



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOFÍSICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ELYSTON CARLOS MELO MOURA

MODELAGEM SÍSMICA 3D: EXEMPLO DA BACIA DO AMAZONAS

BELEM

2008



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOFÍSICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

ELYSTON CARLOS MELO MOURA

MODELAGEM SÍSMICA 3D: EXEMPLO DA BACIA DO AMAZONAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Geofísica da Universidade Federal do Pará, para obtenção do título de Graduado em Geofísica.

Orientador: Dr. Pedro Chira Oliva

BELEM-PA
2008

ELYSTON CARLOS MELO MOURA

MODELAGEM SÍSMICA 3D: EXEMPLO DA BACIA DO AMAZONAS

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 de grau de bacharel em Geofísica.

Defendido e aprovado em: __27__/_06_/2008__

Conceito: __BOM__

Banca examinadora:

Prof. Dr. Pedro Chira Oliva - Orientador
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. João Carlos Ribeiro Cruz - Membro
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Marcos Welby Correa Silva - Membro
Universidade Federal do Pará

Aos meus pais Ana e Ely e irmã Elyana

AGRADECIMENTOS

A minha família por toda a ajuda e incentivo que recebi durante esses anos.

A Universidade Federal do Pará.

Ao professor Dr. Pedro Chira Oliva por toda a orientação e atenção no desenvolvimento deste trabalho.

A Faculdade de Geofísica (UFPA).

Ao consórcio GOCAD (França) pela utilização do software.

Aos amigos Herbert, Thiago Santa Rosa, Ana Carolina, Larissa, Roberta, Kivia, e Benildes.

RESUMO

Um problema frequentemente encontrado na exploração de petróleo e gás em algumas bacias sedimentares brasileiras é a presença de soleiras de diabásio intrudidas nas seqüências Paleozóicas. As soleiras de diabásio reduzem a qualidade do imageamento sísmico. A modelagem destas estruturas geológicas complexas permite o melhor entendimento destas, e conseqüentemente, o progresso no desenvolvimento de metodologias e tecnologias que minimizam seus efeitos nas diversas etapas da indústria de petróleo e gás. Nos últimos anos, diversas técnicas de modelagem e visualização vêm surgindo e ganhando uma nova importância na resolução de problemas encontrados durante a exploração de petróleo. O software de modelagem geológico e geofísico, chamado Geological Object Computer Aided Design (GOCAD) é uma destas técnicas. Neste trabalho, foi usado esta técnica para construir diversos modelos 3-D de uma parte de interesse para a PETROBRÁS referente a Bacia do Amazonas (Brasil). Este tipo de modelagem contribui na resolução e entendimento dos problemas produzidos pela presença das soleiras de diabásio nesta região, e também para testar a eficiência das diversas metodologias sísmicas na melhor iluminação deste tipo de estruturas geológicas complexas existentes na profundidade.

ABSTRACT

A problem frequently encountered in oil exploration in some Brazilian sedimentary basins is the presence of diabase sills intruded in the Paleozoic sequences. Diabase sills reduce the seismic imaging quality. The modeling of these complex geological situations allows the best understanding of them, and consequently the progress in the development of methodologies and technologies that minimize its effect in the diverse stages of the oil and gas industry. In the last years, diverse modeling and visualization techniques have appeared and gained a new importance in the resolution of problems found in oil exploration. The geological and geophysical modeling software called Geological Object Computer Aided Design (GOCAD) is one of these techniques. In this work was used this technique to build 3-D models of a area of interest of PETROBRAS referent to the Amazonas basin (Brazil). This type of modeling contributes in the resolution and understanding of the problems produced by the presence of diabase sills in this region. It is also important to verify the efficiency of diverse seismic methodologies to get a best illumination of these complex geological structures in deep.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Mapa de Localização da bacia do Amazonas (Wanderley Filho et al., 2006).....	5
Figura 2	Arcabouço estrutural da bacia do Amazonas (Brasil, Neves e Rodrigues, 1989).....	6
Figura 3	Carta estratigráfica da Bacia do Amazonas (modificada por Eiras e Matsuda, 1995).....	7
Figura 4	Seção C-D: As soleiras na bacia Amazonas ocorrem na seqüência evaporítica como na seqüência clástica (Wanderley Filho et al., 2006).....	8
Figura 5	Linhas sísmicas utilizadas para a modelagem da Bacia do Amazonas.....	9
Figura 6	Seções geológicas interpretadas (inline): linhas sísmicas 1 (topo) e 2 (base).....	10
Figura 7	Seções geológicas interpretadas (crossline): Linhas sísmicas 3 (lado esquerdo), linha sísmica 4 (parte central) e linha sísmica 5 (lado direito).....	12
Figura 8	Visualização 3-D do modelo estrutural de uma área de interesse da bacia do Amazonas.....	20
Figura 9	Outras visualizações do modelo estrutural da Bacia do Amazonas.....	22
Figura 10	Visualizações do modelo estratigráfico correspondente à área de estudo da Bacia do Amazonas.....	26
Figura 11	Visualizações 3-D do modelo de velocidades com uma função linear da profundidade.....	27

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	ASPECTOS GERAIS	12
2.1	BACIA DO AMAZONAS.....	12
2.1.1	LOCALIZAÇÃO.....	12
2.1.2	ARCABOUÇO ESTRUTURAL.....	12
2.1.3	ARCABOUÇO ESTRATIGRÁFICO.....	13
2.2	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	16
3	MODELAGEM E VISUALIZAÇÃO 3-D	17
3.1	MODELAGEM.....	18
3.1.1	MODELAGEM SÍSMICA.....	18
3.1.2	MODELAGEM E VISUALIZAÇÃO 3-D.....	18
4.	METODOLOGIA	19
4.1	FERRAMENTA DE MODELAGEM GOCAD.....	19
4.2	MODELO GEOLÓGICO 3-D.....	20
4.2.1	MODELO ESTRUTURAL 3-D.....	20
4.2.2	MODELO ESTRATIGRÁFICO 3-D.....	20
4.3	MODELO GEOFÍSICO 3-D.....	21
4.3.1	MODELO DE VELOCIDADES 3-D.....	21
5.	RESULTADOS	22
6.	CONCLUSÕES	28
	REFERENCIAS	29

1. Introdução

Devido às reservas de petróleo no mundo tornarem-se cada vez mais escassas, a indústria de petróleo e gás enfrenta o desafio de aumentar sua taxa de êxito em encontrar petróleo, e de recuperar mais petróleo dos poços já existentes. Então, novas técnicas com o auxílio da realidade virtual estão sendo cada vez mais usadas pela indústria petrolífera para aumentar a habilidade na busca de reservas de hidrocarbonetos e melhorar a eficiência na exploração de petróleo e gás.

Ferramentas de visualização 3-D foram introduzidas na década dos anos 90, porém seu uso no processo de interpretação foi limitado. A visualização 3-D facilita muitas fases do processo de interpretação. Métodos de visualização de volumes 3-D foram desenvolvidos para direcionar os problemas de interpretação. Existem dois tipos gerais de visualização: superfície e volume. A *visualização por superfície* consiste na utilização de superfícies, ou superfície baseada em objetos no espaço 3-D. Já a *visualização por volume* consiste em um processo de aplicar opacidade (transparência) para um subconjunto isolado de dados sísmicos 3-D, para mostrar seus fatores internos. Além disso, a visualização por volume é o processo específico de mostrar em que consistem os dados e a *interpretação de volume* é sua interpretação propriamente dita (Kidd and Montilla, 2003).

Existem diferentes softwares para visualização e modelagem 3-D. Geological Object Computer Aided Design (GOCAD) pertence a este grupo. Este software é um produto da empresa PARADIGM. Anteriormente fazia parte do consórcio GOCAD (<http://www.earthdecision.com>).

Antunes et al (2004) usaram este software para construir modelos 3-D em algumas bacias sedimentares brasilienses. As facilidades apresentadas para a construção de modelos coerentes com o atual background geofísico e geológico, foram etapas fundamentais para o estudo dos comportamentos mecânicos e termais destas bacias.

De Lima et al. (2005) modelaram o reservatório de Mossoró (Natal) e visualizaram dados obtidos a partir de algoritmos de percolação. Isto é importante no estudo de injeção alternativa de água e gás na recuperação de petróleo.

Bender et al (2001) modelaram termomecanicamente a Bacia do Solimões a partir de dados geológicos e geofísicos para entender o processo de maturação da

matéria orgânica nesta bacia. Segundo os autores, as soleiras de diabásio exerceram um papel importante neste processo de maturação.

As soleiras de diabásio são uma problemática para a exploração geofísica por se tratarem de rochas que dificultam a penetração das ondas sísmicas. A dificuldade em processar dados sísmicos de baixa qualidade proveniente de áreas com feições geológicas complexas associadas à ocorrência de rochas magmáticas, como as das bacias do Amazonas e do Solimões, surge do fato de que as soleiras de diabásio perturbam o sinal e causam efeitos que geralmente remetem à interpretações equivocadas quanto a existência de estruturas (Eiras e Wanderley Filho, 2002; Garabito et al., 2003; Wanderley Filho et al., 2006).

Existem diversos trabalhos que tratam sobre as soleiras de diabásio nas bacias paleozóicas amazônicas abordando estudos de modelagens sísmicas, aplicação de técnicas convencionais e não-convencionais de imageamento sísmico (e.g. Garabito et al. 2003; Lima et al., 2003; Nazaré et al., 2005, Lima, 2006; Nazaré, 2007, entre outros).

Com a finalidade de entender melhor este tipo de estruturas geológicas complexas, as soleiras de diabásio, neste trabalho foi utilizado o software GOCAD para modelar e analisar uma determinada área de interesse da PETROBRÁS na Bacia do Amazonas. Os modelos construídos foram: estrutural, estratigráfico e de velocidades. Estes modelos permitem entender melhor este tipo de estruturas presentes na região amazônica, e testar a eficiência de métodos de imageamento sísmico para iluminar melhor estas estruturas complexas em profundidade.

2. Aspectos Gerais

2.1. Bacia do Amazonas

A bacia do Amazonas pertence ao grupo de bacias Paleozóicas brasileiras, que são extensas áreas intrudidas nas antigas regiões cratônicas e ocupam aproximadamente a quarta parte do país. Suas seqüências paleozóicas depositadas têm registros de algumas incursões marinhas, mas, o preenchimento sedimentar é essencialmente silicoclástico.

2.1.1. Localização

Esta bacia cobre aproximadamente 500.000 km do norte do Brasil (Figura 1), situada na floresta amazônica. Situada geologicamente entre as rochas pré-cambrianas das províncias Rio Branco e Tapajós, a bacia é limitada ao Norte pelo Escudo das Guianas, ao Sul pelo Escudo Brasileiro, à Leste pelo Arco de Gurupá (separando-a da Bacia do Marajó), e à Oeste pelo Arco do Purus (separando-a da Bacia do Solimões) (Figura 1).



Figura 1. Mapa de Localização da bacia do Amazonas (Wanderley Filho et al., 2006).

2.1.2. Arcabouço Estrutural

A origem da bacia do Amazonas está relacionada a esforços do fim do Ciclo Brasileiro, no Proterozóico Superior. Nesta ocasião, o *rift* que daria origem ao rio Amazonas, resultaria da distensão norte-sul causada por esforços compressivos

Leste-Oeste, responsáveis pela reativação da faixa de dobramento Araguaia-Tocantins (Neves e Rodrigues, 1989) (Figura 2).



Figura 2. Arcabouço estrutural da bacia do Amazonas (Brasil, Neves e Rodrigues, 1989).

De acordo com Cordani et al. (1984), o substrato proterozóico da bacia é constituído por rochas ígneas, metamórficas e vulcanossedimentares das províncias estruturais e geocronológicas Amazônia-Central e Maroni-Itacaiunas. Na região do Arco de Purus, ocorrem também rochas sedimentares proterozóicas do Grupo Purus, depositadas num sistema de bacias tipo *rift* englobadas principalmente nas Formações Prosperança e Acará (Eiras e Matsuda, 1995, Figura 3).

O arcabouço estrutural da bacia apresenta-se com duas extensas plataformas (uma ao Norte e outra ao Sul) e uma calha central segmentada nas direções Leste-Oeste e Sudoeste-Nordeste, separadas das plataformas por duas linhas de charneira, além dos arcos regionais limitantes da bacia (Neves e Rodrigues, 1989) (Figura 2).

2.1.3. Arcabouço Estratigráfico

O arcabouço estratigráfico fanerozóico da bacia atinge cerca de 6.000 metros de espessura (Figura 3) e pode ser dividido em duas seqüências de primeira ordem: uma paleozóica cortada por diques e soleiras de diabásio, e outra mesozóico-cenozóica.

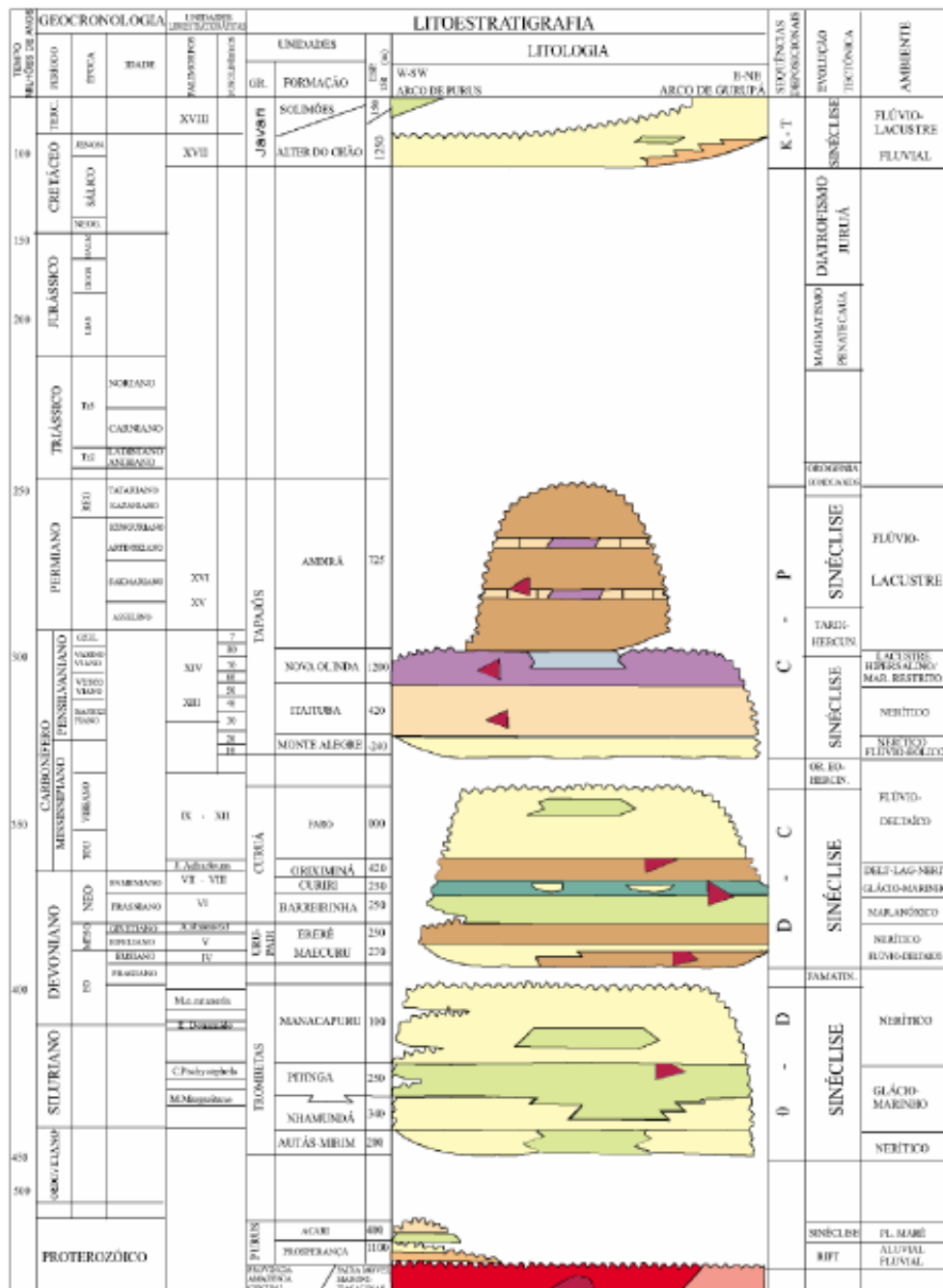


Figura 3. Carta estratigráfica da bacia do Amazonas (modificada por Eiras e Matsuda, 1995)

Sob o ponto de vista da exploração petrolífera, a seqüência paleozóica é a mais importante, devido nela estarem contidas as rochas: geradora, reservatório e selante. De acordo com Eiras e Matsuda (1995), essa seqüência pode ser

subdividida em três seqüências de segunda ordem, limitadas por discordâncias regionais (Figura 3):

- (1) **Neo-ordoviciano - Eodevoniana**: que corresponde litoestratigraficamente ao Grupo Trombetas;
- (2) **Eodevoniano - Eocarbonífera**: representada pelos Grupos Urupadi e Curuá;
- (3) **Neocarbonífero - Permiana**: que consiste no Grupo Tapajós.

Segundo Eiras e Matsuda (1995), a seqüência clástica neo-ordoviciano-eodevoniana foi depositada a partir da primeira invasão marinha paleozóica ocorrida na bacia, cujo ingresso proveio de Leste, consistindo essencialmente de clásticos fluviais, marinhos e glaciais, representados pelo Grupo Trombetas. A sedimentação da seqüência eodevoniano-eocarbonífera ocorreu durante o segundo evento de subsidência e ingresso marinha na bacia, igualmente proveniente de Leste, e representada pelos Grupos Urupadi e Curuá (Figura 3). Uma nova subsidência acompanhada de uma significativa mudança climática, de frio para quente e árido, condicionou a deposição da seqüência químico - evaporítica neocarbonífera-permiana. Nessa ocasião, a invasão marinha proveniente de Oeste, submergiu campos de dunas eólicas da bacia do Solimões, recobrando o Arco de Purus, havendo interligação das bacias do Solimões e do Amazonas. A deposição evoluiu de clásticos fluviais, eólicos e marinho-rasos no início, para carbonatos e depósitos marinho-normais a lacustre hipersalinos e, posteriormente, clásticos fluvio-lacustres e mais raramente evaporitos da fase regressiva. Essa seqüência é representada pelo Grupo Tapajós (Damasceno, 2000) (Figura 3). No Jurotriássico, a bacia foi palco de eventos magmáticos relacionados à abertura do Atlântico e aos possíveis efeitos da orogenia e subducção de alto ângulo ocorridas na zona andina, registrados através dos diques e soleiras de diabásio que cortam a seção pré-cretácea (Eiras e Matsuda, 1995).

Após um longo período de exposição e intensa erosão das rochas paleozóicas, auxiliado também pelos soerguimentos causados pelas intrusões de soleiras de diabásio, iniciou-se a deposição da seqüência de primeira ordem mesozóico-cenozóica representada pelo Grupo Javari (Eiras e Matsuda, 1995, Figura 4).

De acordo com Eiras e Matsuda (1995), a bacia do Amazonas foi submetida a um evento transformador transcorrente transtensivo, na borda Leste e transpressivo

na borda Oeste, apesar de não ter sofrido grandes interferências da tectônica Juruá, de idade provavelmente jurocretácea.

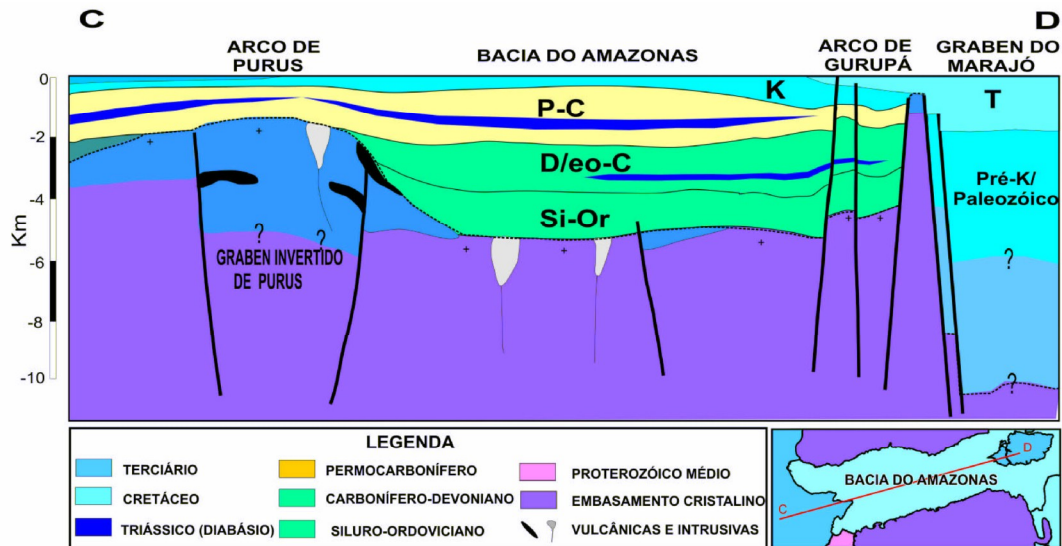


Figura 4. Seção C-D: As soleiras na bacia Amazonas ocorrem na seqüência evaporítica como na seqüência clástica (Wanderley Filho et al., 2006).

2.2. Caracterização do Problema

Nas bacias sedimentares paleozóicas amazônicas, a geração e acumulação de hidrocarbonetos estão relacionadas à presença de soleiras de diabásio. A presença destas rochas ígneas intrudidas nas seqüências paleozóicas (e.g. bacias de Solimões e Amazonas) é um dos principais problemas na pesquisa petrolífera destas áreas. Estas rochas intrusivas têm velocidades sísmicas relativamente maiores que as rochas sedimentares de parede, entre 4000 m/s e 6000 m/s aproximadamente.

Diques e soleiras de diábasio reduzem a qualidade do imageamento sísmico devido a que causam perda do sinal (razão sinal/ruído baixa), formação de reflexões múltiplas, divergência esférica; e também podem prejudicar a interpretação dos dados, pela formação de falsas estruturas produzidas pelos efeitos pull-up e pull-down. Particularmente, as terminações e os saltos de soleiras agravam estes problemas (Imagam, 2002), que podem ser sumarizados como segue:

- saltos de soleira ou variações abruptas na espessura das mesmas podem causar ondas difratadas,

- terminações de soleiras podem causar variações laterais da velocidade, difração e efeitos pull-up e pull-down com conseqüente formação de falsas estruturas;
- áreas intensamente fraturadas pelo tectonismo associado ao magmatismo pode ocorrer difração das ondas ou variações de velocidade nas camadas devido à presença de fluidos nos espaços porosos dos planos de fratura;
- ocorrência de soleiras imediatamente abaixo da superfície de discordância que separa as seqüências paleozóica e cretácea pode causar perda do sinal e/ou múltiplas, em virtude da grande diferença de velocidade entre elas.

3. Modelagem e Visualização 3-D

3.1. Modelagem

Modelagem é o conjunto de métodos matemáticos usados para produzir um modelo de topografia, geometria e propriedades petrofísicas de um objeto geológico em estudo, tendo em conta todos os tipos de dados relativos a esses objetos. Permite observar as partes internas de uma determinada estrutura, gerando, por exemplo, uma imagem de um possível reservatório geralmente enterrado milhares de metros abaixo da superfície e cujos limites são desconhecidos (Blazy et al., 2008).

Em uma modelagem podemos simular os efeitos a partir de um modelo físico ou matemático, ou utilizar um modelo físico correspondente aos efeitos observados. Os modelos podem ser de dois tipos: analógico e digital.

- *Modelagem Analógica*: modelagem na qual um objeto em estudo é reproduzido com matérias substitutas e freqüentemente em escala diferente da original. Em geofísica são micros-levantamentos feitos sobre um modelo físico em escala reduzida.
- *Modelagem computacional ou digital*: são processos matemáticos feitos geralmente com auxílios de computadores e softwares. Procura-se sintetizar a seção sísmica correspondente a um modelo geológico (modelo direto) ou modelo geológico correspondente aos dados sísmicos (modelo inverso), de

um sistema, estrutura, entre outros, e constituído por camadas sob postas, além de fazer uso das técnicas de modelagem acústica e elástica que utilizam as ondas P e ondas P e S em seus modelos, respectivamente.

3.1.1 Modelagem sísmica

A modelagem sísmica é gerada a partir de um modelo que possibilite representar uma provável situação de estruturas complexas no ambiente geológico em estudo. A finalidade é testar a eficiência dos métodos convencionais assim como de novas metodologias.

Com essa finalidade é possível determinar uma estratégia utilizando parâmetros, atribuindo, hipóteses e um novo algoritmo, em que, esses dados sísmicos do modelo mostrarão sua competência para realizar pesquisas e obter resultados satisfatórios com a criação do modelo, fazendo assim da modelagem uma importante ferramenta, principalmente na geofísica, na obtenção de estruturas significativas na exploração de hidrocarbonetos.

3.1.2. Modelagem e visualização 3-D

Em subsuperfície as estruturas geológicas complexas (como por exemplo, falhas, diques, soleiras, dobras, domos de sal, etc) são difíceis de serem imageadas pela sísmica, e em muitos casos reduzem a qualidade do imageamento sísmico. Essa dificuldade se dá pelo fato de que nestas estruturas complexas as ondas sísmicas se difratam produzindo imagens distorcidas, mesmo que se apliquem técnicas avançadas de migração em seu processamento.

Existem vários processos e metodologias para melhorar o imageamento sísmico e reduzir os freqüentes problemas encontrados na exploração petrolífera nas bacias sedimentares. A modelagem pertence a esse grupo de metodologias.

A modelagem de situações geológicas complexas permite uma melhor compreensão das mesmas, e conseqüentemente, desenvolvem tecnologias e metodologias que minimizem seus efeitos nas diversas fases da indústria do petróleo e de gás.

Nos últimos anos, diversas técnicas de modelagem e visualização têm aparecido, ganhando assim, uma nova importância na resolução de problemas encontrados na exploração de hidrocarbonetos.

A modelagem 3-D constitui-se numa ferramenta importante para auxiliar na interpretação geológica e sísmica, e ajudar a identificar possíveis reservatórios ou áreas de aprisionamento de hidrocarbonetos em uma bacia sedimentar, de modo que essa visualização seja possível em todos os pontos, tornando-se um processo específico que mostrará o que está por trás do volume de dados para serem interpretados.

A construção de modelos 3-D é passo fundamental para o estudo do comportamento físico, mecânico, podendo obter e oferecer melhores imagens das áreas de interesse e assim, melhores resultados; contribuindo para estudos de modelagem geofísica e exploração petrolífera. Através da visualização do modelo, podemos ter uma visão geral ou parcial das estruturas em subsuperfície.

4. Metodologia

Neste capítulo será explicado resumidamente a metodologia utilizada e as etapas que proporcionaram a construção dos modelos geológico e geofísico.

4.1. Ferramenta de Modelagem GOCAD

Neste trabalho foi utilizado o software GOCAD (Geological Object Computer Aided Design) que faz parte do consórcio GOCAD (França). É um software de modelagem computacional utilizado na geofísica e na geologia, com a finalidade de ajudar a direcionar e facilitar a interpretação relacionada com as estruturas geológicas complexas como: falhas, dobras, domos, soleiras, diques, etc. São diversas as aplicações deste software na geologia e na geofísica como, por exemplo, modelagem de estruturas complexas, modelagem de bacias sedimentares, etc (Chira, 2007).

O GOCAD possui um conjunto de módulos em que podem ser modeladas várias estruturas como a modelagem estrutural, modelagem estratigráfica, modelagem de velocidades e reservatórios, interpretação sísmica e geológica. Neste trabalho serão construídos modelos geológicos, (estruturais e estratigráficos), e geofísicos (modelos de velocidade) de uma área de interesse correspondente da Bacia do Amazonas.

Vários são os autores que utilizaram o software GOCAD em seus trabalhos para a construção de modelagem e visualização (e.g. Antunes et al. 2004; Chira et al. 2008). Devido às vantagens deste software foi utilizado para modelar as

estruturas geológicas complexas tipo soleiras de diabásio e construir o modelo de velocidades nesse trabalho.

Este trabalho visa a modelagem de uma área de interesse da bacia do Amazonas. Esta área apresenta soleiras de diabásio. Os dados utilizados foram reais fornecidos pela PETROBRAS.

4.2. Modelo Geológico 3-D

O modelo geológico está representado pelos modelos:

- Estrutural: representado pelos horizontes (interfaces) e pelas falhas da estrutura (se houver).
- Estratigráfico: é a construção de camadas.

A construção do modelo estratigráfico só é possível a partir da construção do modelo estrutural. Apresentaremos agora as etapas de construção dos modelos.

4.2.1 Modelo Estrutural 3-D

Nesta etapa foi utilizado o módulo “*Building a Structural Framework*”. Este módulo é utilizado para construção de modelos estruturais com o objetivo de realizar simulações de uma determinada área que apresente ou não estruturas geológicas falhadas.

Para a construção do modelo estrutural 3-D serão consideradas as seguintes etapas (Gocad, 2006):

- Importar arquivos com dados dos horizontes.
- Criar superfícies dos horizontes.
- Caracterizar cada estrutura (horizonte neste caso).
- Construção do modelo estrutural.

4.2.2. Modelo Estratigráfico 3-D

Para a construção do modelo estratigráfico foi utilizado o módulo “*3-D reservoir grid builder*”. Este módulo facilita a construção de modelos estratigráficos, também chamados de grids estratigráficas ou malhas de reservatórios 3-D.

O módulo para construção de reservatórios 3-D apresenta duas opções antes de editar ou atualizar a malha para construir os modelos: construção das interfaces e usando grids 2-D.

A construção do modelo estratigráfico foi realizada em duas etapas: construção de superfícies e edição ou atualização dos grids estratigráficos.

A primeira etapa é controlada pelas estruturas do topo e da base. Essas malhas são construídas com a finalidade de distribuir as propriedades do reservatório e realizar uma simulação do fluxo dos fluidos. Para sua construção utilizaram-se todos os dados do modelo estrutural.

As etapas para a construção de um modelo estratigráfico são as seguintes (Gocad, 2006):

- Selecionar o método para construir as malhas do reservatório.
- Selecionar o topo e a base dos horizontes do reservatório.
- Selecionar o método para construir a malha.
- Preparar os horizontes topo e base.
- Associar os horizontes topo e base.
- Criar a malha da área de estudo.
- Definir as unidades estratigráficas intermediárias.
- Construir a malha do reservatório.
- Definir as camadas dentro das unidades estratigráficas.
- Construir a malha do reservatório propriamente dito.

4.3. Modelo Geofísico 3-D

O modelo geofísico corresponde ao modelo de velocidades que é construído a partir dos modelos geológicos. Neste modelo é adicionado aos modelos geológicos, mais precisamente para cada camada, um valor de velocidade. A seguir apresentam-se as etapas de construção do modelo de velocidades.

4.3.1. Modelo de Velocidades 3-D

Para a construção do modelo de velocidades foi utilizado o módulo “*Velocity Modeling*”. Este módulo permite construir malhas 2-D e 3-D e realizar conversões tempo-profundidade através da modelagem da coluna geológica completa, localizando exatamente reservatórios e delimitando importantes perfurações de risco na cobertura. O modelo de velocidades exato melhora a qualidade da imagem e também os resultados de perfuração em ambientes com desafios sob a orientação de modelos 3-D específicos.

O software GOCAD define duas formas para construir modelos de velocidades 3-D: Voxet Model e 3-D model. O *Voxet model* é um volume com uma malha que está confinada a uma grid do voxet. Este modelo é um volume limitado que consiste de sub-volumes com grids chamados de camadas.

A forma usada para construir o modelo de velocidades de foi o Voxet Model. Pode ser útil construir um voxet model para verificar a validade das camadas. Em um voxet model, o voxet deve ser menor que todas as superfícies que cortarão as paredes do voxet, gerando camadas (Gocad, 2006).

Para verificar a consistência das velocidades, podem ser mostradas seções transversais através do cubo de velocidades com horizontes sísmicos. Este cubo de velocidades apresenta um grid retangular tridimensional.

As etapas para a construção do modelo de velocidades são as seguintes (Gocad, 2006):

- Criar um Voxet a partir dos vértices ou vetores,
- Adicionar o especificar as superfícies que serão incluídas em um Voxet Model,
- Construir o Voxet Model,
- Criar um modelo com a propriedade (neste caso, a velocidade).
- Determinar os valores da propriedade para as diversas camadas que constituem o modelo de velocidades.
- Visualização do modelo.

5. Resultados

Para a modelagem geológica e geofísica de uma determinada área da bacia do Amazonas foram consideradas: linhas sísmicas (Figura 4), seções geológicas interpretadas (Figura 5) e dados de registros de poços da área de estudo. Após estas informações e seguindo as etapas anteriores para modelagem, foram construídos os mesmos e apresentados a continuação.

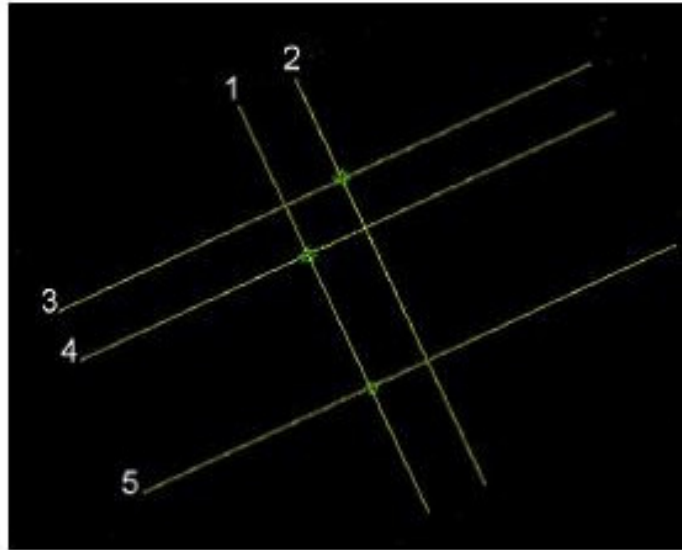


Figura 5. Linhas sísmicas utilizadas para a modelagem da Bacia do Amazonas.

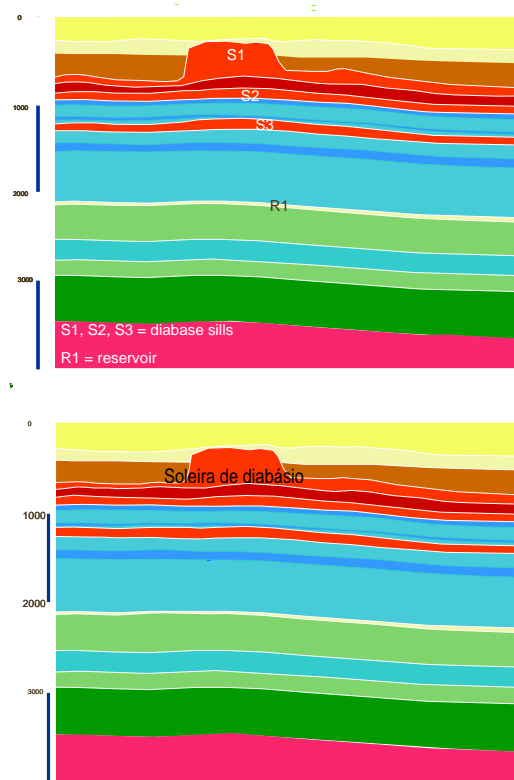


Figura 6. Seções geológicas interpretadas (in line): linhas sísmicas 1 (topo) e 2(base).

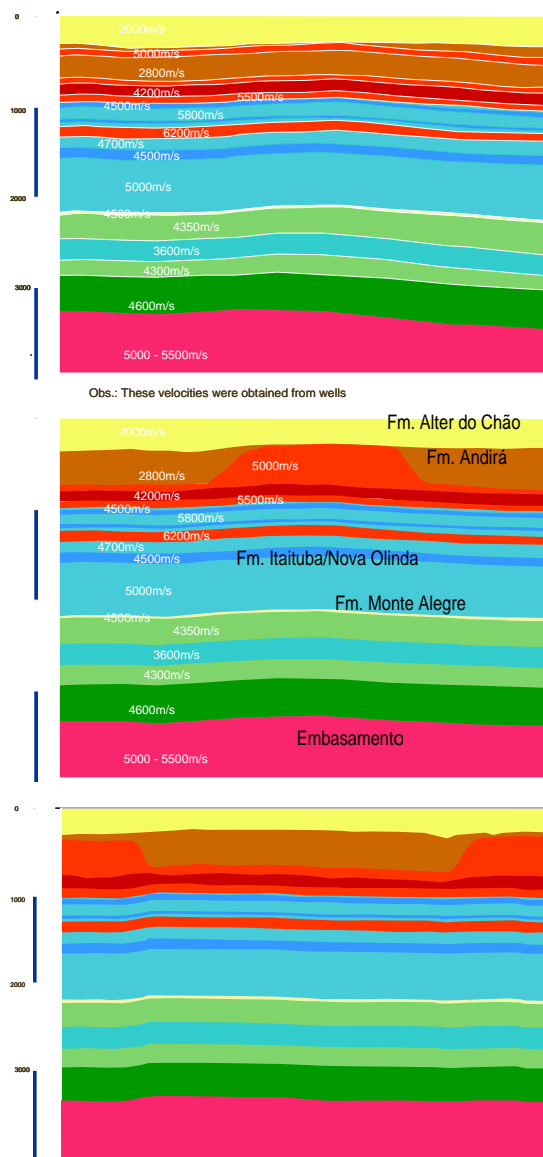


Figura 7. Seções geológicas interpretadas (crossline): Linhas sísmicas 3 (lado esquerdo), linha sísmica 4 (parte central) e linha sísmica 5 (lado direito).

Para construir o modelo geológico foram considerados dezenove refletores e vinte camadas (Figuras 6). O modelo apresenta as seguintes dimensões: 13 km de extensão, 17 km de largura e 4 km de profundidade. Neste modelo, a presença de três soleiras de diabásio e um fino reservatório é distinguida.

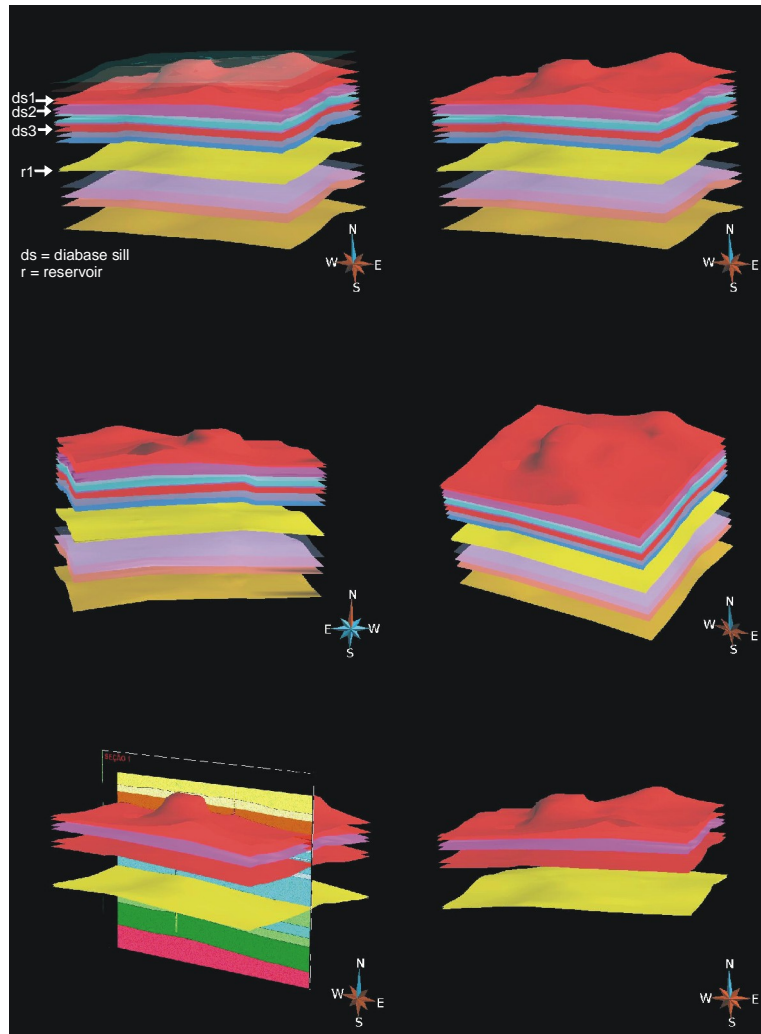


Figura 8. Visualização 3-D do modelo estrutural de uma área de interesse da bacia do Amazonas.

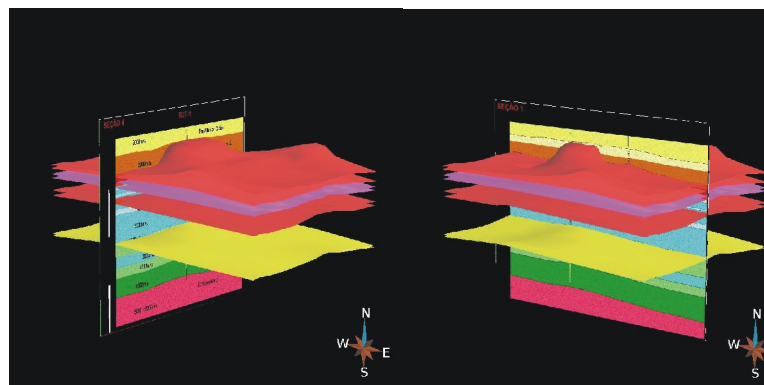


Figura 9. Outras visualizações do modelo estrutural da Bacia do Amazonas.

Para construir o modelo estratigráfico da área de estudo desta bacia (Figuras 9) foram usados as superfícies do modelo estrutural.

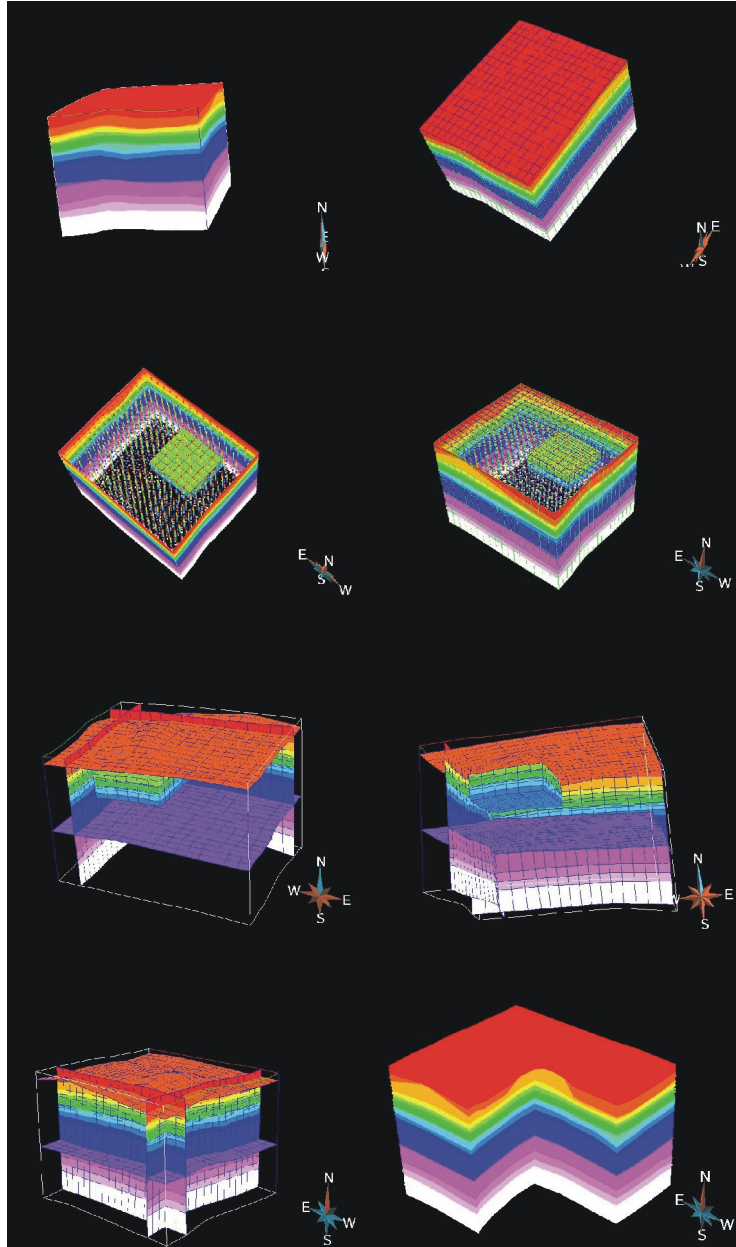


Figura 10. Visualizações do modelo estratigráfico correspondente a área de estudo da Bacia do Amazonas.

Finalmente foi construído o modelo de velocidades baseado nas velocidades intervalares e as seções geológicas interpretadas. O cubo de velocidades apresenta

um grid retangular tridimensional. Foi considerada a velocidades como uma função linear da profundidade

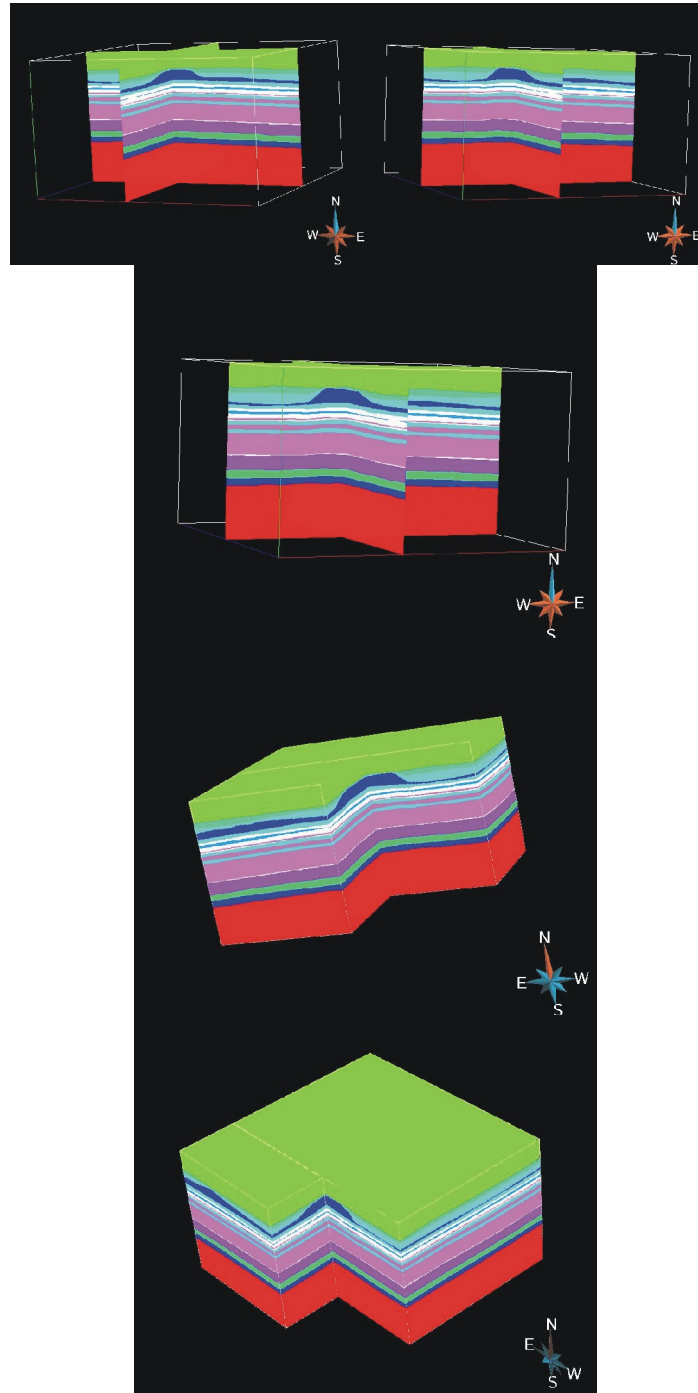


Figura 11. Visualizações 3-D do modelo de velocidades com uma função linear da profundidade.

6. CONCLUSÕES

- Com a finalidade de estudar as estruturas geológicas complexas de uma determinada área de interesse da Bacia do Amazonas são apresentadas as diversas modelagens correspondentes ao modelo estrutural, estratigráfico e de velocidades.
- Este tipo de modelagem contribui na resolução e entendimento dos problemas produzidos pela presença das soleiras de diabásio na região amazônica, e também para testar a eficiência das diversas metodologias sísmicas na melhor iluminação deste tipo de estruturas geológicas complexas existentes na profundidade.
- Aplicações destes modelos geológicos e geofísicos nesta área de estudo resultaram na identificação de três soleiras de diabásio e de uma fina camada correspondente ao reservatório da Formação Monte Alegre.
- O modelo de velocidades obtido pode ser utilizado como dado de entrada na migração em profundidade.
- O modelo de velocidades gerado pode também ser usado para melhorar a qualidade do imageamento sísmico e os resultados na perfuração nesta área complexa da região amazônica.
- Podem ser gerados a partir deste modelo de velocidades, outros modelos de velocidades como, por exemplo, a velocidade RMS (root-mean-square), velocidade intervalar, ou a velocidade média ou ser convertidas para obter propriedades das rochas.

REFERÊNCIAS

BLAZY, P., BITEAU, J.-J., GIAFFERI, J.-L., ANDRÉINI, J.-C., BÉRAUD, J.-F., RICOUR, J., CASES, J.-M., POIRIER, J.-E., MALLET, J.-L., CHAUSSIDON, M., MARTY, B., BARD, E., 2008. **Understanding the future. Geomodeling: helping to make decisions.** Ecole Nationale Supérieure de Géologie press. Editions Hirlé, Paris, 197 pp, 2008.

ANTUNES, P. d. T. S., BENGALY, A. P., CONCEIÇÃO, D. L. R., LANDAU, ., and BEDREGAL, R. P. **Three-dimensional Geometric Modeling of Sedimentary Basins using GOCAD.** 24th GOCAD Meeting (France), 2004.

BENDER, A. A., EIRAS, J. F., WANDERLEY FILHO, J. R.; BARBOSA FILHO, C. M. **Quantificação 3D da evolução termal da Bacia do Solimões e suas implicações petrolíferas, 200.** In: VII SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA. Belém. CD-ROM. Belém: Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo Norte, 2001.

CORDANI, U.G., NEVES, B. B. B., FUCK, R.A., PORTO, R., THOMAZ FILHO, A., CUNHA, A.F. **Estudo preliminar de integração do Pré-cambriano com eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras.** PETROBRAS, Série Ciência Técnica Petróleo: Exploração de Petróleo, Rio de Janeiro, 15-70, 1984.

CHIRA, P. **Minicurso sobre GOCAD.** Instituto de Estudos Costeiros – Campus Bragança (UFPA), 2007.

CHIRA, P., CRUZ, J. C. R., MOURA, E. M., NEVES, H. D., CARDOSO, M. DA S.. **3-D velocity and structural modeling of Brazilian Amazonas paleozoic basin** In: 28th Gocad Meeting (França), 2008.

DAMASCENO, B. C. **Gipsita do Rio Cupari, região Centro-Oeste do Estado do Pará.** Informe de Recursos Minerais: Série Oportunidades Minerais - Exame Atualizado de Projeto. Belém: CPRM, 2000. n. 9, v.1, 26p. In: BRASIL. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/opor/pdf/gipsita.pdf>> Acesso em: 15 de Fevereiro de 2006.

DE LIMA, C. M., BEZERRA, S. J., DE FREITAS, J. E., and CHIRA, P. **Visualização 3D utilizando GOCAD em ambiente imersivo Reality Center:** II Workshop da Rede Cooperativa de Pesquisa em Risco Exploratório em Petróleo e Gás, Belém (Brazil), 2005.

EIRAS, J. F.; WANDERLEY FILHO, J.R. **Ocorrências de petróleo relacionadas a rochas magmáticas fanerozóicas.** In: SIMPÓSIO SOBRE VULCANISMO E AMBIENTES ASSOCIADOS, 2., 2002, Belém. Boletim de resumos e roteiro de excursão. Belém: Núcleo PRONEX do Centro de Geociências da UFPA, p.54, 2002.

EIRAS, J. F.; MATSUDA, N. S. **Roteiro geológico do paleozóico do rio Tapajós, borda Sul da Bacia do Amazonas. Pará.** Belém. Petrobras/E&P AM. (Relatório Interno), 1995.

GARABITO, G., CRUZ, J. C. R., HUBRAL, P., COSTA, J.. **Application of the CRS stack to seismic data of Amazon paleozoic basin.** In: INTERNATIONAL CONGRESS OF BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 8, 2003, Rio de Janeiro. **Expanded abstracts.** Rio de Janeiro: SBGf, CDROM, 2003.

GOCAD. **Gocad 2.1.4. user's guide.**: GOCAD consortium, 2006.

IMAGAM. **Projeto de Pesquisa intitulado "Imageamento sísmico em Bacias Paleozóicas com soleiras de diabásio na Região Amazônica"**.: Relatório Técnico. Financiamento: CTPETRO-FINEP/PETROBRAS/FADESP/UFPA, 2002.

KIDD, G. D., and MONTILLA, G. J. T. **Practical volume visualization methods for imaging complex structures,** North Eastern Venezuela: Eight International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 2003.

LIMA, C. C. A.; GARABITO CALLAPINO, G.; EIRAS, J. F. **Modelagem sísmica por diferenças finitas – o exemplo da Bacia do Solimões.** In: INTERNATIONAL CONGRESS OF BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 8, 2003, Rio de Janeiro. **Expanded abstracts.** Rio de Janeiro: SBGf, CD-ROM, 2003.

LIMA, C. C. A. **Um novo algoritmo para a implementação do método de empilhamento SRC 3D e modelagem sísmica da Bacia do Amazonas.** Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 89 p., 2006.

NAZARÉ, C. P. P.. **Processamento Sísmico CMP E CRS de dados sintéticos acústicos e elásticos representativos das Bacias Paleozóicas da Região Amazônica.** Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 100 p., 2007.

NAZARÉ, C. P. P., GARABITO, G., EIRAS, J., E PASCHOAL, W.. **Aplicação dos métodos PMC e SRC em dados sísmicos sintéticos de um modelo representativo da Bacia do Solimões, Região Amazônica,** Brasil. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 9, Salvador. **Expanded abstracts.** Salvador: SBGf, CD-ROM, 2005.

NEVES, C. A. O., AND RODRIGUES, R. **Integração geológica e exploratória da bacia do Amazonas:** PETROBRAS/DENOC, 1989.

WANDERLEY FILHO, J. R.; TRAVASSOS, W. A. S.; ALVES, D. B. **O diabásio nas bacias paleozóicas amazônicas - herói ou vilão?** Boletim Geociências da Petrobras, v.14, n.1, p.177-184, nov./2005-maio/2006.