



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

EDUARDO NASCIMENTO PAIXÃO

**MODELAGEM 3D SISMO-ESTRATIGRÁFICA E ESTRUTURAL DE
UMA ÁREA ALVO DA BACIA DO PARNAÍBA**

**BELÉM - PARÁ
MARÇO - 2013**

EDUARDO NASCIMENTO PAIXÃO

**MODELAGEM 3D SISMO-ESTRATIGRÁFICA E ESTRUTURAL DE
UMA ÁREA ALVO DA BACIA DO PARNAÍBA**

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

Orientador: Prof. Dr. João Carlos Ribeiro Cruz.

Belém
2013

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

Paixão, Eduardo Nascimento

Modelagem 3D sísmo-estratigráfica e estrutural de uma
área alvo da Bacia do Parnaíba / Eduardo Nascimento
Paixão; Orientador: João Carlos Ribeiro Cruz – 2013

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação em
geofísica) – Universidade Federal do Pará, Instituto de
Geociências, Faculdade de Geofísica, Belém, 2013.

1. Geofísica. 2. Modelagem 3D. 3. Modelo. 4. Bacia do
Parnaíba. I. Cruz, João Carlos Ribeiro, *orient.* II. Universidade
Federal do Pará. III. Título.

CDD 22^a ed.: 550

EDUARDO NASCIMENTO PAIXÃO

**MODELAGEM 3D SISMO-ESTRATIGRÁFICA E ESTRUTURAL DE
UMA ÁREA ALVO DA BACIA DO PARNAÍBA**

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

Data de aprovação: ____ / ____ / ____

Conceito: _____

Banca examinadora:

Prof. João Carlos Ribeiro Cruz - Orientador
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará

Prof. Pedro Andrés Chira Oliva - Membro
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará

Prof. Manuel de Jesus dos Santos Costa - Membro
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Pedro e Edilva, pela paciência que tiveram comigo e por possibilitarem que eu pudesse terminar meus estudos.

Às minhas Tias, Júlia e Ana, pelo incentivo e apoio.

À minha família, que sempre me apoiou.

Ao Prof. Dr. João Carlos Ribeiro Cruz, por ter aceitado ser meu orientador, pelo apoio e condições materiais oferecidos e pela orientação.

Ao Prof. Dr. Pedro Andrés Chira Oliva, pelos ensinamentos iniciais deste trabalho e por aceitar participar da banca examinadora.

Ao Prof. Dr. Manuel de Jesus dos Santos Costa, por aceitar participar da banca examinadora.

À Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) pelo fornecimento dos dados sísmicos utilizados neste trabalho.

À Universidade Federal do Pará, pelos equipamentos e espaço cedido durante minha formação acadêmica.

Aos professores da CPGF/UFPA, pelos conhecimentos e conselhos a mim transmitidos.

Aos meus amigos Rafael Mansano, Diogo Maia e Celina Monteiro que foram imprescindíveis durante todo o curso de Geofísica.

À minha namorada Wanessa, pelo apoio e incentivo.

Aos meus amigos Rodrigo Santos, Jonathas Maciel, Rafael Dalmácio, Rizimar, Jéssica Lia e Isis, por sempre serem solícitos comigo.

A todos os companheiros da Turma de 2009, que compartilharam muitos trabalhos durante o Curso comigo.

A todos os companheiros da Turma de 2008, que fizeram parte do meu início de Curso.

E a todos os colegas da Geofísica.

RESUMO

O presente trabalho consiste na reconstrução 3D de possíveis alvos exploratórios a partir de dados do projeto da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), nomeado de 0295_ANP_2D_PARNAÍBA. Os dados estão localizados na porção sudeste da Bacia do Parnaíba. Essa bacia é do tipo intracratônica da era paleozóica localizada na região nordeste ocidental brasileira, posicionada entre grandes faixas de dobramento onde se encontram depositados sedimentos desde o Ordoviciano até o Terciário, com eventos magmáticos no Mesozóico. Nesse contexto; este trabalho mostra os resultados da modelagem 3D sísmo-estratigráfica e estrutural, das estruturas geológicas mapeadas por oito linhas sísmicas 2D, denominadas 0295-0001, 0295-0002, 0295-0003, 0295-0004, 0295-0005, 0295-0006, 0295-0007 e 0295-0008. Para construir os modelos estrutural e estratigráfico 3D utilizou-se o *software* de modelagem *Geological Object Computer Aided Design* (GOCAD). Esta ferramenta geofísica objetivou visualizar as estruturas e feições geológicas mapeadas como a unidade potencialmente geradora (Formação Pimenteiras) e a unidade potencialmente reservatório (Formação Cabeças), para ampliar as capacidades de interpretação geológica dos resultados e auxiliar no entendimento da geologia do petróleo da Bacia do Parnaíba.

Palavras-chave: Geofísica. Modelagem 3D. Modelo. Bacia do Parnaíba.

ABSTRACT

This work consists of the 3D reconstruction of possible exploration targets from project data of the National Agency of Petroleum, Natural Gas, and Biofuel (ANP) named 0295_ANP_2D_PARNAÍBA. The data are located in the southeastern portion of the Parnaíba Basin. This basin is the type of intracratonic Paleozoic Era located on Brazilian northeastern in occidental region and positioned between large bands folding where there are deposited sediments from the Ordovician until Tertiary with magmatic events on Mesozoic. In this context, this work shows the results of 3D modeling seismic stratigraphic and structural of the geologic structures mapped by eight 2D seismic lines, named 0295-0001, 0295-0002, 0295-0003, 0295-0004, 0295-0005, 0295-0006, 0295-0007, 0295-0008. To build the stratigraphic and structural 3D models were used the modeling software *Geological Object Computer Aided Design* (GOCAD). This geophysical tool aimed to visualize the structures and geological features mapped as potentially generating unit (Pimenteiras Formation), and the potentially reservoir unit (Cabeças Formation), to extend the capabilities of geological interpretation of the results and to assist in the understanding of petroleum geology Parnaíba Basin.

Keywords: Geophysical. 3D modeling. Model. Parnaíba Basin.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa de localização da Bacia do Parnaíba.....	13
Figura 2 - Limites geológicos das bacias do Parnaíba, Grajaú e São Luís.....	15
Figura 3 - Mapa com as principais feições morfo-estruturais e a localização da seção geológica (A-B) da Bacia do Parnaíba.....	16
Figura 4 - Seção geológica (A-B) esquemática da Bacia Parnaíba.....	17
Figura 5 - Esboço do posicionamento geotectônico do início da sedimentação da Bacia do Parnaíba no Gondwana Ocidente durante o fim do Ciclo Pan-Africano/Brasiliano.....	18
Figura 6 - Estruturas do Ciclo Brasileiro de compartimentação no Paleozóico.....	19
Figura 7 - Relação entre os eixos deposicionais dos grupos Serra Grande, Canindé e os lineamentos Transbrasiliano e Picos-Santa Inês.....	20
Figura 8 - Estruturas de compartimentação no Mesozóico.....	22
Figura 9 - Carta estratigráfica da Bacia do Parnaíba.....	24
Figura 10 - Localização das rochas geradoras, reservatórias e seladoras na carta estratigráfica.....	32
Figura 11 - Mapa de localização da área alvo na Bacia do Parnaíba com as linhas sísmicas em azul.....	35
Figura 12 - Mapa geológico da região da área alvo.....	36
Figura 13 - Seção sísmica interpretada da linha 0295-0001.....	37
Figura 14 - Seção sísmica interpretada da linha 0295-0002.....	38
Figura 15 - Seção sísmica interpretada da linha 0295-0003.....	38
Figura 16 - Seção sísmica interpretada da linha 0295-0004.....	39
Figura 17 - Seção sísmica interpretada da linha 0295-0005.....	39
Figura 18 - Seção sísmica interpretada da linha 0295-0006.....	40
Figura 19 - Seção sísmica interpretada da linha 0295-0007.....	40
Figura 20 - Seção sísmica interpretada da linha 0295-0008.....	41
Figura 21 - Visualização 2D das seções sísmicas interpretadas na janela 3D Viewer do GOCAD, com suas respectivas posições.....	44
Figura 22 - Visualização 3D das linhas sísmicas interpretadas na janela 3D Viewer do GOCAD, com suas respectivas posições.....	44
Figura 23 - Visualização 3D no GOCAD das curvas que representam o topo do Embasamento.....	45

Figura 24 - Visualização 3D no GOCAD das curvas que representam o topo do Embasamento com a borda.....	45
Figura 25 - Visualização 3D no GOCAD do volume dos refletores.....	46
Figura 26 - Exemplo de como o <i>software</i> GOCAD cria uma superfície através de triângulos. Atoms: são pontos; Edges: são linhas; Borders: são bordas; Contrtol Node: é ponto de controle; Border Extremities: são as extremidades da borda; Triangles: são triângulos.....	47
Figura 27 - Visualização 3D no GOCAD do topo e da base.....	49
Figura 28 - Visualização 3D no GOCAD da construção da malha pelo modo interativo.....	49
Figura 29 - Visualizações no GOCAD do Modelo Estrutural 3D.....	51
Figura 30 - Visualizações 3D no GOCAD do modelo estrutural com um corte feito na direção de alguns depocentros.....	52
Figura 31 - Visualizações 3D no GOCAD de um corte feito nas superfícies que representam o principal sistema petrolífero potencial da Bacia do Parnaíba.....	53
Figura 32 - Visualizações 3D no GOCAD do modelo estratigráfico.....	54
Figura 33 - Visualizações 3D no GOCAD de baixo para cima do modelo estratigráfico.....	55
Figura 34 - Visualizações 3D no GOCAD do principal sistema petrolífero potencial da Bacia do Parnaíba.....	56

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	GEOLOGIA DA REGIÃO.....	13
2.1	LOCALIZAÇÃO DA BACIA.....	13
2.2	GENERALIDADES.....	14
2.3	EVOLUÇÃO TECTONO-SEDIMENTAR.....	15
2.4	ESTRATIGRAFIA.....	23
2.4.1	Sequência siluriana.....	24
2.4.2	Sequência mesodevoniana-eocarbonífera.....	25
2.4.3	Sequência neocarbonífera-eotriássica.....	26
2.4.4	Sequência jurássica.....	28
2.4.5	Sequência cretácea.....	29
2.4.6	Rochas magmáticas.....	30
2.5	SISTEMAS PETROLÍFEROS.....	31
3	MODELAGEM.....	33
3.1	MODELAGEM GEOLÓGICA 3D.....	33
4	METODOLOGIA.....	34
4.1	GENERALIDADES DOS DADOS.....	34
4.2	SEÇÕES SÍSMICAS INTERPRETADAS.....	36
4.3	SOFTWARE DE MODELAGEM GOCAD.....	41
4.4	MODELO ESTRUTURAL 3D.....	42
4.5	MODELO ESTRATIGRÁFICO 3D.....	47
5	RESULTADOS.....	50
6	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	57
	REFERÊNCIAS.....	58

1 INTRODUÇÃO

As construções de modelos geométricos tridimensionais tendem a ser mais frequente em pesquisas na geociência, pois aperfeiçoa a visualização dos dados e a interpretação dos resultados, tornando assim mais fácil identificar possíveis reservatórios de hidrocarbonetos em uma bacia sedimentar.

A Bacia do Parnaíba é do tipo intracratônica, posicionada entre faixas de dobramentos que bordejam os crátons do Amazonas, São Luis e São Francisco, no qual se encontram sedimentos depositados do Ordoviciano ao Terciário, e rochas intrusivas e extrusivas relacionadas a eventos magmáticos de idades Jurotriássica a Eocretácia. Essa bacia possui uma extensa região, por isso ela é uma das mais desconhecidas em se tratando de geologia e geofísica. Apesar de haver algumas pesquisas geológicas e geofísicas, que permitem um maior conhecimento sobre seus aspectos estratigráficos, litológicos, estruturais e as variações paleoambientais ocorridos durante todo o seu desenvolvimento, a quantidade de dados existente é insuficiente (VAZ et al., 2007).

Neste trabalho utilizaram-se dados do projeto da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), nomeado de 0295_ANP_2D_PARNÁIBA, o qual constou de um total de nove linhas sísmicas 2D que são 0295-0001, 0295-0002, 0295-0003, 0295-0007, 0295-0008 e 0295-0009 localizadas na porção sudeste da Bacia do Parnaíba, cujo objetivo era avaliar o potencial petrolífero desta bacia.

Teixeira (2010) analisou feições estratigráficas e estruturais através da interpretação de seções sísmicas e de mapas gravimétricos, na porção leste da Bacia do Parnaíba, que mapeou ao todo dez refletores desta bacia, a partir da Formação Piauí até o embasamento. Este trabalho foi a base para que outros pudessem interpretar e modelar esta região da Bacia do Parnaíba.

Pinheiro (2011) construiu um modelo geológico-estrutural 2,5D da Bacia do Parnaíba, cujo trabalho foi um passo inicial para a construção de um modelo geológico-estrutural 3D dessa bacia.

Cunha (2012) realizou a conversão em profundidade de dados migrados em tempo da Bacia do Parnaíba, cujo resultado promoveu uma melhoria sutil nos dados da seção migrada no domínio do tempo.

O presente trabalho tem como objetivo construir os modelos estrutural e estratigráfico 3D da região de interesse em subsuperfície, através de oito seções sísmicas interpretadas com suas estruturas geológicas. Para isso, utilizou-se o *software Geological Object Computer Aided Design (GOCAD)*, que permitiu entender melhor as estruturas e as feições geológicas da Bacia do Parnaíba.

O trabalho está estruturado em seis capítulos. O primeiro capítulo apresenta a parte introdutória. O segundo capítulo descreve os aspectos geológicos da Bacia do Parnaíba. O terceiro capítulo mostra os fundamentos da modelagem. O quarto capítulo descreve a metodologia utilizada para fazer a modelagem 3D. O quinto capítulo apresenta os resultados. O sexto e último capítulo apresentam as conclusões e recomendações, respectivamente, referentes aos resultados.

2 GEOLOGIA DA REGIÃO

2.1 LOCALIZAÇÃO DA BACIA

A Bacia do Parnaíba localiza-se na porção noroeste do Nordeste brasileiro, ocupa uma área de cerca de 600 mil km² e recobre os estados do Maranhão, Piauí e parte dos estados de Tocantins, Pará e Ceará (Figura 1).

Figura 1 - Mapa de localização da Bacia do Parnaíba.



Fonte: Santos e Carvalho (2009)

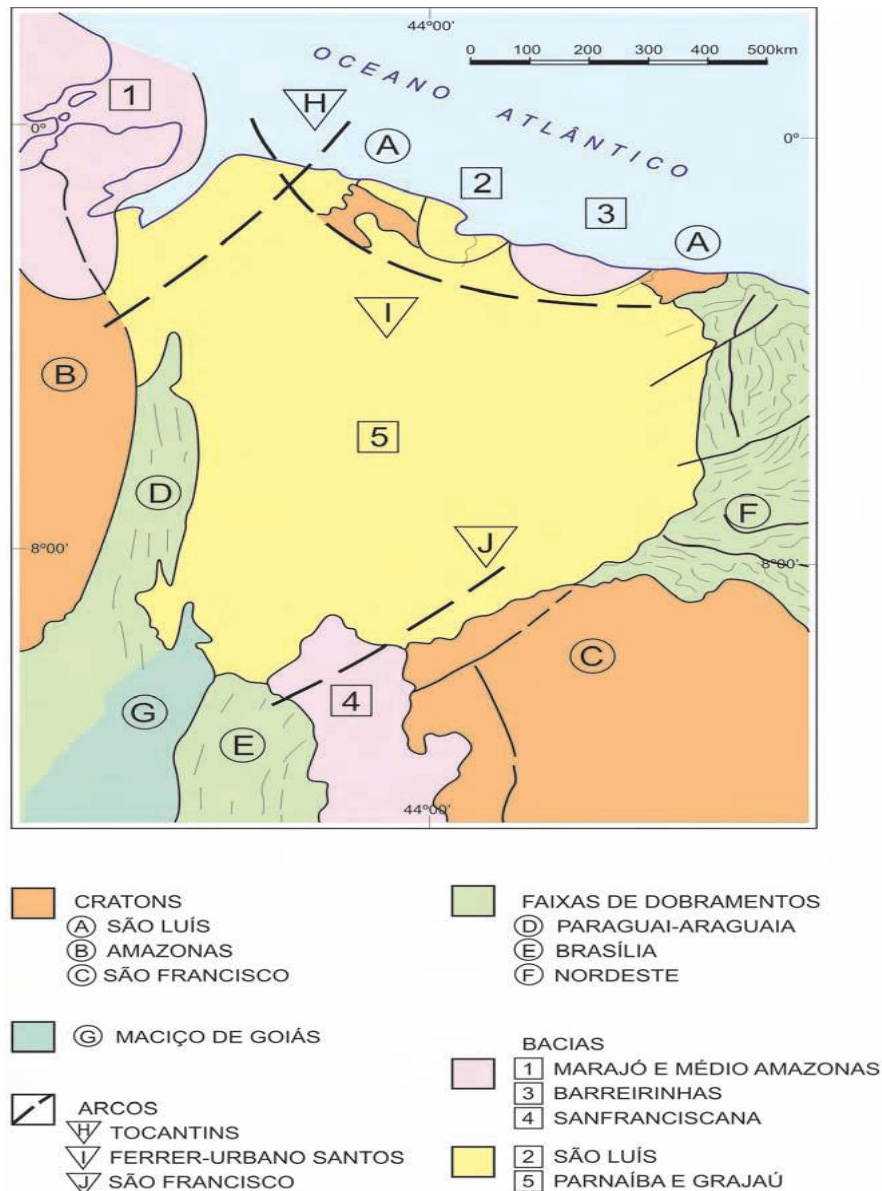
2.2 GENERALIDADES

A Bacia do Parnaíba desenvolveu-se sobre um embasamento durante o período de estabilização da Plataforma Sul-Americana (ALMEIDA; CARNEIRO, 2004). No depocentro a espessura total das rochas atinge cerca de 3.500 m. Esta bacia possui uma forma elipsoidal, com seu diâmetro maior longitudinal por volta de 1000 km, e o diâmetro menor ortogonal por volta de 800 km. A bacia é estruturalmente assimétrica disposta segundo um eixo NE-SW, no qual passa pela capital do estado do Piauí. O mergulho das camadas na borda sul/sudeste é mais acentuado que o da borda noroeste. Na porção central da bacia, as camadas têm inclinações variando de apenas 7m/km a 10m/km, de forma que as feições estruturais de grande extensão da área, como dobras, arcos e falhas passem despercebidas, sendo visíveis apenas em nivelamentos encontrados em afloramentos mais extensos (CUNHA, 1986).

A borda sul da bacia do Parnaíba delimita-se pelo Arco de São Francisco, já a borda leste e a oeste são delimitados por rochas da orogenia Brasileira (Figura 2). A borda noroeste da bacia delimita-se pelo arco de Tocantins, que separa esta bacia da Bacia do Amazonas. Ao norte existem duas bacias costeiras (Bacias de São Luiz e de Barreirinhas), que são separadas da Bacia do Parnaíba pelo Arco de Ferrer - Urbano Santos (VAZ et al., 2007).

A origem ou subsidência inicial da Bacia do Parnaíba provavelmente está ligada às deformações e eventos térmicos finais e pós-orogênicos do Ciclo Brasileiro ou durante o período de Transição da plataforma, segundo Almeida e Carneiro (2004). Estruturas grabeniformes interpretadas (com base em dados de sísmica, gravimetria e magnetometria) no substrato da Bacia do Parnaíba (OLIVEIRA; MOHRIAK, 2003), teriam controlado o depocentro inicial dessa bacia. Bem como, esses sítios deposicionais, ou riftes precursores da Bacia do Parnaíba, seriam correlacionáveis ao Gráben Jaibaras e também a outros grábens, como, por exemplo, Jaguarapi, Cococi e São Julião, situados na Província Borborema, que foram gerados num sistema de riftes do final do Proterozóico e início do Paleozóico.

Figura 2 - Limites geológicos das bacias do Parnaíba, Grajaú e São Luís.



Fonte: Santos e Carvalho (2009)

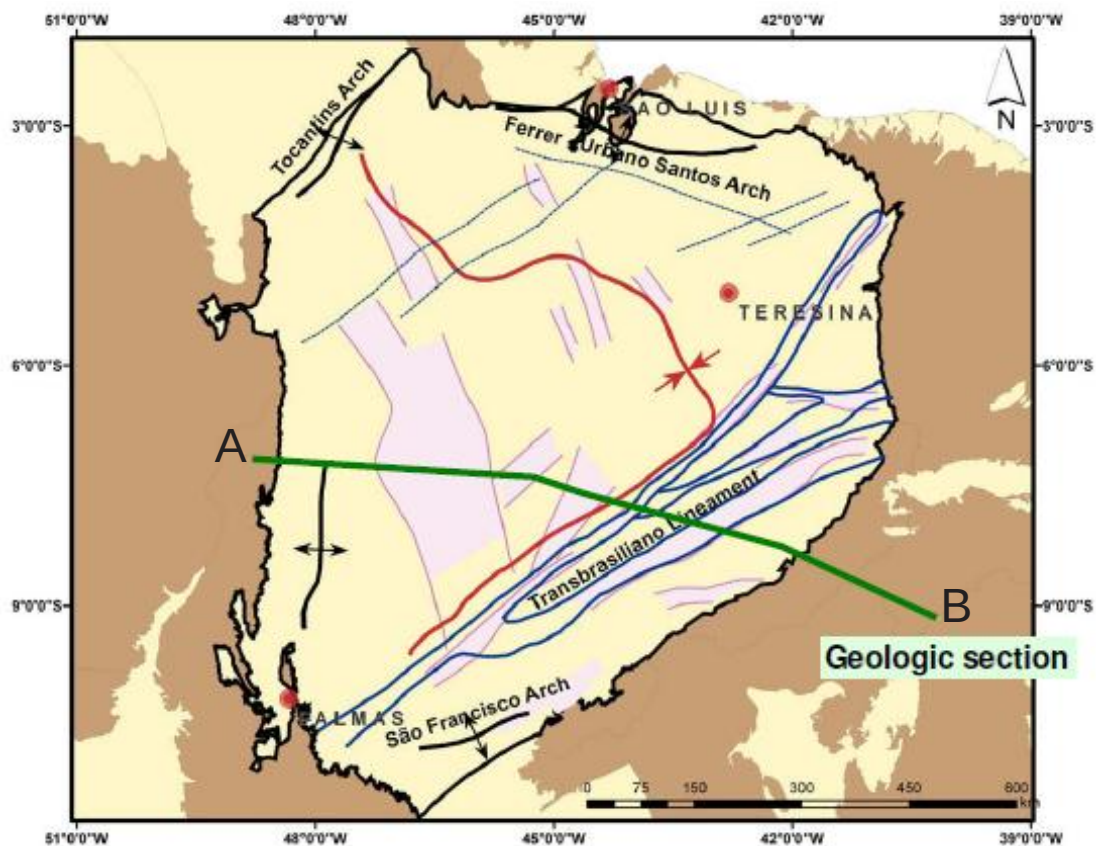
2.3 EVOLUÇÃO TECTONO-SEDIMENTAR

O desenvolvimento tectono-sedimentar da Bacia do Parnaíba é devido à estruturação precursora relacionada aos pulsos termiais do Ciclo Brasileiro, de modo que se originou a formação de grábens, distribuídos por toda a bacia, com eixos orientados de nordeste a norte. A tectônica desta bacia foi muito importante para o desenvolvimento da sedimentação, pós-ordoviciano, nas primeiras fases deposicionais na bacia. A Figura 3 mostra a localização de uma seção geológica

(Figura 4) feita sobre um mapa com as principais feições morfo-estruturais da Bacia do Parnaíba.

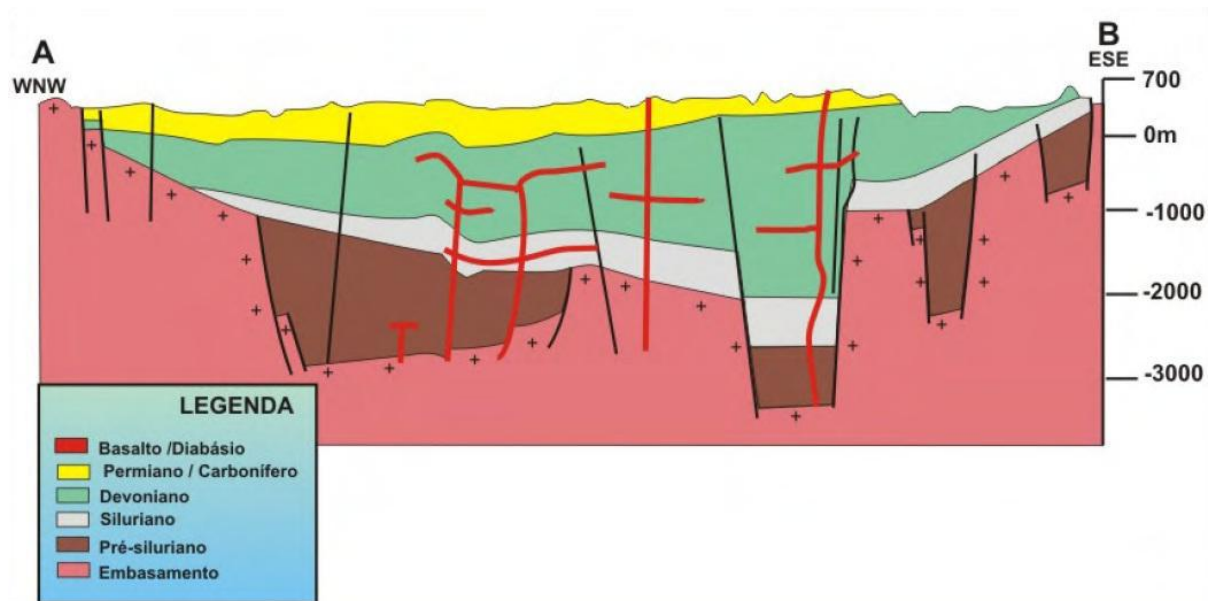
O substrato desta bacia é constituído de rochas metamórficas, ígneas e sedimentares, cujas idades vão do Arqueano ao Ordoviciano, porém, predominam rochas formadas entre o final do Proterozóico e o início do Paleozóico, que correspondem ao tempo de consolidação desta plataforma.

Figura 3 - Mapa com as principais feições morfo-estruturais e a localização da seção geológica (A-B) da Bacia do Parnaíba.



Fonte: Modificado de Milani e Zalán (1998)

Figura 4 - Seção geológica (A-B) esquemática da Bacia do Parnaíba.



Fonte: Modificado de Góes e Feijó (1994)

Os pulsos termais do Ciclo Brasileiro cambro-ordoviciano tiveram muita influência sobre a sedimentação subsequente da Bacia do Parnaíba (Figura 5). A tectônica desta bacia foi responsável pela formação de grábens e riftes com eixos orientados de nordeste a norte-sul inicialmente preenchidos por sedimentos imaturos (CUNHA, 1986).

Figura 5 - Esboço do posicionamento geotectônico do início da sedimentação da Bacia do Parnaíba no Gondwana Ocidente durante o fim do Ciclo Pan-Africano/Brasiliano.

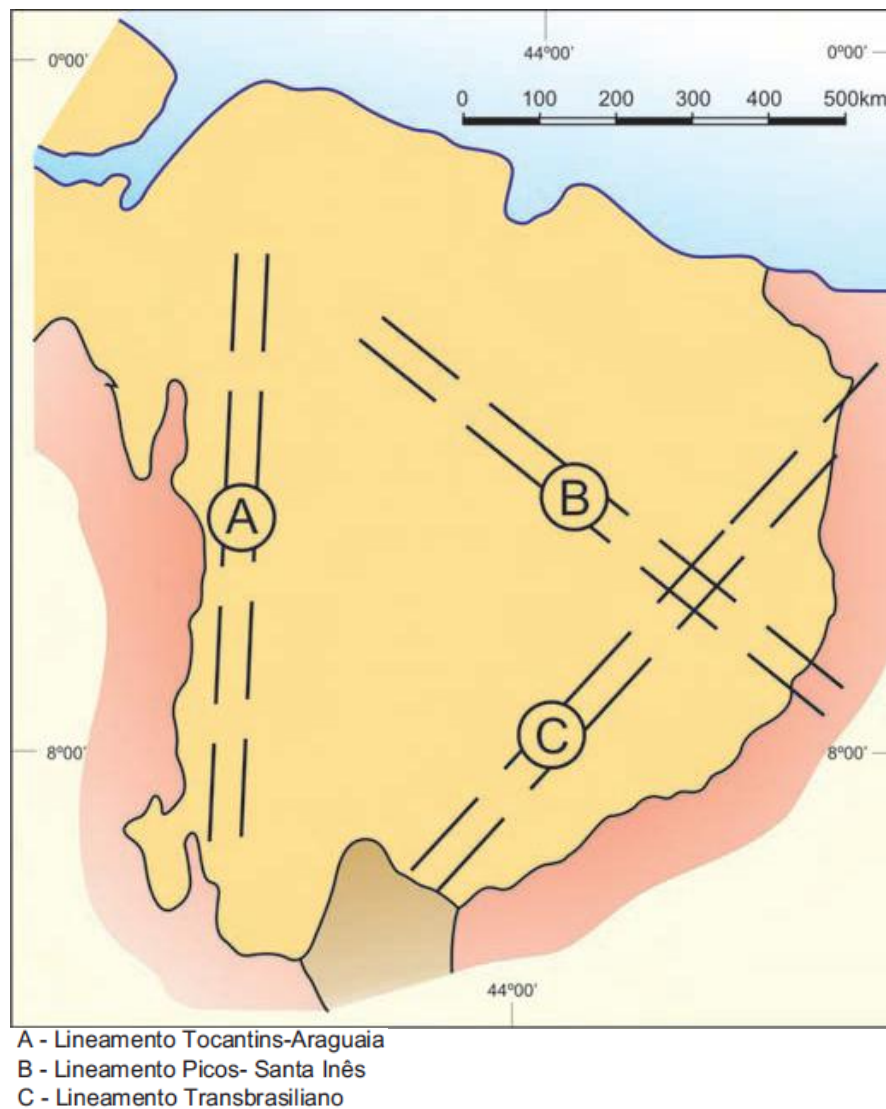


Fonte: Modificado de Cunha (1986)

Os Lineamentos Picos-Santa Inês, Tocantins-Araguaia e o Lineamento Transbrasiliano (Figura 6) são as três feições morfo-estruturais mais notáveis da bacia, sendo o Lineamento Transbrasiliano a mais importante, atravessando toda sua porção nordeste e sul-sudeste. As mais significativas fraturas e falhas herdadas do embasamento foram importantes não só na fase inicial da bacia, mas também em sua evolução, já que controlaram as direções dos eixos deposicionais (Figura 7) até o Eocarbonífero (VAZ et al., 2007). Do Neocarbonífero até o Jurássico, os depocentros deslocaram-se para a parte central da bacia, e a sedimentação passou a ter um padrão concêntrico e a forma externa da bacia ficou ovalada, típica de uma sinéclise interior. O Arco Ferrer-Urbano Santos, uma feição flexural positiva relacionada com a abertura, no Mesozóico, do Oceano Atlântico Equatorial, definiu-se o limite norte da Bacia do Parnaíba, no qual o rifteamento Atlântico quebrou a conexão então existente dessa grande sinéclise com bacias análogas que, atualmente, estão assentadas no noroeste da África (MILANI; THOMAZ FILHO,

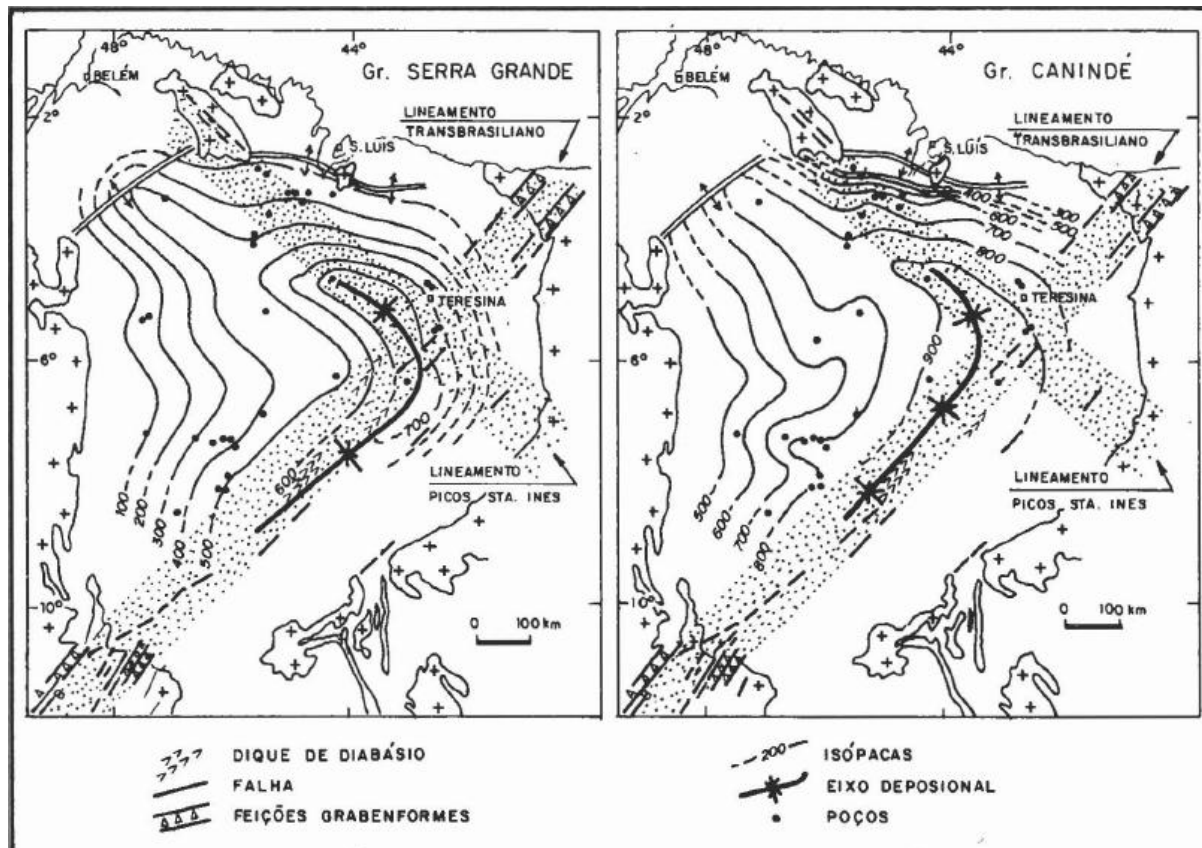
2000). Adicionando a esta bacia não só blocos falhados de pequenos rejeitos, como também dobras e outras estruturas resultantes da intrusão de corpos ígneos mesozoicos nas camadas sedimentares, o que se permite assim fechar o panorama estrutural fundamental dessa bacia.

Figura 6 - Estruturas do Ciclo Brasileiro de compartimentação no Paleozóico.



Fonte: Santos e Carvalho (2009)

Figura 7 - Relação entre os eixos deposicionais dos grupos Serra Grande, Canindé e os lineamentos Transbrasiliano e Picos-Santa Inês.



Fonte: Góes et al. (1990)

Após o término do Ciclo Brasileiro (Cambro-Ordoviciano), os grábens foram preenchidos pelo progressivo afundamento ao longo das faixas tectonicamente instáveis, e a partir do final do Ordoviciano devido à subsidência termomecânica (CAPUTO; LIMA, 1984). Durante o Paleozóico até o carbonífero, os lineamentos Transbrasiliano e Picos-Santa Inês comportaram-se como eixos deposicionais. A partir do carbonífero superior, iniciaram-se os movimentos precursores de agregação do supercontinente Pangea ligado à Orogenia Eo-herciniana (GÓES; FEIJÓ, 1994), o que provocou o deslocamento do depocentro para noroeste, dando início a retração da área deposicional e o processo de continentalização da bacia.

A evolução termo-mecânica da Bacia provocou a grande depressão ordoviciano, sobre a qual se depositaram sedimentos flúvio-deltáicos a marinho raso do Grupo Serra Grande. O final da sedimentação Serra Grande evidenciou-se pelos efeitos da Orogenia Caledoniana, na qual resultou em uma discordância de caráter regional. A continuação dos processos termais, ligado a uma considerável influência

de efeitos flexurais, resultou em uma maior sedimentação do Grupo Canindé durante o Devoniano (GÓES et al., 1990).

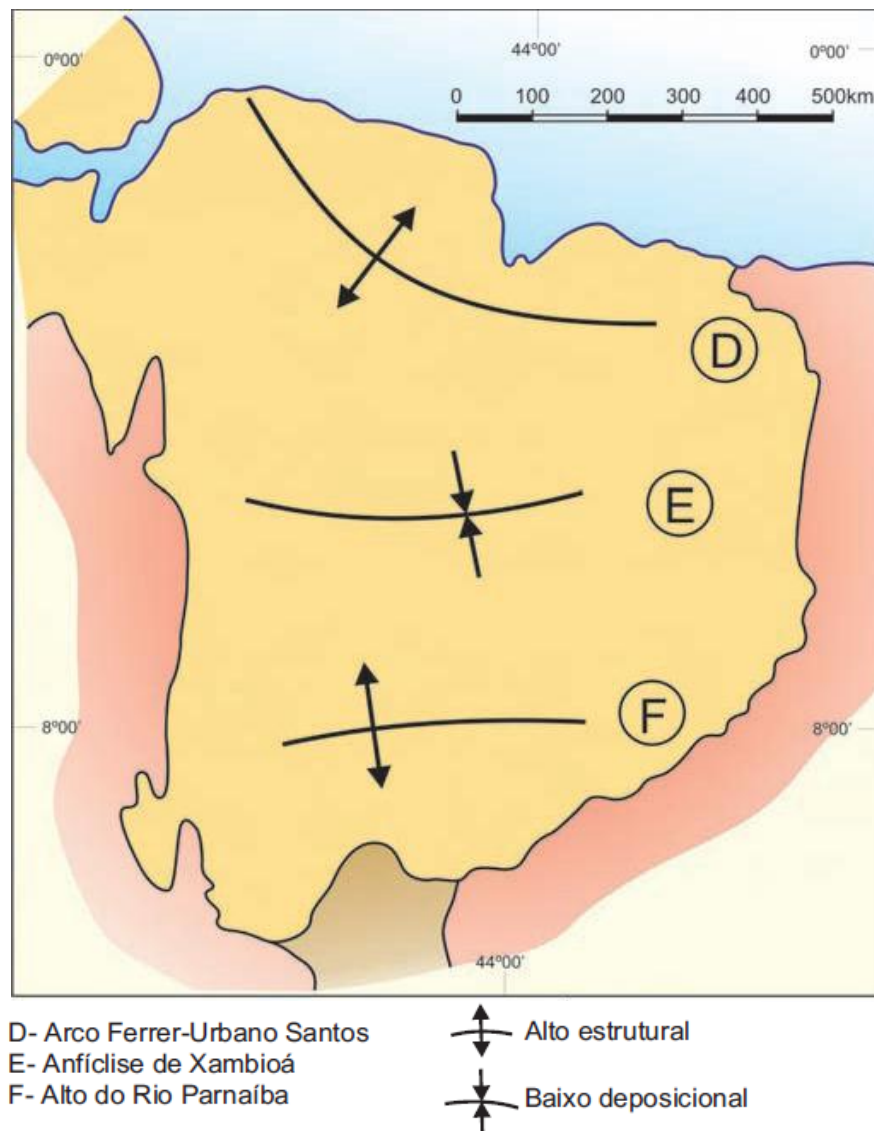
Durante o Permiano, as regiões a noroeste e a oeste, o Lineamento Tocantins-Araguaia elevou-se, e as comunicações entre as Bacias Amazonas e Parnaíba encerram-se. No Triássico, a área deposicional deslocou-se para o centro da bacia com o ciclo continental sendo finalizado com a deposição das formações Motuca e Sambaíba.

Durante o Mesozóico, a Estrutura de Xambioá de orientação Leste-Oeste localiza-se no centro da bacia, o Arco Ferrer-Urbano Santos delimita-se por pequenas bacias marginais associadas à abertura do Atlântico Sul Equatorial e o Alto do Rio Parnaíba (Figura 8) são os principais elementos tectônicos regionais.

Durante o Jurássico e o Cretáceo, os derrames e diques de rochas básicas de ambientes distensionais indicam os efeitos da separação dos continentes (Magmatismo Penatecaua). Estas rochas apresentam forte orientação E-W e NW-SE. A direção E-W correspondem ao Arco de Xambioá e corresponde a um alto interno durante o Paleozóico (AGUIAR, 1969). No Mesozóico, a fragmentação do Pangea modificou o arcabouço tectônico da bacia, passando a Estrutura de Xambioá a compor um novo eixo deposicional.

No Aptiano, com a evolução da separação dos continentes Africano e Sul-americano e a formação do Oceano Atlântico, formou-se o sistema de Grábens Gurupi, no qual a Bacia de São Luís-Grajaú está presente. Estudos faciológicos, estratigráficos e tectônicos, demonstraram que as bacias do Grajaú e São Luís se comportaram como depressões individualizadas somente até o Albiano (cerca de 112 milhões de anos), enquanto houve a transposição do Arco Ferrer-Urbano Santos que servia de barreira ao avanço da sedimentação para sul (GOÉS; ROSSETI, 2001).

Figura 8 - Estruturas de compartimentação no Mesozóico.



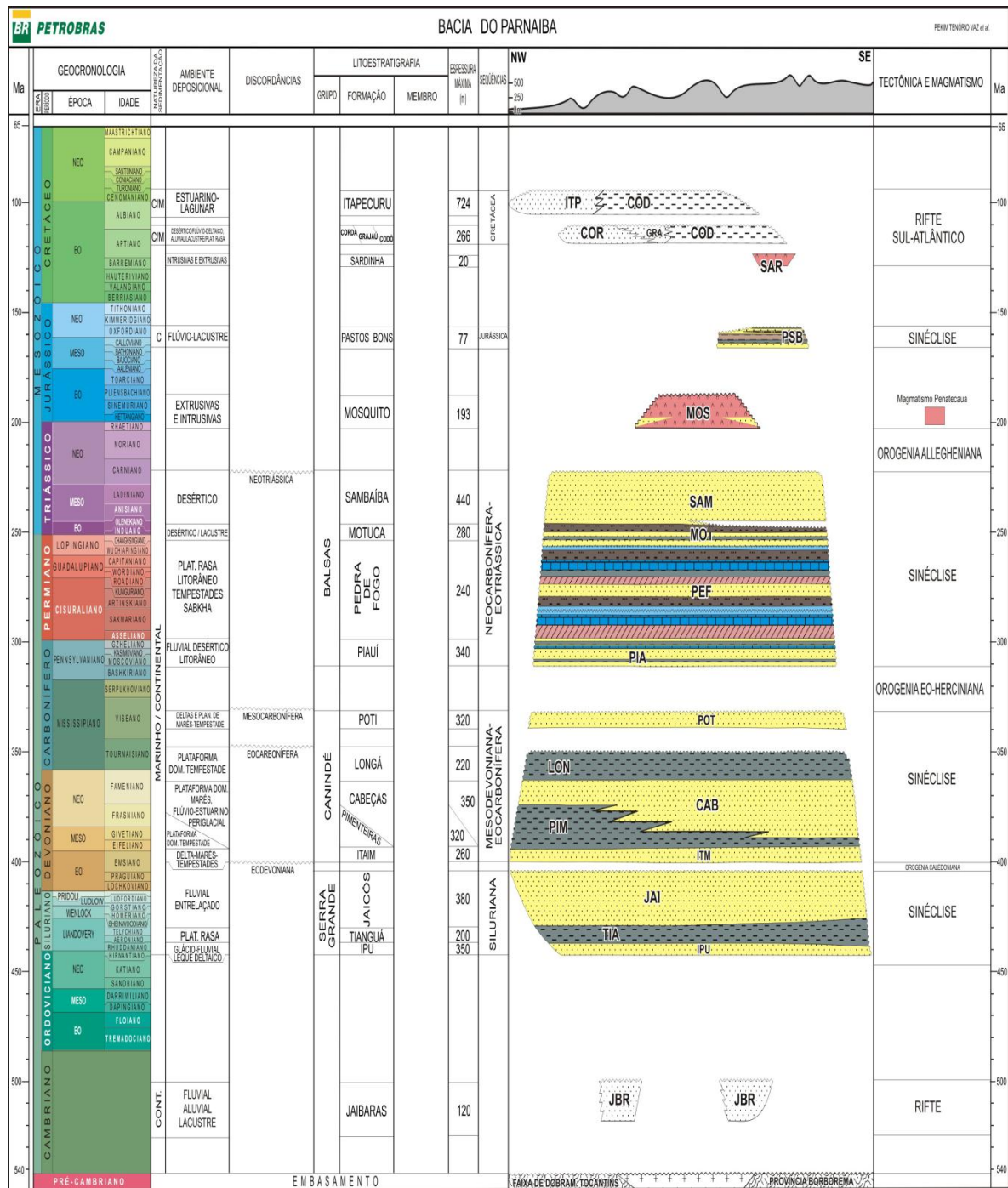
Fonte: Santos et al. (2009)

2.4 ESTRATIGRAFIA

A sucessão de rochas sedimentares e magmáticas da Bacia do Parnaíba divide-se em cinco supersequências, em ordem da mais antiga para a mais recente: Siluriana, Mesodevoniana-Eocarbonífera, Neocarbonífera-Eotriássica, Jurássica e Cretácea, que se delimitam por discordâncias que se estendem por toda a bacia (Figura 9).

No contexto da Plataforma Sul-Americana, as três primeiras sequências situam-se no período de estabilização e as discordâncias correspondentes têm suas gêneses em parte relacionadas às flutuações dos elevados níveis eustáticos dos mares epicontinentais do Eopaleozóico. As transgressões provieram do oceano próximo à margem ativa do sudoeste do Gondwana e de bacias do norte atual da África, inundadas pelo Oceano Tethys. As regressões e discordâncias erosivas teriam contribuições de ascensões epirogênicas, em respostas às orogêneses ocorridas na borda ativa do Gondwana próximo à plataforma. A forma de o registro sedimentar deve-se em parte pela contribuição da subsidência ocorrida devido ao estiramento litosférico e a outros processos da dinâmica continental. Portanto, as ascensões eustáticas em parte respondem pelas sucessivas inundações do mar no Brasil durante o Fanerozóico (ALMEIDA; CARNEIRO, 2004). A eustasia foi o fator primordial no controle dos ciclos transgressivos-regressivos e, por conseguinte, das discordâncias que definiram-se os limites das sequências da Bacia do Parnaíba (DELLA FÁVERA, 1990).

Figura 9 - Carta estratigráfica da Bacia do Parnaíba.



Fonte: Modificado de Petrobras (2007)

2.4.1 Sequência siluriana

A sedimentação desta sequência é um ciclo transgressivo completo, corresponde litoestratigraficamente ao Grupo Serra Grande. Sua unidade mais antiga é a Formação Ipu, composta de arenitos com seixos, conglomerados com

matriz areno-argilosa e matacões de quartzo ou quartzito e arenitos de finos a grossos. As rochas dessa unidade depositaram-se numa grande variedade de ambientes, de glacial proximal e glacio-fluvial, a leques ou frentes deltaicos (CAPUTO, 1984).

A Formação Tianguá é composta de folhelhos cinza-escuro, bioturbados, sideríticos e carbonáticos, de arenitos cinza-claro, fino a médio, feldspáticos e de intercalações de siltitos e folhelhos cinza-escuros, bioturbados e micáceos. A deposição sucedeu-se num ambiente de plataforma rasa (GÓES; FEIJÓ, 1994). Os contatos das camadas das formações Ipu (sotoposta) e Jaicós (sobrepota) são concordantes (CAPUTO, 1984).

A Formação Jaicós é constituída de arenitos cinza com tonalidades claras, creme ou amarronzada, grossos, contendo seixos angulares a subangulares, mal selecionados, friáveis, maciços ou com estratificação cruzada ou lenticular (CAPUTO, 1984). O ambiente de deposição deveu-se a sistemas fluviais entrelaçados (GÓES; FEIJÓ, 1994).

A Formação Tianguá representa a superfície de inundação máxima, e as camadas Jaicós, o intervalo regressivo dessa sequência, cujas fácies indicam deposição por sistemas fluviais, deltaicos e plataformais, em ambientes continental, transicional e marinho raso (GÓES; FEIJÓ, 1994).

2.4.2 Sequência mesodevoniana-eocarbonífera

Os estratos desta sequência depositaram-se discordantemente sobre a sequência mais antiga. Esta sequência divide-se em quatro formações. A Formação Itaim apresenta arenitos finos a médios com grãos subarredondados, bem selecionados e com alta esfericidade. Os sedimentos Itaim depositaram-se em ambientes deltaicos e plataformais, dominados por correntes induzidas por processos de marés e de tempestades (GÓES; FEIJÓ, 1994). A Formação Pimenteiras consiste-se de folhelhos cinza-escuros a pretos, esverdeados, em parte bioturbados. São radioativos, ricos em matéria orgânica e representam a ingressão marinha mais importante da bacia. Apresentaram intercalações de siltito e arenito, e a sedimentação sucedeu-se em um ambiente de plataforma rasa dominada por tempestades. As feições grafoelétricas indicam ciclicidade deposicional, e uma

mudança de tendência transgressiva para regressiva na passagem gradacional para a Formação Cabeças, que lhe é sobreposta (DELLA FÁVERA, 1990).

A Formação Cabeças consiste-se de arenitos cinza-claros a brancos, médios a grossos, com intercalações delgadas de siltitos e folhelhos. Tilitos, pavimentos e seixos estriados denotam um ambiente glacial ou periglacial (CAPUTU, 1984). A estratificação cruzada tabular ou sigmoidal predomina, e tempestitos ocorrem na transição para a Formação Pimenteiras (DELLA FÁVERA, 1990). Mas o ambiente mais importante para Cabeças é o ambiente plataformar sob a influência preponderante de correntes desencadeadas (GÓES; FEIJÓ, 1994).

Na Formação Longá, o litotipo predominante consiste-se de folhelhos cinza-escuros a pretos, em parte arroxeados, homogêneos ou bem laminados, bioturbados. Em sua porção média comumente apresentam um pacote de arenitos e siltitos cinza-claros a esbranquiçados, laminados (LIMA; LEITE, 1978). Esta unidade depositou-se em um ambiente plataformar dominado por tempestades (GÓES; FEIJÓ, 1994).

A Formação Poti consiste-se em uma sucessão de estratos que se divide em duas porções, a inferior constituída de arenitos cinza esbranquiçados, médios, com lâminas dispersas de silito cinza-claros, e a superior de arenitos cinza, lâminas de siltitos e folhelhos com eventuais níveis de carvão (LIMA; LEITE, 1978). A deposição sucedeu-se em deltas e planícies de maré, às vezes sob a influência de tempestades (GÓES; FEIJÓ, 1994). O contato superior com a Formação Piauí é discordante, erosivo. A regressão que precedeu a sedimentação Poti pode estar ligada ao aumento das capas de gelo do Continente Gondwana. Após a deposição dessa formação, movimentos epirogênicos ascendentes e uma regressão de extensão global (CAPUTO, 1984), teriam conduzido à erosão na bacia. Esses fenômenos ocorreram provavelmente em resposta à Orogênese Eo-herciniana.

2.4.3 Sequência neocarbonífera-eotriássica

Em subsuperfície está presente numa extensa região da bacia, e a erosão, parece ser o fator mais importante na explicação de sua ausência, do que não deposição em algumas das áreas de borda dessa sinéclise. Numa seção aproximadamente norte-sul, controlada por poços, observa-se que há coincidência entre os depocentros dessa unidade e os das duas sequências mais antigas da

bacia. Entretanto, numa seção oeste-leste, constata-se que o depocentro da Sequência Neocarbonífera-Eotriássica situa-se a oeste daqueles das duas sequências subjacentes.

A Formação Piauí divide-se em duas sucessões: a inferior, composta de arenitos cor-de-rosa, médios, maciços ou com estratificação cruzada de grande porte e intercalações de folhelho vermelho, e a superior, formada de arenitos vermelhos, amarelos, finos a médios, contendo intercalações de folhelhos vermelhos, calcários e finas camadas de sílex, e Siltitos e lentes conglomeráticas também ocorrem (CAPUTO, 1984). Essa unidade é pensilvaniana (MELO et al., 1998), interpretou-se um ambiente fluvial com contribuição eólica e breves incursões marinhas, num clima semiárido a desértico (LIMA; LEITE, 1978). A Formação Pedra de Fogo, de idade permiana (DINO et al., 2002), é caracterizada por uma considerável variedade de rochas - sílex, calcário oolítico e pisolítico creme a branco, eventualmente estromatolítico, intercalado com arenito fino a médio amarelado, folhelho cinzento, siltito, anidrita e, eventualmente, dolomito. Depositados num ambiente marinho raso a litorâneo com planícies de sabkha, sob influência de tempestades (GÓES; FEIJÓ, 1994). Ciclos deposicionais podem ser identificados na sucessão de camadas desta unidade (AGUIAR, 1971). Os contatos são concordantes com as Formações Piauí (subjacente) e Motuca (sobrejacente).

A Formação Motuca denomina-se siltito vermelho e marrom, arenito branco fino e médio, subordinadamente folhelho, anidrita e raros calcários. Esses dois últimos litotipos (LIMA; LEITE, 1978) ocorrem sob a forma de lentes delgadas nos pelitos, e o contato apresenta-se concordante com a Formação Pedra de Fogo (subjacente). Os sedimentos Motuca depositaram-se num sistema desértico, com lagos associados (GÓES; FEIJÓ, 1994). Sua idade estende-se do Permiano terminal ao início do Eotriássico (CAPUTO, 1984). Porém, a sedimentação Motuca talvez tenha se prolongado até o final do Eotriássico.

A Formação Sambaíba é composta de arenitos, cujos sedimentos caracterizam-se por rochas de um sistema desértico, com contribuição fluvial (LIMA; LEITE, 1978). A deposição dessa sequência coincidiu com as mudanças ambientais e tectônicas profundas na região ocupada pela Bacia do Parnaíba, mares abertos com ampla circulação e clima temperado, condições prevaletentes até então, passaram a serem restritos rasos e o clima quente e árido. Uma regressão de alcance mundial ocorrida no final do Permiano-início do Triássico (CAPUTO, 1984)

provavelmente seja a causa da progressiva desertificação e a retirada definitiva do mar epicontinental dessa bacia, já que culminaram com o estabelecimento do amplo deserto no qual se depositou os arenitos Sambaíba.

2.4.4 Sequência jurássica

A sequência consistiu-se somente pela Formação Pastos Bons, tendo em vista que a posição estratigráfica da Formação Corda foi reinterpretada pelos autores e passou a fazer parte da Sequência Cretácea. A subsidência que se preencheu com essa deposição jurássica teve, como origem ou causa fundamental, o peso das rochas básicas Mosquito, que se somou ao da carga sedimentar então existente. O final dessa fase sedimentar teria sido uma consequência das atividades tectônicas concernentes à abertura do Atlântico Equatorial.

Na carta nota-se que a Formação Pastos Bons sobrepõe-se, parcialmente, à Formação Mosquito em consonância com a interpretação sísmica, tendo em vista que esse esquema estratigráfico não foi evidenciado em poços (VAZ et al., 2007). Entretanto, deve-se ressaltar que essa bacia está relativamente pouco amostrada. Os litotipos da Formação Pastos Bons divide-se em três partes: na base predomina arenito branco ou com tonalidades esverdeadas, amareladas, fino a médio, grãos subarredondados e, geralmente, apresentam estratificação paralela e raras lentes de calcário. Na parte média da seção ocorrem siltito, folhelho/argilito cinza a verdes, comumente intercalados com arenito.

A porção mais superior é formada de arenito vermelho/cor-de-rosa, fino, gradando para siltito, contendo níveis de folhelho (CAPUTO, 1984). De leste para oeste, a Formação Pastos Bons encontra-se discordantemente sobre as Formações paleozóicas Poti, Piauí, Pedra de Fogo e Motuca (LIMA; LEITE, 1978). Com base no conteúdo fossilífero (peixes, conchostráceos, ostracodes) atribui-se idade jurássica média a superior à Formação Pastos Bons, depositada em paleodepressões continentais, lacustrinas, com alguma contribuição fluvial, em clima semiárido a árido (VAZ et al., 2007).

2.4.5 Sequência cretácea

Nesta Sequência os depocentros deslocaram-se da região central para as proximidades do extremo norte e noroeste da bacia, como reflexo da abertura do Atlântico. No caso dos depósitos marinhos, diferentemente das sequências anteriores, as transgressões e regressões aconteceram desse oceano, portanto no estágio inicial de seu desenvolvimento. Essa Sequência aflora principalmente na porção noroeste-norte da bacia e sobrepõe-se discordantemente sobre as rochas das sequências Jurássica e as mais antigas. É constituída pelas seguintes Formações: Codó, Corda, Grajaú e Itapecuru (VAZ et al., 2007).

A Formação Corda refere-se, essencialmente, a arenitos vermelhos, castanho-avermelhados, muito finos e médios, seleção regular a boa, semifriáveis a semicoesos, ricos em óxidos de ferro ezeólitas. Estratificações cruzadas de grande porte, climbings transladantes e ripples, fluxos de grãos e outras estruturas típicas de dunas eólicas são comuns nessa unidade. Estruturas cruzadas de baixo ângulo e cruzadas acanaladas também ocorrem. Desse conjunto de informações deduz-se que essa unidade depositou-se num sistema desértico. A litologia da Formação Grajaú representa-se pelas rochas aflorantes nas cercanias da cidade homônima – arenitos creme-claro/esbranquiçado, creme-amarelado ou variegados, médio/grossos, subangulosos/angulosos, mal selecionados. Sendo comum a presença de seixos e de níveis conglomeráticos. Estruturas cruzadas acanaladas e marcas de carga são abundantes. Também no caso da Formação Grajaú constata-se que quando existem basaltos subjacentes, esses fornecem material para os corpos areníticos (VAZ et al., 2007).

A Formação Codó constitui-se de folhelhos, calcários, siltitos, gipsita/anidrita e arenito, nos quais são os principais litotipos e são frequentes níveis de sílex e estromatolito. Os jazimentos de gipsita são recobertos abruptamente por folhelho bege a cinza/preto esverdeado, revelando uma ampla inundação (transgressão) do mar/lago Codó. As Formações Grajaú e Codó, ambas do Neo-aptiano-Eo-albiano, depositaram-se em ambientes marinho raso, lacustre e flúvio-deltaico (ROSSETTI et al., 2001).

A Formação Itapecuru constitui-se de estratos arenosos e pelíticos, de idade Mesoalbiano-Neocretáceo, que correspondem a seis ciclos deposicionais atribuídos a sistemas de vales estuarinos incisos (ROSSETTI et al., 2001). Para esta unidade,

na região de Açailândia, predomina-se um sistema estuarino-lagunar episodicamente atingido por ondas de grande escala, no qual foram observados os seguintes ambientes: canal fluvial, laguna, canal de maré e litorâneo. Os depósitos são de natureza transgressiva, e o litotipo mais frequente é formado de arenitos variegados, finos, friáveis, com estruturas diversas, como, por exemplo, estratificações cruzadas swaley, hummocky, acanalada, tabular, mud couplets e escorregamento de massa. A Formação Itapecuru recobre discordantemente as Formações Grajaú e Codó (ROSSETTI et al., 2001).

2.4.6 Rochas magmáticas

Um novo estágio tectônico no Brasil estabeleceu-se através da ruptura do megacontinente Pangea, o da ativação, que levaria à abertura do Oceano Atlântico. Eventos distensionais, remobilização de falhas antigas, surgimento de fraturas e intenso magmatismo básico caracterizaram essa etapa mesozóica na evolução da área que, posteriormente, tornou-se o território brasileiro (ALMEIDA; CARNEIRO, 2004; ZALÁN, 2004). Nesse contexto tectônico, na Bacia do Parnaíba acomodaram-se as ígneas intrusivas (diques e soleiras) e extrusivas, de composição básica, as quais do ponto de vista estratigráfico foram divididas em duas unidades: Formação Mosquito e Formação Sardinha. Em subsuperfície, os diques e soleiras estão presentes em maior quantidade na Sequência Mesodevoniana-Eocarbonífera e ocorrem também na Sequência Siluriana e são muito raros na Neocarbonífera-Eotriássica.

A Formação Mosquito constitui-se de derrames basálticos com intercalações de arenitos que afloram no rio homônimo, ao sul da cidade de Fortaleza dos Nogueiras (MA). A Formação Sardinha constitui-se de corpos de basalto, preto a roxo, mapeados entre as cidades de Fortaleza dos Nogueiras e Barra do Corda (AGUIAR, 1971). O magmatismo da Formação Mosquito estaria relacionado ao rifteamento do Atlântico Central, e o Sardinha ao do Atlântico Sul (MILANI; THOMAZ FILHO, 2000). Em subsuperfície, segundo a interpretação sísmica, há soleiras numa grande extensão da bacia, no entanto com base no conhecimento atual não sabemos quais delas classificar como Mosquito ou Sardinha. Porém, por correlação com as bacias do Solimões e Amazonas, predominam, possivelmente, as ígneas Mosquito que provieram do Magmatismo Penatecaua (VAZ et al., 2007).

2.5 SISTEMAS PETROLÍFEROS

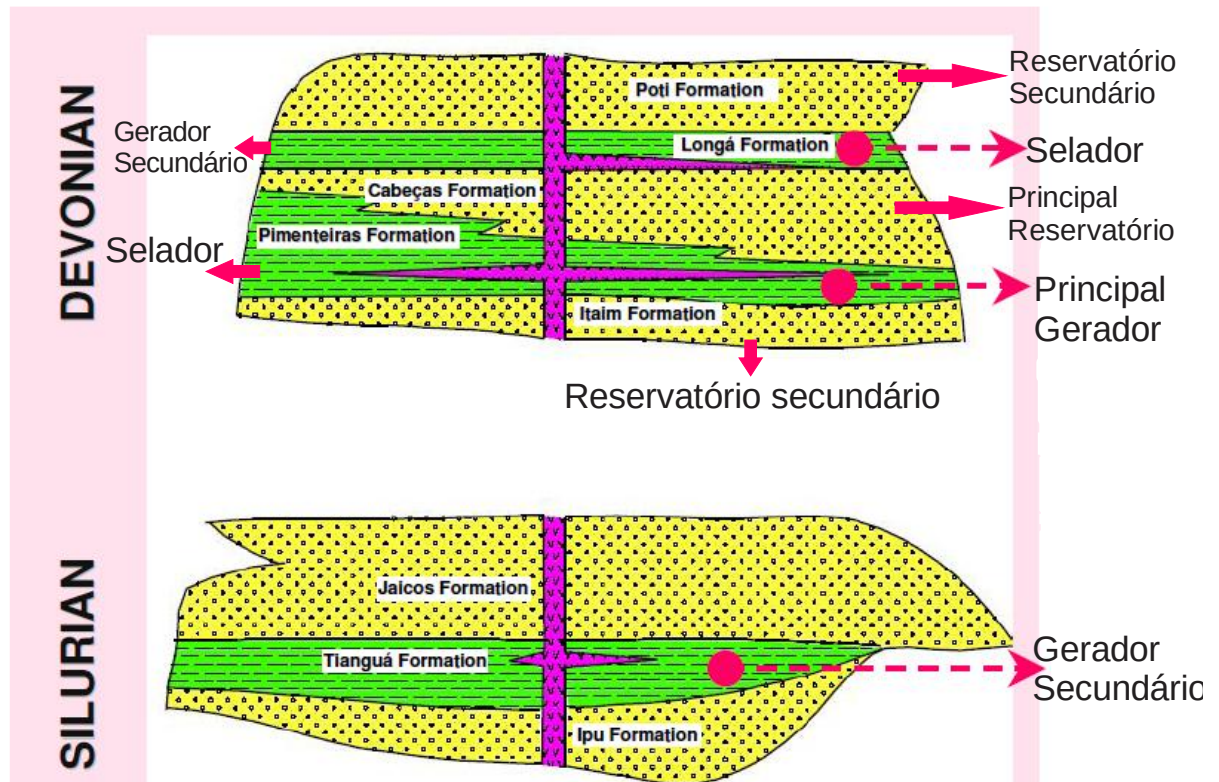
As informações adquiridas sobre a Bacia do Parnaíba permitem que condições básicas, como reservatório, geração, migração e trapeamento, para a ocorrência de acumulações de hidrocarbonetos existam. Para a Formação Pimenteiras considera-se como a principal unidade potencialmente geradora de hidrocarbonetos (Figura 10), com grande extensão e alcançando espessuras superiores a 500m.

A matéria orgânica predominante é do tipo II e III (QUADROS, 1980). A relativa quantidade orgânica dos folhelhos desta formação é restrita a níveis de radioatividade elevada, atingindo valores de carbono orgânico total residual de até 6% e isólitais máximas em torno de 60m.

O principal reservatório potencial são os arenitos devonianos da Formação Cabeças. Para esse reservatório a Formação Longá funcionaria como seladora, ou seja, impediria a migração do óleo, e a Formação Pimenteiras seria o gerador do hidrocarboneto.

Os reservatórios potenciais secundários seriam a Formação Itaim e a Formação Poti. Para o reservatório da Formação Itaim, a Formação Pimenteiras, nessa situação, serviria como uma seladora para este hidrocarboneto e a Formação Tianguá seria a geradora. Para o reservatório da Formação Poti, a Formação Longá, nessa circunstância, seria a geradora do hidrocarboneto (Figura 10).

Figura 10 - Localização das rochas geradoras, reservatórias e seladoras na carta estratigráfica.



Fonte: Modificado de Góes e Feijó (1984)

3 MODELAGEM

Modelagem consiste no conjunto de todos os métodos matemáticos que permitem produzir um modelo de topografia, geometria e propriedades petrofísica de um objeto geológico em estudo, considerando todos os tipos de dados relativos a esses objetos. Permite visualizar partes internas de uma determinada estrutura, gerando uma imagem de um possível reservatório geralmente enterrado milhares de metros abaixo da superfície e que muitos limites são desconhecidos (MALLET, 2008).

Na modelagem podem se 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. A Modelagem Analógica consiste em um objeto que é reproduzido com matérias substitutas e frequentemente em escala diferente da original. Em geofísica são micro-levantamentos feitos sobre um modelo físico em escala reduzida. A Modelagem Computacional ou Digital consiste em processos matemáticos feitos geralmente com auxílios de computadores e softwares. Busca-se sintetizar a seção sísmica correspondente a um modelo geológico (modelo direto) ou modelo geológico correspondente aos dados sísmicos (modelo inverso), ou um modelo geológico correspondente aos dados sísmicos (modelo inverso), de um sistema e estrutura. Também, utilizam-se técnicas de modelagem acústicas e elásticas que usam as ondas P e as ondas P e S em seus modelos.

3.1 MODELAGEM GEOLÓGICA 3D

A modelagem geológica tridimensional envolve a construção, visualização e manipulação de elementos geológicos no espaço tridimensional, com a possibilidade de integrar diversas ferramentas, como informações geofísicas (seções sísmicas e poços, por exemplo) e produtos de sensores remotos como imagens de satélites e fotografias de áreas.

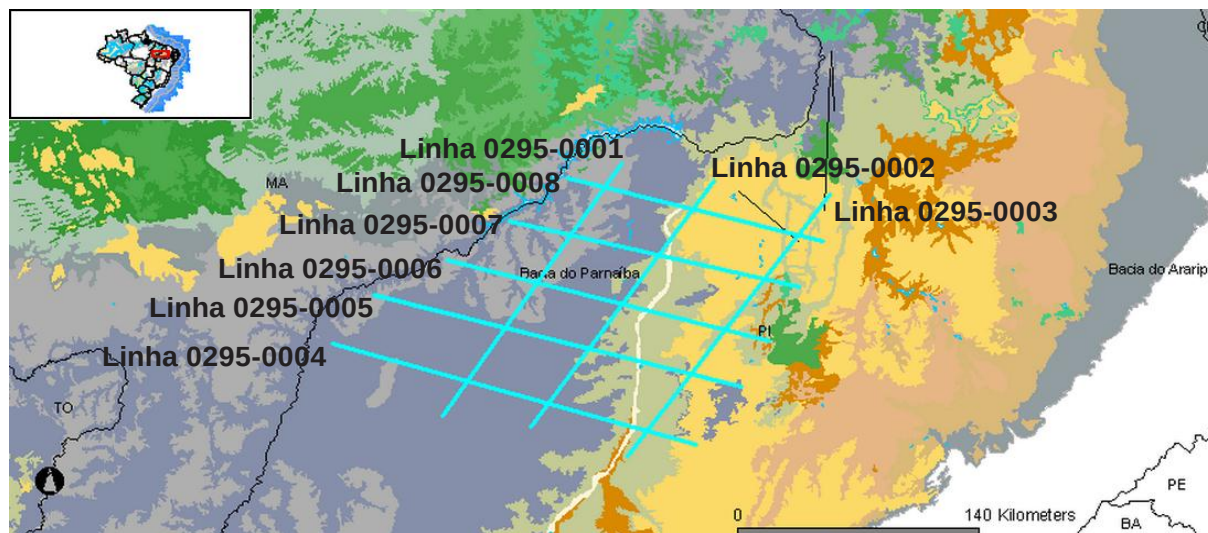
4 METODOLOGIA

Neste capítulo apresentam-se os dados utilizados e descrevem-se com detalhes a metodologia utilizada e as etapas que proporcionaram a construção do modelo geológico-estrutural.

4.1 GENERALIDADES DOS DADOS

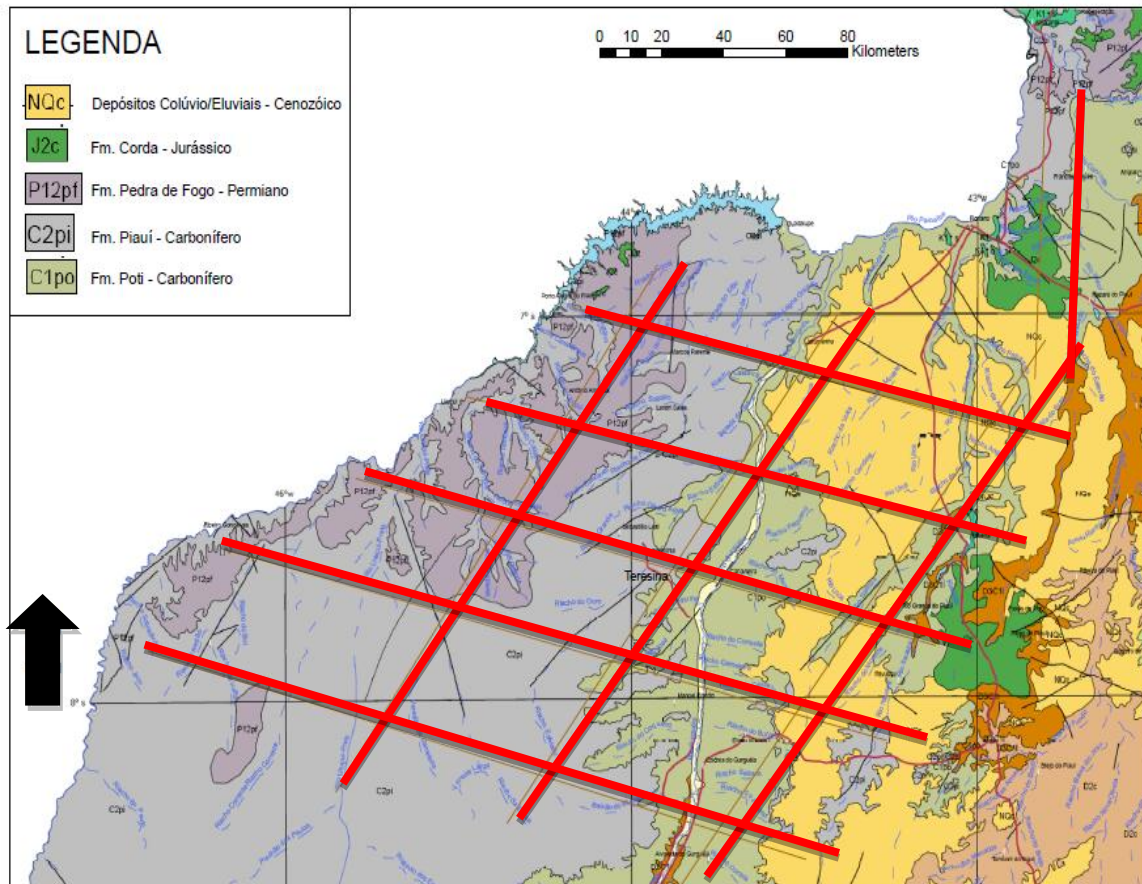
As linhas sísmicas utilizadas neste trabalho ficam localizadas na porção sudeste da Bacia do Parnaíba (Figura 11), mais precisamente na região centro-sul do estado do Piauí. Essas linhas fazem parte de um projeto da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) que recebeu o nome de 0295_ANP_2D_PARNAIBA, o qual constou de um total de nove linhas sísmicas 2D, pós-stack e com 1600Km de extensão linear, abrangendo mais de 55.000 Km². Essa malha foi traçada por geólogos e geofísicos da ANP, a partir de mapas geológicos da área alvo (Figura 13) e mapas gravimétricos pertencentes à área, acompanhando a trajetória *dip* e *strike* do lineamento estrutural Transbrasiliano, com o objetivo de avaliar o potencial petrolífero da Bacia do Parnaíba. Neste trabalho foram utilizadas oito dessas linhas, que são as linhas 0295-0001, 0295-0002, 0295-0003, 0295-0004, 0295-0005, 0295-0006, 0295-0007, e 0295-0008. Este conjunto de dados foi adquirido da ANP pelo Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará (IG-UFPA) para fins de desenvolvimento acadêmico. Assim, as linhas sísmicas foram adquiridas da ANP já processadas. As linhas adquiridas estavam migradas em tempo pré e pós-stack. Sendo as linhas migradas em tempo pós-stack as utilizadas para a interpretação e, por conseguinte, as utilizadas para realizar a modelagem.

Figura 11 - Mapa de localização da área alvo na Bacia do Parnaíba com as linhas sísmicas utilizadas em azul.



Fonte: Modificado ANP (2013)

Figura 12 - Mapa geológico da região da área alvo.

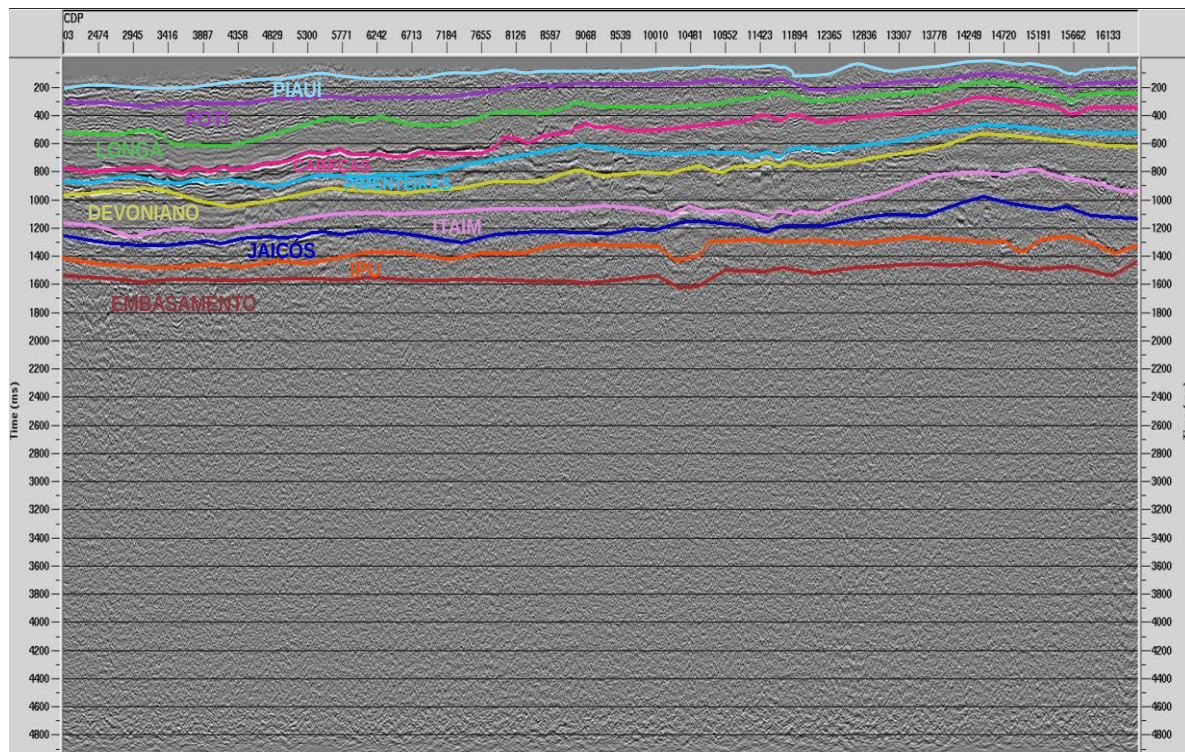


Fonte: Modificado de Santos e Carvalho (2009)

4.2 SEÇÕES SÍSMICAS INTERPRETADAS

Teixeira (2010) e Pinheiro (2011) fizeram a interpretação das linhas sísmicas 0295-0007, 0295-0008 e partes das linhas 0295-0001, 0295-0002 e 0295-0003. E em processo de conclusão de trabalho de curso (Graduação em Geofísica), Rafael M. Holanda interpretou as linhas sísmicas 0295-0001, 0295-0002, 0295-0003, 0295-0004, 0295-0005 e 0295-0006. Com base nessas seções sísmicas interpretadas foram feitas as marcações dos horizontes, que serão utilizadas para a modelagem 3D sísmo-estratigráfica e estrutural, nas seguintes seções abaixo:

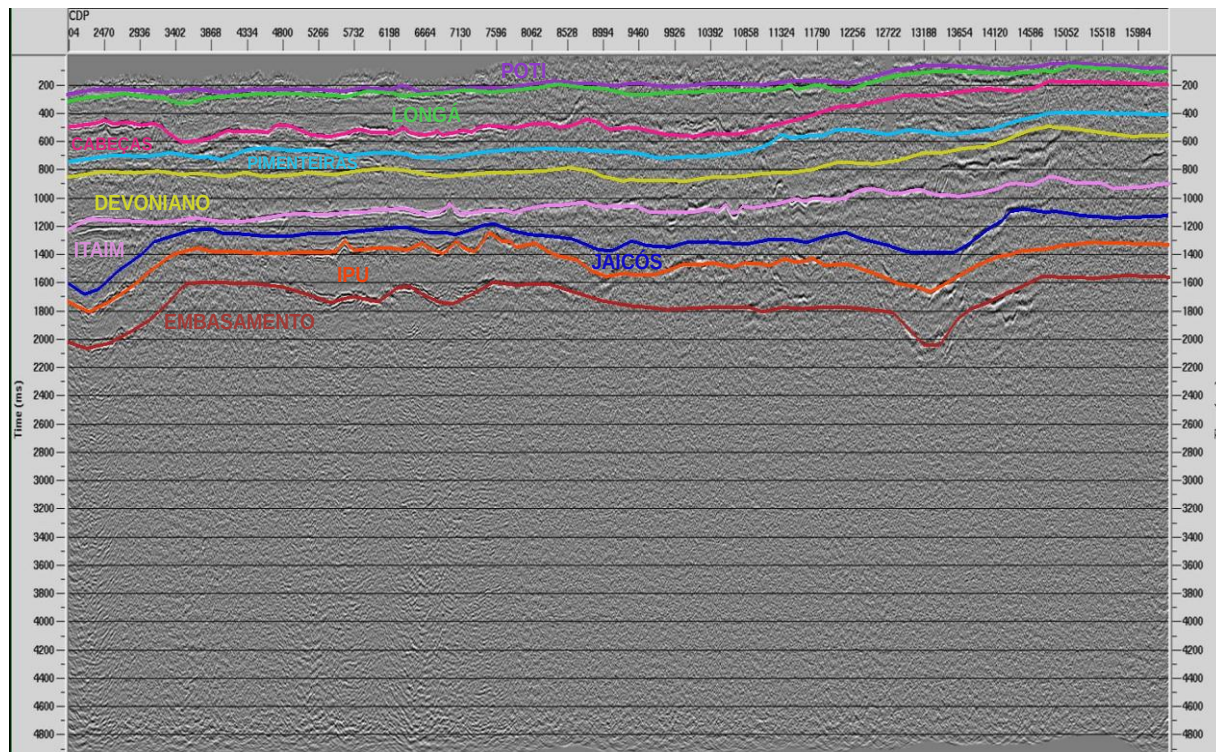
Figura 13 - Seção sísmica interpretada da linha 0295-0001.



Fonte: autor

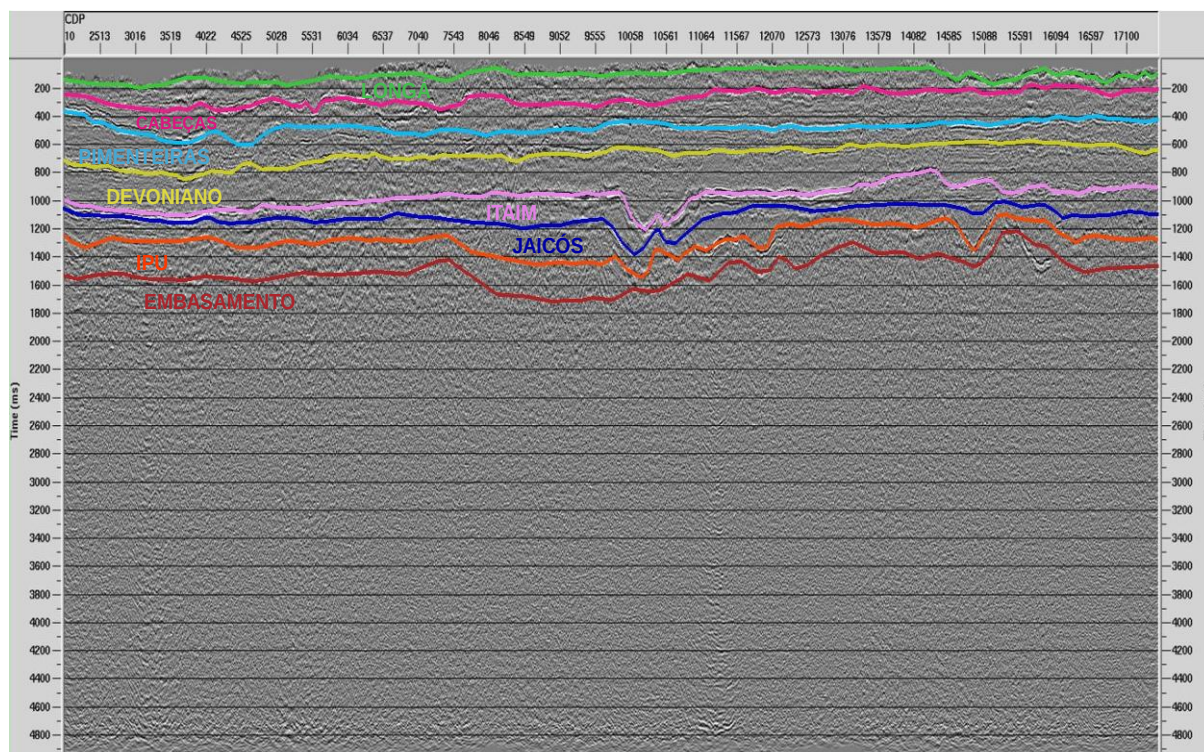
Nesta seção sísmica (Figura 13), o horizonte da Formação Piauí não foi utilizado para a construção de nenhum modelo deste trabalho, já que esse horizonte só aparece nessa seção sísmica.

Figura 14 - Seção sísmica interpretada da linha 0295-0002.



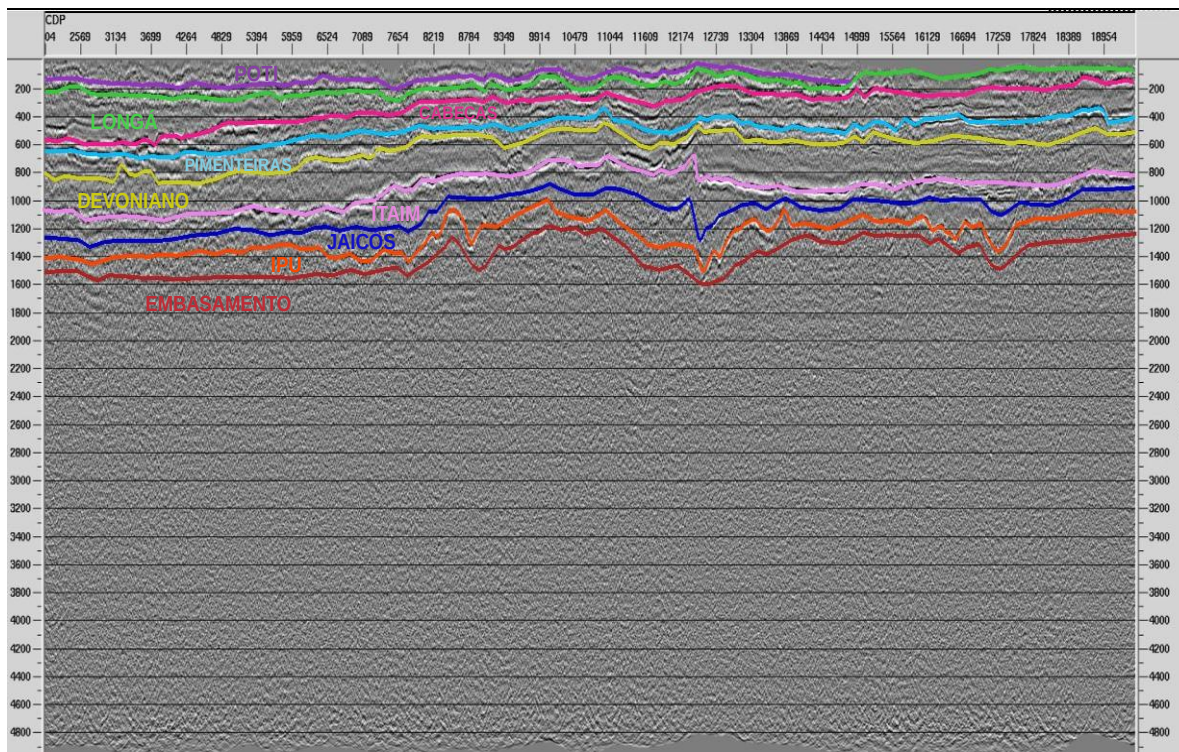
Fonte: autor

Figura 15 - Seção sísmica interpretada da linha 0295-0003.



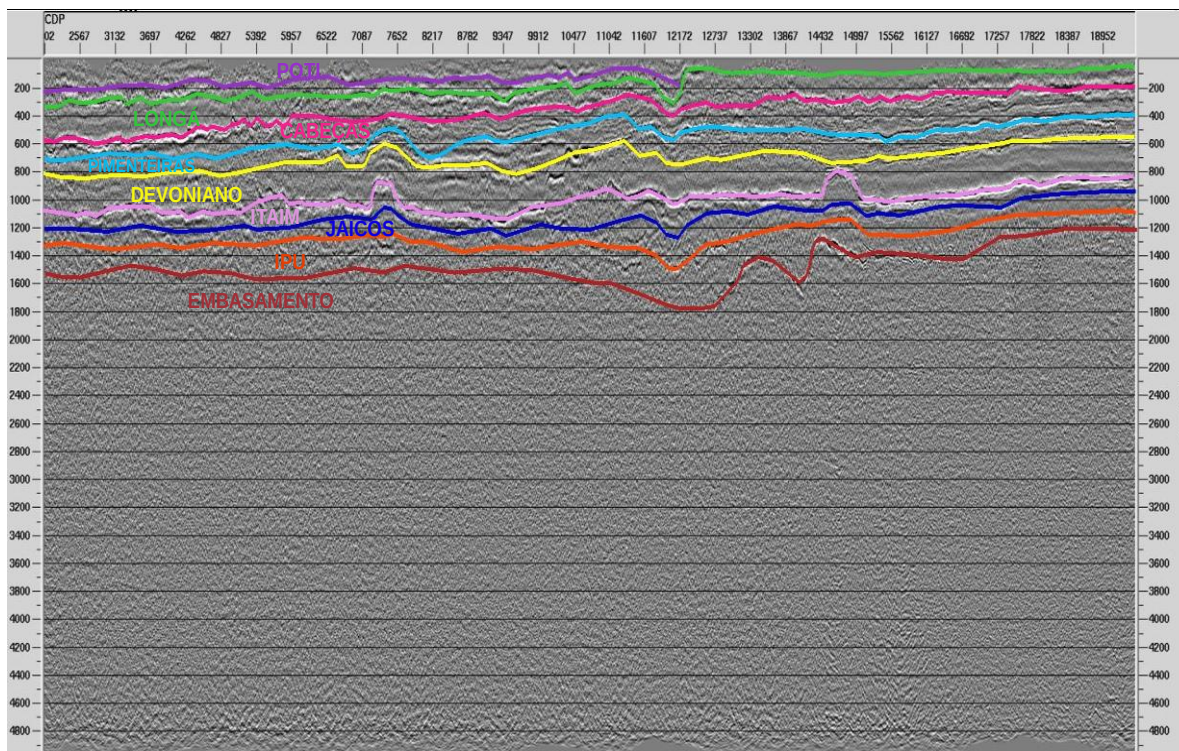
Fonte: autor

Figura 16 - Seção sísmica interpretada da linha 0295-0004.



Fonte: autor

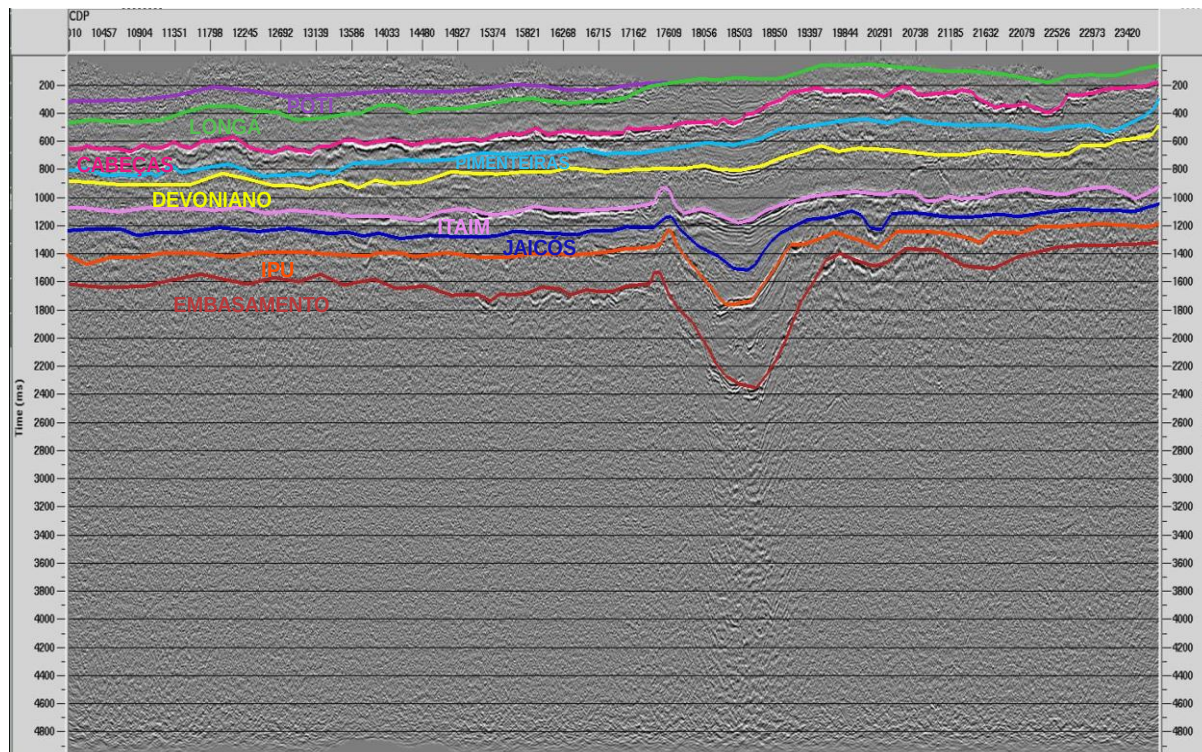
Figura 17 - Seção sísmica interpretada da linha 0295-0005.



Fonte: autor

Fonte: autor

Figura 20 - Seção sísmica interpretada da linha 0295-0008.



Fonte: autor

4.3 SOFTWARE DE MODELAGEM GOCAD

No presente trabalho utilizou-se o *software Geological Object Computer Aided Desing* (GOCAD), que faz parte do consórcio GOCAD (França). É um *software* de modelagem computacional utilizado na geofísica e na geologia, que propicia uma melhor interpretação relacionada com as estruturas geológicas complexas como: falhas, dobras, domos, soleiras, diques, etc. Este *software* também permite a visualização simultânea e conseqüentemente uma interpretação integrada de diferentes elementos geológicos como topografia, estruturas tectônicas, horizontes estratigráficos e parâmetros geofísicos. 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.

Vários trabalhos foram feitos com o *software* GOCAD, para a construção de modelagem e visualização 3D.

De Lima et al. (2005) modelaram e visualizaram o reservatório Mossoró (Natal-Brasil) a partir de dados obtidos com algoritmos de percolação. Isto é

importante no estudo da injeção alternativa de água e gás na recuperação de petróleo.

Chira-Oliva et al. (2008) modelaram e visualizaram as soleiras de diabásio e principalmente o reservatório correspondente a Fm. Monte Alegre presentes em uma determinada área da bacia sedimentar paleozóica Amazonas. Eles construíram vários modelos (estrutural, estratigráfico e de velocidades) para entender e qualificar riscos associados à exploração e produção de hidrocarbonetos nas regiões onde existem diabásio.

Este software foi utilizado para modelar as estruturas geológicas da Bacia do Parnaíba, devido o GOCAD apresentar significativas vantagens.

4.4 MODELO ESTRUTURAL 3D

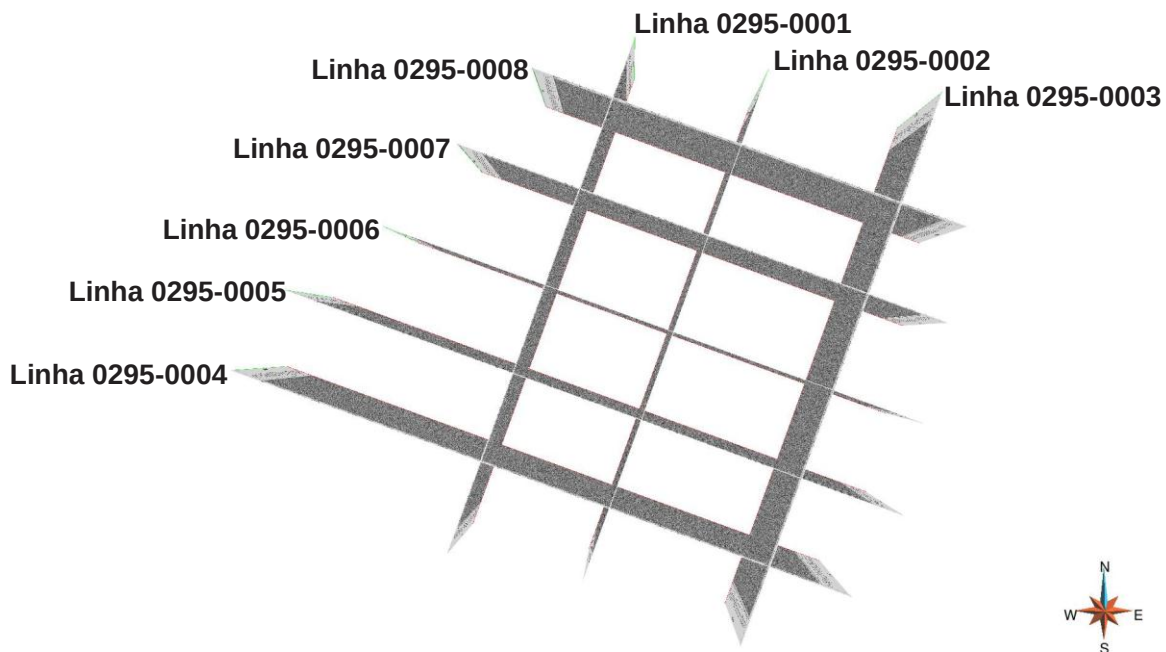
O modelo construído foi feito através do módulo *Building a Structural Framework* do software GOCAD. Esse módulo é utilizado para construção de modelos estruturais com dados dos horizontes e falhas (GOCAD, 2008). Neste modelo não se construiu nenhuma falha devido à falta de informação geológica. Para a construção do modelo foram realizadas as seguintes etapas:

- Importar os arquivos com os dados dos horizontes (seções interpretadas);
- Criar as curvas que representam os horizontes interpretados;
- Especificar a área de interesse;
- Criar o volume de interesse;
- Criar as superfícies dos horizontes;
- Modelar as superfícies;
- Modelar os contatos das superfícies.

Os dados de entrada para o módulo *Building a Structural Framework* podem ser de vários tipos, como por exemplo: pontos, curvas, superfícies, etc. O objeto utilizado para carregar no módulo estrutural do GOCAD foram curvas. As curvas criadas para representar os horizontes interpretados não perderam informações, pois essas curvas podem ser editadas no *menu tool* do objeto curvas. Ou seja, qualquer detalhe do horizonte pode ser marcado pelas curvas, para isto basta adicionar mais pontos a curva e manipulá-los para qualquer direção do horizonte. Essa etapa foi realizada após carregar-se na janela *3D Viewer* do GOCAD, como

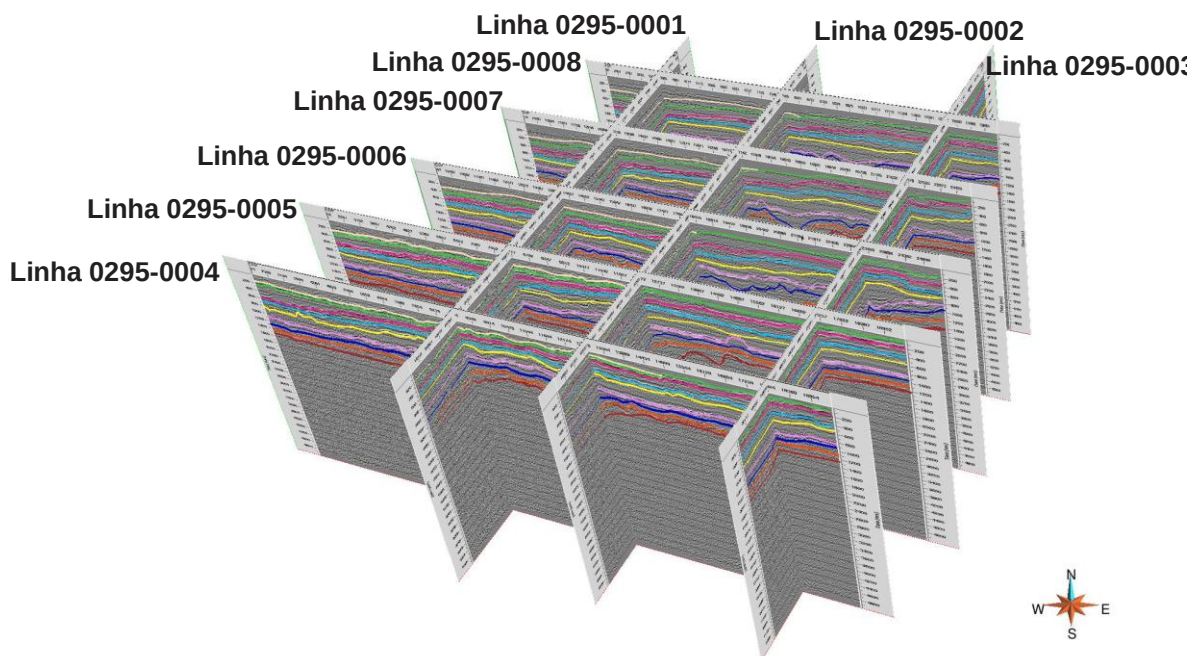
objeto *Voxel*, as seções sísmicas posicionadas em suas respectivas posições de levantamento (Figura 21) e com as interpretações marcadas (Figura 22). Posteriormente, agrupar-se todas as curvas que representam o mesmo refletor (Figura 23) e criar um único objeto do tipo curva que represente esse refletor marcado na seção sísmica. Em seguida, especifica-se a área de interesse que o modelo estrutural terá (Figura 24). Através da área é possível criar o volume de interesse (Figura 25). O volume é criado automaticamente pelo módulo estrutural do GOCAD, basta acionar o botão criar volume de interesse. Agora, criam-se todas as superfícies que representam os horizontes das seções sísmicas. Depois, modelam-se as superfícies para que passem por todos os pontos das curvas interpretadas. Para isto é necessário editar a borda de cada superfície criada, para que a borda intercepte todas as curvas que fazem parte do refletor e criar novamente as superfícies com as novas bordas editadas. Também, pode ser feito mais interpolação dos triângulos que formam a superfície até que a superfície fique bem suave. Por último, modelam-se os contatos entre as superfícies que se interceptam. Neste modelo estrutural a única interseção ocorrida entre as superfícies foram as que representam o topo da Formação Poti e o topo da Formação Longá. Para corrigir essa interseção não foi utilizado o módulo estrutural do GOCAD, mas os seus objetos. Neste caso, foi marcado o contato entre as superfícies da Formação Poti e da Formação Longá, que se interceptam, para que se determinasse a região da superfície da Formação Poti que seria retirada conforme a interpretação feita da região sugere.

Figura 21 - Visualização 2D das linhas sísmicas interpretadas na janela 3D Viewer do GOCAD, com suas respectivas posições.



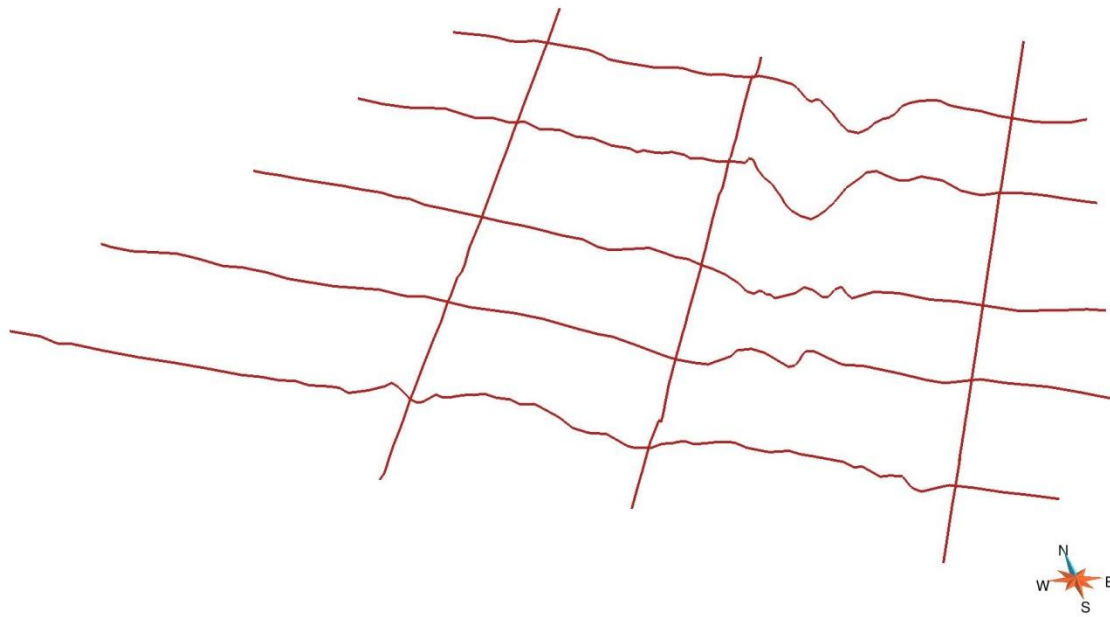
Fonte: autor

Figura 22 - Visualização 3D das seções sísmicas interpretadas na janela 3D Viewer do GOCAD, com suas respectivas posições.



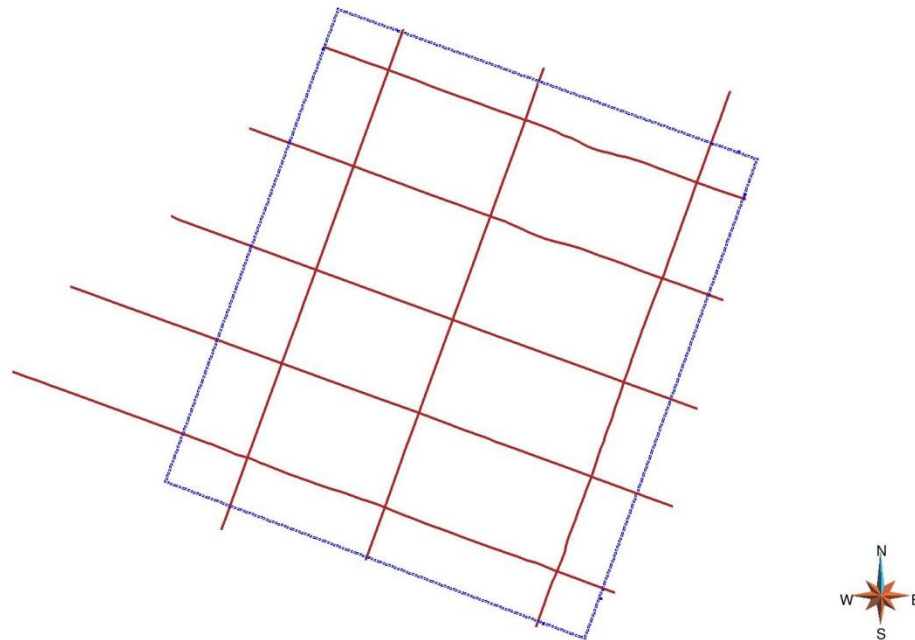
Fonte: autor

Figura 23 - Visualização 3D no GOCAD das curvas que representam o topo do Embasamento.



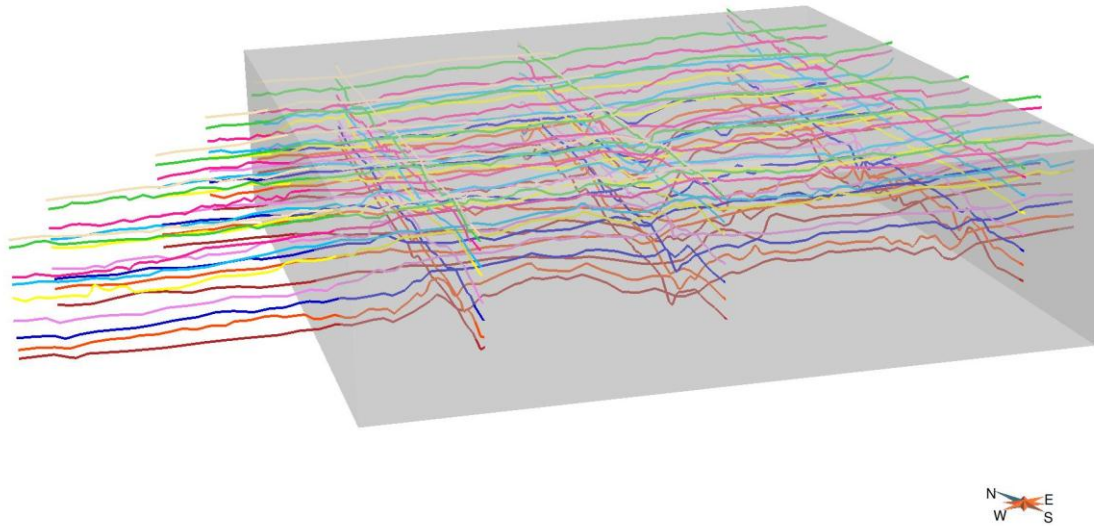
Fonte: autor

Figura 24 - Visualização 3D no GOCAD das curvas que representam o topo do Embasamento com a borda.



Fonte: autor

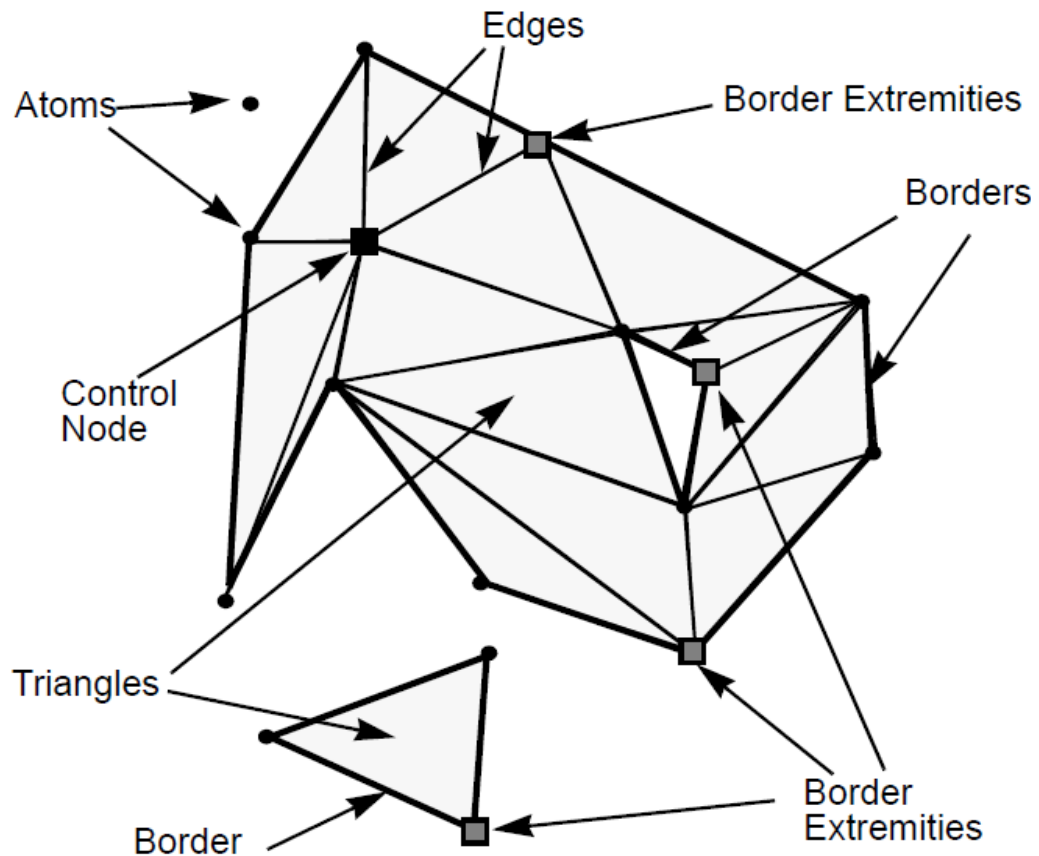
Figura 25 – Visualização 3D no GOCAD do volume dos refletores.



Fonte: autor

O GOCAD cria as superfícies através da conexão de triângulos. Cada triângulo é composto de três átomos, um em cada canto (GOCAD, 2008), como mostra a Figura 26.

Figura 26 - Exemplo de como o *software* GOCAD cria uma superfície através de triângulos. Atoms: são pontos; Edges: são linhas; Borders: são bordas; Control Node: é ponto de controle; Border Extremities: são as extremidades da borda; Triangles: são triângulos.



Fonte: GOCAD (2008)

4.5 MODELO ESTRATIGRÁFICO 3D

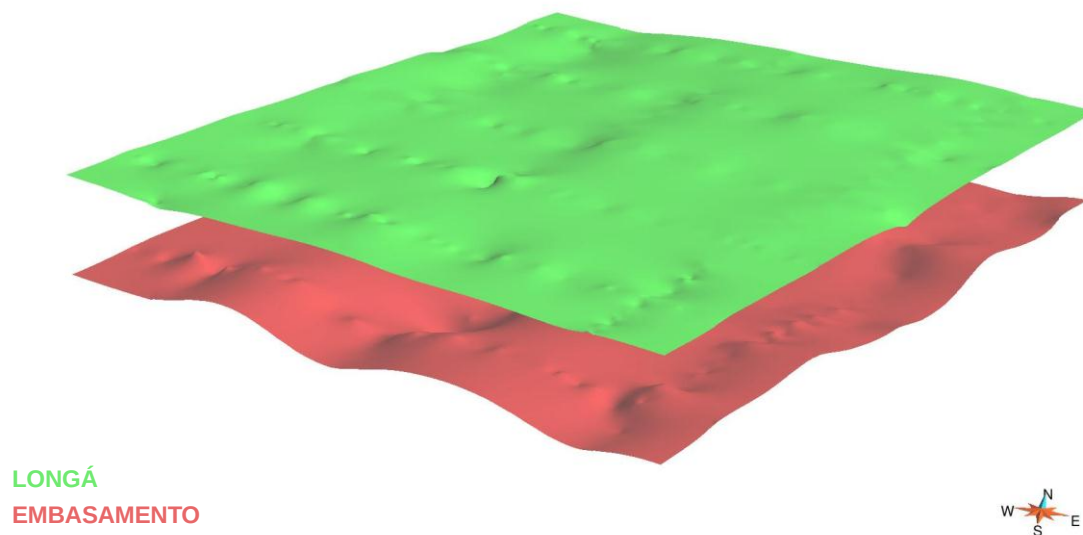
Para a construção do modelo estratigráfico utilizou-se o módulo do GOCAD *3D Reservoir Grid Builder*. Este módulo facilita a construção de modelos estratigráficos, também chamados de malhas estratigráficas ou malhas de reservatórios 3D. A construção do modelo estrutural 3D é um pré-requisito para a construção do modelo estratigráfico 3D. Neste modelo estratigráfico não foi considerada a superfície que representa o topo da Formação Poti, já que essa não representava toda a área pré-estabelecida para o modelo estrutural. Todas as etapas utilizadas para a construção deste modelo estratigráfico estão apresentadas abaixo:

- 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;
- Criar a malha da área de controle da estrutura do modelo;
- Definir as unidades estratigráficas intermediárias;
- Construir a malha das unidades intermediárias;
- Construir todas as camadas do modelo 3D.

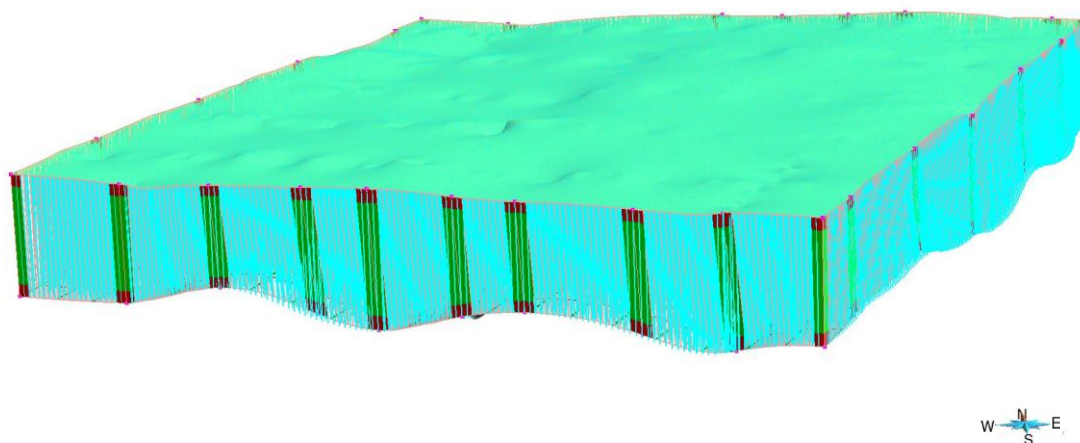
O módulo para construção dessa malha 3D apresenta duas opções, a primeira através de superfícies triangulares 2D e a segunda através de malhas 2D. A opção utilizada foi a de superfícies triangulares 2D, em seguida escolhemos as superfícies do topo e da base (Figura 27), que irão controlar toda a estrutura do modelo. A superfície escolhida para o topo do modelo estratigráfico foi a superfície que representa a Formação Longá, já que a superfície da Formação Poti não compreende toda a área escolhida para o modelo estratigráfico. A superfície escolhida para a base do modelo foi a do embasamento. A construção da malha 3D entre o topo e a base pode ser feita de dois modos: automático ou interativo. Utilizou-se o modo interativo (Figura 28), já que o modelo obtido pelo modo automático apresentava deformidades nas bordas. No modo interativo é necessário que se determinem todos os pares de interação das bordas do topo com as bordas da base. Após essa etapa definem-se as unidades estratigráficas intermediárias, para isto utiliza-se da coluna estratigráfica interpretada criando assim as unidades intermediárias. Por último, criam-se todas as camadas do modelo 3D.

Figura 27 - Visualização 3D no GOCAD do topo e da base.



Fonte: autor

Figura 28 - Visualização 3D no GOCAD da construção da malha pelo modo interativo.



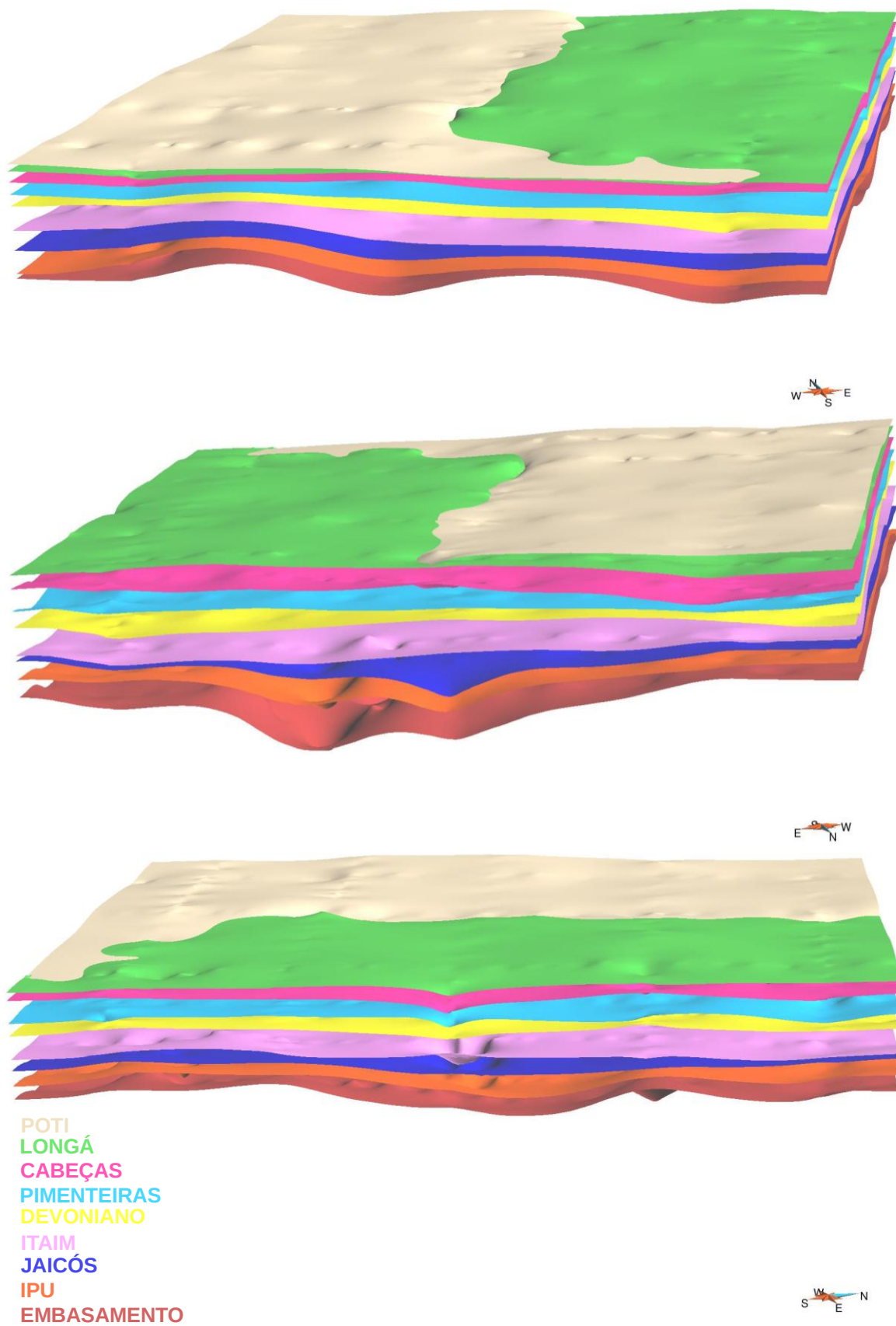
Fonte: autor

5 RESULTADOS

O modelo estrutural 3D construído possui nove superfícies, que representam o topo das camadas da subsuperfície da região alvo da Bacia do Parnaíba. As superfícies são na ordem da base para o topo: Embasamento (vermelho), Formação Ipu (laranja), Formação Jaicós (azul marinho), Formação Itaim (rosa claro), um refletor muito marcante de idade Devoniano Médio (amarelo), Formação Pimenteiras (azul claro), Formação Cabeças (rosa), Formação Longá (verde) e Formação Poti (bege), como mostram a Figura 29.

Na Figura 29 observa-se que a superfície que representa a Formação Poti não preenche toda a área definida para o modelo, porque nesta região a Formação Poti está na superfície da área desta bacia, como este modelo estrutural é de subsuperfície, só visualiza as camadas que estão abaixo da superfície.

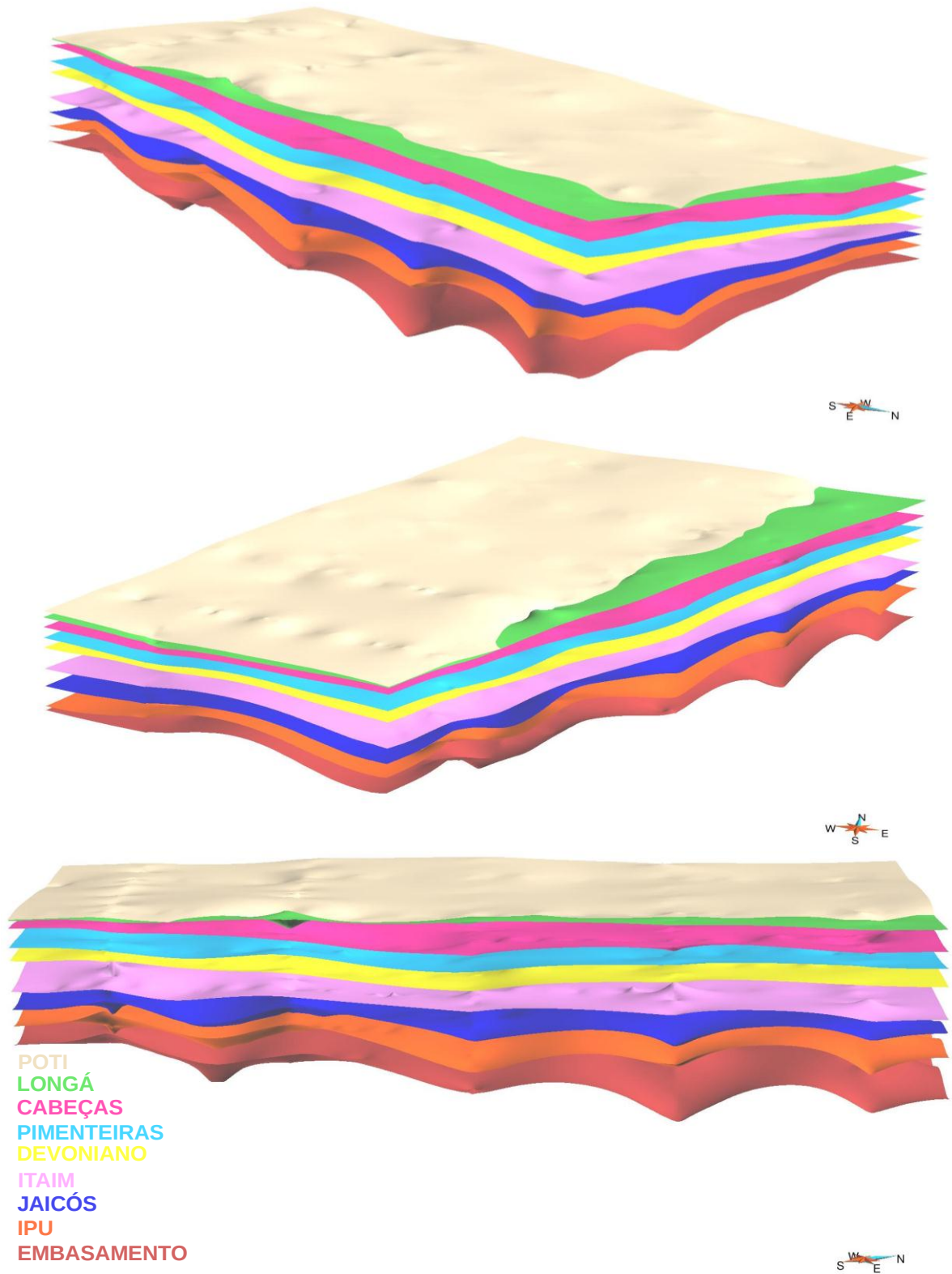
Figura 29 - Visualizações no GOCAD do Modelo Estrutural 3D.



Fonte: autor

Um corte foi feito no modelo estrutural (Figura 32) na direção de alguns depocentros para melhorar a visualização do mesmo.

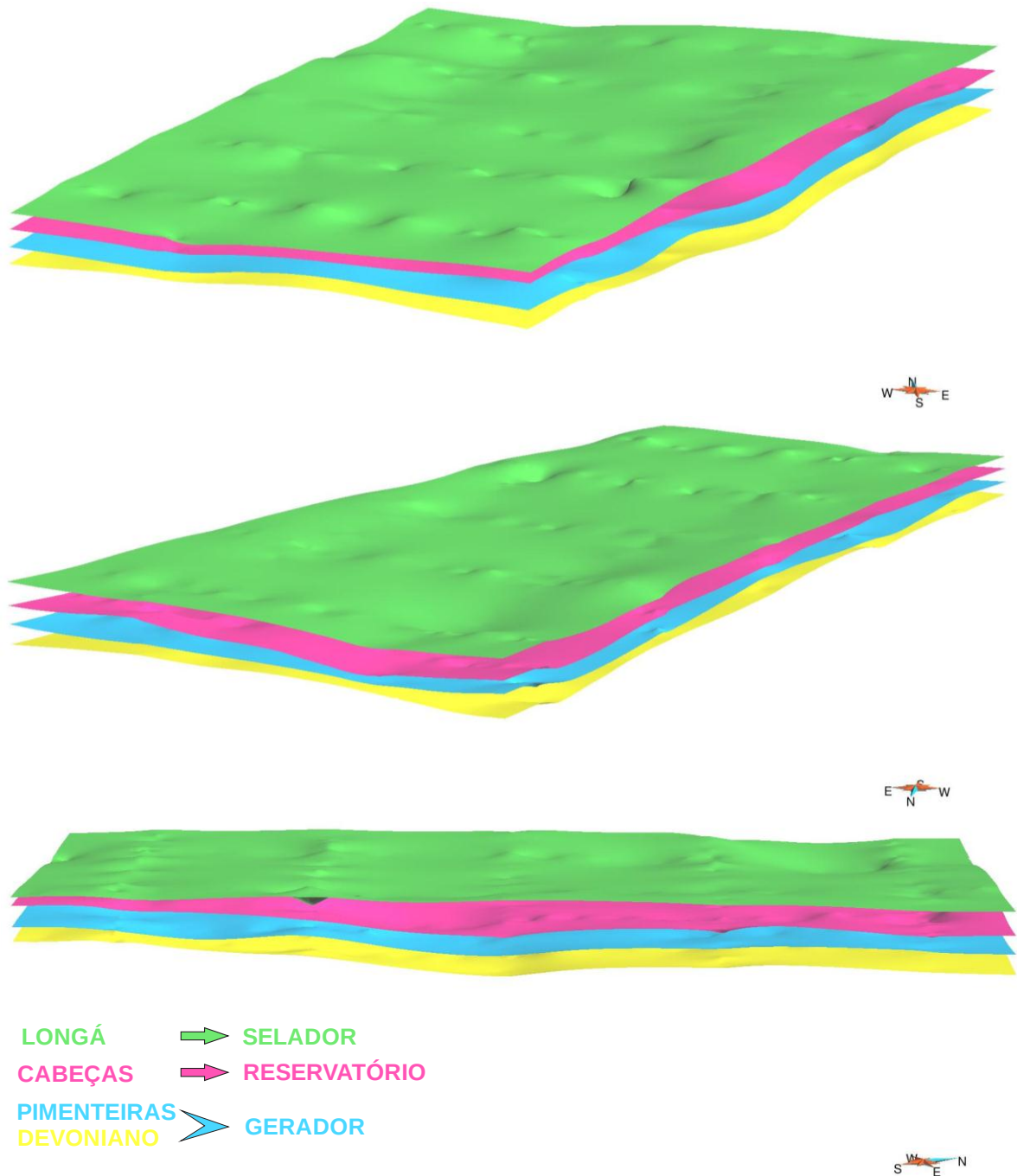
Figura 30 - Visualizações 3D no GOCAD do modelo estrutural com um corte feito na direção de alguns depocentros.



Fonte: autor

Um corte foi feito no modelo estrutural apenas com as superfícies que representam o principal sistema petrolífero potencial da bacia (Figura 34).

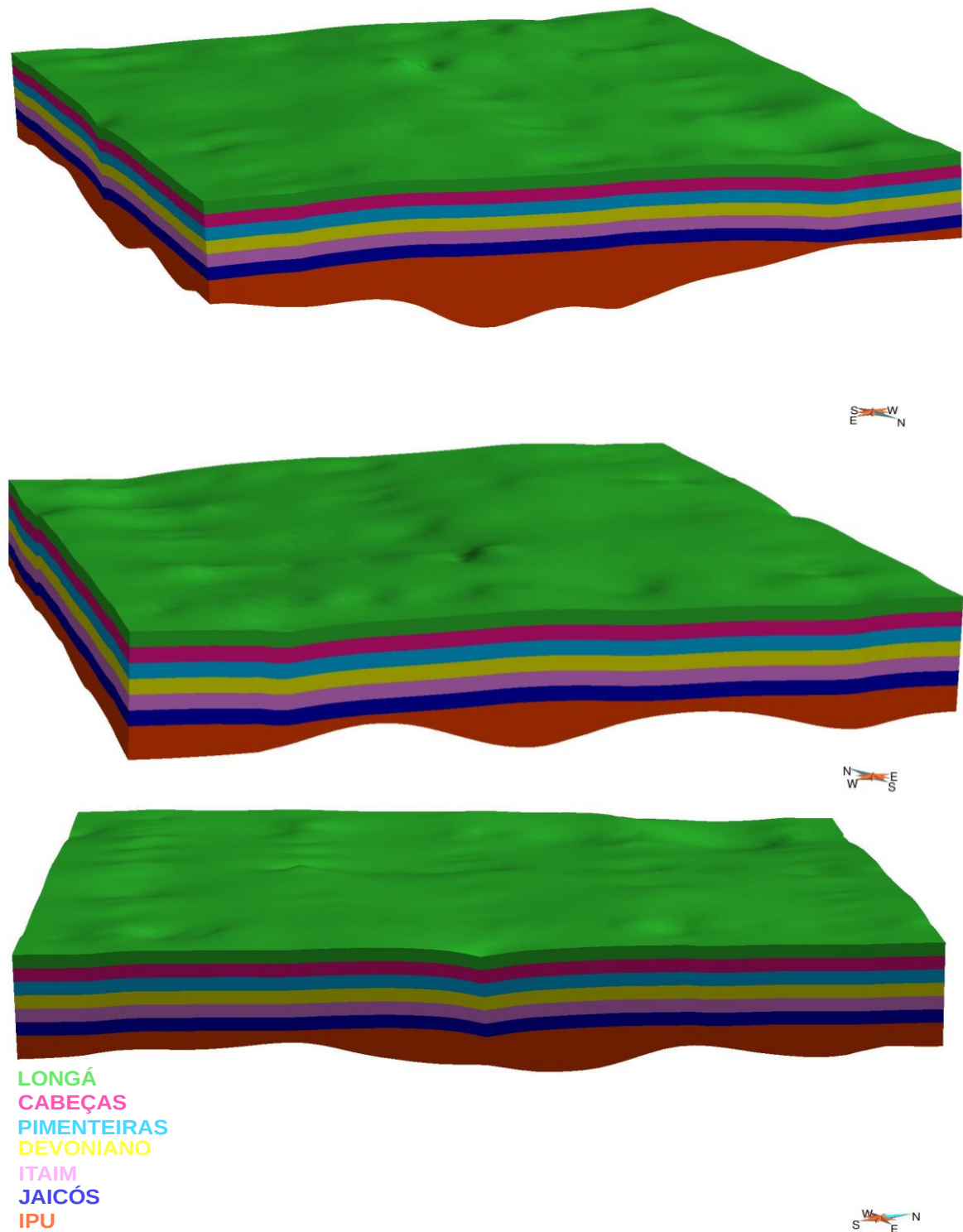
Figura 31 - Visualizações 3D no GOCAD de um corte feito nas superfícies que representam o principal sistema petrolífero potencial da Bacia do Parnaíba.



Fonte: autor

Para o modelo estratigráfico 3D construído, não foi considerado a superfície que representa o topo da Formação Poti. Por isso, este modelo estratigráfico possui apenas sete camadas, que são: Formação Ipu, Formação Jaicós, Formação Itaim, Camada do Devoniano, Formação Pimenteiras, Formação Cabeças e Formação Longá (Figura 30).

Figura 32 - Visualizações 3D no GOCAD do modelo estratigráfico.

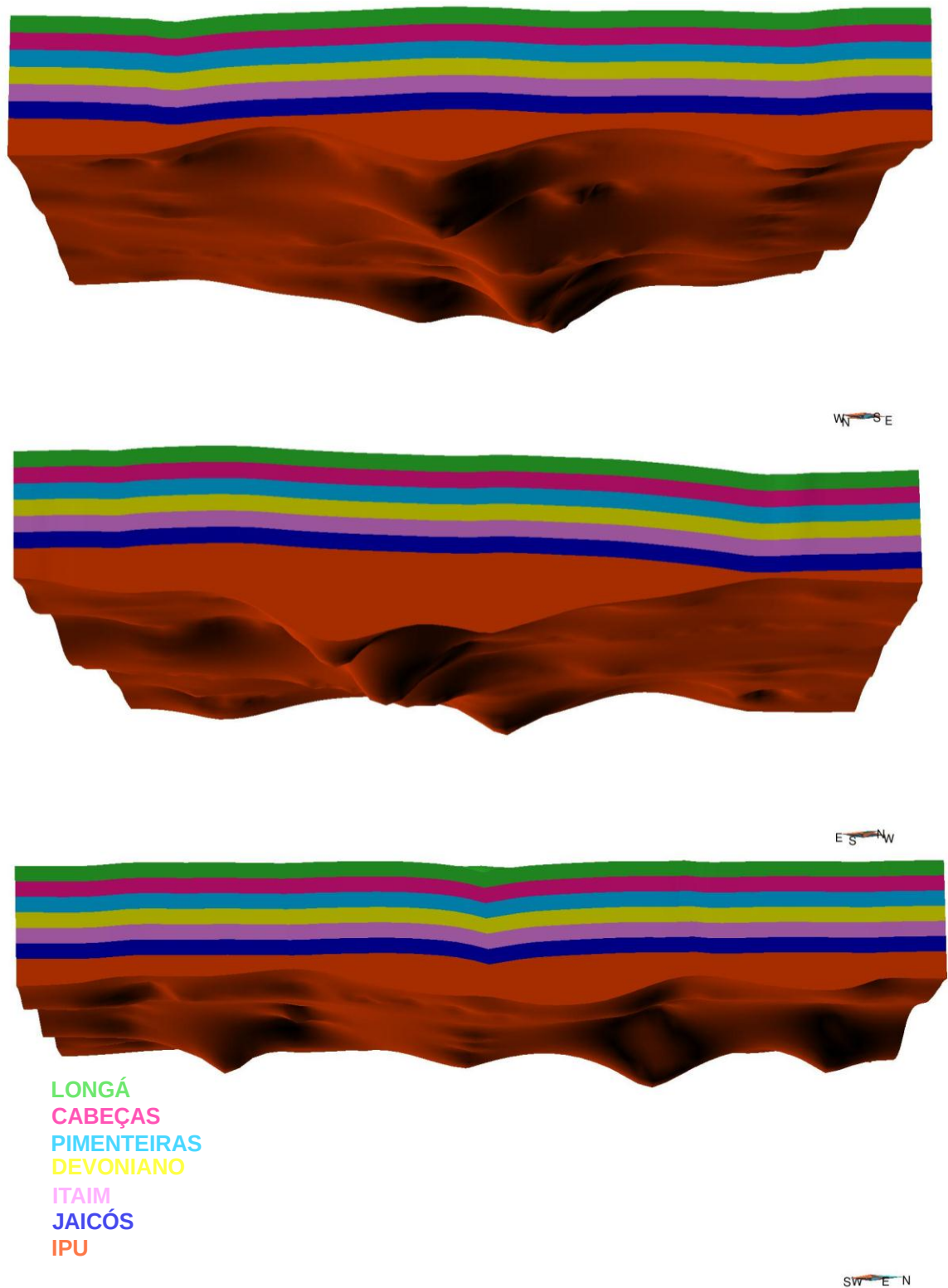


Fonte: autor

Verifica-se na camada da Formação Ipu os maiores depocentros dessa bacia, que podem estar relacionados ao Lineamento Transbrasiliano (Figura 31).

Consequentemente, essa visualização desses depocentros permitem traçar melhor a trajetória *dip* e *strike* do Lineamento Estrutural Transbrasiliiano.

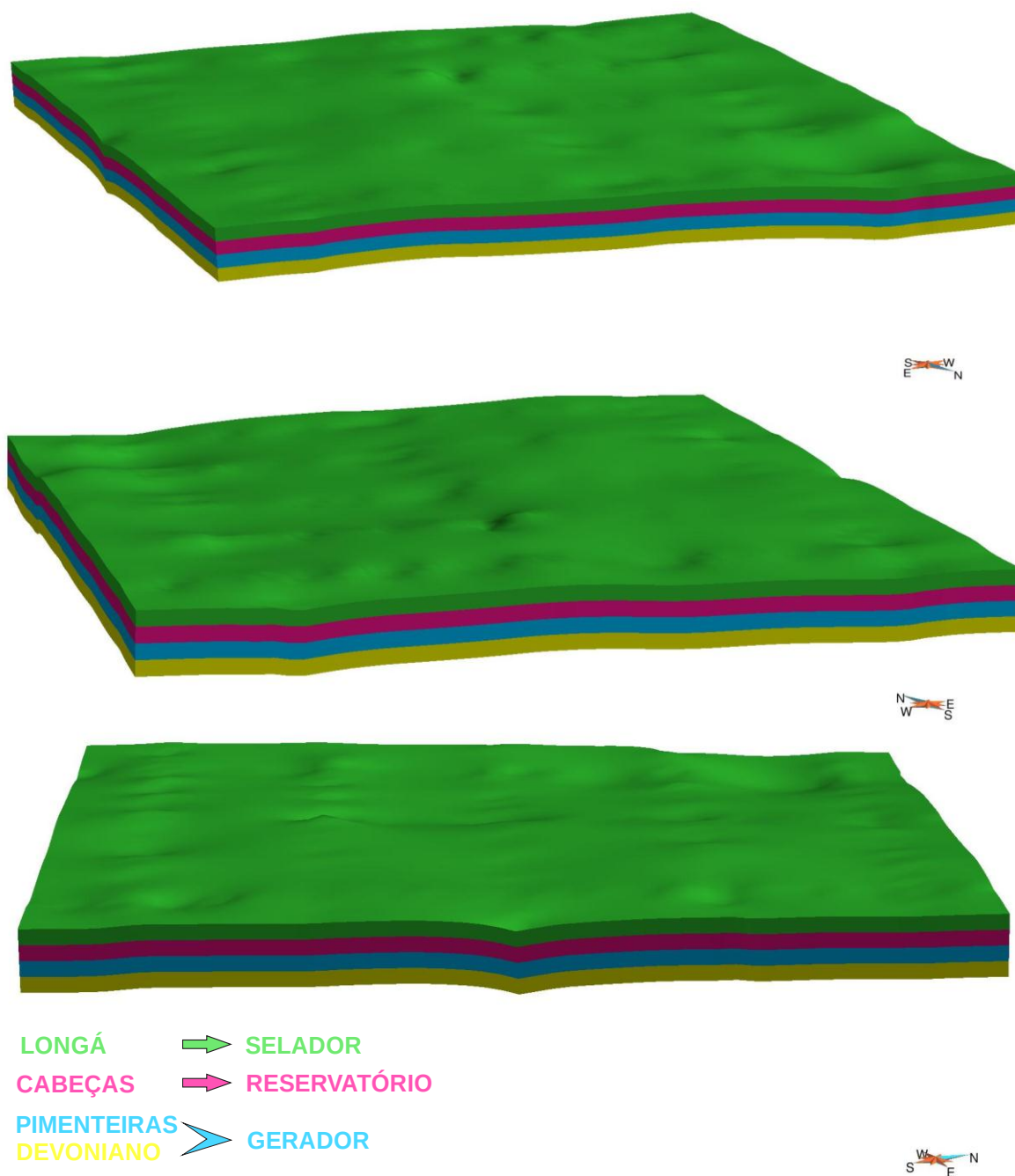
Figura 33 - Visualizações 3D no GOCAD de baixo para cima do modelo estratigráfico.



Fonte: autor

As formações que estão relacionadas ao sistema petrolífero da Bacia do Parnaíba, que são a Formação Pimenteiras como o principal gerador potencial do hidrocarboneto e a Formação Cabeças como o principal reservatório potencial da Bacia do Parnaíba, são mostradas com destaque através da visualização do modelo estrutural 3D (Figura 33).

Figura 34 - Visualizações 3D no GOCAD do principal sistema petrolífero potencial da Bacia do Parnaíba.



Fonte: autor

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

A modelagem 3D sismo-estratigráfica e estrutural mostrou-se satisfatória, já que foi possível criar sete camadas da região sudeste da Bacia do Parnaíba. Além de poder visualizar as feições geológicas do topo da Formação Pimenteiras, que é o gerador potencial principal dessa bacia, e visualizar a Formação Cabeças, que é o reservatório potencial principal dessa bacia, contribuindo para os estudos no âmbito da Geologia do Petróleo. Nos Modelos estrutural e estratigráficos 3D, também pode ser visualizado alguns depocentros que se estendem ao longo de toda a área mapeada, que podem estar relacionados ao Lineamento Transbrasiliano, principal lineamento regional da Bacia do Parnaíba.

Portanto, a Modelagem 3D, se mostra uma ferramenta de grande utilidade para o estudo de bacia sedimentares, revelando com clareza estruturas e as relações do embasamento com o pacote sedimentar e apresentando dado interessante que podem contribuir para o avanço do conhecimento geológico da Bacia do Parnaíba.

Entretanto, estes são apenas os modelos estrutural e estratigráfico 3D. Pode ser dada continuidade a este trabalho construindo o Modelo Geofísico 3D desta área da Bacia do Parnaíba. Também, recomenda-se que realize mais linhas sísmicas ao longo dos depocentros, já que a linha sísmica 0295-0002 passa apenas, no final e no começo, de dois depocentros. Além de ser necessário conhecer melhor esta região que pode estar relacionado ao Lineamento Estrutural Transbrasiliano.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, G. A. **Bacia do Maranhão**: geologia e possibilidades de petróleo. Belém: PETROBRAS, 1969. (Relatório Interno).
- AGUIAR, G. A. Revisão geológica da bacia paleozoica do Maranhão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 25., 1971, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia-SBG, 1971. v. 3, p.113-122.
- AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Linhas sísmicas 2D pós-stack**. Disponível em: <<http://maps.bdep.gov.br/website/mapas/images/pixel.gif>>. Acessado em: 10 março 2013.
- ALMEIDA, F. F. M.; CARNEIRO, C. D. R. Inundações marinhas fanerozóicas no Brasil e recursos minerais associados. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO-NEVES, B. B. (Org.). **Geologia do Continente Sul-Americano**: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Beca, 2004. p.43-58.
- CAPUTO, M. V. **Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of Northern Basins of Brazil**.1984. 583f. PhD (thesis) – University of California. Santa Barbara, 1984.
- CAPUTO, M. V.; LIMA, E. C. Estratigrafia, idade e correlação do grupo Serra Grande–Bacia do Parnaíba. In: CONGR. BRAS. DE GEOLOGIA, 33.,1984, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBG, 1984.p. 740–752.
- CHIRA OLIVA, P. A. et al. 3-D velocity and structural modeling of Brazilian Amazonas paleozoic basin. In: GOCAD MEETING, 28., 2008, França. **[Proceeding.]**. França, 2008.
- CUNHA, F. M. B. da. **Evolução paleozóica da Bacia do Parnaíba e seu arcabouço tectônico**. 1986.107 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Geociências, 1986.
- CUNHA, A. R. A. **Conversão em profundidade de dados migrados em tempo da Bacia do Parnaíba**. 2012. 101f. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação em geofísica) – UFPA, Faculdade de Geofísica, Belém, 2012.
- DELLA FÁVERA, J. C. **Tempestitos na Bacia do Parnaíba**. 1990. 560 f. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1990.
- DINO, R.; ANTONIOLI, L.; BRAZ, S. M. N. Palynological data from the trisidela member of upper Pedra de Fogo Formation (“Upper Permian”) of the Parnaíba Basin, Northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Paleontologia**, São Leopoldo, n. 3, p. 24-35, jan./ jun. 2002.
- GOCAD. **Gocad 2.5.2. user’s guide**. [S.l.]: GOCAD consortium, 2008.

GÓES, A.M.O.; FEIJÓ J.F. Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p.57-67. 1994.

GÓES, A. M.; ROSSETTI, D. F. Gênese da Bacia de São Luís-Grajaú, Meio-Norte do Brasil. In: ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT, W. (Ed.). **O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú**. Belém: Museu Paraense Emilio Goeldi, 2001. p. 15-29.

GÓES, A. M. O.; SOUZA, J. M. P.; TEIXEIRA, L. B. Estágio explorativo perspectivas petrolíferas da bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, Rio de Janeiro, v.4, n. 1, p. 55-64. 1990.

LIMA , C. M. de ; BEZERRA, S. J.; FREITAS, J. E. de; CHIRA OLIVA, P. A. **Visualização 3D utilizando GOCAD em ambiente imersivo Reality Center**. In: WORKSHOP DA REDE COOPERATIVA DE PESQUISA EM RISCO EXPLORATÓRIO EM PETRÓLEO E GÁS, 2.,2005, Belém: [s.n.], 2005.

LIMA, E. A. M.; LEITE, J. F. **Projeto estudo global dos recursos minerais da Bacia sedimentar do Parnaíba**: integração geológico-metalogenética: relatório final da Etapa III. Recife: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 1978. 212 p.

MALLET, J. -L. **Numerical earth models**. The Netherlands: EAGE, 2008.

MILANI E. J.; THOMAZ FILHO, A. Sedimentary basins of South America. In: CORDANI, U. G.; MILANI, E. J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D. A. (Ed.). **Tectonic evolution of South America**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2000. p. 389-450.

MILANI, E.J.; ZALÁN, P.V. Brazilian Geology Part I: the geology of paleozoic cratonic basins and Mesozoic interior rifts of Brazil. In: AAPG INTERNATIONAL CONFERENCE & EXHIBITION, 1998, Rio de Janeiro, Brasil. **Short Course Notes**. Rio de Janeiro, Brasil, 1998. 184p.

OLIVEIRA, D. C.; MOHRIAK, W. U. Jaibaras Trough: an important element in the early tectonic evolution of the Parnaíba interior sag Basin, Northeastern Brazil. **Marine and Petroleum Geology, Guildford**, v. 20, p. 351-383. 2003.

PINHEIRO, A. G. **Interpretação sísmica 2D e modelagem geológica 2,5D da Bacia do Parnaíba**. 2011. 87 f. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação em geofísica) – UFPA, Faculdade de Geofísica, Belém, 2011.

QUADROS, L. P. Distribuição bioestratigráfica dos chitinozoa e acritarchae na Bacia do Parnaíba. **Ciência – Técnica – Petróleo**, 1982, Rio de Janeiro, 13: 3-28.

SANTOS, M. E. de C. M.; CARVALHO, M. S. S. de. **Paleontologia das bacias do Paranaíba, Grajaú e São Luís**: (reconstituições paleobiológicas). Rio de Janeiro: CPRM, Serviço Geológico do Brasil, 2009.

TEIXEIRA, F. S. **Análise estrutural e estratigráfica de feições geológicas através da interpretação de seções sísmicas e de mapas gravimétricos, na porção Leste da Bacia do Parnaíba, PI.** 2010. 92 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

VAZ, P. T.; REZENDE, N. G. A. M.; WANDERLEY FILHO, J. R.; TRAVASSOS, W. A. S. Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 253-263, maio/nov. 2007.

ZALÁN, P. V. Evolução fanerozóica das bacias sedimentares brasileiras. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. R.; BRITO-NEVES, B. B. (Org.). **Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida.** São Paulo: Beca, 2004. p. 595-612.