 Perfis de densidade medidos nos poços 1 (5a), 2 (5b) e 3 (5c). Novamente a maior quantidade de informação é obtida do poço 1.	30
Figura 3.6 Perfil de velocidade com os dados brutos (em azul) e após o processamento acima (em vermelho). Detalhe de uma região em torno do círculo em preto é mostrado na Figura 3.6b.	31
Figura 3.7 Perfil de densidade com os dados brutos (em azul) e após o processamento acima (em vermelho). Detalhe de uma região em torno do círculo em preto é mostrado na Figura 3.7b.	32
Figura 3.8 Seção e poço escolhidos como referência para a construção do modelo com a localização das camadas. Camadas 14 e 15 são de baixa velocidade média.	33
Figura 3.9 Superfícies geradas a partir do mapa de isópacas do topo (Figura 3.9a) e base (Figura 3.9b) da região de maior espessamento do diabásio. Os valores de Z estão mostrados no mapa de cores e variam de até 280 metros no topo e 105 metros na base. As regiões em lilás e branco são as regiões mais altas, comparadas com as regiões em vermelho e amarelo. A espessura total do diabásio assume valores de até 175 metros. Na Figura 3.9c são mostradas as duas superfícies juntas.	35
Figura 3.10 Sistema de coordenadas utilizado no GoCad. O Eixo Z positivo aponta para baixo.	36
Figura 3.11 Superfícies construídas no Gocad a partir das seções interpretadas cruzadas. A seção 4, por apresentar a maior espessura do diabásio foi usada como guia. Acima da região de maior espessamento do diabásio as camadas são mostradas com transparência azul.	37
Figura 3.12 Superfícies construídas no Gocad. As superfícies acima da superfície de maior espessamento do diabásio são mostradas com transparência em azul.	38
Figura 3.13 Malha 3D da camada com maior espessamento do diabásio. A distância entre os nós é de 20 metros na horizontal e o número de nós no eixo Z (profundidade) foi tomado de acordo com o número de amostras da velocidade e densidade medidas no poço 1. A malha é mostrada com transparência.	39
Figura 3.14 Camadas construídas a partir das superfícies do modelo e poço cujas propriedades físicas foram utilizadas na construção do modelo. A camada de diabásio com maior espessura está representada em laranja e o reservatório está assinalado pela seta branca.	40
Figura 3.15 Modelo velocidade de estimada a partir do modelo 3D na direção de maior extensão do modelo no eixo X (situada na mesma posição que a seção 4). Escala de cores mostra os valores da velocidade e está de acordo com o perfil de velocidade medido no	

poço. Velocidade variam de 2 km/s ate 6.2 km/s.	41
Figura 4.1 Tabela com os dados da geometria do levantamento 3D, do tipo <i>swath</i>	43
Figura 4.2 Vista de cima do modelo. Mapa de cores da superfície do diabásio. Levantamento do tipo <i>swath</i> feito na região central do espessamento do diabásio. Tem-se oito linhas de receptores por tiro com 201 receptores por linhas, espaçados regularmente de 30 metros (nas linhas verdes). Os tiros estão distribuídos 36 linhas com 72 tiros espaçados de 150 metros (representados em cruz preta).	44
Figura 4.3 Para um tiro tem-se o arranjo de oito linha de receptores. Ao fundo vista de cima da região do diabásio.	44
Figura 4.4 Levantamento em 3D com duas seções cruzadas e linhas de tiros (segmentos em preto).	45
Figura 4.5 Registro dos campos de pressão medidos entre as duas linhas mais internas das oito linhas de receptores. O primeiro tiro está situado na posição de 5 km no eixo x_1 e registo mostrado na Figura 4.5a. O segundo tiro está situado na posição de 10 km no eixo x_1 e registo mostrado na Figura 4.5b. O terceiro tiro está situado na posição de 15 km no eixo x_1 e registo mostrado na Figura 4.5c. A posição dos três tiros é mostrada na Figura 3.15 no capítulo anterior.	46
Figura 5.1 Migração <i>pré-stack</i> em tempo da seção 2D apresentada na Figura3.15. Interface do diabásio está assinalado em verde. Os refletores abaixo deste sofreram o fenômeno de <i>pull-up</i> , estes estão assinalados em amarelo.	49
Figura 5.2 Migração em profundidade da seção 2D apresentada na Figura 3.15. Diabásio assinadalo em verde. Refletores abaixo deste estão praticamente horizontais, o que esta de acordo com modelo exato. A região do reservatório pode ser visualizada (setas vermelhas) além da região de baixa velocidade (em 2.7 km aproximadamente).	50

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	BACIAS PALEOZÓICAS	17
2.1	Formação dos pacotes sedimentares paleozóicos e as atividades magmáticas no Mesozóico	17
2.2	BACIAS PALEOZÓICAS BRASILEIRAS	19
2.2.1	Bacia do Solimões	20
2.2.2	Bacia do Amazonas	21
2.2.3	Bacia do Parnaíba	22
2.2.4	Bacia do Paraná	22
2.2.5	Síntese sobre o potencial petrolífero das bacias paleozóicas brasileiras	23
2.2.6	O imageamento sísmico e as camadas de alta velocidade	24
3	CONSTRUÇÃO DO MODELO	25
3.1	Dados reais utilizados na modelagem	25
3.1.1	Seções sísmicas 2D interpretadas	25
3.1.2	Dados de Poço	28
3.1.3	Processamento dos dados de poço	31
3.1.4	Mapa de isópacas	34
3.2	Parâmetros do GoCad	36
3.2.1	Criação das camadas e da malha 3-D irregular que obedece às características topográficas das superfícies	38
3.2.2	Incorporação das propriedades físicas ao modelo na malha 3-D irregular que obedece às características topográficas das superfícies.	40
3.2.3	Construção de uma malha regular a partir da malha irregular	41
4	AQUISIÇÃO SÍSMICA	43

4.1	AQUISIÇÃO 3D	43
4.2	AQUISIÇÃO 2D	47
5	RESULTADOS OBTIDOS	48
5.1	MIGRAÇÃO DOS DADOS	48
5.1.1	Migração em tempo	48
5.1.2	Migração em profundidade	49
5.1.3	Limitações do modelamento e perspectivas	51
6	CONCLUSÃO	52
	REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

Grande parte dos reservatórios de hidrocarbonetos atualmente explorados no mundo são de bacias sedimentares intracontinentais. Com a descoberta de vários campos produtores na costa leste, o Brasil deixou de lado durante muito tempo o estudo dessas bacias interiores. As respostas satisfatórias obtidas em alto-mar contribuíram para que houvesse uma concentração de estudos e levantamentos sísmicos nessas regiões, sem muito interesse pelo interior do continente. Vários fatores contribuíram para esse menor interesse pelas bacias do interior do continente como: o alto custo de uma aquisição sísmica terrestre, se comparada com a sísmica marinha; as dificuldades de acesso a essas regiões e problemas ocasionados ao meio ambiente; as grandes quantidades de estruturas magmáticas intrusivas que geram no sinal sísmico de baixa qualidade, ocasionando sérios problemas no processamento e na interpretação geofísica.

No Brasil são conhecidas quatro grandes bacias da Era Paleozóica: Amazonas, Solimões, Parnaíba e Paraná. Relatórios recentes sobre a sísmica terrestre no Brasil (ONIP; ON, 1999), revelaram a potencialidade dessas bacias para a exploração de hidrocarbonetos de forma comercial. Estudos de geofísica, geoquímica e geologia mostraram que um entendimento maior desses sistemas petrolíferos se faz necessário. Na área da sísmica a maior dificuldade observada em bacias paleozóicas, é de se fazer uma imagem de regiões abaixo da corpos intrusivos, como soleiras e diques de diabásio, onde estão situados os potenciais armazenadores de hidrocarboneto. A presença de soleiras de diabásio mascaram o sinal sísmico, levando a erros de processamento e interpretação dos dados. Um estudo desse tipo de ambiente faz-se então necessário.

Este trabalho teve por objetivo a construção do modelo 3D acústico representativo de um alvo exploratório em bacias paleozóicas, com a presença de soleiras de diabásio. Este modelo foi gerado a partir de informações cedidas pela PETROBRAS.

A criação de um modelo sintético faz-se necessária para que possamos desenvolver novas metodologias e fluxos de processamentos sísmicos, obtendo um melhor diagnóstico da região estudada.

Deste modo dividimos o trabalho em cinco capítulos. No primeiro capítulo é feita descrição das Bacias paleozóicas brasileiras, suas características e situação atual de exploração. O segundo capítulo é criado o modelo acústico 3D representativo de um alvo exploratório. Detalhes da criação e tratamento dos dados de poço incorporados no modelo são discutidos. Os modelamentos sísmicos 3D e 2D são discutidos no capítulo 3. Os

fenômenos devido a presença de fortes contrastes de impedância são mostrados. O imageamento do modelo em 2D a partir dos dados do modelamento sísmico, são apresentados no capítulo 4. Nos resultados do imageamento ocorrem fenômenos encontrados nos experimentos reais, o que comprova a representatividade do modelo criado. Por fim no último capítulo são discutidas as limitações da criação do modelo e perspectivas futuras.

2 BACIAS PALEOZÓICAS

Neste capítulo será descrito de forma sucinta como ocorreram as atividades magmáticas na Era Paleozóica, analisando cada Bacia intracontinental brasileira e suas características.

2.1 Formação dos pacotes sedimentares paleozóicos e as atividades magmáticas no Mesozóico

Durante o Pré-Cambriano Superior ao Paleozóico Inferior ocorreu uma intensa fase de sedimentação nas bacias paleozóicas intracontinentais brasileiras (MILANI; ZALÁN, 1999; MILANI; FILHO, 2000). No Mesozóico, com a quebra do Gondwana Figura 2.1, essas bacias foram afetadas, formando riftes superpostos e feições extencionais, ocorrendo também derrames e intrusões magmáticas associados à abertura do Atlântico Sul (MIZUSAKI et al., 2002).

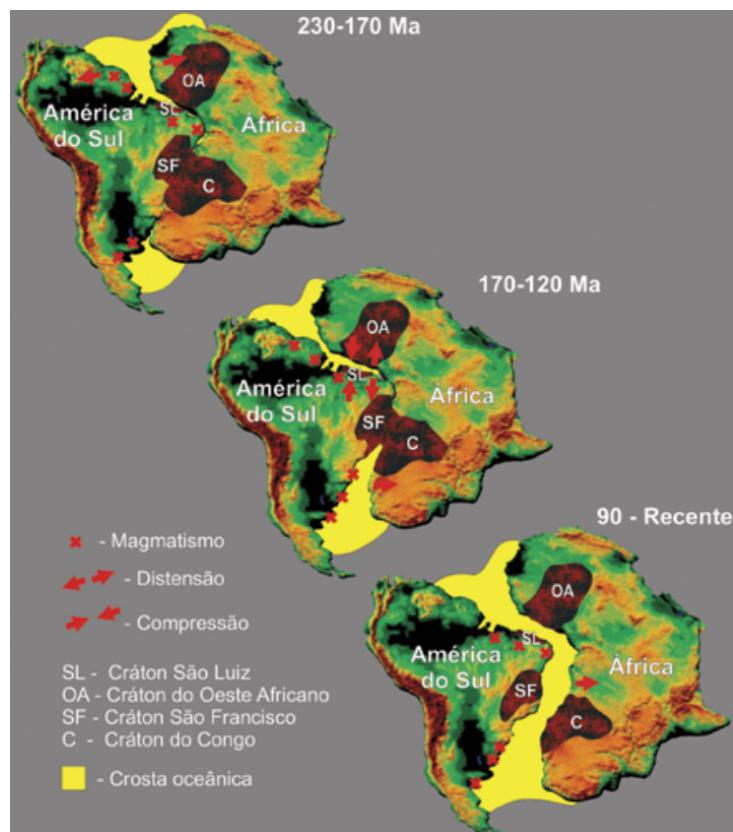


Figura 2.1: Posição relativa da América do Sul e África durante a abertura do Oceano Atlântico Sul e o magmatismo associado. (modif. Mizusaki et al., 1998, p.53)

No Brasil, foram formados importantes pacotes sedimentares potencialmente geradores de hidrocarbonetos mostrados na Figura 2.2 e que hoje são alvos de estudos exploratórios.

Essas bacias paleozóicas possuem pacotes sedimentares potencialmente geradoras de hidrocarbonetos de períodos Siluriano e Devoniano. Sendo que nas bacias paleozóicas existem rochas geradoras, carreadoras, reservatórios e selantes, necessárias para a formação, transporte e trapeamento do hidrocarboneto.

As rochas geradoras são ricas em matéria orgânica que ao longo dos anos são soterradas e sofrem efeitos de aumento da pressão e temperatura, que "cozinham" essa matéria formando o hidrocarboneto, rochas carreadoras são as rochas que são responsáveis pela condução do hidrocarbonetos através dos poros ou fraturas nelas existentes já as rochas selantes, como o nome já diz são responsáveis pelo trapeamento do hidrocarboneto, sendo que as mais freqüentes são as evaporíticas, mas é importante ressaltar que outras grandes estruturas são responsáveis pelo trapeamento, como é o caso dos grandes lineamentos tectônicos regionais, de natureza cisalhante. Este é o caso, entre outros, da Bacia do Solimões (Megacisalhamento do Solimões), possivelmente da Bacia do Parnaíba (Lineamento Transbrasiliano) e da Bacia do Paraná (Lineamento Noroeste).

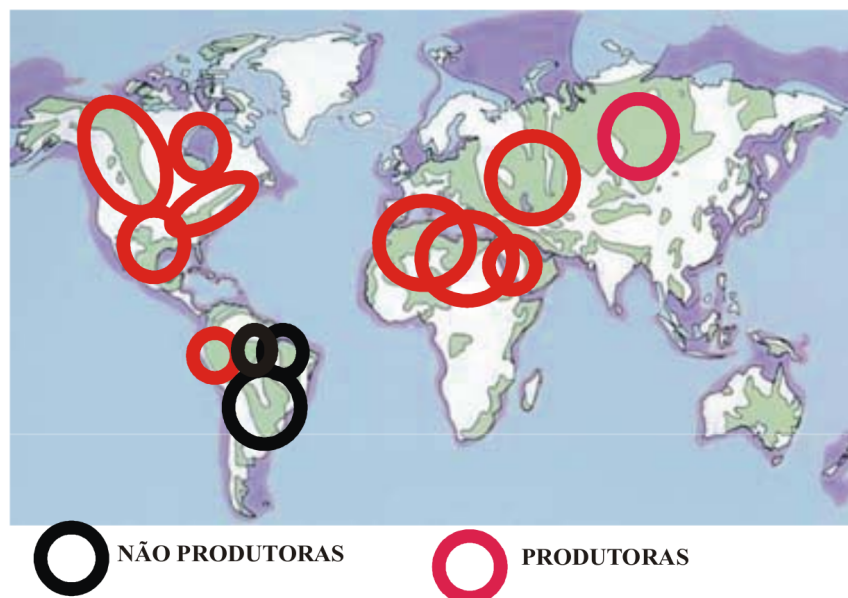


Figura 2.2: Escala global das bacias do Paleozóico Inferior. Os círculos em vermelho representam as áreas produtoras de hidrocarbonetos, já as de áreas demarcadas com círculo preto não são produtoras de hidrocarbonetos. Fonte: Geólogo Roberto Souza, apresentação da ANP por Magda Chambriard

As atividades magmáticas que ocorreram no Mesozóico, promoveram, em alguns casos, tanto a maturação, quanto o trapeamento de hidrocarbonetos. Essas atividades magmáticas foram descritas na subseção 2.2.5.

2.2 BACIAS PALEOZÓICAS BRASILEIRAS

O registro de sedimentações significativas no período Paleozóico no Brasil é presente em quatro bacias principais, sendo elas as bacias intracratônicas do Solimões, Amazonas, Parnaíba e Paraná representadas em amarelo na Figura 2.3. Cada uma dessas bacias apresenta configurações estruturais e deposicionais diferentes, mas que acabam se correlacionando, no período geológico.



Figura 2.3: Distribuição esquemática das principais áreas cratônicas, bacias sedimentares intracontinentais e bacias sedimentares marginais. Destacam-se enxames de diques basálticos e corpos alcalinos e bacias com eventos vulcânicos pós-paleozóicos (modif. de Almeida, 1986, p.326)

2.2.1 Bacia do Solimões

A Bacia do Solimões (Figura 2.4) localiza-se ao norte do Brasil ao lado da Bacia do Amazonas, essas duas bacias correspondem à antiga Bacia do Amazonas, dividida em três domínios: Alto, Médio e Baixo Amazonas, separados, respectivamente, pelo Alto de Purus e pelo Alto de Monte Alegre. Apesar da designação prévia da Bacia Solimões ter sido aplicada para a cobertura cenozóica do oeste da Amazônia (SANTOS, 1974.), Caputo(1984), sugeriu a substituição do nome Alto Amazonas por Solimões. O nome da Bacia do Amazonas atualmente corresponde à antiga Bacia do Médio e Baixo Amazonas (EIRAS et al., 1994a) sendo que as duas bacias (Amazonas e Solimões) estão separadas pelo Alto de Purus que corresponde aproximadamente ao limite entre as províncias Tapajós-Parima e Rio Negro (SANTOS et al., 2000).

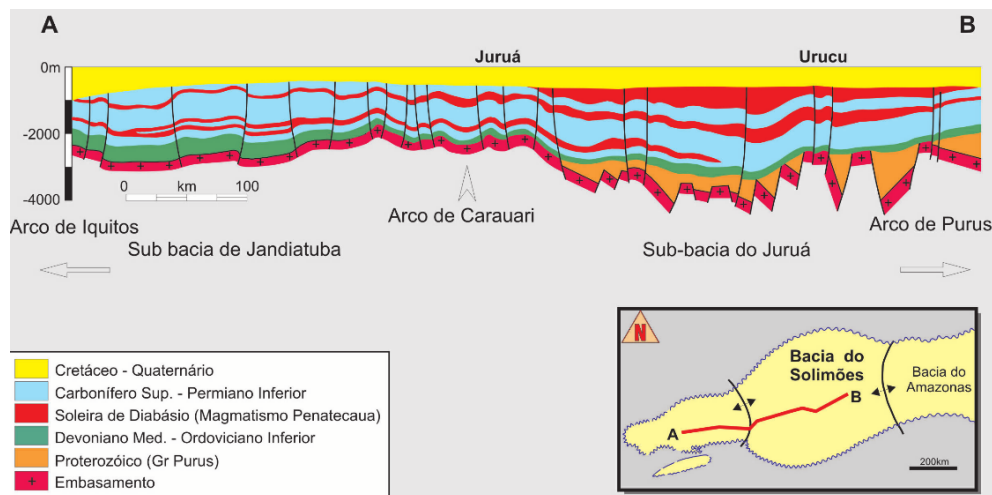


Figura 2.4: Seção esquemática da Bacia do Solimões. Wanderley et al., 2006. A-B - As soleiras (em vermelho), na Bacia do Solimões, estão essencialmente na seqüência evaporítica.

Atualmente a bacia do Solimões é limitada à oeste com a bacia do Acre pelo Arco de Iquitos e a leste, com a Bacia do Amazonas, pelo Alto de Purus possuindo uma área de aproximadamente 500.000 km² e uma profundidade de aproximadamente 3800 m de sedimentos. Dentro da bacia, o Arco de Carauari a divide em duas sub-bacias: Jandiatuba a oeste, sotoposta por rochas ígneas e metamórficas, e Juruá a leste, com 3.800 m de espessura de sedimentos, sobre substrato semelhante, além de riftes proterozóicos (EIRAS et al., 1994a).

A atividade magmática dessa área proporcionou a formação de três grandes soleiras de diabásio principais, com um espessura da ordem de 800 m em uma área onde a espessura total de sedimentos não passa de 2000 m (ONIP; ON, 1999)

Apesar da Bacia do Solimões ser produtora de óleo e gás, sendo a maior bacia intracontinental com cobertura sísmica absoluta 2D e 3D (ONIP; ON, 1999), possuir uma

qualidade boa dos dados registrados, a maioria de seus levantamentos concentram-se no centro da bacia, tornando-se raros em direção as bordas, onde pode ocorrer formações interessantes para o acúmulo de petróleo.(ONIP; ON, 1999)

2.2.2 Bacia do Amazonas

A bacia do Amazonas (Figura 2.5), localizada ao norte do país, na área dos estados do Amazonas e do Pará, entre o alto Purus no ocidente, fronteira com a bacia do Solimões e o rift mesozóico do Marajó no oriente, possui uma profundidade de sedimentos que chega a atingir 5.000 m (CUNHA et al., 1994) e uma área de aproximadamente 606 000 km².

O potencial petrolífero nessa bacia é considerado o melhor dentre as bacias paleozóicas do Brasil. A qualidade das rochas geradoras, reservatórios e selantes são de boa qualidade, porém mesmo com todos os indícios para uma boa formação e acumulação de hidrocarbonetos, ainda não foram localizadas acumulações economicamente significativas. Atualmente são conhecidos dois campos em desenvolvimento: o de Azulão e Japiim.

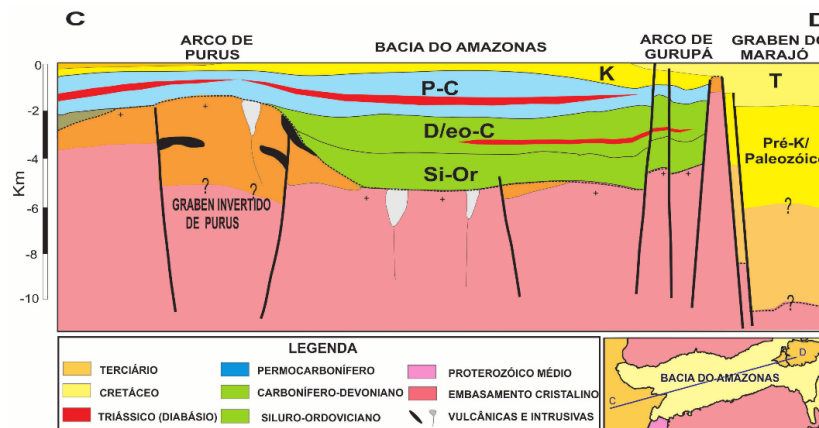


Figura 2.5: Seção esquemática da Bacia do Amazonas.Wanderley et al., 2006. C-D - As soleiras (em vermelho), na Bacia do Amazonas, ocorrem tanto na seqüência evaporítica quanto na clástica.

A ocorrência de diques e soleiras de rochas ígneas de maneira aleatória, e camadas de evaporitos que localmente mobilizam-se por halocinese incipiente, dificultam o imageamento da subsuperfície, prejudicando o mapeamento em profundidade dos principais horizontes que geralmente estão abaixo do sal (ONIP; ON, 1999).

Os levantamentos na bacia do Amazonas são muito irregulares e de qualidade insatisfatória, além de antigos, alguns chegam a ser da década de 60. Atualmente a bacia possui 176 poços perfurados e 43.598 km de sísmica 2D linear. Em termos relativos com a bacia do Solimões a bacia do Amazonas possui a maior área de levantamento sísmico 2D, cerca de 1 km de sísmica a cada 10 km² contra 1 km de sísmica a cada 15 km² na bacia do

Solimões.

2.2.3 Bacia do Parnaíba

A bacia do Parnaíba (Figura 2.6) está localizada em uma área de aproximadamente 650.000 km² sendo parte dos estados do Piauí, Maranhão, Tocantins, Pará, Ceará e Bahia (FEIJÓ; GÓES, 1994a).

As atividades magmáticas também estão presentes na bacia do Parnaíba sendo que essas atividades são mais localizadas e menos espessas do que as que ocorrem na Paraná

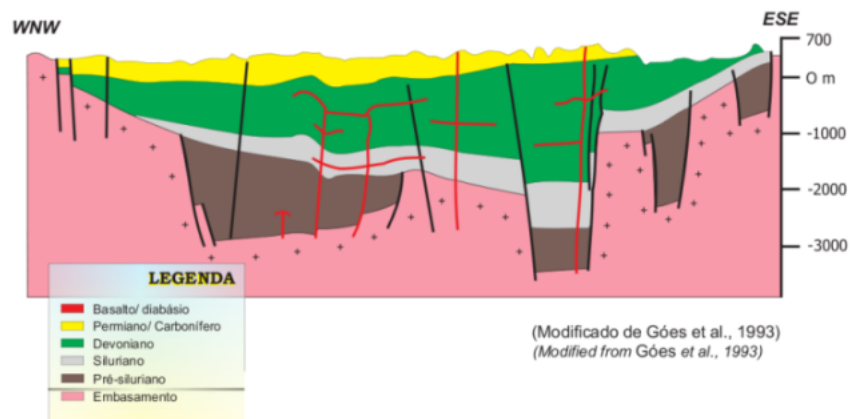


Figura 2.6: Seção geológica da Bacia do Parnaíba. (Modificado de Góes et al., 1993)

Entre todas as bacias paleozóicas brasileiras a bacia do Parnaíba é a que possui um menor esforço exploratório se comparado com as outras bacias intracontinentais. Atualmente ela possui 34 poços e 14.500 km lineares de sísmica 2D, sendo das quatro bacias a que possui a menor densidade de cobertura sísmica.

2.2.4 Bacia do Paraná

A Bacia do Paraná (Figura 2.7) está localizada em uma zona interessante e importante, possuindo uma área com cerca de 1.120.000 km² no Brasil, e se estende também para os países vizinhos sendo esses, os Paraguai, o Uruguai e a Argentina.

O primeiro poço foi perfurado em 1952 a uma profundidade de 1545 m e atualmente a bacia conta com 124 poços perfurados possuindo 47771 km lineares de sísmica 2D, sendo que os dados são de qualidade insatisfatória.

A espessura dos derrames basálticos capeando sedimentos chegam a espessuras de 1000 m.

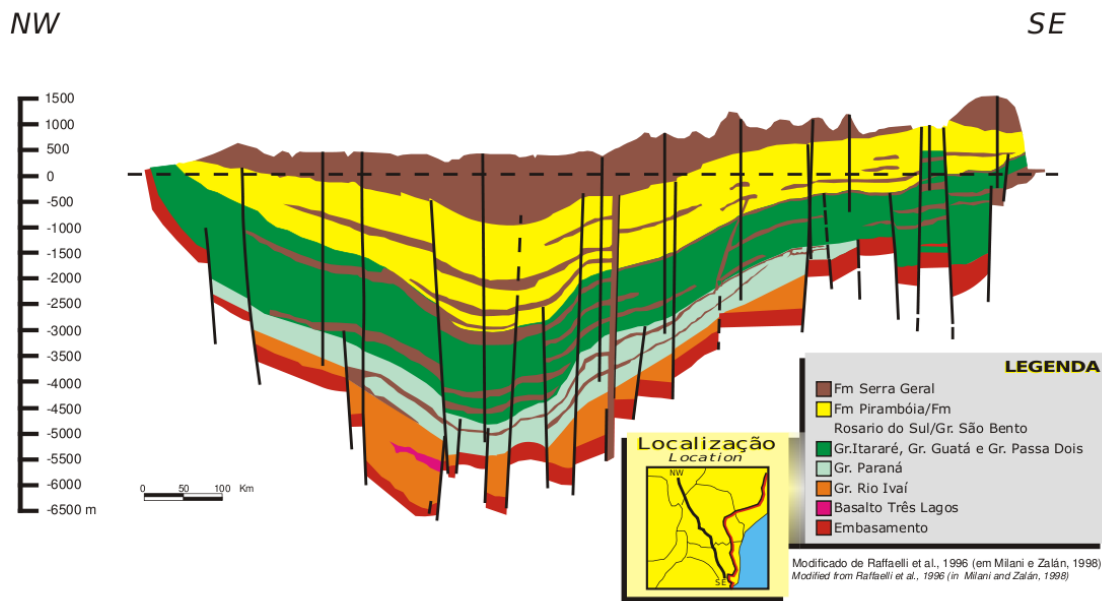


Figura 2.7: Seção Geológica da Bacia do Paraná. Modificado de Raffaelli et al., 1996 (em Milani e Zalán, 1998).

2.2.5 Síntese sobre o potencial petrolífero das bacias paleozóicas brasileiras

Mendonça et al (2004), fizeram um breve histórico de como a descoberta de campos de petróleo em bacias paleozóicas motivou novamente a busca por hidrocarbonetos no continente. Em 1978, ao ser perfurada uma inversão estrutural mostrada em linha sísmica regional, que fora posicionada para estudar o arcabouço tectônico da Bacia do Solimões, foi descoberto o Campo de Juruá, portador de gás em arenitos do Carbonífero. Uma vez encontrado o lineamento ao longo da calha da bacia, sucedeu-se uma série de descobertas (Nordeste de Juruá, Jaraqui, Jutaí, Sudoeste de Juruá e outros) que confirmou a presença de uma importante província gaséfera na Amazônia.

Nos anos 80, viriam as descobertas de óleo da área de Rio Urucu sendo que está descoberta representou uma conquista exploratória, pois revelava que as complexas bacias paleozóicas brasileiras, sempre alvos de polêmicas sobre sua potencialidade, poderiam contribuir de fato na produção nacional. Atualmente, o Pólo de Urucu produz cerca de 58 000 bbl/dia de óleo de excelente qualidade (MENDONÇA et al., nov. 2003/maio 2004)

Diferentemente do ocorrido nas bacias do Solimões e do Amazonas, que tiveram uma atividade mais continuada através do tempo, a presença da exploração no paleozóico do Paraná e do Parnaíba se deu em ciclos sendo que um desses ciclos começaram em 1975, com o retorno à Bacia do Parnaíba. Após exaustivos estudos de testes de formação, em um intervalo de diabásio fraturado intrudido na rocha geradora e outro em arenitos

da Formação Itaim exibiram surgência de gás; nos perfis, revelou-se um terceiro intervalo possivelmente portador de gás, este na Formação Cabeças, porém o mesmo não foi testado.

É inegável que a descoberta de óleo em Rio Urucu, em meados dos anos 80, trouxe uma nova motivação à exploração no Paleozóico brasileiro abrindo assim novas perspectivas para a exploração no interior do Brasil.

2.2.6 O imageamento sísmico e as camadas de alta velocidade

O problema exploratório em bacias paleozóicas, são essas intrusões e derramamentos magmáticos que afetam a qualidade do sinal sísmico, pois elas absorvem e difratam, a energia que é utilizada para imagear a subsuperfície prejudicando a qualidade do sinal recebido.

Corpos ígneos nas bacias nesses tipos de bacias contribuem para o aumento do risco exploratório. O surgimento de múltiplas pela alta refletividade na interface entre o topo do diabásio e o pacote sedimentar, múltiplas de curto período devido a heterogeneidade dentro do diabásio e o espalhamento de energia devido a rugosidade na topografia do diabásio (SATPAL et al., 2006; WITHERS et al., 1994), constituem os desafios do imageamento sísmico nesses tipos de ambientes.

No capítulo dos resultados poderemos observar os problema ocasionados pela camada de alta velocidade na migração em tempo, chamado de *pull up*, que é o efeito da redução localizada do tempo de reflexão ocasionado por uma camada de alta velocidade sobrejacente (DUARTE, 2003) e difrações ocasionadas pela topografia irregular da soleira

3 CONSTRUÇÃO DO MODELO

Neste capítulo são apresentadas as etapas de construção do modelo, representativo de um alvo exploratório de uma bacia paleozóica, desde a marcação dos horizontes nas seções interpretadas a criação da malha 3D regular para ser utilizada na modelagem dos dados sísmicos através do método de diferenças finitas.

3.1 Dados reais utilizados na modelagem

Os dados foram fornecidos pela unidade de negócios da PETROBRAS, UN-BSOL e constituem cinco seções sísmicas interpretadas, mapas de isópacas da região de maior espessamento do diabásio e dados de poço. Um modelo 3D acústico de uma alvo exploratório da bacias paleozoicas foi criado no *software* GoCad e incorporado no mesmo as propriedades físicas de velocidade e densidade obtidas da medida nos poços.

3.1.1 Seções sísmicas 2D interpretadas

O modelo 3D acústico foi construído a partir das 5 seções sísmicas interpretadas em profundidade cruzadas que são apresentadas nas Figuras 3.1a a 3.1e.

As seções apresentam várias regiões com intrusão de diabásio. O maior espessamento do diabásio é mostrado na seção 4 e é assinado pelo pontilhado em preto. O reservatório está a uma profundidade de 2,1 km aproximadamente e mostrado na seção 4 pela região compreendida pelas setas vermelhas. Ainda na seção 4 é foram fornecidas as velocidades médias de cada camada baseada na interpretação dos dados de poço, com exceção da camada do embasamento cuja variação de velocidade é baseada em informação geológica. As camadas de diabásio apresentam velocidades médias que variam de 5 km/s a 6,2 km/s, tendo-se assim nas interfaces entre o sedimento e o diabásio um forte contraste acústico. Nestas figuras são mostradas ainda três poços onde foram medidas as propriedades físicas de velocidade da onda P e densidade.

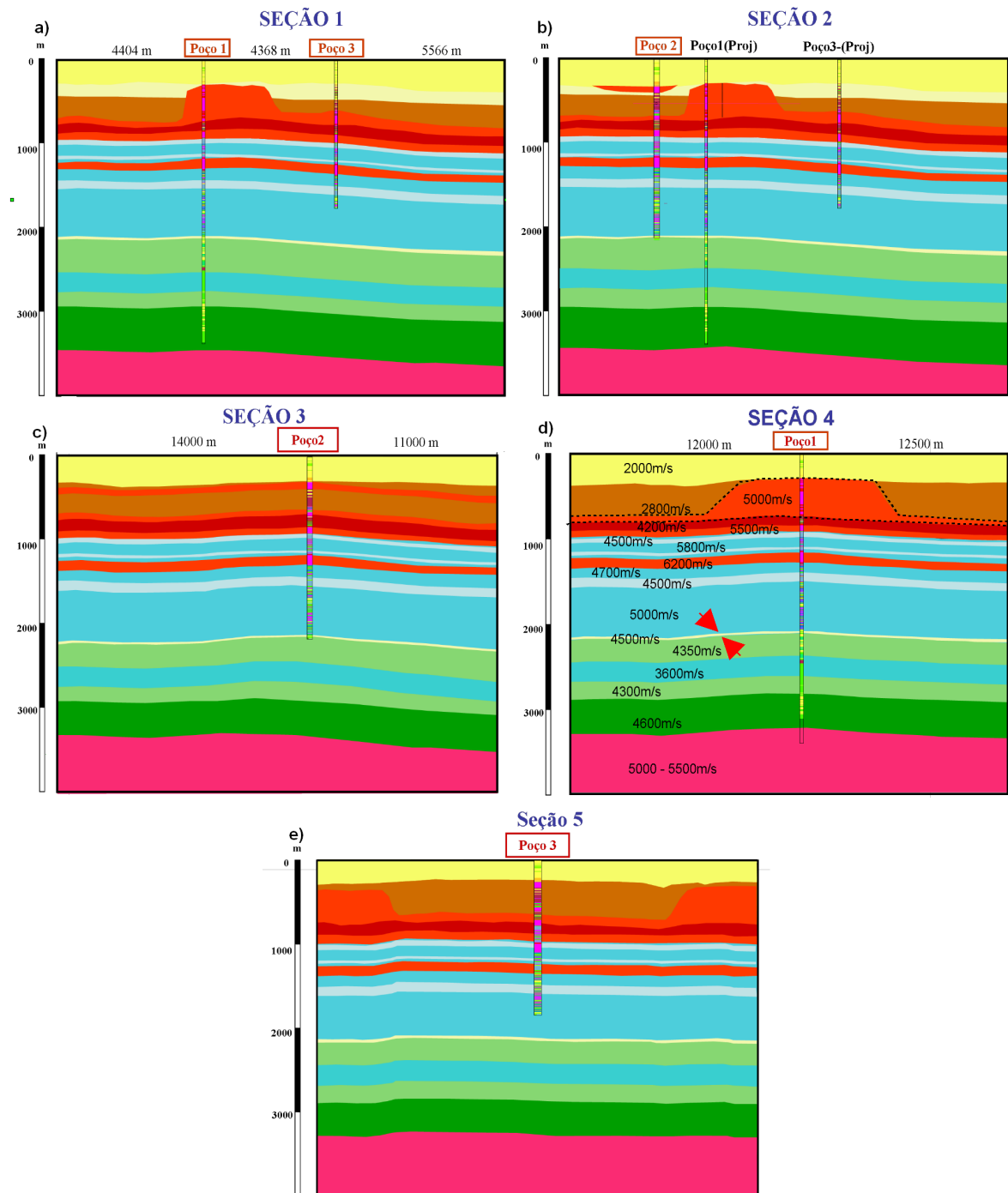


Figura 3.1: Seções sísmicas interpretadas em profundidade, 3.1a a 3.1e. Nestas figuras a distância e a profundidade são apresentadas em metros. O maior espessamento do diabásio é mostrado na seção 4, assinalado pelo pontilhado em preto. O reservatório está a uma profundidade de 2,1 km aproximadamente, mostrado na seção 4 pela região compreendida pelas setas vermelhas.

Na Figura 3.2 é mostrada a área esquemática do levantamento com a localização das seções e dos três poços e na Figura 3.3 as seções cruzadas de acordo com essa localização. As coordenadas dos dados não nos foram fornecidos.

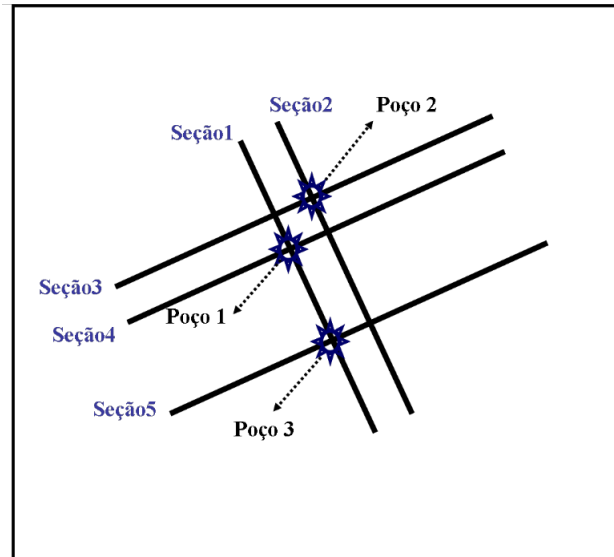


Figura 3.2: Área esquemática do levantamento com a localização das seções e dos poços.

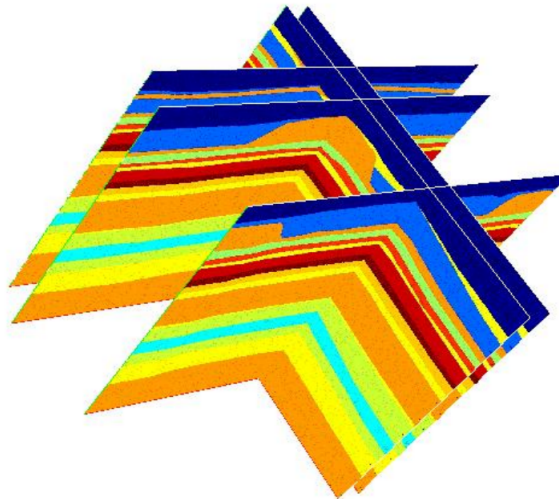


Figura 3.3: Posição relativa das seções sísmicas.

De acordo com as Figuras 3.2 e 3.3, a área de levantamento apresenta as dimensões de 25 km (direção das seções 3, 4 e 5), 14,338 km (direção das seções 1 e 2) com aproximadamente 4 km (ver Figuras 3.1a a 3.1e) de profundidade. A partir dessas informações, foi gerado um modelo com as seguintes dimensões de 21 km no eixo X, 13 km no eixo Y e 3.960 km no eixo Z.

3.1.2 Dados de Poço

A área estudada apresenta três poços, cuja localização é apresentada na Figura 3.2 e que apresentam profundidade de 1.835 m (Poço 3), 2.219 m (Poço 2) e 3.472 m (Poço 1). Em cada poço foram feitas medidas de caliper, raio gama, densidade e perfil sônico a cada 0.0254 m.

Na Figura 3.4 são apresentados os perfis de velocidade medidos em cada poço. De acordo com esses perfis verifica-se que a velocidade da onda P varia de 1,9 km/s até 7,2 km/s aproximadamente. O poço 1 situado entre as seções 1 e 4 (ver Figura 3.4,) apresenta maior quantidade de medidas, iniciando em 34 m e vai até 3.500 m de profundidade aproximadamente. De acordo com esse perfil, na área do reservatório a velocidade é em média de 4,5 km/s e nas áreas de diabásio a velocidade varia de 5 km/s até 6,2 km/s aproximadamente. Os perfis de densidade são apresentados na Figura 3.5

De acordo com a Figura 3.5, os perfis de densidade apresentam, valores que variam em média de 1,2 g/cm³ a 3,2 g/cm³. O poço 3 é o que apresenta menor quantidade de dados de densidade medida, indo de 200 m até 1.800 m aproximadamente.

Por apresentar maior quantidade de medidas foi utilizado no modelamento apenas o poço 1. Este apresenta o perfil de densidade que inicia a 480 metros e vai até 3.500 m de profundidade e valores que variam de 1,6 g/cm³ a 3,2 g/cm³. Na região do diabásio a densidade varia de 2,5 à 3,2 g/cm³.

De acordo com as Figuras 3.4 e 3.5, verifica-se que os perfis de velocidade e densidade apresentam dados espúrios o que justifica a necessidade de tratamento desses dados antes de incorporá-los ao modelo.

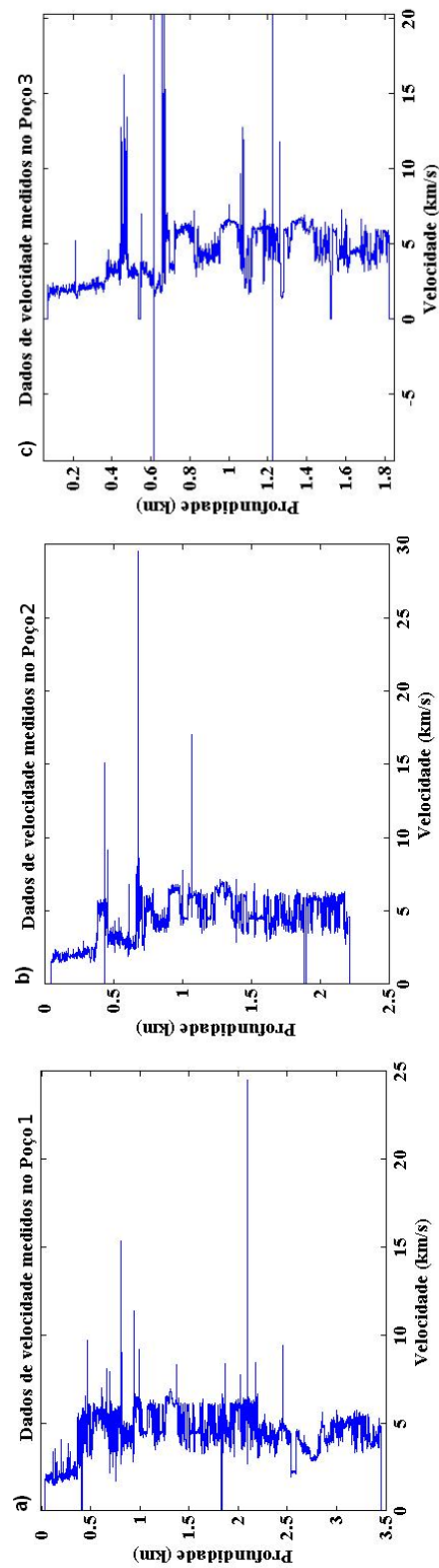


Figura 3.4: Perfis de velocidade obtidos dos perfis sônicos medidos nos poços 1 (4a), 2 (4b) e 3 (4c). O poço 1 apresenta a maior quantidade de informação, indo até 3.500 m de profundidade aproximadamente.

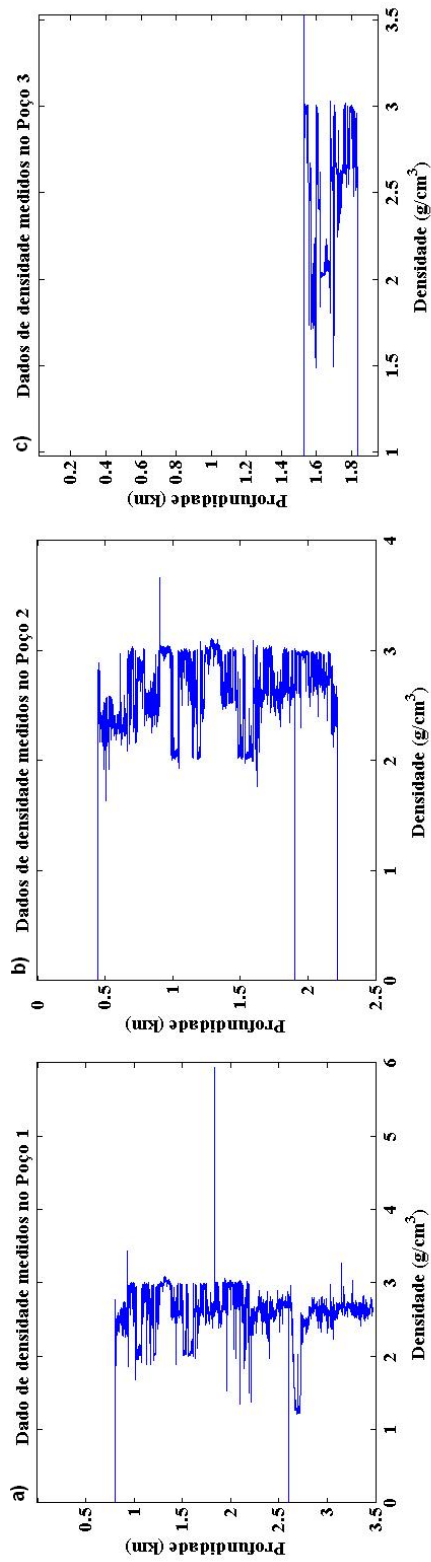


Figura 3.5: Perfis de densidade medidos nos poços 1 (5a), 2 (5b) e 3 (5c). Novamente a maior quantidade de informação é obtida do poço 1.

3.1.3 Processamento dos dados de poço

Os dados de velocidade e densidade sofreram o seguinte tratamento:

-Retirada dos valores nulos e valores discrepantes, valores muito maiores as encontrados na vizinhança. Nos pontos onde o valor era nulo ou discrepante considerou-se o valor anterior.

-Aplicação da mediana móvel (SANTOS, 1982), com objetivo de suavizar os dados. A mediana foi aplicada a cada metro. Os dados foram medidos a cada 0.0254 m, desta forma a cada metro tem-se aproximadamente 39 medidas.

-Os dados medidos a cada 0.0254 m foram reamostrado para cada 3,5 metros (taxa de amostragem aplicada no GoCad).

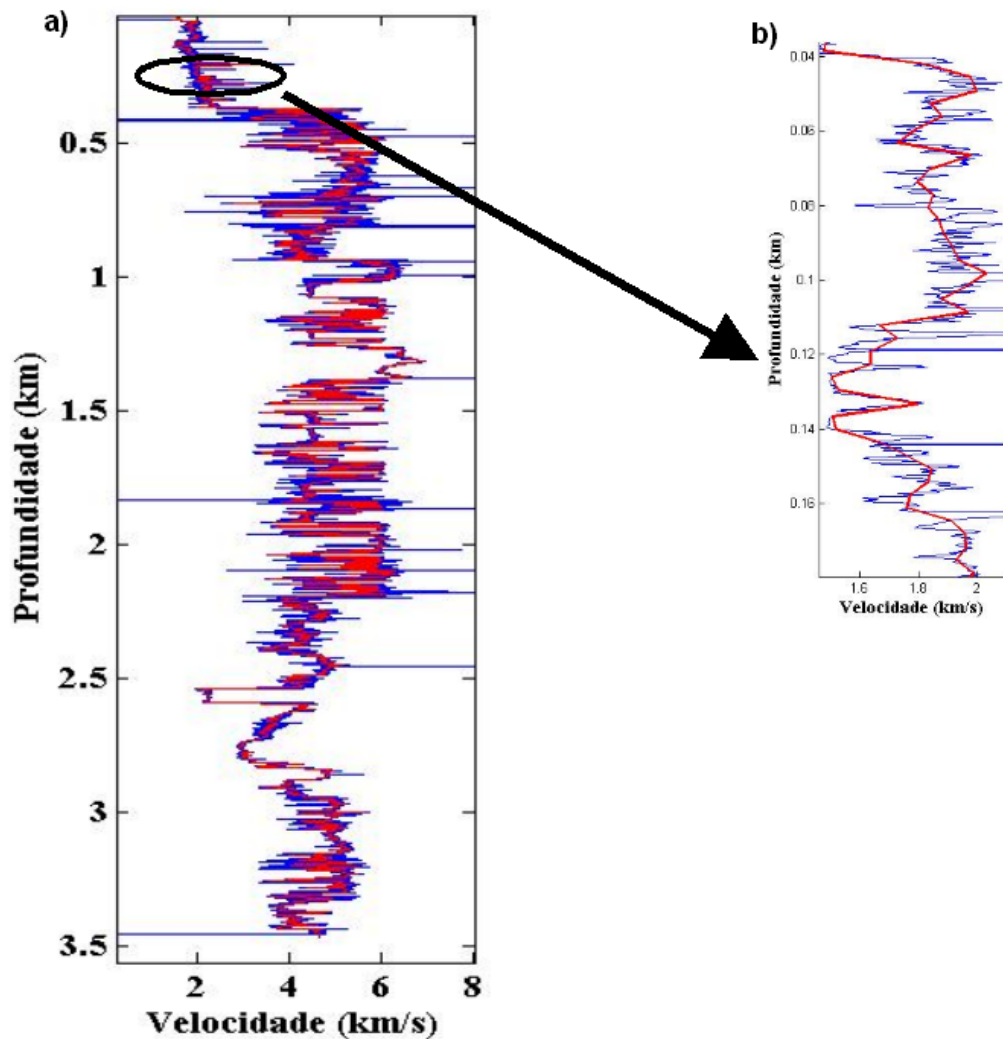


Figura 3.6: Perfil de velocidade com os dados brutos (em azul) e após o processamento acima (em vermelho). Detalhe de uma região em torno do círculo em preto é mostrado na Figura 3.6b.

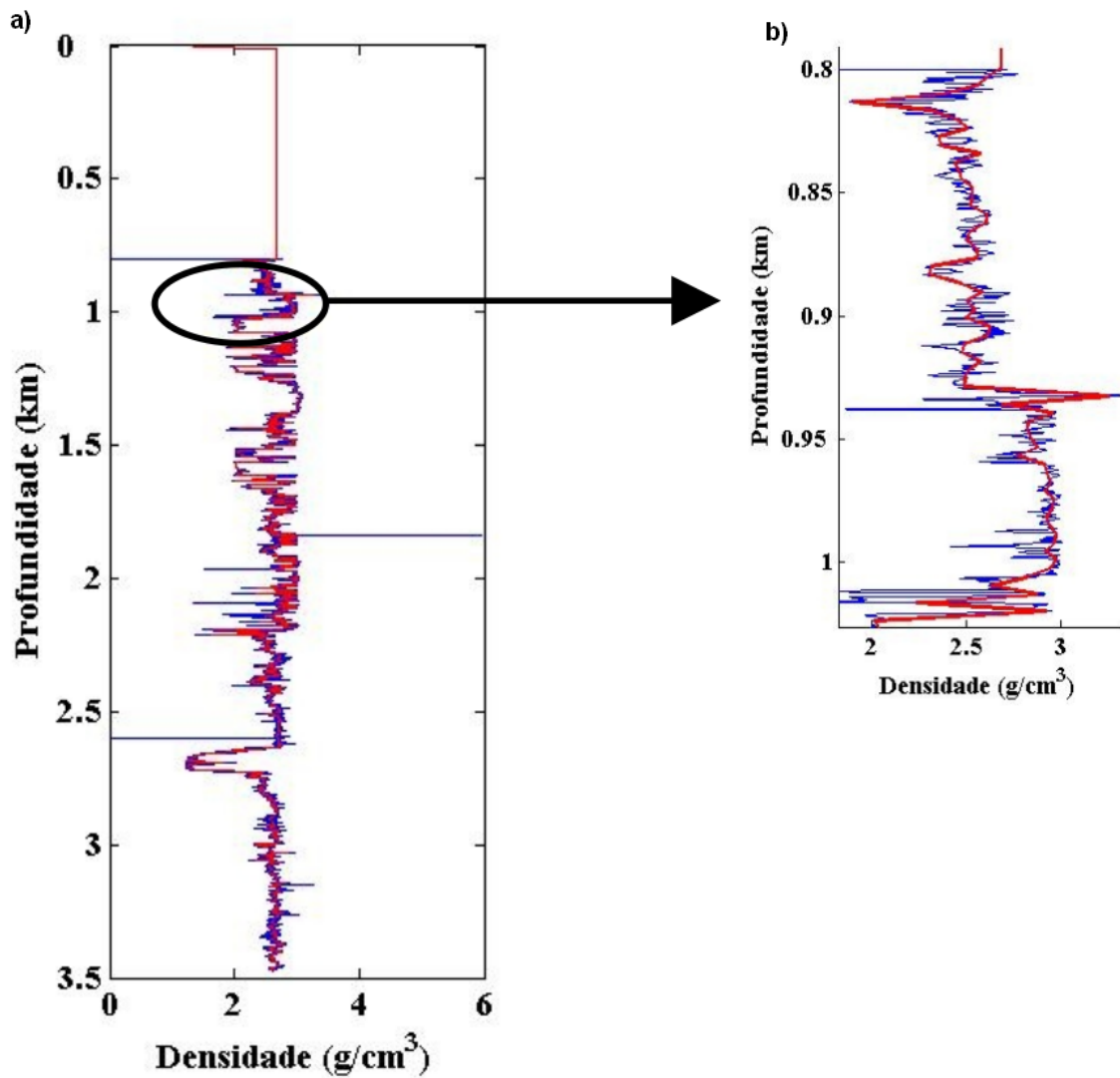


Figura 3.7: Perfil de densidade com os dados brutos (em azul) e após o processamento acima (em vermelho). Detalhe de uma região em torno do círculo em preto é mostrado na Figura 3.7b.

De acordo com as figuras acima, verifica-se que após o processamento os dados espúrios e nulos foram retirados dos registros. Na Tabela 3.1 são mostrados os valores médio das velocidades e densidades calculadas dos dados já processados para cada camada. A localização de cada camada é mostrada na Figura 3.8, que mostra a seção 4 e o poço 1.

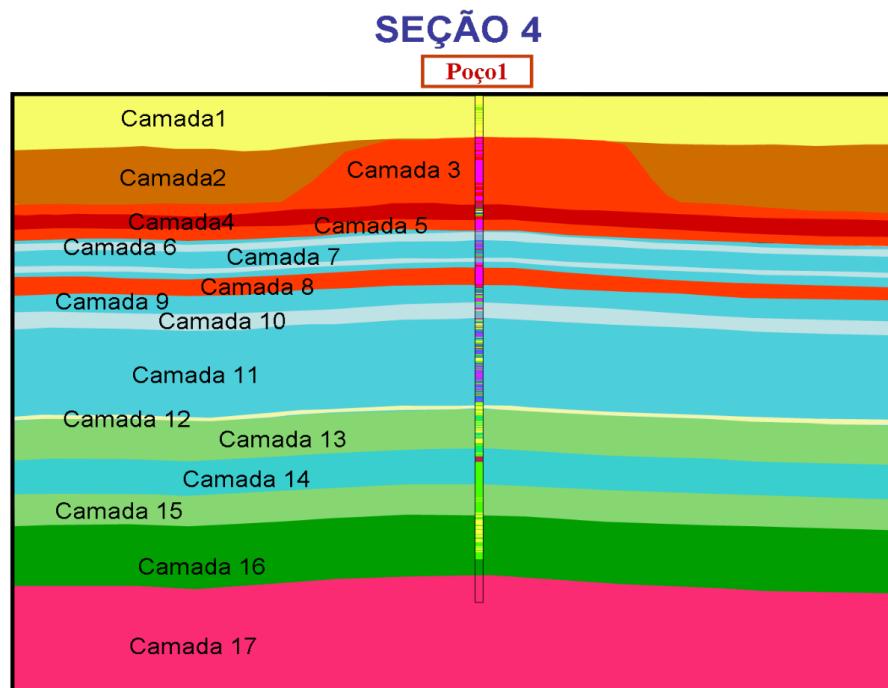


Figura 3.8: Seção e poço escolhidos como referência para a construção do modelo com a localização das camadas. Camadas 14 e 15 são de baixa velocidade média.

Nº	Camadas	velocidade média (km/s)	densidade média (g/cm ³)
01	Camada 1	1,92	2,67
02	Camada 2	0,00	0,00
03	Camada 3	4,60	2,68
04	Camada 4	4,46	2,54
05	Camada 5	4,50	2,64
06	Camada 6	5,71	2,74
07	Camada 7	5,11	2,52
08	Camada 8	5,82	2,76
09	Camada 9	5,37	2,79
10	Camada 10	4,74	2,45
11	Camada 11	5,06	2,71
12	Camada 12	4,99	2,66
13	Camada 13	4,44	2,56
14	Camada 14	3,66	2,43
15	Camada 15	3,64	2,35
16	Camada 16	4,80	2,63
17	Camada 17	4,19	2,65

Tabela 3.1: Velocidade e densidade médias das camadas da seção 4, usada como referência para construção do modelo. Os valores médios foram calculados a partir dos dados processados.

De acordo com a Tabela 4.1 acima, nas camadas de diabásio do modelo a velocidade média encontrada é de 4,85 km/s (camada 3), 5,80 km/s (camada 5) e 6,12 km/s (camada 8). Na camada do reservatório a velocidade média de 4,26 km/s e densidade média de 2,66 g/cm³. Ainda de acordo com a Tabela acima, não há valor de velocidade e densidade para a camada 2, o que é explicado na Figura 3.8. Nesta região onde situa-se o poço 1, a espessura da camada 2 é praticamente nula. Dessa forma o poço 1 não possui informações sobre esta camada. As informações de velocidade e densidade na camada 2 foram extraídas do poço 2. A velocidade média da camada é de 3,0 km/s e densidade média de 2,48 g/cm³.

Na região de maior espessamento do diabásio tem-se forte contraste acústico entre diabásio e camada sedimentar (30%). Tem-se ainda que as camadas 14 e 15 apresentam baixa velocidade média.

3.1.4 Mapa de isópacas

A região de maior interesse na modelagem além do reservatório é a área de maior espessamento do diabásio, mostrado em 2D na área pontilhada da Figura 3.1d. Para auxílio na modelagem dessa região foi utilizado os mapas de isópacas do topo e da profundidade dessa região, no qual geramos as superfícies (Figura 3.9a, 3.9b e 3.9c). As variações de profundidade estão mostradas através do mapa de cores que variam de vermelho e amarelo, nas regiões de menor valor de Z, até branco e lilás, nas regiões de maior valor de Z. Na Figura 3.9a é mostrado o topo do diabásio, enquanto que, na Figura 3.9b é mostrada a base do diabásio.

De acordo com a Figura 3.9a o topo do diabásio apresenta variações em Z de 280 metros enquanto que, a base (Figura 3.9b) apresenta variações em Z de 105 metros. A espessura total da camada de diabásio assume valores de até 175 metros, na região de maior espessamento (ver Figura 3.1d). Essas isópacas apresentam dimensões menores na horizontal que o modelo constituído pelas seções interpretadas. Devido a isso o modelo criado, tem as dimensões horizontais de acordo com as dimensões das isópacas. O próximo passo é carregar essas informações no GoCad.

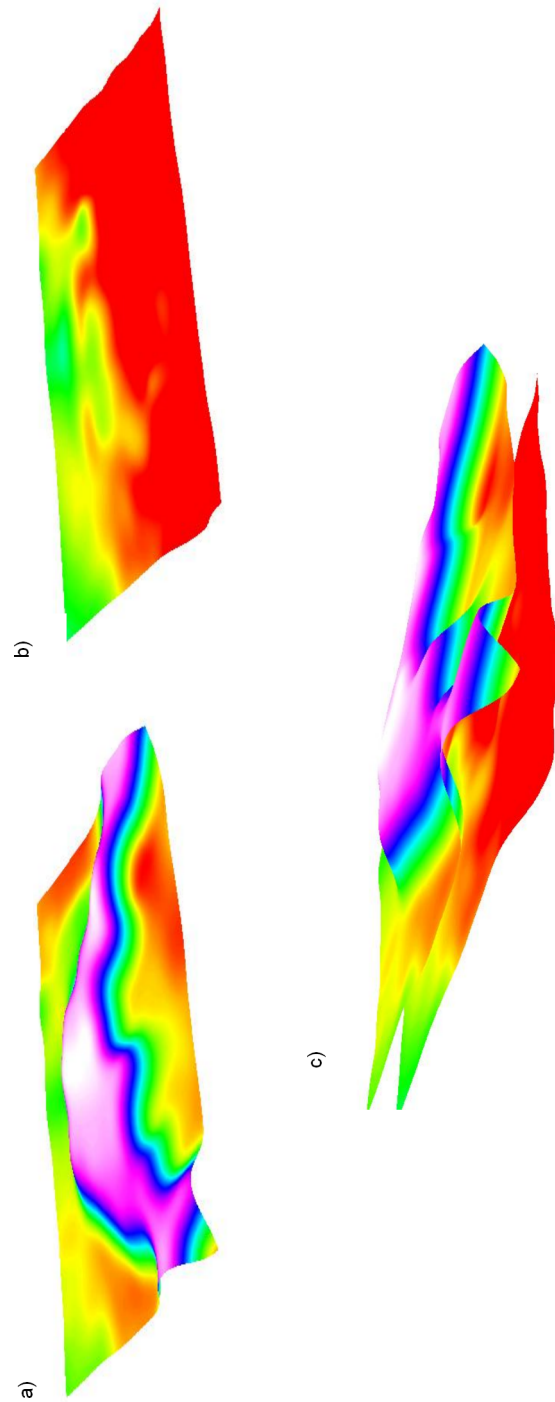


Figura 3.9: Superfícies geradas a partir do mapa de isópacas do topo (Figura 3.9a) e base (Figura 3.9b) da região de maior espessamento do diabásio. Os valores de Z estão mostrados no mapa de cores e variam de até 280 metros no topo e 105 metros na base. As regiões em lilás e branco são as regiões mais altas, comparadas com as regiões em vermelho e amarelo. A espessura total do diabásio assume valores de até 175 metros. Na Figura 3.9c são mostradas as duas superfícies juntas.

3.2 Parâmetros do GoCad

O modelo acústico 3D representativo de um alvo exploratório de uma bacia paleozóica foi construído no *software* GoCad. Este *software* é constituído dos módulos:

- Modulo Básico
- Interpretarão Sísmica
- Interpretação Geológica
- Modelamento de velocidade
- Produção de reservatório
- Planejamento de perfuração

Estes módulos realizam atividades de modelagem 3-D, interpretação sísmica, interpretação geológica e monitoramento de reservatórios. Na construção do modelo apresentado neste trabalho, foram utilizados os módulos: Módulo Básico e Modelamento de reservatório.

O modelo foi criado a partir da seguinte ordem:

- Construção das superfícies a partir das seções interpretadas cruzadas.
- Criação das camadas e da malha 3-D irregular que obedece às características topográficas das superfícies.
- Incorporação das propriedades físicas ao modelo na malha 3-D irregular que obedece às características topográficas das superfícies.
- Construção de uma malha regular a partir da malha irregular

No GoCad estamos utilizando a regra da mão esquerda (Figura 3.10) com eixo Z positivo apontando para baixo.

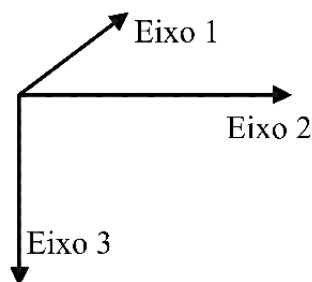


Figura 3.10: Sistema de coordenadas utilizado no GoCad. O Eixo Z positivo aponta para baixo.

As seções 2D interpretadas foram importadas para o GoCad. No GoCad, as seções são reamostradas tal que, a direção X é amostrada a cada 20 metros, a direção Y a cada 10 metros e a direção Z (profundidade) a cada 3,5 metros.

Os horizontes em cada seção foram marcados e a partir destes, as superfícies foram criadas. Nas Figuras 3.11 e 3.12 são mostradas as superfícies criadas a partir das seções cruzadas. De acordo com estas figuras, as superfícies criadas são menores que as dimensões das seções, isto se deve ao fato de criarmos a superfície de espessamento do diabásio de acordo com os mapas de isópacas, que são menores. As superfícies acima do espessamento do diabásio estão sendo mostradas com transparência em azul.

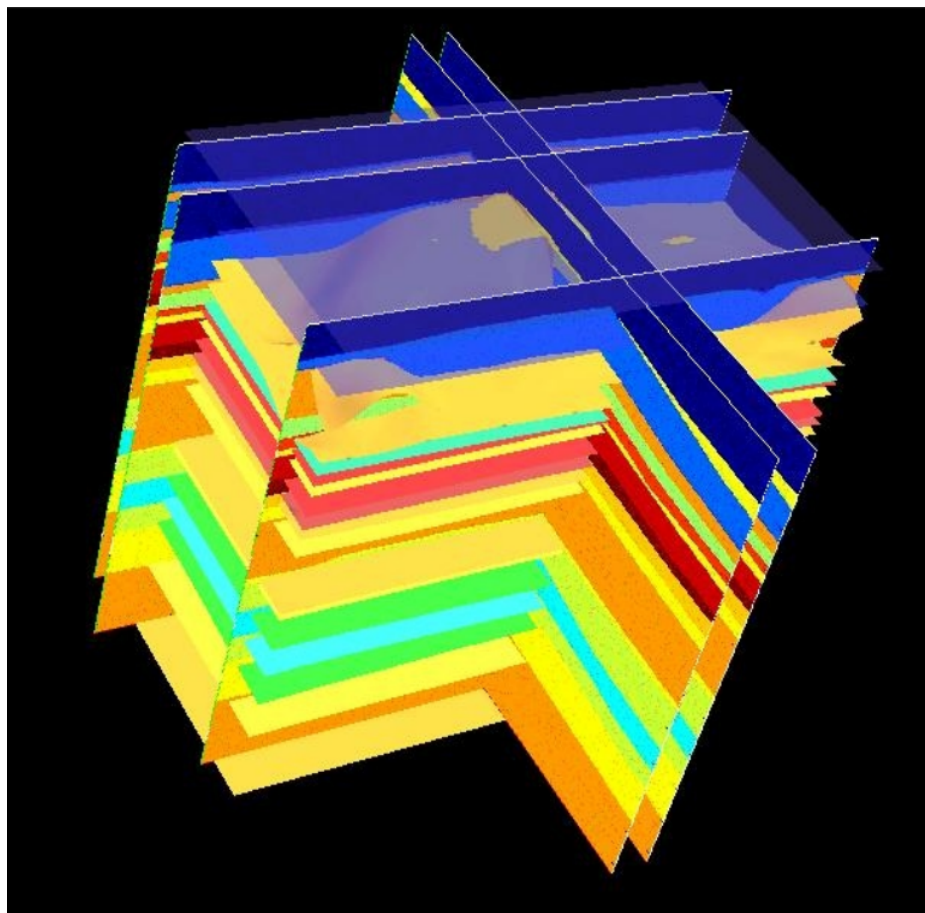


Figura 3.11: Superfícies construídas no Gocad a partir das seções interpretadas cruzadas. A seção 4, por apresentar a maior espessura do diabásio foi usada como guia. Acima da região de maior espessamento do diabásio as camadas são mostradas com transparência azul.

As superfícies acima do espessamento do diabásio estão plotadas com transparência em azul.

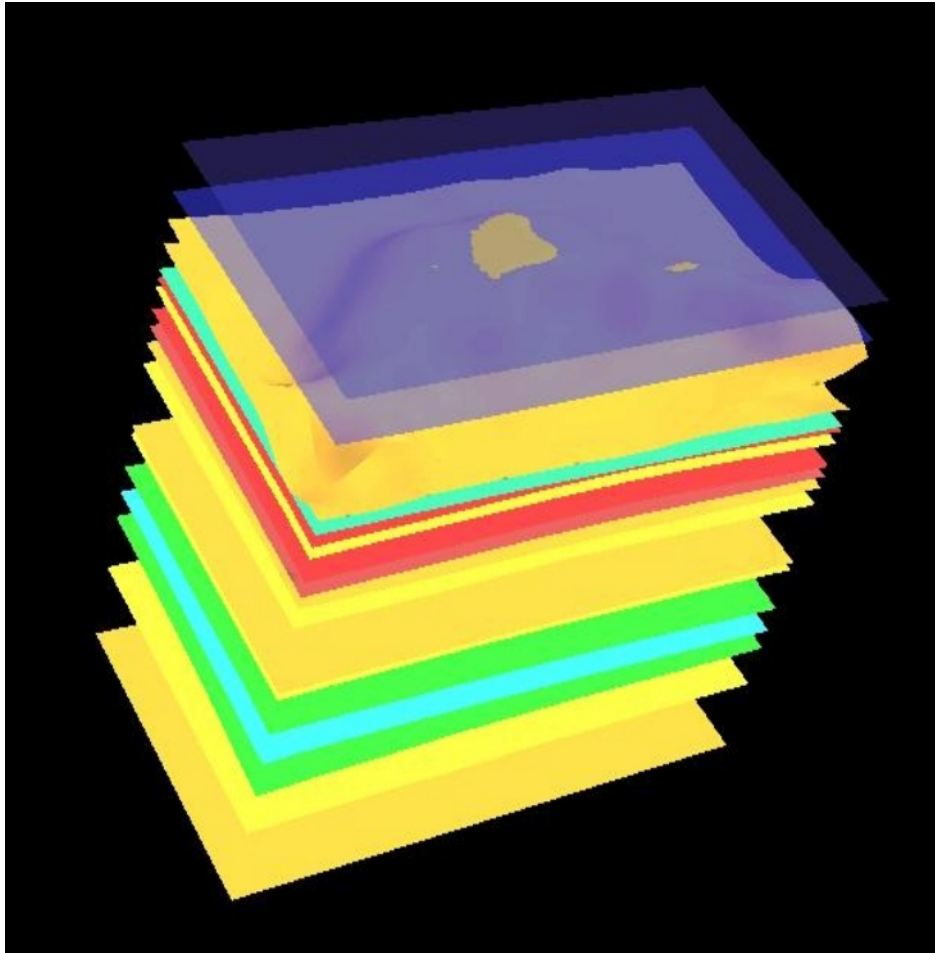


Figura 3.12: Superfícies construídas no Gocad. As superfícies acima da superfície de maior espessamento do diabásio são mostradas com transparência em azul.

3.2.1 Criação das camadas e da malha 3-D irregular que obedece às características topográficas das superfícies

Após a construção das superfícies, o próximo passo foi à construção de cada camada a partir das superfícies. Essas malhas foram criadas obedecendo às características topológicas de cada superfície do modelo, sendo, portanto irregulares.

Na Figura 3.13 é mostrada para a camada com maior espessamento do diabásio a malha irregular 3D. A distância entre os nós nas direções horizontais de 20 metros. O número de nós no eixo Z (profundidade) foi tomado de acordo com o número de amostras da velocidade e densidade medidas no poço 1. Todas as malhas foram construídas da mesma forma.

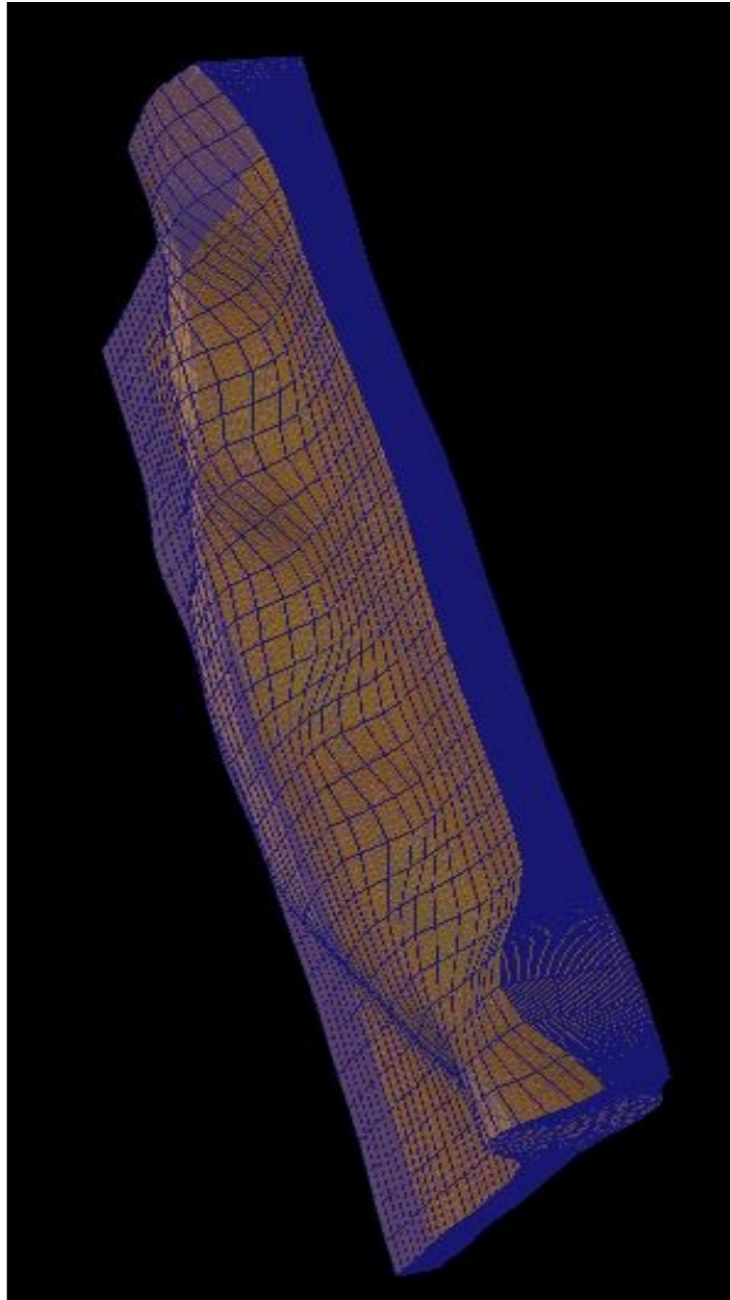


Figura 3.13: Malha 3D da camada com maior espessamento do diabásio. A distância entre os nós é de 20 metros na horizontal e o número de nós no eixo Z (profundidade) foi tomado de acordo com o número de amostras da velocidade e densidade medidas no poço 1. A malha é mostrada com transparência.

Na Figura 3.14 são apresentadas todas as camadas construídas a partir das superfícies e o poço cujas medidas de densidade e velocidade da onda P serão incorporadas ao modelo. O reservatório é mostrado pela seta branca, e possui pouca espessura (aproximadamente 40 m), comparada com a espessura das outras camadas o reservatório (camada de maior espessura do diabásio é de 438 m). Região do reservatório está assinalada por uma seta branca.

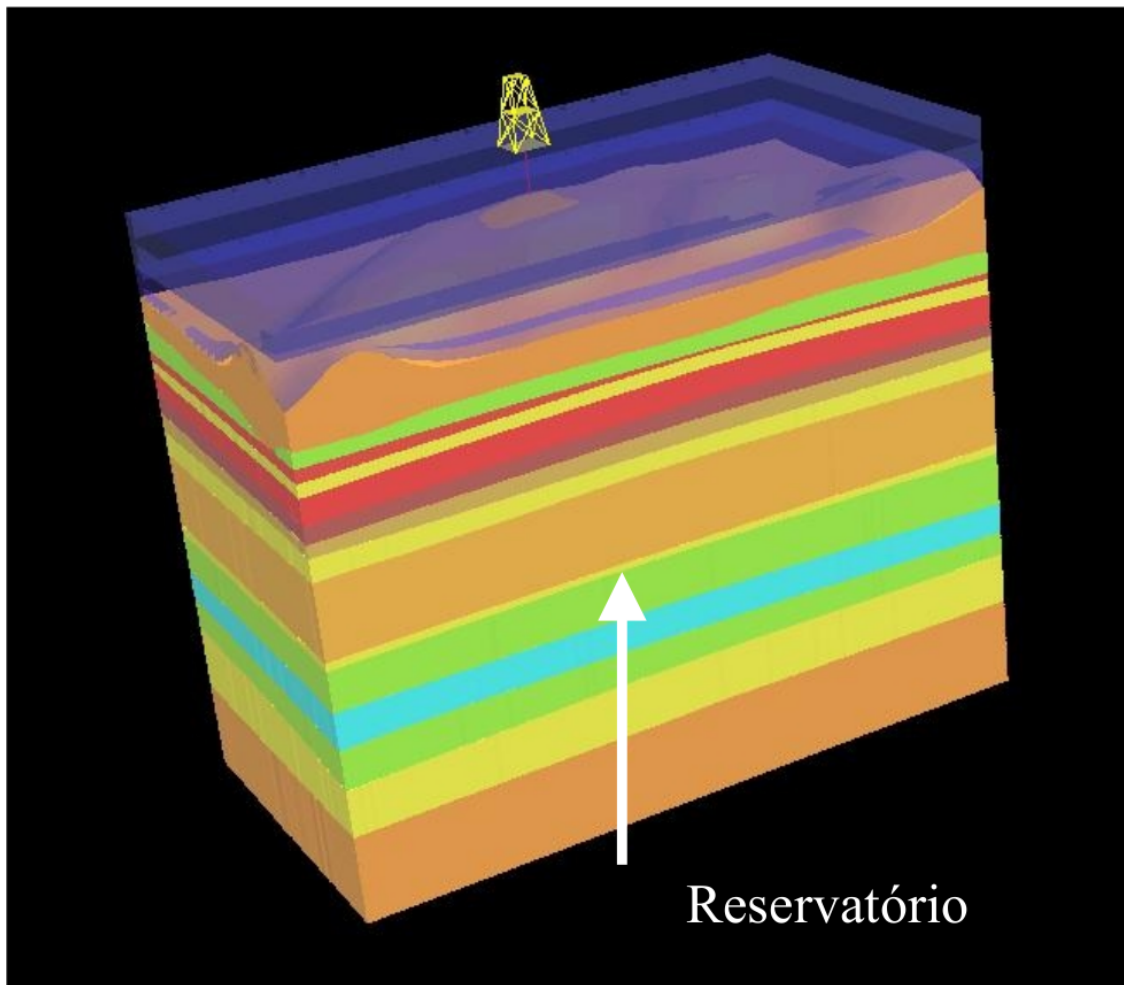


Figura 3.14: Camadas construídas a partir das superfícies do modelo e poço cujas propriedades físicas foram utilizadas na construção do modelo. A camada de diabásio com maior espessura está representada em laranja e o reservatório está assinalado pela seta branca.

3.2.2 Incorporação das propriedades físicas ao modelo na malha 3-D irregular que obedece às características topográficas das superfícies.

Em seguida, as propriedades físicas de velocidade da onda P e densidade medidas no poço 1 foram incorporadas ao modelo. Como foi utilizado apenas dados medidos em um poço em cada camada criada a propriedade física varia apenas verticalmente. Para a modelagem dos dados sísmicos nesse modelo utilizando diferenças finitas (LEVANDER, 1988; KARRENBACH, 1995; NETO; COSTA, 2006) é necessário que a propriedade física esteja disposta em uma malha regular. A malha criada obedece a topografia das camadas.

3.2.3 Construção de uma malha regular a partir da malha irregular

A partir das malhas 3D irregulares de cada camada foi construída uma única malha regular 3D de todo modelo. E incorporada a propriedades física. Agora essa propriedade varia tanto na vertical (medidas de poço), quanto na horizontal (de acordo com a topologia de cada camada). Nos três eixos X, Y, Z a discretização foi de 20 metros e a malha utilizada ficou então com 1346 pts na direção X, 646 pts na direção Y e 197 pts na direção Z. O ideal é que nas três direções X, Y e Z, a discretização fosse a mesma e de 5 metros, o que não foi feito devido a limitações computacionais.

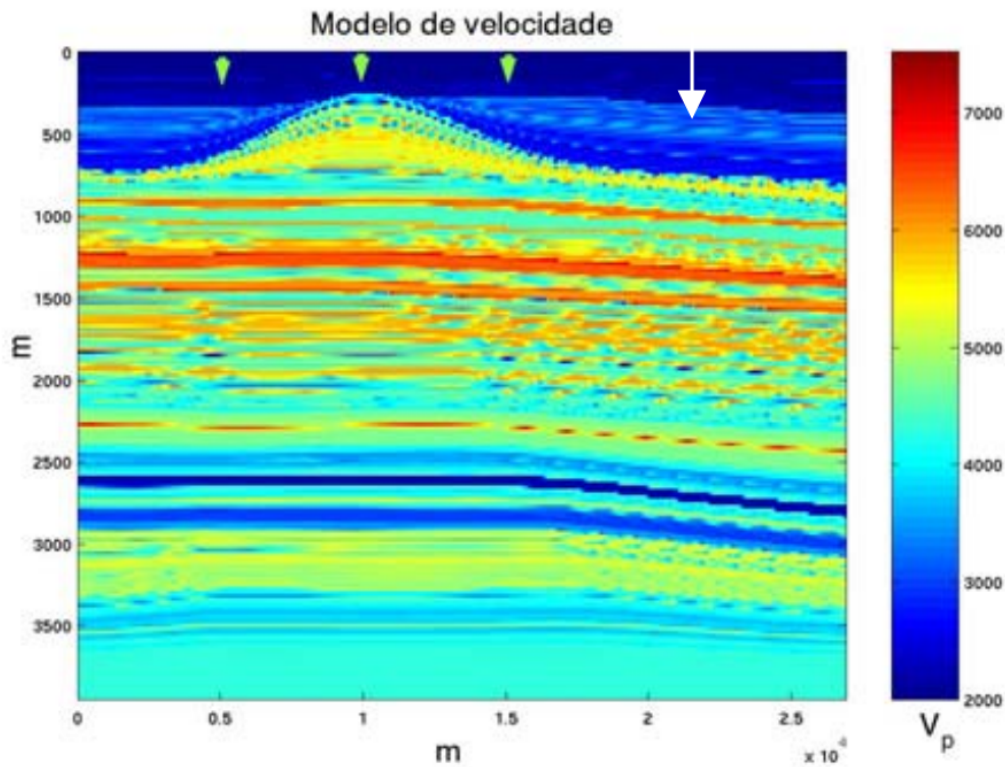


Figura 3.15: Modelo velocidade de estimada a partir do modelo 3D na direção de maior extensão do modelo no eixo X (situada na mesma posição que a seção 4). Escala de cores mostra os valores da velocidade e está de acordo com o perfil de velocidade medido no poço. Velocidade variam de 2 km/s até 6.2 km/s.

Na Figura 3.15, é apresentado uma seção 2D do modelo de velocidade, obtido de um corte na direção do eixo x_2 no modelo 3D. Esta seção é que está na mesma posição da seção 4 sísmica interpretada, utilizada no modelamento. De acordo com essa Figura 3.8, a região de maior espessamento do diabásio apresenta heterogeneidade além do grande contraste acústico na interface diabásio - camada sedimentar (região mostrada pela seta branca).

A Figura 3.8 mostra uma seção 2D (direção de maior espessamento do diabásio) do modelo 3D, já com a malha reamostrada e com o modelo já suavizado. Construída a malha regular 3D o próximo passo é a aquisição dos dados sísmicos. Foram realizadas as aquisições 3D e 2D, principal objetivo deste trabalho. Esta aquisição foi feita na seção 2D mostrada na Figura 3.15. Detalhes das aquisições são apresentados no próximo capítulo.

4 AQUISIÇÃO SÍSMICA

Ao modelo construído foi aplicada dois levantamentos: o levantamento 3D em todo o modelo e o levantamento 2D na seção mostrada na Figura 3.15 do capítulo anterior. Do levantamento 3D será apresentado os dados da geometria do levantamento além os sismogramas do campo de pressão em alguns pontos próximo a região do espessamento do diabásio. Nesse trabalho iremos analisar mais detalhadamente o levantamento 2D e os resultados obtidos. Para a realização dos levantamentos 3D e 2D o modelo acústico exportado do GoCad foi reamostrado tal que a nova distância entre os nós é de 10 m.

4.1 AQUISIÇÃO 3D

Foi feito o levantamento 3D do tipo *swath* (YILMAZ, 2001) e detalhes da geometria utilizada são apresentados na Tabela 2 abaixo.

Parâmetros	Valores
Número de linhas de tiro	36
Distância entre as linhas de tiro	150
Número de tiros por linha	72
Número de linhas de receptores	8
Número de receptores por linha	201
Distância entre os receptores	30 m
Incremento temporal - dt	0.008 s
Número de amostras temporais	625

Figura 4.1: Tabela com os dados da geometria do levantamento 3D, do tipo *swath*.

Nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4, são mostradas a geometria do levantamento, vista de cima do modelo (mapa de cores) com destaque para a parte central do diabásio e laterais (manchas cujas cores vermelha a amarela). Na Figura 4.2, os tiros estão representados pelos pontos em cruz (em preto) enquanto que, os receptores estão situados nas linhas em verde. A Figura 4.3 apresenta detalhes para um tiro as linhas de receptores. Na Figura 4.4 é mostrado em 3D e para duas seções cruzadas, as linhas de tiros (segmentos em preto).

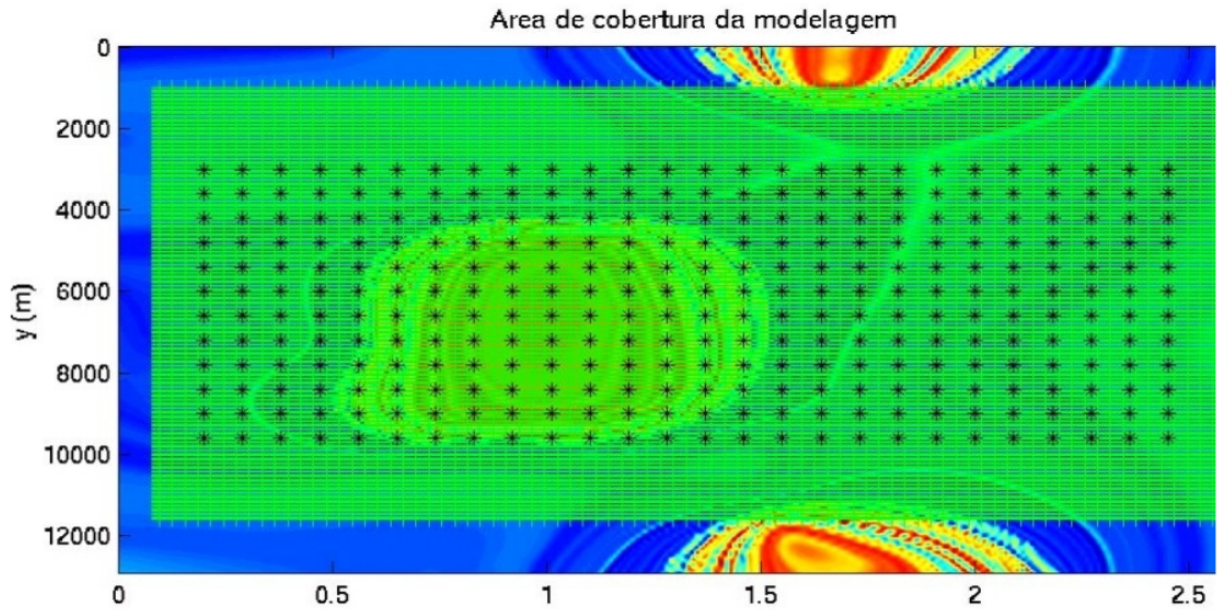


Figura 4.2: Vista de cima do modelo. Mapa de cores da superfície do diabásio. Levantamento do tipo *swath* feito na região central do espessamento do diabásio. Tem-se oito linhas de receptores por tiro com 201 receptores por linhas, espaçados regularmente de 30 metros (nas linhas verdes). Os tiros estão distribuídos 36 linhas com 72 tiros espaçados de 150 metros (representados em cruz preta).

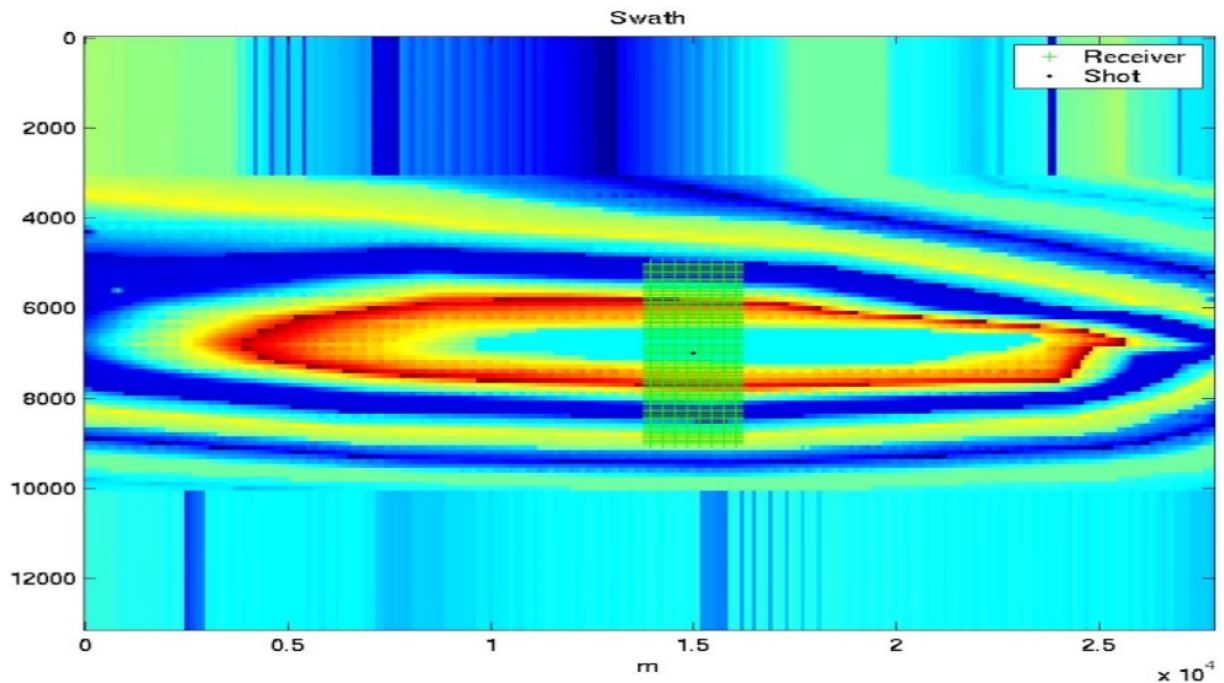


Figura 4.3: Para um tiro tem-se o arranjo de oito linha de receptores. Ao fundo vista de cima da região do diabásio.

Nas Figuras 4.5 são apresentados os campos de pressão para três tiros situados próximos ao espessamento do diabásio (conforme mostrado na Figura 3.15 por triângulos

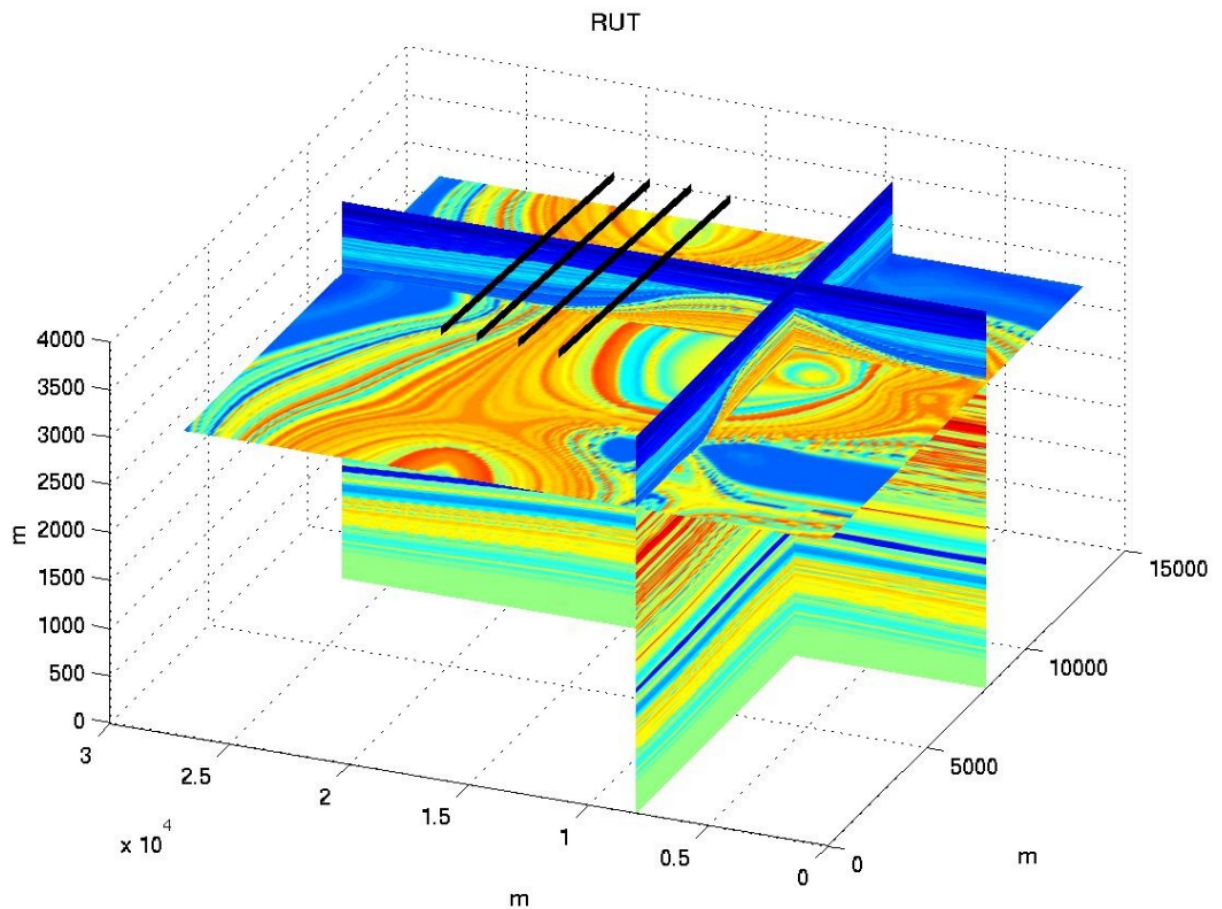


Figura 4.4: Levantamento em 3D com duas seções cruzadas e linhas de tiros (segmentos em preto).

verdes) registrados para as duas linhas de geofone mais próximas dos tiros. Os eventos associados ao diabásio apresentam maior energia. Nos registros mostrados nas Figuras 4.5a e 4.5c, (que estão mais distantes do topo do diabásio) o evento associado as rochas sedimentares e o evento associado ao diabásio são claramente observados (letras A e B respectivamente). Na Figura 4.5b, que registra o campo de pressão em uma região acima do ponto onde sedimento e diabásio estão muito próximos, esses eventos são indistinguíveis (letras A e B). Ainda de acordo com estas figuras, após os eventos associados ao diabásio (após 1.5 segundos) a amplitude do sinal cai bastante, dificultando a obtenção de informação de estruturas abaixo do diabásio. Isso se deve ao grande contraste de impedância acústica entre as rochas sedimentares e o diabásio.

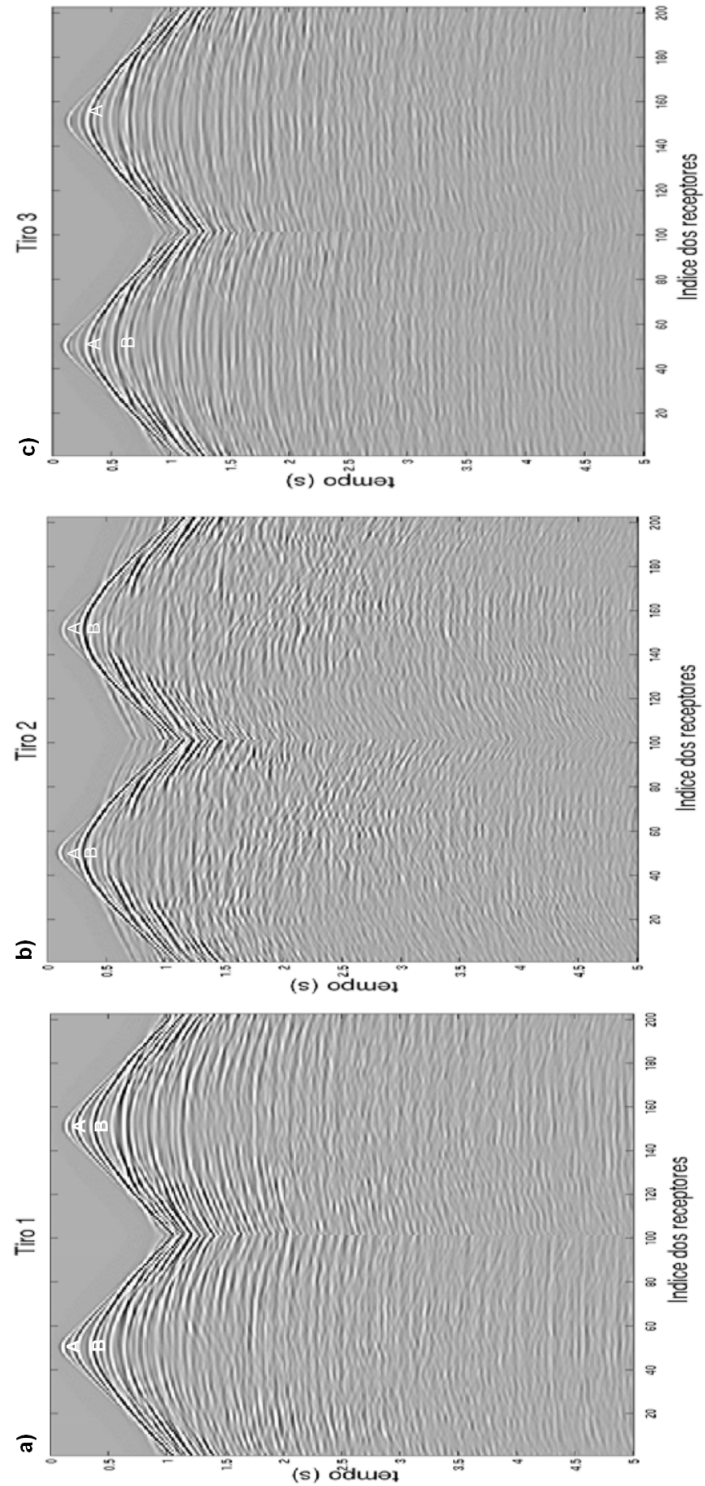


Figura 4.5: Registro dos campos de pressão medidos entre as duas linhas mais internas das oito linhas de receptores. O primeiro tiro está situado na posição de 5 km no eixo x_1 e registo mostrado na Figura 4.5a. O segundo tiro está situado na posição de 10 km no eixo x_1 e registo mostrado na Figura 4.5b. O terceiro tiro está situado na posição de 15 km no eixo x_1 e registo mostrado na Figura 4.5c. A posição dos três tiros é mostrada na Figura 3.15 no capítulo anterior.

4.2 AQUISIÇÃO 2D

Em seguida, foi feito um levantamento 2D com lanço simétrico na região de maior extensão do espessamento do diabásio (região mostrada Figura 3.15). A geometria utilizada nesse levantamento é apresentada na Tabela 4.1 abaixo.

Parâmetros	Valores
Número de tiros	226
Distância entre os tiros	60 m
Número de receptores	80
Distância entre os receptores	60 metros
Offset mínimo e máximo	-2500 m à 2490 m
Incremento temporal -dt	0.008 s
Número de amostras temporais	625

Tabela 4.1: Geometria do levantamento 2D realizado na seção 2D modelo (Figura 3.15).

O número de traços medidos foi de 18306. Dos 530 cdps 490 possui cobertura total (60 traços). Da mesma forma que apresentado nas Figuras 4.5a, 4.5b e 4.5c, os eventos associados ao diabásio são bastante visíveis e a amplitude do sinal cai após esse evento. No próximo capítulo o imageamento a partir desses dados é analisado.

5 RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo são analisados os resultados das migrações em tempo e em profundidade dos dados sintéticos gerados na seção 2D na região de maior espessamento da soleira de diabásio, Figura 3.15 analisando quais os limites e as perspectivas desse trabalho.

5.1 MIGRAÇÃO DOS DADOS

Com objetivo de apenas analisar os resultados na região imageada do modelo acústico criado, as migrações foram realizadas utilizando o modelo de velocidade exato. Após a aquisição dos dados sintéticos 2D foram aplicados dois tipos de migração: migração em tempo e a migração em profundidade ambas pré-stack. Na migração as difrações são colapsadas além de reposicionar os refletores e esta depende fortemente do modelo de velocidades.

5.1.1 Migração em tempo

A migração em tempo é usada para o imageamento da subsuperfície em áreas onde a variação de velocidade lateral não é muito alta, mas que possuem um ambiente com estruturas complexas. O resultado dessa técnica é o deslocamento aparente dos eventos em função do tempo de trânsito em vez da profundidade. Neste trabalho, o modelo da velocidade em função da profundidade (velocidade intervalar) foi convertido em velocidade RMS para aplicação na migração pré-stack em tempo, sendo utilizada a migração Stolt. O resultado da migração *pré-stack* em tempo é apresentado na Figura 5.1.

A interface refletora do diabásio está assinalado em verde. É observado o fenômeno de *pull up*, no qual os refletores abaixo da interface de grande contraste de impedância apresentam-se curvos, este fenômeno se deve ao efeito da redução localizada o tempo de reflexão ocasionado por uma camada de alta velocidade sobrejacente (DUARTE, 2003) em nosso caso a camada de diabásio. Este fenômeno está assinalado na Figura 5.1 por uma linha amarela.

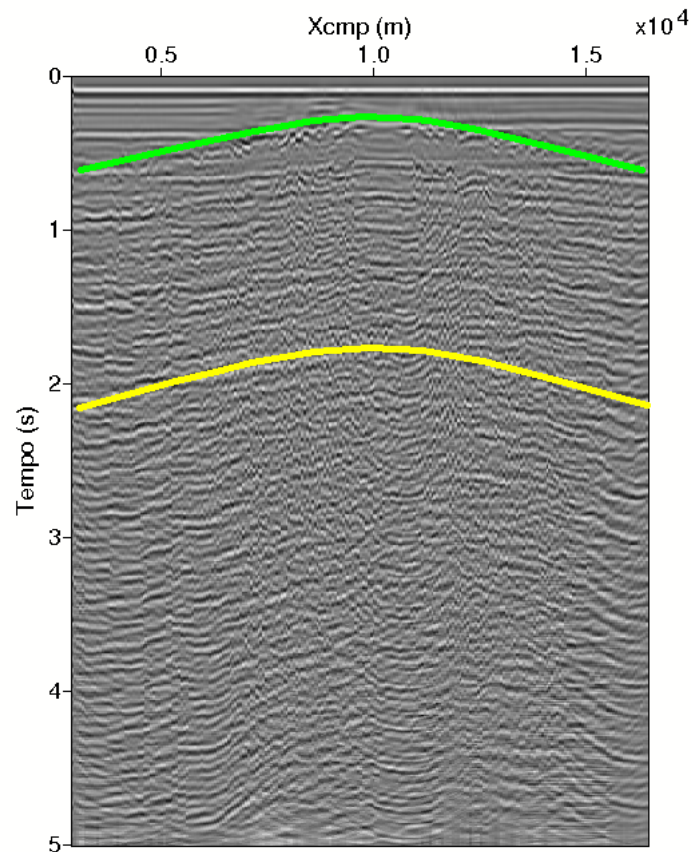


Figura 5.1: Migração *pré-stack* em tempo da seção 2D apresentada na Figura 3.15. Interface do diabásio está assinalado em verde. Os refletores abaixo deste sofreram o fenômeno de *pull-up*, estes estão assinalados em amarelo.

5.1.2 Migração em profundidade

A migração em profundidade é usada para o imageamento da subsuperfície em áreas com grande variação lateral de velocidade. Neste trabalho foi aplicada a migração *pré-stack* em profundidade de mudança de fase, utilizando o modelo de velocidades intervalares exato. O resultado da migração *pré-stack* em profundidade é apresentado na Figura 5.2. Diferente do que acontece na migração em tempo (Figura 5.1), o fenômeno de *pull up* não afeta a migração em profundidade (Figura 5.2) o efeito desaparece completamente. O topo e a base da soleira de diabásio são reposicionados em seus devidos lugares. Além disso, tem-se os refletores abaixo da soleira aproximadamente horizontalizados (linhas em azul claro). Podemos observar a interface associada ao reservatório, assinalado na Figura 5.2 por setas em vermelho e a região de baixa velocidade (profundidade de 2.7 km aproximadamente). As fortes difrações no topo da soleira do diabásio, se devem a malha grosseira utilizada na criação do modelo. Estas simulam a rugosidade na topografia da

estrutura.

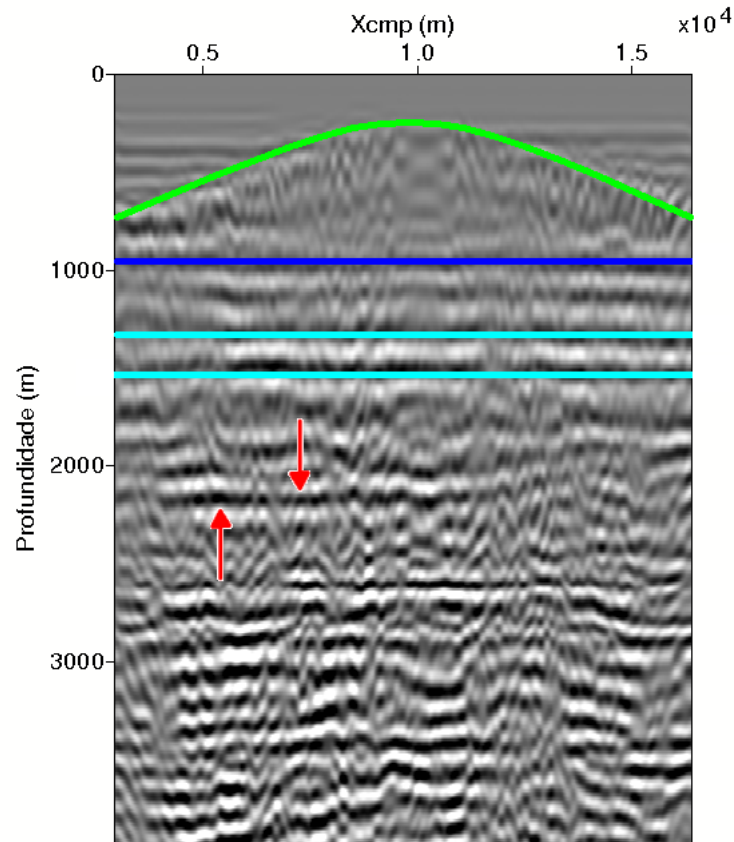


Figura 5.2: Migração em profundidade da seção 2D apresentada na Figura 3.15. Diabásio assinado em verde. Refletores abaixo deste estão praticamente horizontais, o que está de acordo com modelo exato. A região do reservatório pode ser visualizada (setas vermelhas) além da região de baixa velocidade (em 2.7 km aproximadamente).

Comparando os resultados das migrações, Figuras 5.2 e Figura 5.1, com o modelo exato Figura 3.15, temos que a migração que melhor se aproxima do modelo é a migração *pré-stack* em profundidade. Entretanto, não se pode esquecer que neste trabalho estamos utilizando o modelo de velocidade exato. O processamento e obtenção do modelo de velocidades para a migração não é objetivo deste trabalho. O objetivo foi o de criar um modelo 3D acústico cujo imageamento dos dados sísmicos obtidos neste modelo apresentasse características iguais às encontradas em modelos reais de alvos exploratório de bacias paleozóicas, como: eventos de *pull-up*, rugosidade, atenuação do sinal após as camadas de diabásio, para melhor entendimento do que ocorre nestas regiões.

5.1.3 Limitações do modelamento e perspectivas

Os resultados das seções migradas apresentam limitações devido a malha grosseira utilizada na criação e incorporação das propriedades físicas no modelo 3D acústico. Essa limitação se deve basicamente aos custos computacionais. Atualmente foi criado um modelo 3D acústico com a propriedade física distribuída em uma malha cuja a distância entre os nós é de 5m nas três direções. Em encontra-se em fase de modelamento sísmico.

6 CONCLUSÃO

Tendo em vista os aspectos observados, serão apresentados as conclusões e apontamentos finais do presente estudo relevando os aspectos metodológicos e construção do modelo e análise dos resultados. Seguem-se, posteriormente, as questões que ainda ficaram em aberto e por fim serão apresentadas as recomendações para trabalhos futuros.

Em termos metodológicos, foi observado que os estudos sobre as bacias paleozóicas são bastante amplos. O estudo de corpos ígneos nessas bacias e os problemas que eles ocasionam no sinal sísmico ainda constituem um desafio. Sabe-se porém, que essas estruturas estão associadas com a maturação ou destruição de hidrocarbonetos, levando-nos a perguntar como podemos melhorar o resultado sísmico nessas regiões e desenvolver novas metodologias de geometria de aquisição e processamento de dados sísmicos.

Neste trabalho foi apresentado um modelo acústico 3D de um alvo exploratório representativo de bacia paleozóica e resultados da simulação de levantamentos sísmicos em 2D objetivando modelar características de variação da espessura, forte heterogeneidade, rugosidade nas soleiras e forte contraste de impedância acústica entre as rochas sedimentares e a soleira. O modelo foi construído a partir de cinco seções sísmicas interpretadas, mapas de isópacas da região e dados de poço. Os dados foram carregados em um *software* de modelagem e com isso foi gerado um cubo de informações 3D, sendo logo em seguida realizada a aquisição sísmica 2D da região de maior espessamento da soleira, através de um programa de diferenças finitas. Os resultados apresentados neste trabalho estão baseados na seção 2D devido a limitações computacionais, mas como observamos o modelo obteve resultados satisfatórios e condizentes com o meio estudado.

Faz-se ainda necessário, como trabalho futuro, a incorporação de mais informações ao modelo. O refinamento da malha 3D com o modelo acústico, incorporação de falhas, refinamento da malha utilizada em diferenças finitas para o modelamento sísmico e a criação de um modelo elástico, constituem os novos desafios com o intuito de termos melhores aproximações do meio estudado.

Ainda que o modelo criado apresente limitações devido a malha grosseira, o mesmo apresenta fortes características do meio, podendo-se verificar que o modelo criado descreve os problemas de forma consistente aos encontrados em áreas com camadas de alta velocidade como ocorre nos alvos exploratórios das bacias paleozóicas.

REFERÊNCIAS

- CUNHA, P. R. C. et al. Bacia do amazonas. *Boletim Geociências da Petrobras*, 1994.
- DUARTE, O. *Dicionário Enciclopédico Inglês-Português de Geofísica e Geologia*. [S.l.]: SBGF, 2003.
- EIRAS, J. et al. Bacia do solimões. *Boletim de Geociências da PETROBRAS*, 1994a.
- FEIJÓ, F.; GÓES, A. Bacia do solimões. *Boletim de Geociências da PETROBRAS*, 1994a.
- KARRENBACH, M. *Elastic Tensor Wave Fields*. Tese (Doutorado) — Stanford University, 1995.
- LEVANDER, A. R. Fourth-order finite-difference p-sv seismograms. *Geophysics*, v. 53, n. n. 11, p. 1425–1436, 1988.
- MENDONÇA, P.; SPADINI, A.; MILANI, E. Exploração na petrobras: 50 anos de sucesso. *Boletim Geociências Petrobras*, nov. 2003/maio 2004.
- MILANI, E.; FILHO, A. T. Sedimentary basins of south america. *Tectonic Evolution of South America*, 2000.
- MILANI, E.; ZALÁN, P. An outline of the geology and petroleum systems of the paleozoic interior basins of south america. *Episodes*, 1999.
- MIZUSAKI, A. et al. Mesozoic and cenozoic igneous activity and its tectonic control in northeastern brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, p. 183–198, 2002.
- NETO, F. A. S.; COSTA, J. C. Modelagem acústica por diferenças finitas e elementos finitos em meios geologicamente complexos. *Rede Cooperativa de Pesquisa em Risco Exploratório*, 2006.
- ONIP; ON. Situação da sísmica terrestre brasil no projeto onipgeo. ONIP - Organização Nacional da Indústria do Petróleo e ON - Observatório Nacional, 1999.
- SANTOS, J. Considerações sobre a bacia cenozóica solimões. *Congresso Brasileiro de Geologia*, 1974.
- SANTOS, J. et al. A new understanding of the province of the amazon craton based on integration of field mapping and u-pb and sm-nd geochronology. *Gondwana Research*, 2000.
- SANTOS, V. R. de B. *Curso de Cálculo numérico*. [S.l.]: LTC, 1982.
- SATPAL, O. P. et al. Integrated interpretation for sub-basalt imaging in samashtra basin, india. *The Leading Edge*, p. 882–885, 2006.

WITHERS, R. et al. A case study of integrated hydrocarbon exploration through basalts. *Geophysics*, p. 1666–1679, 1994.

YILMAZ, O. *Seismic data analysis*. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 2001.