



MARÍLIA ROCHA ZIMMERMANN

**ANÁLISE SISMOESTRATIGRÁFICA DO INTERVALO MIOCENO-PLIOCENO
DO OFFSHORE PLATAFORMAL DO SETOR CENTRO-SUL DA BACIA DE
CAMPOS**

Porto Alegre, 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
DEPARTAMENTO DE PALEONTOLOGIA E ESTRATIGRAFIA

MARÍLIA ROCHA ZIMMERMANN

**ANÁLISE SISMOESTRATIGRÁFICA DO INTERVALO MIOCENO-PLIOCENO
DO OFFSHORE PLATAFORMAL DO SETOR CENTRO-SUL DA BACIA DE
CAMPOS**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Juliano Kuchle

Porto Alegre, 2021

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é resultado do esforço intelectual, emocional, e financeiro, de muitas pessoas.

Agradeço primeiramente aos meus pais, Andréa Oxley da Rocha e Renato Innig Zimmermann, que me apoiam durante toda a minha trajetória acadêmica, dando suporte a todas etapas de graduação (várias pouco usuais), permitindo que eu realizasse muitos sonhos profissionais, que não se encerram nesta monografia. Cada conquista profissional até hoje, e todas as conquistas futuras, serão devido a todo exemplo e suporte que me foi fornecido por eles. Seu apoio e seu amor foram indispensáveis para a realização da minha formação, que se conclui com este trabalho.

Também, sou muito grata a todos orientadores que tive durante minha graduação, especialmente ao Prof. Dr. Juliano Kuchle, o qual investiu muitas horas em orientação remota, durante todas etapas de construção da monografia, tornando esse trabalho possível. O Professor me acolheu como orientanda em um momento de grandes mudanças profissionais, e modificou o projeto conforme as adversidades, empenhado em me auxiliar a conquistar minhas ambições profissionais. Sou muito grata a sua estimada orientação.

Agradeço por último a toda minha rede de apoio composta pela minha família e amigos, que dividiram tantas alegrias e angústias que envolveram a graduação e a realização do meu trabalho de conclusão de curso.

“O que funcionava, sabia ele, era o teste da persistência e da coragem de quem busca sua Lenda Pessoal. “

Paulo Coelho, O Alquimista

RESUMO

Compreender a evolução tectonossedimentar das bacias sedimentares da margem passiva brasileira é essencial para a avaliação de seus potenciais exploratórios de hidrocarboneto. Na década de 1980 a Petrobrás investiu na aquisição sísmica de águas profundas na bacia de Campos, motivados pela exploração de petróleo na área, resultando na descoberta de gigantes plays turbidíticos de Albacora (Mioceno) e Marlim (Oligo-Mioceno), e mais adiante, com o avanço da sísmica 3D, o campo gigante de Barracuda em arenitos turbidíticos do Oligoceno. A sismoestratigrafia é uma das ferramentas eficazes para caracterização do arcabouço estratigráfico em subsuperfície, permitindo a predição de heterogeneidades em sistemas petrolíferos, bem como a compreensão dos eventos deposicionais controladores da sedimentação atuantes na bacia. Assim sendo, o presente trabalho visa definir o arcabouço estratigráfico do intervalo, reconhecendo as unidades deposicionais, padrões de empilhamento, e posicionamento cronoestratigráfico das unidades, de maneira que se compreenda a evolução deposicional do intervalo e se determine uma curva eustática para o mesmo, a fim de estabelecer a relação dos mecanismos controladores da deposição atuantes na bacia com os da curva global de variação do nível do mar. Foram identificadas 35 unidades sismoestratigráficas, pertencentes a quatro sequências, identificadas como idade aproximada do Mioceno – Plioceno. O intervalo demonstrou um forte padrão prográdante interno das unidades, com o empilhamento sugerindo uma tendência geral regressiva normal, com sequências correlacionáveis com os ciclos de terceira ordem de Haq. et al (1998), sugerindo como mecanismo de controle deposicional a variação global do nível do mar, com influência da tectônica regional da Bacia de Campos.

Palavras-Chave: Sismoestratigrafia; Bacia de Campos; Mioceno-Pleistoceno.

ABSTRACT

Understanding the tectonosedimentary evolution of sedimentary basins in the Brazilian passive margin is essential for the assessment of their exploration potential for hydrocarbons. In the 1980s, Petrobras invested in the seismic acquisition of deep waters in the Campos basin, motivated by oil exploration in the area, resulting in the discovery of giant turbidite plays in Albacora (Miocene) and Marlim (Oligo-Miocene), and later on, with the advancement of 3D seismic, the giant Barracuda field in Oligocene turbidite sandstones. Seismostratigraphy is one of the effective tools for characterization of the subsurface stratigraphic framework, allowing the prediction of heterogeneities in petroleum systems, as well as the understanding of the depositional events that control sedimentation in the basin. Therefore, the present work aims to define the stratigraphic framework of the interval, recognizing the depositional units, stacking patterns, and chronostratigraphic positioning of the units, in order to understand the depositional evolution of the interval and determine a eustatic curve for it, in order to establish the relationship of the deposition controlling mechanisms acting in the basin with those of the global sea level variation curve. 35 seismostratigraphic units were identified, belonging to four sequences, identified as the approximate age of the Miocene – Pliocene. The interval demonstrated a strong internal prograding pattern of the units, with the stacking suggesting a general normal regressive trend, with sequences correlated with third-order cycles Haq. et al (1998), suggesting as a mechanism of depositional control the global variation of the sea level, influenced by the regional tectonics of the Campos Basin.

Palavras-Chave: Seismostratigraphy; Campos Basin; Miocene-Pleistocene.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Seção geológica regional NO-SE da Bacia de Campos. Fonte: De Castro e Picolini, 2015.....14
- Figura 2:** Carta cronoestratigráfica da Bacia de Campos. Assinalado em vermelho o intervalo de estudo. Fonte: Winter et al., 2007.....15
- Figura 3:** Seção esquemática da evolução das sequências deposicionais terciárias (Gabaglia e Milani, 1990).....16
- Figura 4:** Relação entre transgressões, regressões normais e forçadas, a sedimentação e a variação no nível relativo do mar. A curva senoite superior mostra no eixo esquerdo a flutuação no nível do mar, indicadas em vermelho os momentos que antecedem e sucedem a mudança do nível do mar. A senoide inferior mostra a relação variação do nível do mar (eixo esquerdo) com o aumento do espaço de acomodação e a sedimentação (em verde), marcando ainda os estágios de transgressão (azul) e regressão (vermelho) (Catuneanu, 2006).....17.
- Figura 5:** Posicionamento das Superfícies Estratigráficas (coluna da direita) com relação à curva de variação do nível do mar (senoide à esquerda), e os eventos deposicionais associados (Catuneanu, 2006).....19
- Figura 6:** Padrões de empilhamento dos estratos associados às mudanças no espaço de acomodação e taxa de preenchimento sedimentar. Fonte: Neal e Abreu, 200920
- Figura 7:** *Acomodation sucessions*. A) Sequências deposicionais. B) Distribuição de fácies idealizada. Fonte: Neal e Abreu, 2009.....21
- Figura 8:** Perfil sísmico interpretado em sequências estratigráficas. Fonte: Neal e Abreu, 2009.....22
- Figura 9:** A) Bacia de Campos em verde, a área de estudo no polígono vermelho, as linhas sísmicas 2D em azul e os poços representados por pontos brancos. B) Zoom na área de estudo mostrando em amarelo a linha sísmica 0239_0363 e em laranja o poço 1-RJS-101-RJ.....24
- Figura 10:** Relação entre os padrões de terminações de refletores (superior e inferior) e o limite de sequências deposicionais. Fonte: Vail e Mitchum, 1977.....27
- Figura 11:** Geometria interna das sismofácies. Fonte: (Vail e Mitchum, 1977).....28
- Figura 12:** Geometria externa das sismofácies. Fonte: (Vail e Mitchum, 1977).....29
- Figura 13:** Linha sísmica em fase normal. Em amarelo, a linha basal do arcabouço interpretado, indicada pela flecha amarela, assinalada abaixo do refletor escolhido..32
- Figura 14:** Linha sísmica 0239_0363 em fase normal, sem interpretação.....33
- Figura 15:** Linha sísmica 0239_0363 em fase normal, com interpretação completa dos refletores.....33
- Figura 16:** Padrões de continuidade dos refletores: A) Topo do intervalo; B) Porção inferior e central do intervalo; C) Porção Proximal; C) Porção Distal.....34

Figura 17: A) Recorte da linha sísmica em fase normal. B) Recorte da linha sísmica com interpretação dos refletores e terminações.....	34
Figura 18: A coluna I apresenta recortes da linha sísmica em fase normal. A coluna II apresenta a interpretação completas dos refletores (linhas pretas) e terminações de topo (verde) e base (laranja), e as superfícies limítrofes das unidades sísmicas (vermelho). A coluna III mostra a relação entre as terminações (setas pretas) e as superfícies limítrofes. As linhas a, b e c dão destaque para as terminações em <i>onlap</i> , <i>downlap</i> e de topo (truncamento erosivo e <i>toplap</i>), respectivamente.....	35
Figura 19: Unidades sismoestratigráficas numeradas (1 a 35) e as superfícies limítrofes em vermelho.....	37
Figura 20: Em detalhe um recorte da porção proximal da seção sísmica, mostrando as unidades sismoestratigráficas numeradas, delimitadas pelas superfícies limítrofes em preto.....	37
Figura 21: Carta cronoestratigráfica completa da seção sísmica. Representação das unidades sismoestratigráficas numeradas de 1 a 35; Superfícies erosivas em vermelho; Superfícies regressivas em roxo; Superfícies transgressivas em azul.....	38
Figura 22: Tratos de sistemas identificados no intervalo.....	39
Figura 23: A) Em laranja as unidades de 6 a 8 compoendo o primeiro TST. B) Detalhe da porção mais proximal das unidades, mostrando as sequências de terminações em <i>onlap</i> sobre as superfícies limítrofes, caracterizando o TST. C) Detalhe das unidades 6 a 8 influenciadas pelas estruturas tectônicas.....	42
Figura 24: A) Em vermelho as unidades de 9 a 12 compoendo o primeiro TSNA. B) Detalhe do trato, mostrando as sequências de terminações em <i>downlap</i> internas, e sobre a superfície limítrofe, caracterizando o TSNA. C) Detalhe das unidades 10 a 12 na porção mais distal, destacando novamente os <i>downlaps</i> internos das unidades....	43
Figura 25: A) Em verde o TSEQ composto pela unidade 13. B) Detalhe da unidade, mostrando a superfície erosiva basal (SBRF), indicado pela relação da superfície com as terminações em truncamento erosivo da unidade inferior. C) Detalhe das unidades do trato, destacando as terminações em <i>onlap</i> e <i>downlap</i> internas.....	44
Figura 26: A) TSNB em verde. B) Detalhe da unidade 14, mostrando as terminações em <i>onlap</i> , e o padrão de refletores paralelo.....	45
Figura 27: A) Unidades TST em verde. B) Terminações em em <i>onlap</i> e <i>downlap</i> internas das unidades sismoestratigráficas 15 e 16. Variação do padrão interno dos refletores da unidade 16, divergentes (C) e paralelos em (D).....	46
Figura 28: A) TSNA em verde, composto pelas unidades 17 e 18. B) Detalhe das unidades 17 e 18, mostrando o padrão interno divergente dos refletores, sucessões de terminações em <i>downlap</i> , e a estrutura em <i>mound</i> encontrada na unidade 17.....	47
Figura 29: A) TSEQ representado em azul. B) Destaque para as terminações de refletores internos em <i>downlap</i> das unidades sismoestratigráficas 20 e 19, e erosão na superfície basal (SBRF) indicada pelas terminações em truncamento erosivo da unidade inferior. C) Padrão interno subparalelo dos refletores das unidades, e terminações internas em <i>downlap</i>	50

Figura 30: A) TST em azul composto pela unidade 21. B) Destaque para as terminações em <i>onlap</i> basais na unidade.....	51
Figura 31: A) TSNA representado em azul, mostrando ampla abrangência das unidades ao longo da extensão da linha sísmica. B) Recorte da seção na porção proximal mostrando as terminações de refletores internos em <i>onlap</i> das unidades sismoestratigráficas 22 a 29. C) Padrão interno subparalelo a paralelo dos refletores, com destaque para a parcela caótica na unidade 27.....	52
Figura 32: A) Segundo TSNB da seção, representado em rosa. B) Recorte da seção mostrando as terminações de refletores internos em <i>onlap</i> das unidades e o avanço das unidades 30 a 35 no sentido proximal da linha sísmica. C) Padrão interno predominantemente paralelo dos refletores, das unidades que compõe o trato.....	53
Figura 33: Idade relativa do intervalo no poço 1-RJS-101-RJ. Em preto, as superfícies limítrofes das unidades sismoestratigráficas.....	54
Figura 34: A esquerda, segmento da carta cronoestratigráfica elaborada por Haq. et al. (1998), modificada, com indicação das Séries. Curva eustática em azul, com indicação do posicionamento correlato cronoestratigráfico das sequências, em vermelho.....	55
Figura 35: Interpretação das unidades sismoestratigráficas em sucessões de acomodação, baseada em Neal e Abreu (2009). Tratos de <i>lowstand</i> (laranja) L1 e L2; <i>transgressive</i> (azul) T1, T2 e T3; e <i>highstand</i> (verde) H1, H2 e H3.....	57
Figura 36: Estrutura em <i>mound</i> na Unidade Sismoestratigráfica 17.....	60
Figura 37: Correlação da unidade 17 com os dados litológicos de poço, indicando a possível presença de carbonatos (azul).....	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Parâmetros de reflexão sísmicas utilizados na interpretação sismoestratigráfica e seu significado geológico. Modificada de Vail e Mitchum (1977).....	25
Quadro 2: Atributos sísmicos utilizados. Fontes: Alvarenga, 2016, Chen e Sidney, 1997, e Chopra e Marfurt, 2007.....	26
Quadro 3: Tabela completa dos Tratos de Sistmas, agrupados nas Sequências e as respectivas Superfícies Limítrofes.....	39

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS E METAS.....	12
3 JUSTIFICATIVA	12
4 ESTADO DA ARTE / REFERENCIAL TEÓRICO	13
4.1. Contexto Geológico	13
4.1.1. Bacia de Campos	13
4.1.2. Intervalo Mioceno-Plioceno.....	14
4.2. Estratigrafia de Sequências e Curva de Variação do Nível do Mar	17
4.2.1. Superfícies Limítrofes	18
4.3. Sismoestratigrafia	19
5 METODOLOGIA E ESTRATÉGIAS DE AÇÃO	23
5.1. Revisão Bibliográfica	23
5.2. Aquisição e carregamento dos dados.....	23
5.3. Interpretação e mapeamento sismoestratigráfico do intervalo.	24
5.3.1. Rastreamento de todas continuidades laterais de refletores: identificação das terminações, padrões estratigráficos e geometrias;.....	25
5.3.2. Individualização de unidades sismoestratigráficas;.....	27
5.3.3. Determinação da evolução estratigráfica da porção analisada da bacia: sismofácies e tratos de sistema;.....	27
5.3.4. Correlação com os dados de poço;.....	29
5.3.5. Confecção de uma carta cronoestratigráfica da sessão e curva eustática afim. 29	
6 RESULTADOS	31
6.1. Interpretação dos refletores e terminações.....	31
6.1.1. Mapeamento da base do arcabouço estudado	31
6.1.2. Interpretação completa dos refletores e terminações.....	32
6.2. Arcabouço estratigráfico	35
6.2.1. Unidades Sismoestratigráficas e Carta cronoestratigráfica	35
6.2.2. Tratos de Sistemas e Sequências Sismoestratigráficas	39
6.2.3. Curva de Variação Relativa do Nível do Mar e sua correlação com a Curva eustática global.....	54
6.3. Sucessões de Acomodação.....	56
7 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES	58
7.1. Padrões de empilhamento.....	58
7.2. Sequências Depositionais e mecanismo de variação eustático.....	58
7.3. Arcabouço do Intervalo.....	59
REFERÊNCIAS.....	61

1 INTRODUÇÃO

A Bacia de Campos, segunda bacia maior produtora de óleo e gás brasileira (1.135.559 boe/dia), está localizada na margem leste do país, ocupando uma área de aproximadamente 100.000 km² entre o litoral norte do estado do Rio de Janeiro e sul do Espírito Santo (ANP- SPD, 2020; Rangel et al, 1994). A sedimentação na bacia se estende do período cretáceo até atualmente, e seu arcabouço estratigráfico é subdividido em três supersequências tectonossedimentares: rifte, pós-rifte e drifte (Winter et al., 2007).

A sedimentação em águas profundas no intervalo Mioceno-Plioceno na Bacia de Campos é marcada por importantes variações no nível do mar, expressas no registro sedimentar pela intercalação de depósitos turbidíticos folhelhos e carbonatos (Carminatti e Scarton, 1991). Estes depósitos turbidíticos compreendem importantes reservatórios de hidrocarbonetos do pós-sal, explorados em campos como Voador, Albacora e Marlim (ANP, 2021).

A sismoestratigrafia, método aplicado para a caracterização do arcabouço estratigráfico no presente trabalho, permite o mapeamento regional das sequências deposicionais, contribuindo com uma previsibilidade das heterogeneidades estratigráficas encontradas em subsuperfície, interpretadas a partir dos dados sísmicos e de poço (Neal e Abreu, 2009). A partir da sismoestratigrafia, também é possível estimar a idade relativa das unidades estratigráficas, permitindo um posicionamento cronoestratigráfico do intervalo, e elaboração de uma curva eustática, permitindo compreender não só o modelo de deposição, mas os mecanismos controladores (Vail et al., 1997 e Posamentier et al., 1988).

2 OBJETIVOS E METAS

Estabelecer o arcabouço estratigráfico do intervalo de estudo, com suas unidades internas, definir os parâmetros controladores da sedimentação e preservação das unidades, bem como a variação destes parâmetros ao longo dos períodos deposicionais.

Ainda, construir uma carta cronoestratigráfica para o intervalo, a fim de identificar os ciclos transgressivos e regressivos, e a curva de variação do mar, comparando a curva obtida no estudo com a curva global de variação do nível do mar apresentada por Haq. et al. (1998).

3 JUSTIFICATIVA

A caracterização do acabou estratigráfico através da sismoestratigrafia é uma metodologia amplamente utilizada na indústria do petróleo, a qual pode ser aprimorada com estudos de caso detalhados, como aqui proposto. Além da compreensão da deposição das unidades litológicas, a sismoestratigrafia possibilita compreensão cronoestratigráfica de eventos deposicionais em uma bacia. Sendo assim, o reconhecimento das unidades sismoestratigráficas deste intervalo, permite um melhor entendimento da relação dos depósitos com agentes controladores da sua sedimentação e preservação.

Ainda, o intervalo Cenozóico da bacia de Campos possui relevantes reservatórios do pós-sal, explorados em diversos campos em operação como Voador, Marlim e Albacora. O detalhamento do seu sistema petrolífero através da caracterização do arcabouço estratigráfico, permite avaliar possibilidades de otimização dos recursos de produção nos campos.

4 ESTADO DA ARTE / REFERENCIAL TEÓRICO

4.1. Contexto Geológico

4.1.1. Bacia de Campos

A área de estudo faz parte do *offshore* da Bacia de Campos, uma das bacias sedimentares da margem leste brasileira, desenvolvidas por um processo de rifteamento iniciado no Cretáceo inferior, que evoluiu para uma fase drifte a qual se estende até atualmente (Rangel et al, 1994; Winter et al. 2007). A bacia está situada nas águas territoriais do estado do Rio de Janeiro, sudeste do Brasil, cobrindo uma área de aproximadamente 115.000 km² das quais apenas 500 km² são *onshore*. A norte, a bacia isola-se, tanto a *onshore* quando a *offshore*, da Bacia do Espírito Santo pelo alto de vitória, um bloco elevado do embasamento precambriano, e a sul pelo Arco de Cabo Frio (Cordani et al, 2000; Rangel et al, 1994; Winter et al. 2007).

Atualmente, a Bacia de Campos é a segunda bacia em maior produção de petróleo e gás natural do Brasil, possuindo 28 campos produtores, segundo o Boletim da Produção de Petróleo e Gás da SPD-ANP de agosto de 2021. Devido sua importância econômica, a bacia possui extensa disponibilidade de dados sísmicos e de poços, possibilitando o conhecimento geológico detalhado (Figura 1), incluindo de seu arcabouço estratigráfico.

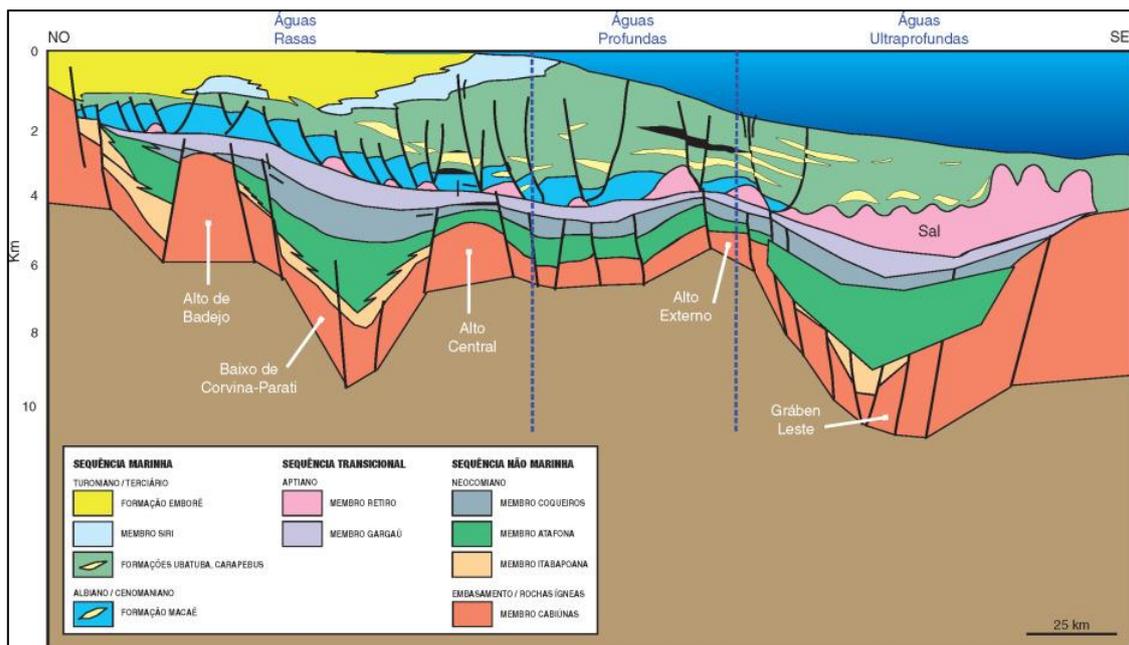


Figura 1: Seção geológica regional NO-SE da Bacia de Campos. Fonte: De Castro e Picolini, 2015.

4.1.2. Intervalo Mioceno-Plioceno

Os depósitos marinhos do intervalo Mioceno-Plioceno (Figura 2) fazem parte da Supersequência Drift na bacia de Campos, depositados em um contexto de subsidência térmica da bacia, associada a tectonismo adiastrófico (Winter et al., 2007).

Em *offshore*, na porção distal a ser estudada, o acabamento da bacia é formado pela Formação Ubatuba, composta predominantemente por siltitos e folhelhos, e diamictitos e margas subordinadamente, intercalados com arenitos resultantes de fluxos turbidíticos da Formação Carapebus (Rangel et al, 1994; Winter et al., 2007).

A Formação Ubatuba, descrita detalhadamente por Rangel et al (1994), nomeia a seção depositada sobreposta em discordância à Formação Macaé, lateralmente interdigitada à Fm. Emborê. Está é composta por milhares de metros de pelitos, especialmente folhelhos cinza-escuro e esverdeado, e marga cinza clara, calcilito cinza e creme e diamictito cinzento. A base da Formação Ubatuba é denominada Membro Tamoios e se distingue por apresentar litificação mais pronunciada. Segundo datação, a Formação se depositou do

Turoniano a Maastrichiana (Membro Tamoios) com sedimentação dos pelitos ao longo do Cenozóico até o Holoceno. Interpostos aos depósitos de baixa energia, ocorrem os arenitos turbidíticos da Formação denominada Carapebus. A Formação Carapebus é composta por arenitos finos a conglomeráticos formados no período Turoniano ao Holoceno, por correntes de turbidez em ambiente de talude plataformar (Rangel et al, 1994).

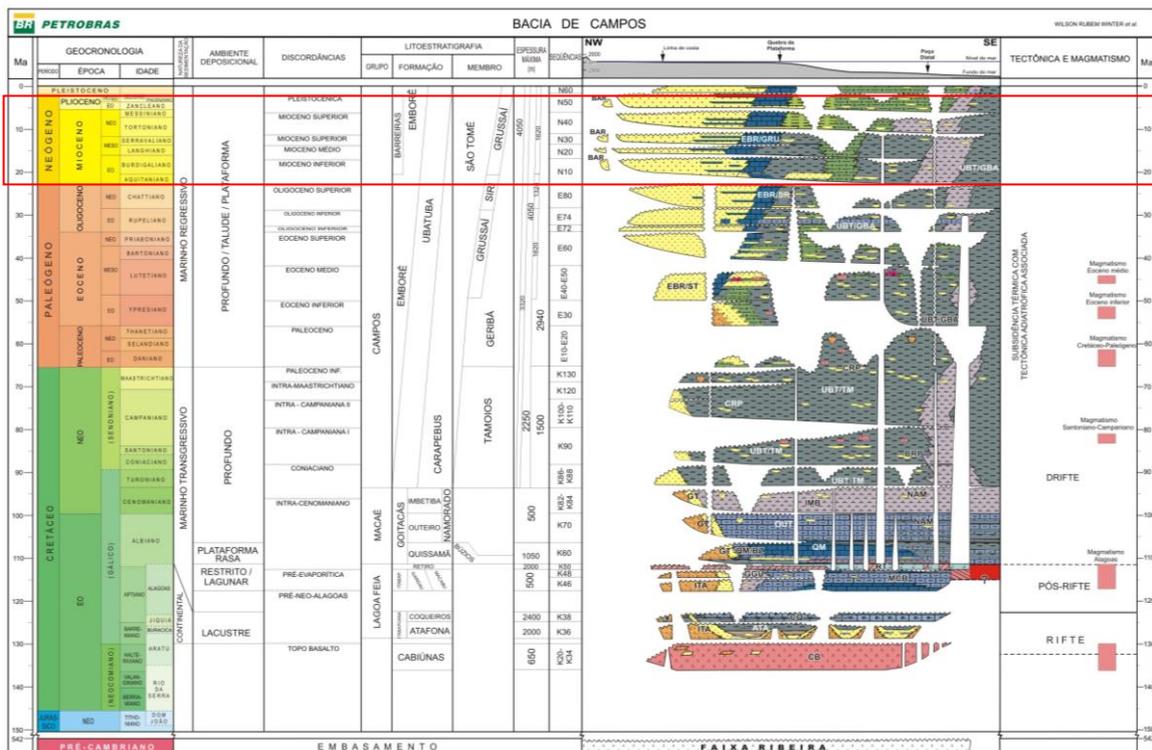


Figura 2: Carta cronoestratigráfica da Bacia de Campos. Assinalado em vermelho o intervalo de estudo. Fonte: Winter et al., 2007.

Segundo Raja-Gabaglia e Milani (1990) o durante o terciário a sedimentação na bacia de Campos é influenciada pelo soerguimento da Serra do Mar e pela halocinese, marcando uma mudança perceptível na sedimentação onde são observadas sequências com padrões fortemente progradantes. Segundo os autores, neste intervalo predominavam plataformas rasas repletas de sedimentos siliciclásticos, alimentadas por um contínuo influxo sedimentar do sistema flúvio-deltaico do Rio Parnaíba Sul, sendo essas as condições de formação da abundante ocorrência de arenitos turbidíticos no sopé continental e planície abissal da Bacia.

Em termos de evolução sismoestratigráfica, os períodos de rebaixamento do nível do mar foram responsáveis pela formação dos turbiditos terciários da Fm. Carapebus (Raja-Gabaglia e Milani, 1990) nas porções da plataforma rasa. Segundo os autores, durante a crescente subida do nível do mar neste período, se desenvolveram nas partes externas das plataformas bancos carbonáticos durante o ápice do sistema transgressivo, geralmente associados a uma posterior queda relativa do nível do mar e formação de depósitos turbidíticos (Figura 3). Durante o Mioceno médio as elevações do nível do mar resultaram na formação de níveis carbonáticos, que antecedem o rebaixamento que deu origem aos turbiditos que compõem os reservatórios dos campos de Albacora e Marlim (Raja-Gabaglia e Milani, 1990).

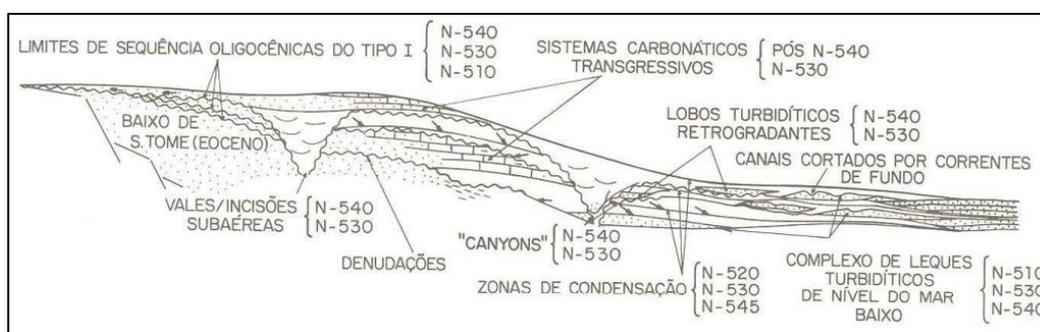


Figura 3: Seção esquemática da evolução das sequências deposicionais terciárias (Raja-Gabaglia e Milani, 1990).

De Castro e Picolini, 2015 também descrevem o Terciário como um Período deposicional marcado por significativo aumento no aporte sedimentar na bacia, que já se encontrava em condições definitivas de mar aberto, promovendo a progradação dos ambientes proximais para o seu interior. Nessas condições, se desenvolveram os depósitos turbidíticos, reservatórios de hidrocarbonetos explorados nos campos de Voador, Marlim e Albacora, que tem sua formação associada a recorrentes rebaixamentos do nível do mar, descritos em detalhe por Carminatti e Scarton (1991).

4.2. Estratigrafia de Sequências e Curva de Variação do Nível do Mar

A interação entre as mudanças do nível relativo do mar e a sedimentação controlam as flutuações na profundidade da lâmina d'água (espaço de acomodação) bem como as mudanças nos padrões de empilhamento (Progradacional e Retrogradacional) (Figura 4) (Catuneanu et al., 2006 e 2019). Segundo o autor, Transgressões são a migração da linha de costa em direção ao continente, causadas por um aumento no espaço de acomodação de sedimentos (profundidade da lâmina d'água), e um empilhamento retrogradacional de fácies distais sobre proximais. Já a Regressão, é definida como a migração da linha costeira em direção ao mar, resultando na sobreposição das fácies proximais sobre as distais, formando padrões de empilhamento progradacionais, e, por sua vez, causada pela redução do espaço de acomodação. As Regressões, ainda, podem ser normais ou forçadas, sendo a primeira caracterizada pela regressão da costa pelo aumento do aporte sedimentar na bacia, durante um período de subida do nível relativo do mar, e a segunda pela queda do nível relativo do mar.

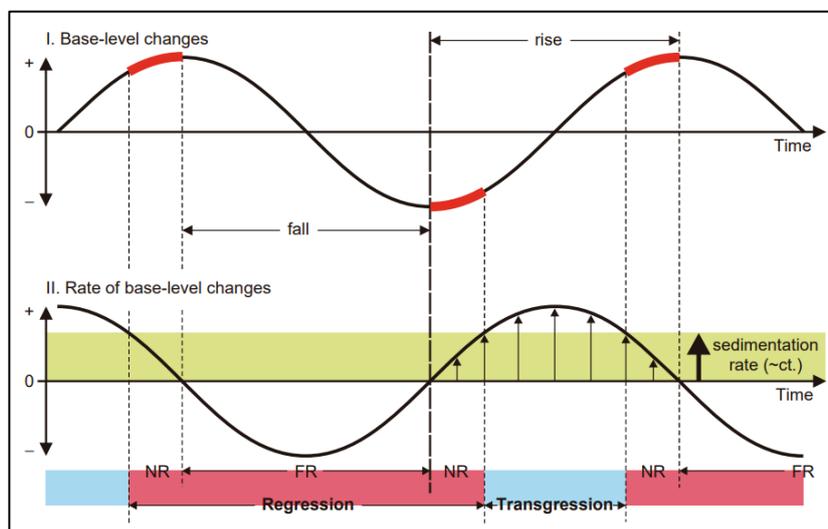


Figura 4: Relação entre transgressões, regressões normais e forçadas, a sedimentação e a variação no nível relativo do mar. A curva senoide superior mostra no eixo esquerdo a flutuação no nível do mar, indicadas em vermelho os momentos que antecedem e sucedem a mudança do nível do mar. A senoide inferior mostra a relação variação do nível do mar (eixo esquerdo) com o aumento do espaço de acomodação e a sedimentação (em verde), marcando ainda os estágios de transgressão (azul) e regressão (vermelho) (Catuneanu, 2006). NR – regressão normal (normal regression), e FR – regressão forçada (forced regression).

4.2.1. Superfícies Limítrofes

As superfícies limítrofes marcam mudanças nos regimes deposicionais ao longo do tempo, podendo estar relacionadas à mudança de ambiente deposicional ou carga de sedimento, criadas pela variação do nível do mar ou da sedimentação (Catuneanu et al., 2006 e 2019). Essas mudanças podem estar associadas a mudanças no padrão de empilhamento, e também corresponder a hiatus deposicionais. Sendo assim, cada superfície representa uma estrutura estratigráfica distinta que marca um evento ou estágio específico do ciclo do nível de base (Figura 5). Catuneanu (2006) define as superfícies como:

Discordância Subaérea (DS): Superfície de erosão ou não-deposição, criada geralmente durante a queda do nível do mar, marca a exposição subaérea. As DS estão associadas aos maiores hiatus temporais, marcando mudanças abruptas de fácies.

Concordância Correlata (CC): A CC está associada ao final de regressões forçadas, encontradas nas porções distais do sistema associada à DS.

Superfície Basal de Regressão Forçada (SBRF): Superfície sobre a qual acumulam depósitos durante a queda do nível do mar, em uma regressão forçada.

Superfícies de Regressão Máxima (SRM): Superfície que marca a mudança do padrão regressivo para o transgressivo em uma sequência, conseqüentemente, marca mudança do padrão de empilhamento de estratos progradantes abaixo para retrogradantes acima.

Superfície de Inundação Máxima (SIM): A SIM marca o final de uma transgressão, e início da regressão. Assim como a SEM, a SIM marca a mudança no padrão de empilhamento dos estratos, porém de retrogradantes abaixo, para progradantes em cima.

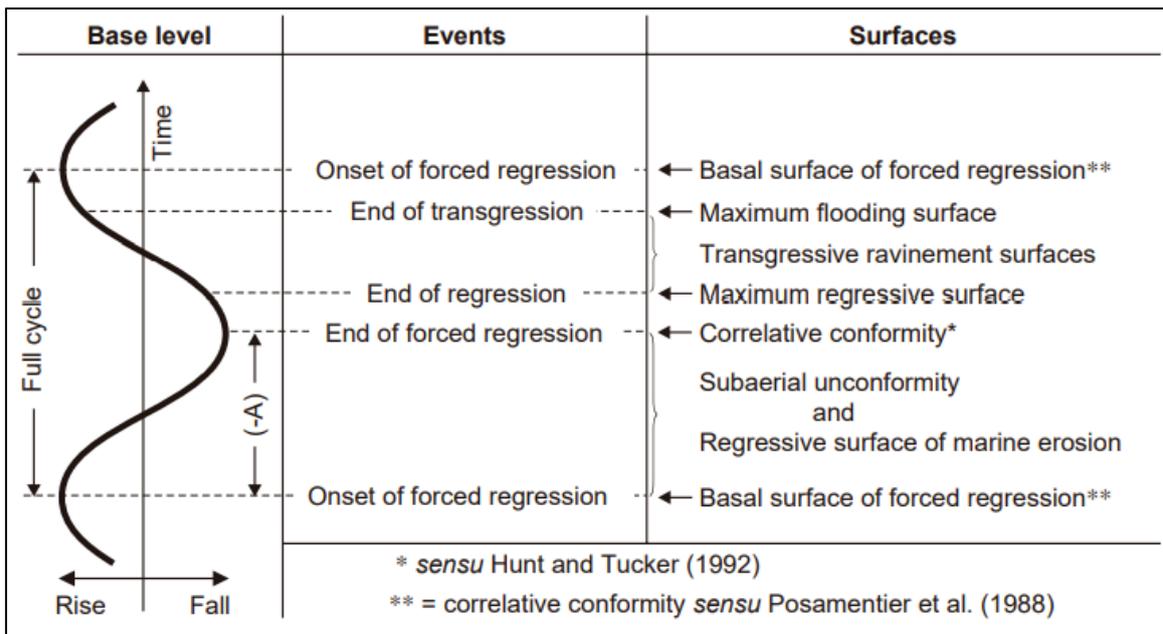


Figura 5: Posicionamento das Superfícies Estratigráficas (coluna da direita) com relação à curva de variação do nível do mar (senoide à esquerda), e os eventos deposicionais associados (Catuneanu, 2006).

4.3. Sismoestratigrafia

Para determinar a estratigrafia do intervalo estudado utilizaremos a ferramenta da sismoestratigrafia, publicado pela primeira vez em 1977 no *Memoir 26* da AAPG por Peter Vail e Robert Mitchum. Na sismoestratigrafia as reflexões em dados sísmicos representam superfícies estratigráficas, permitindo identificação em escala regional de sequências estratigráficas além da predição de fácies em maior detalhe (Neal e Abreu, 2009).

Para a interpretação sismoestratigráfica, Neal e Abreu (2009) propõe a hierarquia das unidades sedimentares observada na estratigrafia baseada na relação geométrica entre os estratos. Assume-se que as geometrias estão associadas a sucessivas criação de espaço de acomodação e preenchimento sedimentar, dividindo o registro em unidades deposicionais. A Figura 6 demonstra os padrões de empilhamento associados às mudanças na criação de espaço de acomodação e preenchimento sedimentar. Cada unidade deposicional é composta pela sucessão de sets classificados como *progradation to aggradational (PA)*; *retrogradation (R)*; e *aggradation to*

progradation to degradation (APD), determinando os tratos de sistemas: *lowstand*, *transgressive* e *highstand* respectivamente.

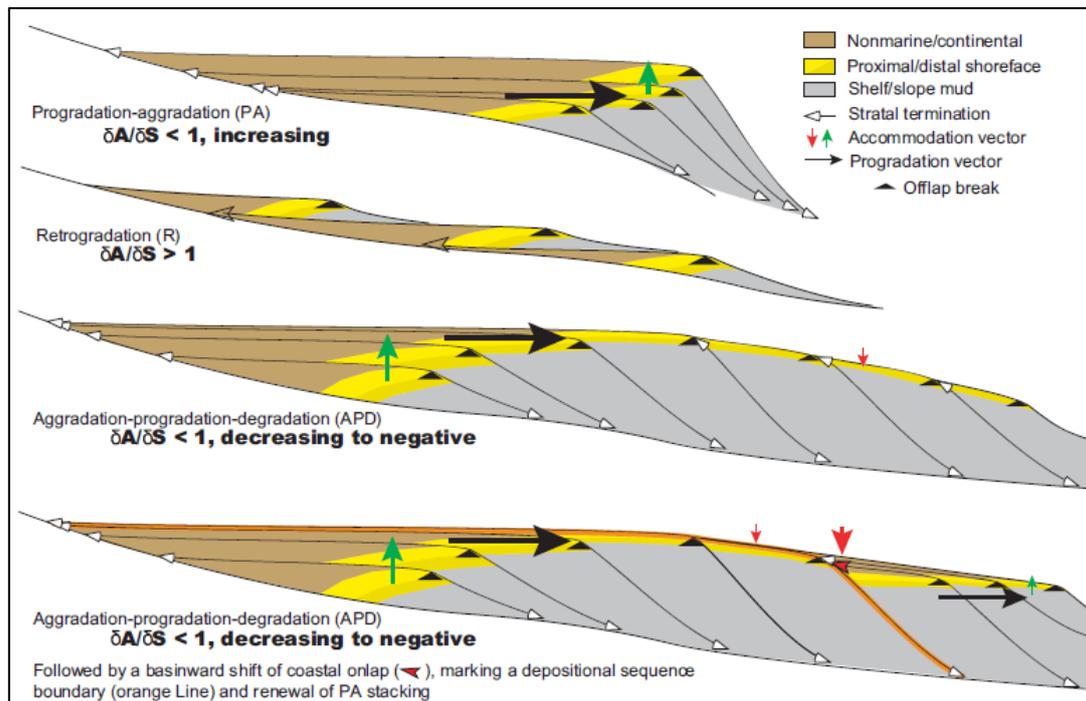


Figura 6: Padrões de empilhamento dos estratos associados às mudanças no espaço de acomodação e taxa de preenchimento sedimentar. Fonte: Neal e Abreu, 2009.

Neal e Abreu aplicam os conceitos de sequência estratigráfica, apresentados por Catuneanu (2006), na definição da estratigrafia sísmica. Deste modo, a sismoestratigrafia é formada pela sucessão das sequências deposicionais, individualizadas por superfícies-chave, e suas relações laterais e verticais, ilustradas na figura 7.

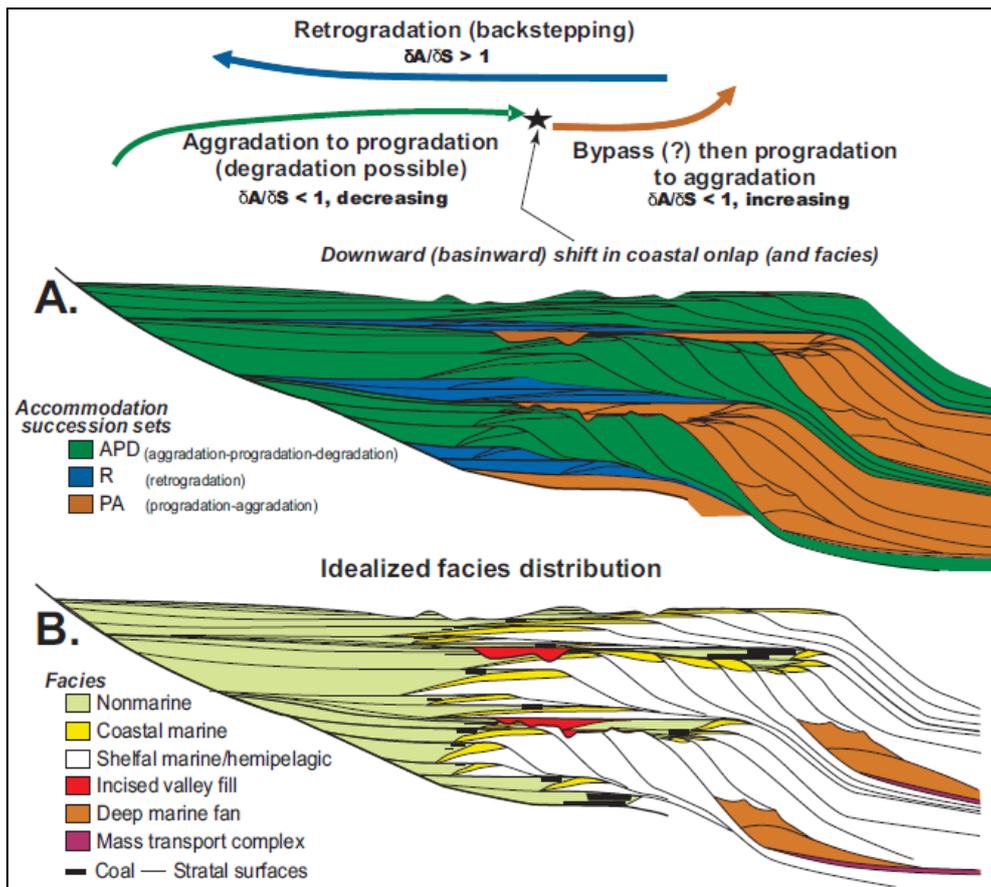


Figura 7: Acomodation sucessions. A) Sequências deposicionais. B) Distribuição de fácies idealizada. Fonte: Neal e Abreu, 2009.

O arcabouço estratigráfico, portanto, é determinado a partir do reconhecimento das sequências deposicionais, tratos de sistema e superfícies-chaves, identificados segundo a continuidade e terminação dos refletores sísmicos, podendo ainda ser integrados a dados de rocha (poços, afloramentos e bioestratigrafia) (Neal e Abreu, 2009) (Figura 8).

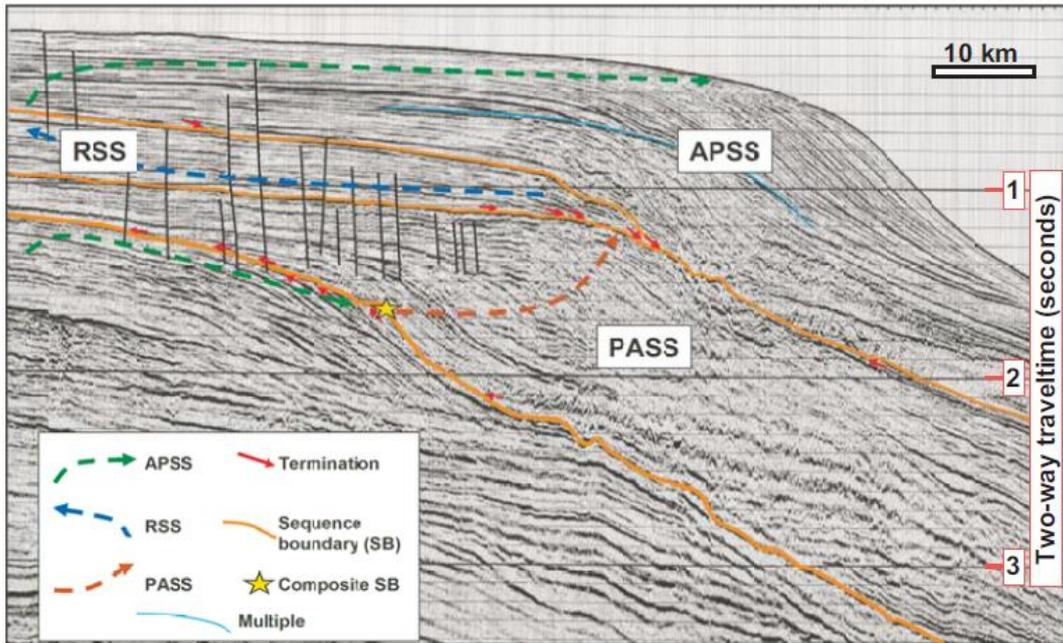


Figura 8: Perfil sísmico interpretado em seqüências estratigráficas. Fonte: Neal e Abreu, 2009.

5 METODOLOGIA E ESTRATÉGIAS DE AÇÃO

5.1. Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica é realizada durante todas as etapas da construção da monografia, e consistiu na busca de livros, artigos, periódico, entre outros, acerca de todos os temas abordados neste trabalho. A revisão contemplou trabalhos sobre a evolução tectonossedimentar da bacia de campos, sobretudo no intervalo estudado, o desenvolvimento e aplicação da sismoestratigrafia, e temas afins.

5.2. Aquisição e carregamento dos dados.

Os dados utilizados para a realização do presente trabalho foram fornecidos pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, mediante solicitação, segundo Decreto n.º 8.777, de 11 de maio de 2016, que institui a Política de Dados Abertos do Poder Executivo federal. A solicitação se deu segundo a Resolução ANP N° 757, que regula acesso aos dados técnicos de exploração, desenvolvimento e produção de petróleo e gás natural nas bacias sedimentares brasileiras.

Os dados fornecidos contemplaram (Figura 9):

- Levantamento sísmico 2D pós-stack R003_GRAND_CAMPOS, em tempo duplo (TWT, milissegundos).
- Dados litológicos e petrofísicos de poços (13 poços)
- 1 Estudo: Modelagem 3D do sistema petrolífero e risco exploratório da Bacia de Campos

Foi selecionada para interpretação completa dos refletores a linha sísmica 2D 0239_0363 (Figura 6), devido a sua qualidade, exposição de boas estruturas deposicionais no intervalo, bem como pouca interferência tectônica (falhamentos), permitindo a observação de eventos deposicionais com clara ocorrência e rastreabilidade; e os dados litológicos e petrofísicos pertencem ao poço 1-RJS-101-RJ. O poço 1-RJS-101-RJ foi correlacionado com a linha

sísmica analisada a partir de dados de checkshot (correlação tempo x profundidade) fornecidos no pacote de dados da ANP.

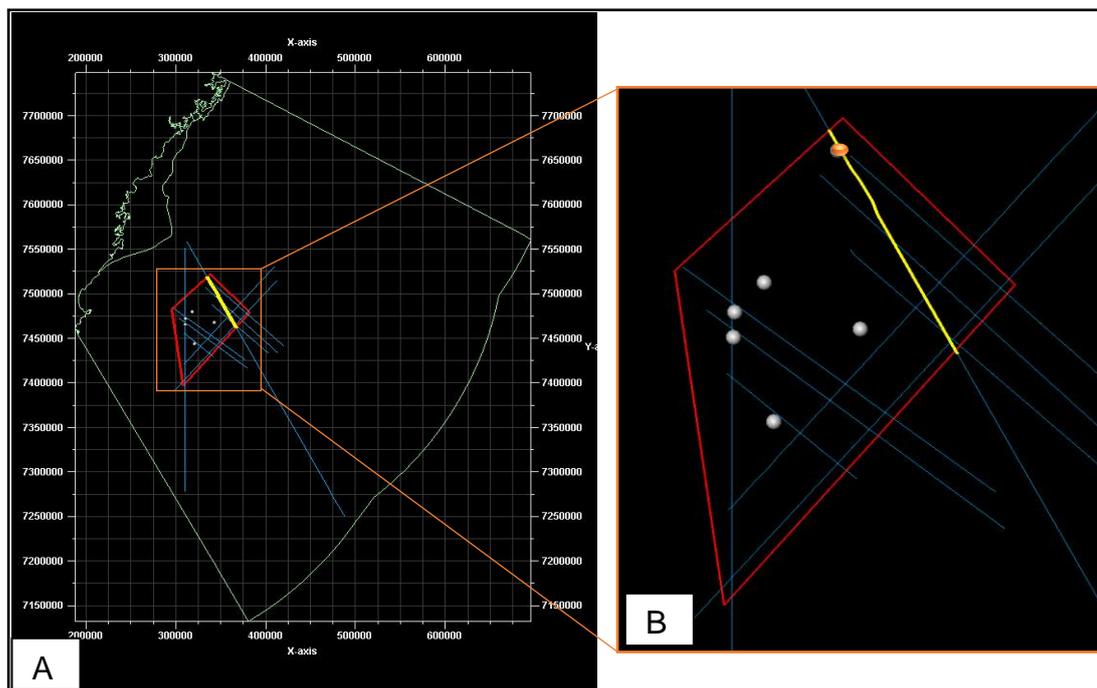


Figura 9: A) Bacia de Campos em verde, a área de estudo no polígono vermelho, as linhas sísmicas 2D em azul e os poços representados por pontos brancos. B) Zoom na área de estudo mostrando em amarelo a linha sísmica 0239_0363 e em laranja o poço 1-RJS-101-RJ.

Os dados sísmicos, apresentados em tempo duplo, foram carregados no software livre *OpendTect*, onde foram produzidas imagens da sísmica, seus atributos, e interpretados em estrutura de múltiplas camadas sobrepostas no Adobe Illustrator.

5. 3. Interpretação e mapeamento sismoestratigráfico do intervalo.

O trabalho foi desenvolvido empregando a metodologia sismoestratigráfica, que consiste em uma abordagem geológica para interpretação estratigráfica do dado sísmico (Vail e Mitchum, 1977). Segundo os autores, devido às reflexões sísmicas seguirem correlações cronoestratigráficas é possível fazer os seguintes tipos de interpretações estratigráficas, a partir dos padrões de correlação geométricos da reflexão sísmica: (1) correlações geológicas de tempo, (2) definição de unidades deposicionais, (3) espessura e ambientes deposicionais de unidades genéticas, (4) paleobatimetria, (5) história de soterramento, (6) relevo e topográfica de

inconformidades, e (7) paleogeografia e história geológica, quando combinadas com o dado geológico. O quadro 1 descrevem em detalhe as interpretações geológicas realizadas a partir do dado sísmico.

Parâmetros Sísmicos	Interpretação Geológica
Configuração da Reflexão	<ul style="list-style-type: none"> • Padrões de Acamamento • Processo Deposicional • Erosão e Paleotopografia • Contato entre Fluidos
Continuidade da Reflexão	<ul style="list-style-type: none"> • Continuidade da Camada • Processo Deposicional
Amplitude da Reflexão	<ul style="list-style-type: none"> • Contraste de Impedância • Espaçamento da Camada
Frequência da Reflexão	<ul style="list-style-type: none"> • Espessura da Camada • Composição do Fluido
Velocidade do Intervalo	<ul style="list-style-type: none"> • Litologia estimada • Porosidade estimada • Composição do Fluido
Forma externa e associação adjacente das sismofácies	<ul style="list-style-type: none"> • Ambiente Deposicional • Origem do Sedimento • Configuração Geológica

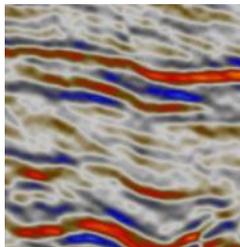
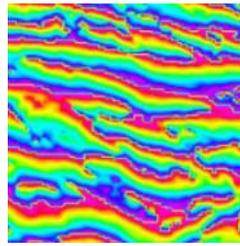
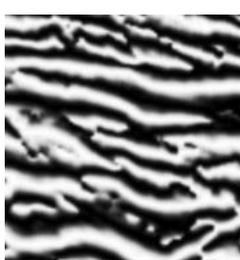
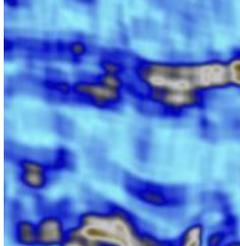
Quadro 1: Parâmetros de reflexão sísmicas utilizados na interpretação sismoestratigráfica e seu significado geológico. Modificada de Vail e Mitchum (1977).

O *workflow* deste trabalho, apresentado a seguir, foi baseado em Kuchle e Scherer (2010) e Neal e Abreu (2009).

5.3.1. Rastreamento de todas continuidades laterais de refletores: identificação das terminações, padrões estratais e geometrias;

O trabalho inicia com a interpretação completa dos refletores sísmicos compreendidos no intervalo de estudo, realizada no software Adobe Illustrator. As reflexões sísmicas primárias são geradas por superfícies físicas nas rochas, limites estratais e descontinuidades, gerados pelo contraste de impedância acústica (densidade e velocidade) (Vail e Mitchum, 1977). Neste projeto, a área de investigação foi limitada no topo pelo fundo do mar e na base por um refletor positivo de alta amplitude e grande continuidade, sobre o qual ocorrem diversas terminações sucessivas de downlap, indicando tratar-se de uma superfície estratigráfica relevante de idade Oligoceno. Esta superfície será definida em termos estratigráficos no desenvolvimento deste projeto. Para

auxiliar na interpretação foram utilizados subconjuntos de informações provenientes dos dados de reflexão sísmica (Barnes, 2016), denominados atributos sísmicos. Foram selecionados os atributos: *Cosine Phase*, *Instantaneous Phase*, e *Root Mean Square (RMS) Amplitude*, com o objetivo de auxiliar na interpretação realizada a partir da fase primária (*Normal Phase*), a exemplo no quadro 2.

Atributo Sísmico	Descrição	Aplicação	Visualização
<i>Normal Phase</i>	<i>Fase normal da sísmica migrada final, em tempo duplo (milissegundos – ms). A partir deste dado são realizados os atributos abaixo selecionados.</i>		
Instantaneous phase	Definido como o ângulo cuja tangente é $(q(t) / f(t))$, a fase (modulação) dos traços da amostra selecionada, em graus ou radianos.	Utilizado para traçar a continuidade de refletores e detectar discontinuidades, falhas e mudanças laterais na estratigrafia.	
Cosine phase	Atributo derivado do cosseno da fase instantânea.	É eficiente em salientar descontinuidade nos refletores, falhas, angularidades, mudanças no acamamento, limites de sequências sísmicas, padrões de acamamento sedimentar auxilia na identificação das terminações dos refletores.	
RMS amplitude	Corresponde a raiz quadrada da soma do domínio do tempo (quadrado da amplitude) dentro do intervalo.	Aperfeiçoamento visual das fácies sísmicas, frequentemente utilizado para salientar a morfologia de canais fluviais. Neste trabalho realçou as porções da bacia com maior presença de sedimento arenoso.	

Quadro 2: Atributos sísmicos utilizados. Fontes: Alvarenga, 2016, Chen e Sidney, 1997, e Chopra e Marfurt, 2007.

5.3.2. Individualização de unidades sismoestratigráficas;

As unidades sismoestratigráficas foram individualizadas através do reconhecimento das terminações de refletores sísmicos de base e topo (onlaps, downlaps, toplaps e truncamentos erosivos) (Figura 10), as quais representam um conjunto de estratos relacionados cronoestratigraficamente, que pode ser composto por um ou mais sistemas deposicionais (Vail & Mitchum, 1977).

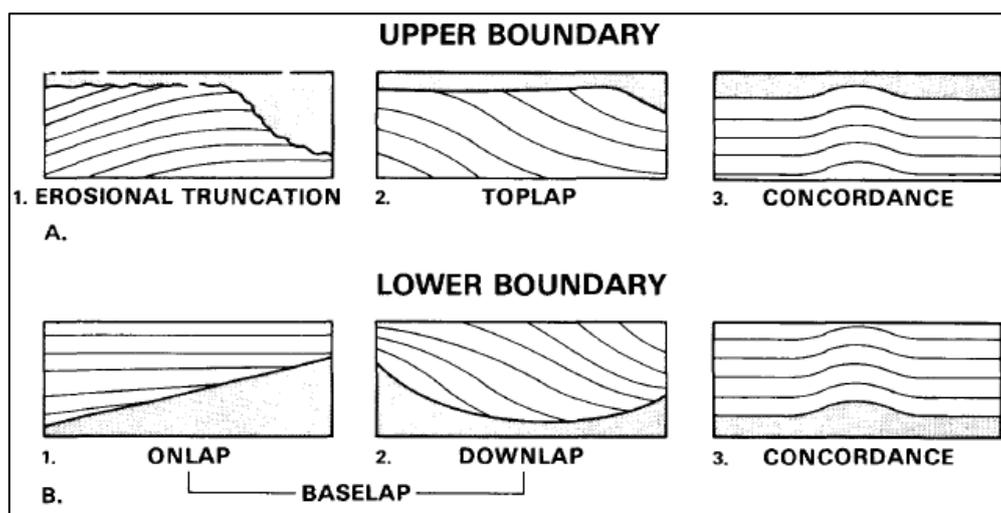


Figura 10: Relação entre os padrões de terminações de refletores (superior e inferior) e o limite de seqüências deposicionais. Fonte: Vail e Mitchum, 1977.

A mudança sistemática dos padrões das terminações, marcadas por uma descontinuidade, distingue uma unidade da outra. É importante ressaltar que nem todas descontinuidades no registro sísmico representarão discordâncias, os limites entre as unidades podem representar eventos deposicionais distintos e subsequentes (Kuchle e Scherer, 2010).

5.3.3. Determinação da evolução estratigráfica da porção analisada da bacia: sismofácies e tratos de sistema;

A partir da individualização das unidades sismoestratigráficas são obtidas três informações muito importantes para a definição da evolução estratigráfica da bacia: (1) o contexto paleogeomórfico de deposição, fornecido

pela geometria da unidade, (2) o arranjo arquitetural dos sistemas deposicionais, determinado pela relação de disposição das unidades, e (3) idade relativa, inferido a partir do empilhamento das unidades (Kuchle e Scherer, 2010).

As fácies sísmicas são determinadas a partir da análise da configuração das reflexões e de outros parâmetros dentro da correlação sísmica, tais como: configuração da reflexão, amplitude, continuidade, frequência e velocidade no intervalo (Vail e Mitchum, 1977). Segundo os autores, alguns dados geológicos brutos como estratificação e características deposicionais dos sedimentos podem ser interpretados a partir destes parâmetros, que serão mapeados como unidade de fácies sísmicas, e agrupados em unidades com reflexões que se distinguem das adjacentes (figuras 11 e 12). Essas unidades serão sempre interpretadas dentro da conotação cronoestratigráfica da estrutura da sequência sísmica.

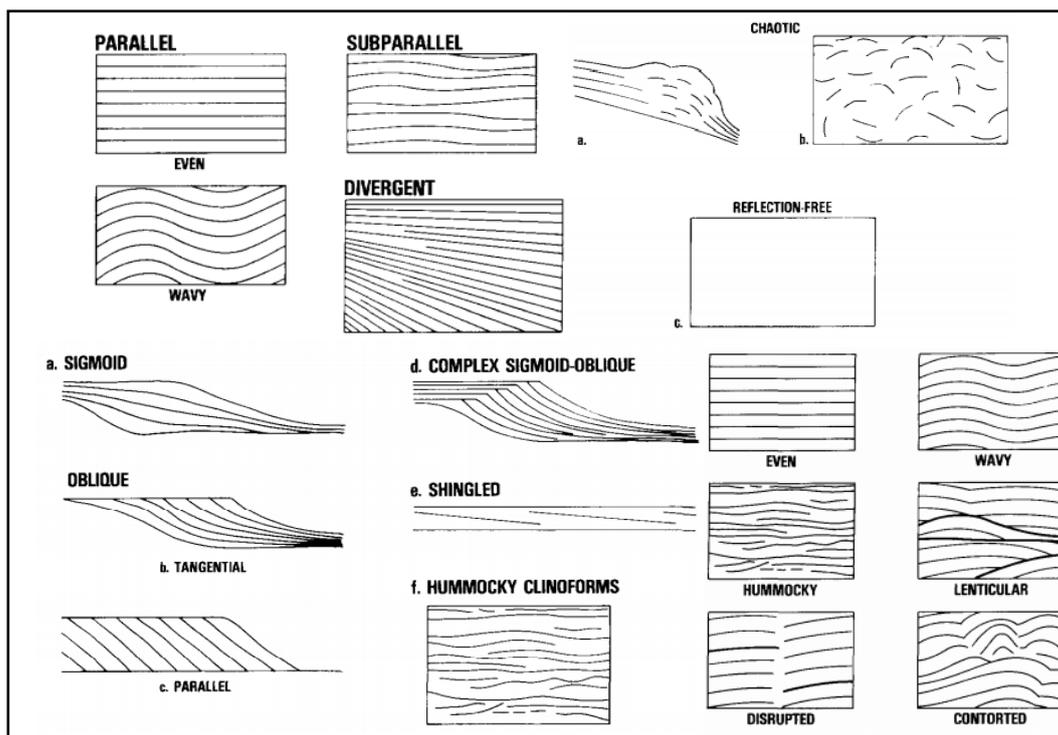


Figura 11: Geometria interna das sismofácies. Fonte: (Vail e Mitchum, 1977).

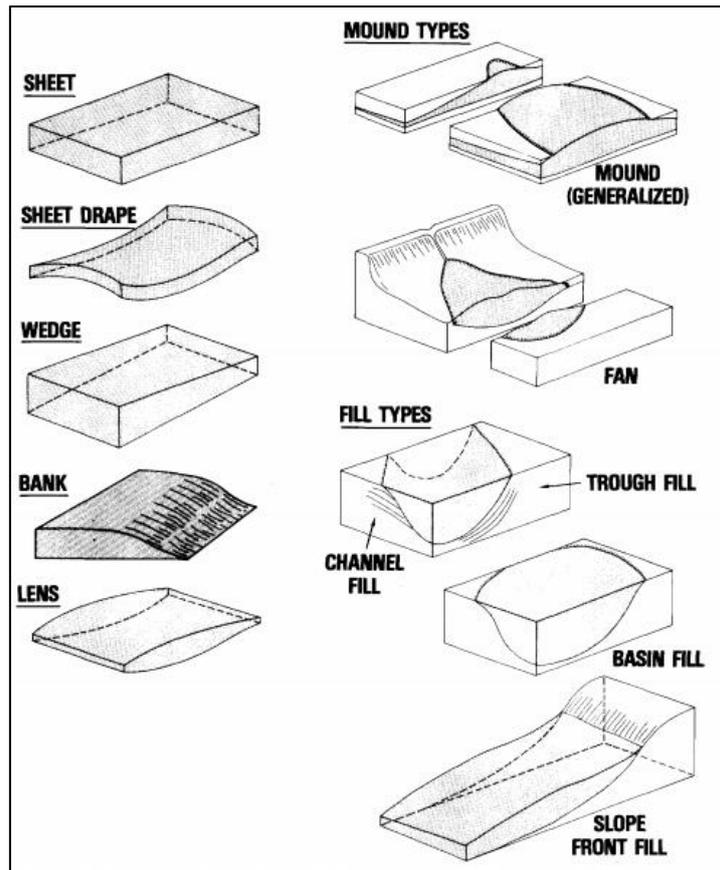


Figura 12: Geometria externa das sismofácies. Fonte: (Vail e Mitchum, 1977).

5.3.4. Correlação com os dados de poço;

Os dados litológicos de poço são importantíssimos para verificar e calibrar a interpretação geológica realizada a partir do dado sísmico, visto que este representa um dado indireto geofísico. Para auxiliar a interpretação, também são utilizados perfis geofísicos de Raios-Gama e Acústico, afim de auxiliar na correlação litológica. A perfilagem pode suprimir o registro de formações durante a perfuração, e os perfis geofísicos preenchem esses *gaps*, e com uma precisa calibração, podem fornecer informações interpretativas precisas (Rider, 1996).

5.3.5. Confecção de uma carta cronoestratigráfica da sessão e curva eustática afim.

Considerando que todas as rochas acima de uma superfície estratal ou uniforme são mais jovens do que aquelas abaixo dela, a seção sísmica

resultante é um registro dos padrões de deposição e estruturais cronoestratigráficos (Vail e Mitchum, 1977). O procedimento completo para a construção de uma carta cronoestratigráfica de eventos é descrito por Vail e Mitchum (1997; parte 3). A curva eustática representa as mudanças relativas no nível do mar no dado intervalo, e é construída a partir da análise dos indicadores estratigráficos: terminações de refletores e descontinuidades. Segundo Vail e Mitchum os indicadores estratigráficos mais confiáveis para marcar uma variação no nível relativo do mar (n.r.m.) são as terminações de refletores em onlap (subida do n.r.m.) e toplap (queda do n.r.m.).

6 RESULTADOS

6.1. Interpretação dos refletores e terminações

6.1.1. Mapeamento da base do arcabouço estudado

O limite basal do arcabouço a ser interpretado foi escolhido como um refletor de alto valor de amplitude e expressiva continuidade ao longo da linha sísmica 0239_0363. Considerando o objetivo inicial de delimitar a superfície basal de descontinuidade que marca a passagem do Período Mioceno para o Oligoceno, foi considerada ainda a variação litológica observada no perfil litológico do poço 1-RJS-101-RJ. Visto que, na porção em estudo da bacia o limite Mioceno-Oligoceno é marcado por uma maior intercalação entre as margas e folhelhos da Formação Ubatuba, com subordinação da presença dos arenitos da Formação Carabepus (Rangel et al, 1994; Winter et al., 2007), a amplitude e continuidade do refletor, adicionado à correlação com os dados litológicos de poço determinaram a escolha do refletor basal (Figura 13). A base do intervalo também está associada a uma sequência de estruturas, principalmente falhamentos normais com rejeitos variáveis, mais frequentes na porção distal, os quais acomodam as unidades basais do intervalo, como é possível identificar nas Figuras 14 e 15.

Já o topo do intervalo de estudo é o fundo do mar, marcado pelo refletor negativo (azul) de alta amplitude e contínuo ao longo do toda a linha sísmica analisada.

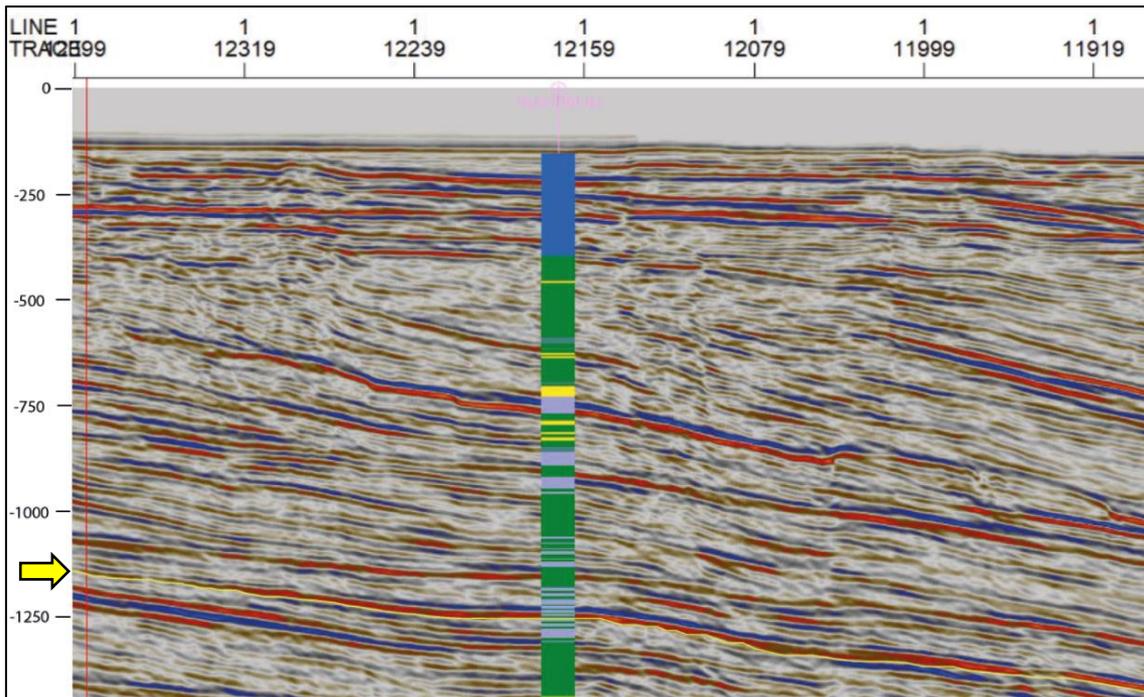


Figura 13: Linha sísmica em fase normal. Em amarelo, a linha basal do arcabouço interpretado, indicada pela flecha amarela, assinalada abaixo do refletor escolhido.

6.1.2. Interpretação completa dos refletores e terminações

A interpretação completa dos refletores da linha sísmica 0239_0363 (Figuras 14 e 15) demonstra maior continuidade e concordância dos refletores na porção superior do arcabouço, próximos ao fundo do mar, com redução destes parâmetros em direção a base do intervalo mapeado. A porção central do intervalo apresenta maior descontinuidade dos refletores, com relação às porções mais proximais e distais, podendo encontrar-se caótica em alguns segmentos. A Figura 16 apresenta em detalhe a continuidade dos refletores no intervalo interpretado.

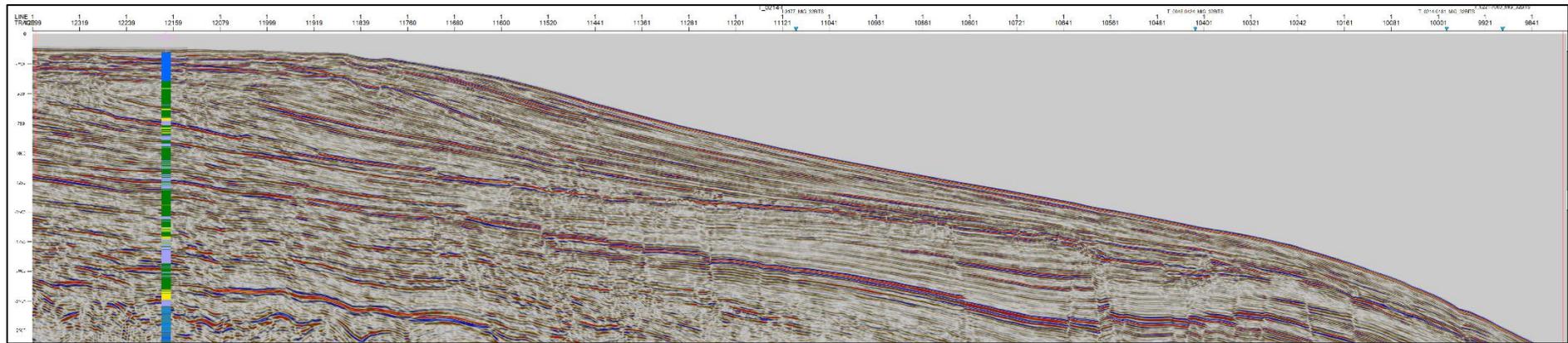


Figura 14: Linha sísmica 0239_0363 em fase normal, sem interpretação.

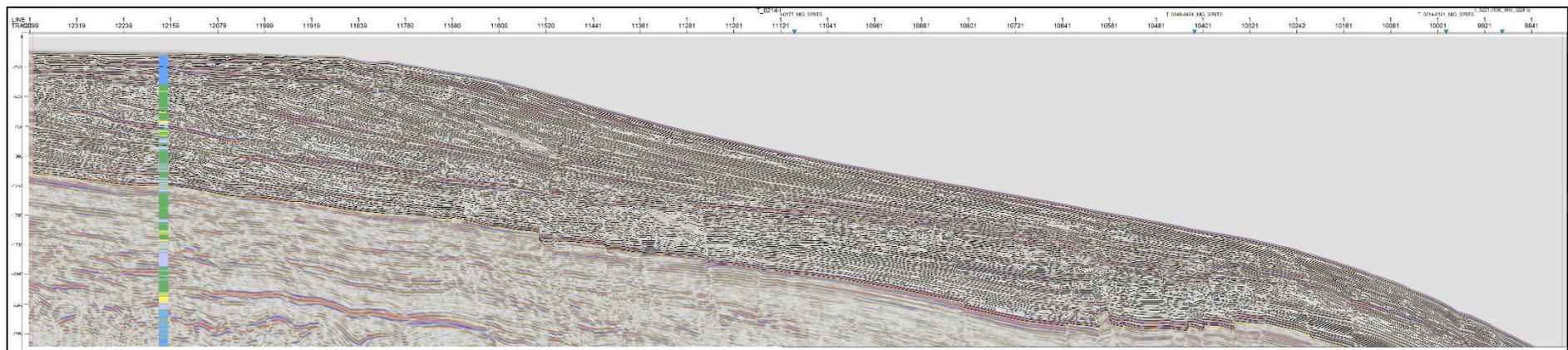


Figura 15: Linha sísmica 0239_0363 em fase normal, com interpretação completa dos refletos.

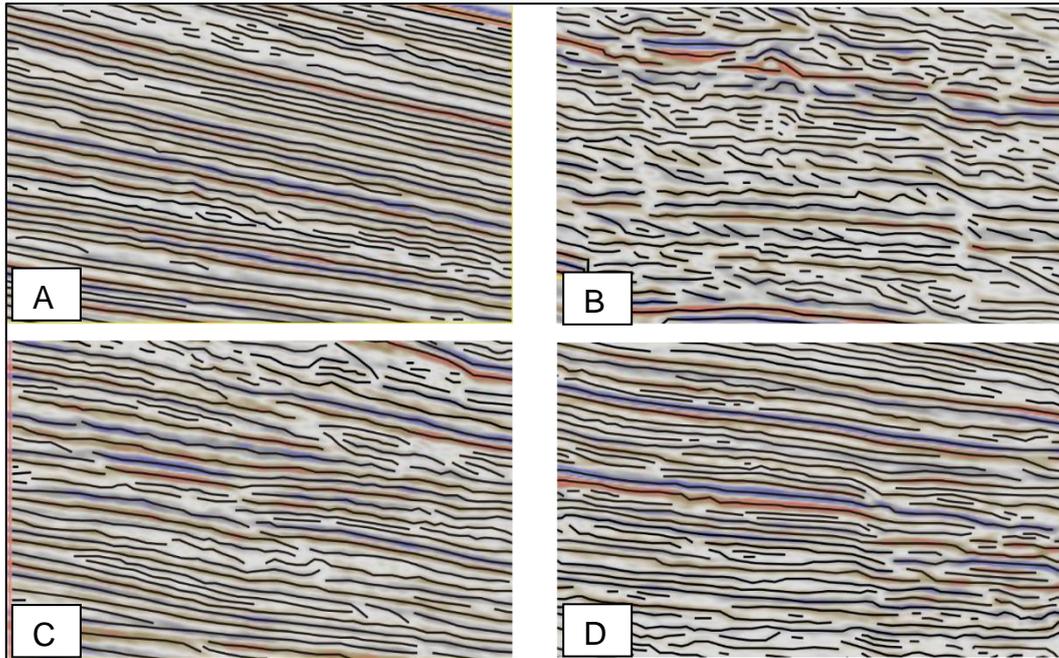


Figura 16: Padrões de continuidade dos refletores: A) Topo do intervalo; B) Porção inferior e central do intervalo; C) Porção Proximal; C) Porção Distal.

A partir do mapeamento dos refletores, foram identificadas as terminações dos refletores em *onlap*, *downlap*, *toplap* e truncamento erosivo, agrupadas em terminações de topo (*toplap* e truncamento erosivo), e terminações de base (*downlap* e *onlap*) (Figura 17).

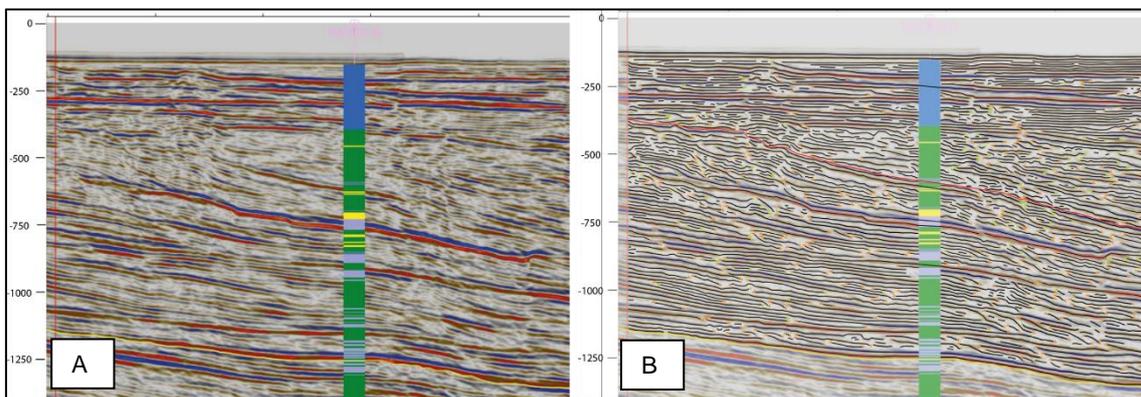


Figura 17: A) Recorte da linha sísmica em fase normal. B) Recorte da linha sísmica com interpretação dos refletores e terminações.

Observa-se a ocorrência das terminações de base e topo ao longo de todo intervalo, com maior ocorrência das terminações de base, e predominância de *onlaps* na parte mais proximal da linha sísmica, e *downlaps*

na parte mais distal. Com relação às terminações de topo, observa-se maior concentração de truncamentos erosivos e *toplaps* nas porções proximal e central do intervalo sísmico. A figura 18 apresenta um quadro detalhado das relações entre as terminações dos refletores com as superfícies limítrofes das unidades sísmicas.

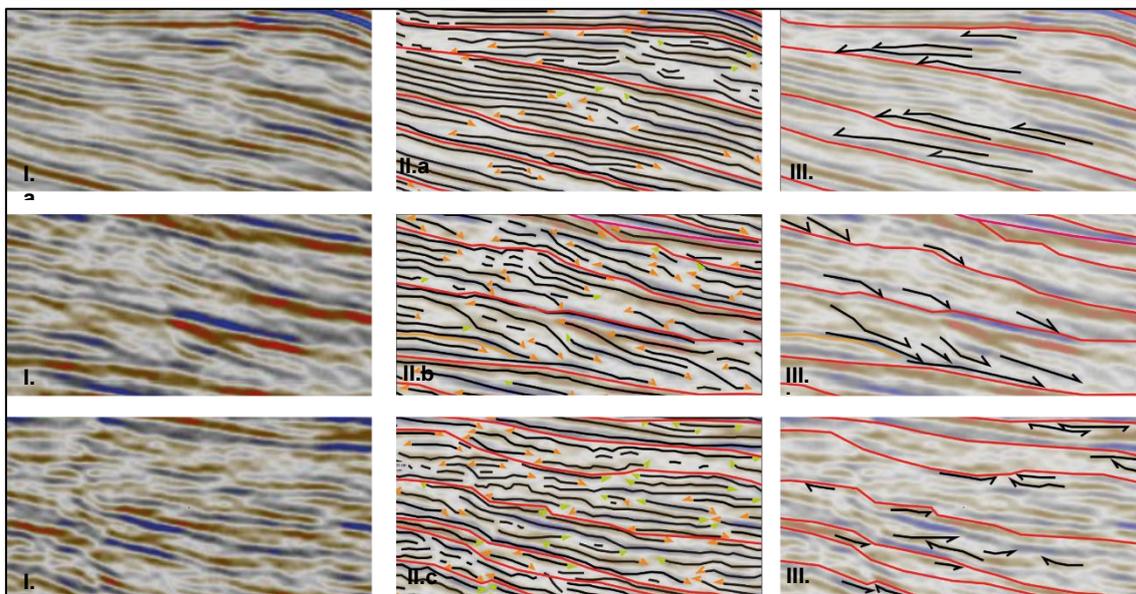


Figura 18: A coluna I apresenta recortes da linha sísmica em fase normal. A coluna II apresenta a interpretação completa dos refletores (linhas pretas) e terminações de topo (verde) e base (laranja), e as superfícies limítrofes das unidades sísmicas (vermelho). A coluna III mostra a relação entre as terminações (setas pretas) e as superfícies limítrofes. As linhas a, b e c dão destaque para as terminações em *onlap*, *downlap* e de topo (truncamento erosivo e *toplap*), respectivamente.

6.2. Arcabouço estratigráfico

O arcabouço é formado pelo agrupamento das unidades conforme seu arranjo, zona de ocorrência e comportamento, apresentando padrões de empilhamento continuados, definindo os tratos de sistemas e as sequencias deposicionas.

6.2.1. Unidades Sismoestratigráficas e Carta cronoestratigráfica

No intervalo de estudo foram identificadas 35 unidades sismoestratigráficas, individualizadas por 34 superfícies limítrofes (Figura 19 e

20). Considerando que as unidades sismoestratigráficas representam unidades deposicionais sísmicas com relação temporal relativa entre si, foi elaborada uma carta cronoestratigráfica, conforme metodologia descrita anteriormente, baseada em Vail et al. (1977). Na carta cronoestratigráfica (Figura 21) também foram representadas as superfícies erosivas (marcas pela presença de terminações de refletores em truncamentos erosivos), superfícies regressivas (marcadas por sucessivas terminações em *downlaps*), e transgressivas (sucessivos *onlaps*), indicando eventos de erosão, regressão e transgressão associados à deposição e preservação dessas unidades. As superfícies erosivas de ampla ocorrência vão definir discordâncias, e separam sequências deposicionais.

A carta mostra o início da deposição nesta seção pela porção distal, representadas pelas unidades 1 a 8, inicialmente condicionada às estruturas de falhas (unidades 1 a 5). Posteriormente, percebe-se um avanço da deposição das unidades no sentido proximal da linha, unidades 9 a 29, com alguns eventos de deposição recobrando quase a extensão completa da linha (unidades 16, 24 e 27). Por fim, as unidades 30 a 35 mostram nova deposição na porção centro-distal da seção sísmica.

As unidades sismoestratigráficas aqui definidas compreendem unidades deposicionais com contexto temporal associado – tempo relativo. Desta forma, todas as unidades apresentam expressividade temporal igual, embora entenda-se que não é desta forma que elas ocorrem. Para definir períodos temporais específicos para unidades sismoestratigráficas e seus conjuntos (tratos de sistemas), seria necessário obter dados bioestratigráficos de detalhe ou datações absolutas em um nível de alta resolução. Tais dados são extremamente raros e de difícil obtenção. Entretanto, tal carência não invalida a metodologia aqui aplicada, onde uma bioestratigrafia geral existente no poço permite um bom grau de correlação com períodos geológicos já definidos de forma bem confiável. Também neste enfoque, discordâncias que compreendem a ausência de unidades não são possíveis de determinar (definir extensão temporal da discordância), pois da mesma forma é necessária a ausência de uma biozona para definir a extensão temporal de uma discordância.

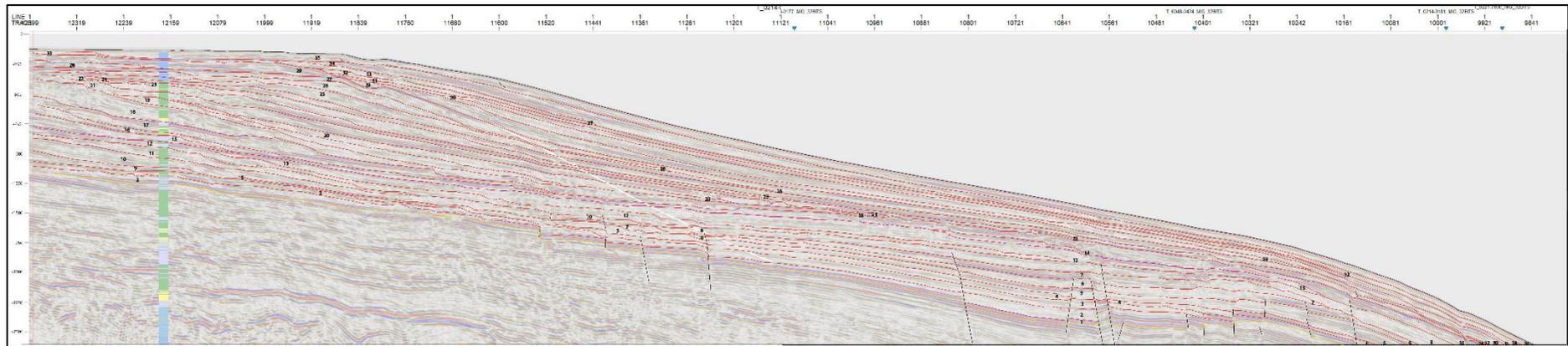


Figura 19: Unidades sismoestratigráficas numeradas (1 a 35) e as superfícies limitrofes em vermelho.

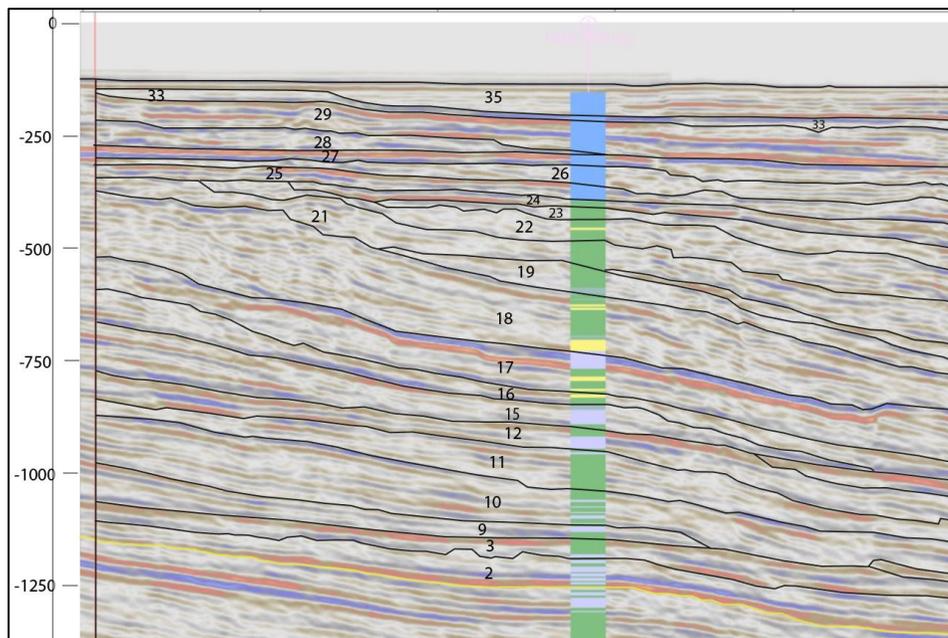


Figura 20: Em detalhe um recorte da porção proximal da seção sísmica, mostrando as unidades sismoestratigráficas numeradas, delimitadas pelas superfícies limitrofes em preto.

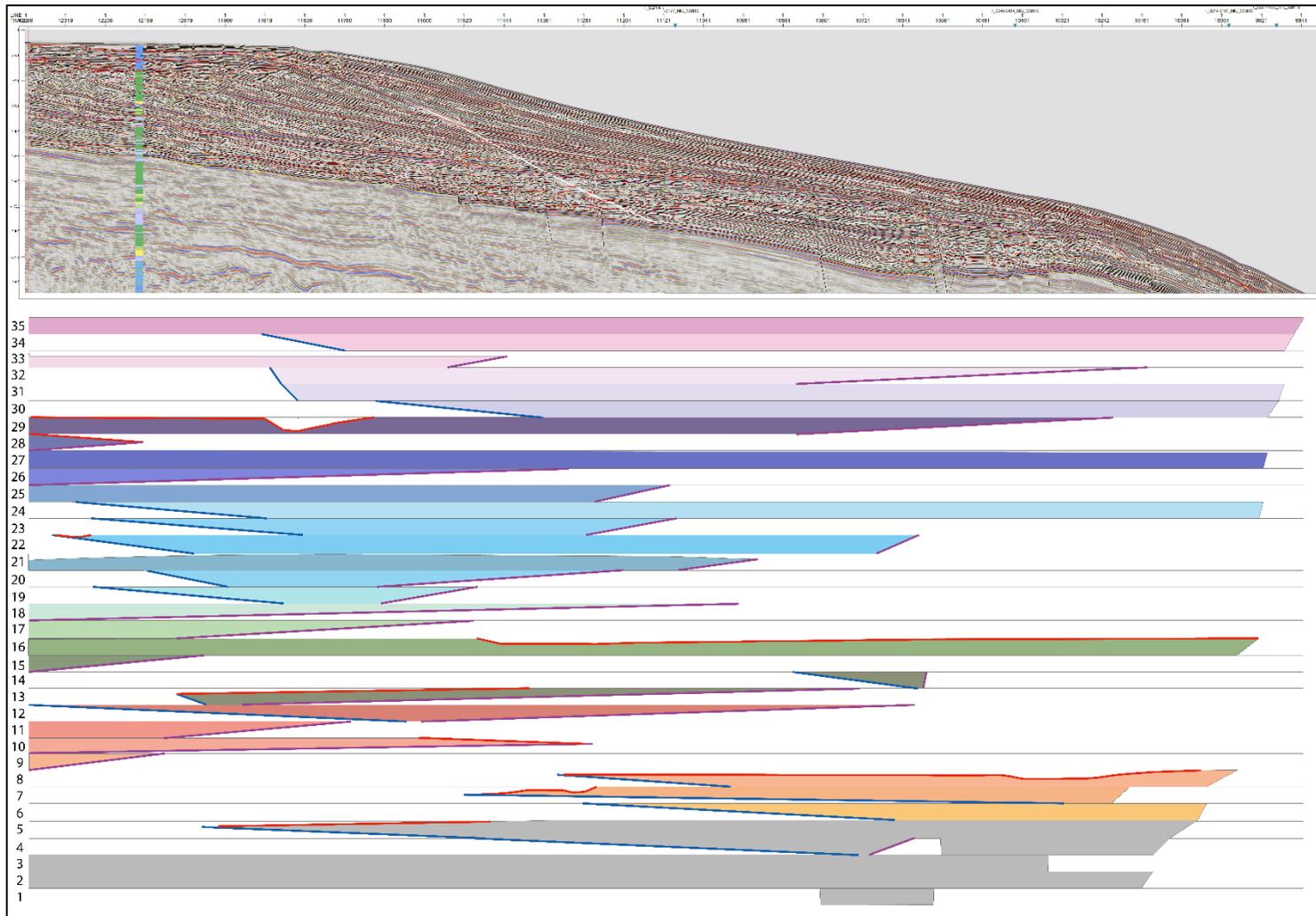


Figura 21: Carta cronoestratigráfica completa da seção sísmica. Representação das unidades sismoestratigráficas numeradas de 1 a 35; Truncamentos erosivos em vermelho; Downlaps em roxo; Onlaps em azul.

6.2.2. Tratos de Sistemas e Sequências Sismoestratigráficas

As Unidades Sismoestratigráficas foram interpretadas e agrupadas em Tratos de Sistemas, segundo a estratigrafia de sequências apresentada por Catuneanu (2006). Foram identificados três Tratos de Sistema de Nível Alto (TSNA), dois Tratos de Sistemas de Estágio de Queda (TSEQ), dois Tratos de Sistemas de Nível Baixo (TSNB), e três Tratos de Sistemas Transgressivos (TST) (Figura 22). Individualizando os tratos de sistema, foram identificadas dez superfícies limítrofes, sendo elas a Superfície de Inundação Máxima (SIM), Superfície de Base de Regressão Forçada (SBRF), Superfície de Regressão Máxima (SRM), Discordância Subaérea (DS) e a Concordância Correlata (CC). Ainda, a partir dos Trato de Sistema, foram identificadas quatro sequências deposicionais (unidades estratigráficas compostas, limitadas por discordâncias – Posamentier et al., 1988, ou DS-CC, conforme Catuneanu, 2006), compostas por ciclos transgressivos e regressivos afins. O quadro 3 é uma tabela completa apresentando os tratos de Sistema identificados, compondo as respectivas sequências, e as Superfícies Limítrofes de Cada Trato.

Sequência	Tratos de Sistema	Superfície Limítrofe
4	TSNB	CC + DS + SBRF
	TSNA	SIM
3	TST	CC + DS + SRM
	TSEQ	SBRF
2	TSNA	SIM
	TST	SRM
	TSNB	CC + DS
1	TSEQ	SBRF
	TSNA	SIM
	TST	SRM

Quadro 3: Tabela completa dos Tratos de Sistemas, agrupados nas Sequências e as respectivas Superfícies Limítrofes.

Sequência 1

A sequência 1 inicia com um TST, composto pelas Unidades Sismoestratigráficas de 6 a 8, limitadas na base por uma SRM e no topo por uma SIM (Figura 23). As unidades neste trato possuem geometria sigmoidal, com padrões internos dos refletores de maneira geral subparalelos. Esta sequência é a única do intervalo estudado que é afetada pelas estruturas tectônicas basais do intervalo. A SIM que delimita o topo do trato apresenta característica erosiva, marcada pelas terminações em truncamento erosivo.

Acima da primeira SIM está depositado o primeiro TSNA, composto pelas unidades de 9 a 12 (Figura 24). Este trato possui geometria sigmoidal-oblíqua, e padrões internos majoritariamente subparalelos. No topo do trato, delimitando também o fim da primeira sequência, se encontra uma SBRF.

Sequência 2

A sequência 2 tem na sua base a SBRF, sobre a qual se deposita um TSEQ composto pela unidade 13 (Figura 25). O trato possui característica erosiva na base, indicado pelas terminações de refletores em truncamento erosivo da unidade inferior com a SBRF (Figura 25 – B). Internamente, a unidade apresenta de maneira geral padrão dos refletores divergente. O topo da unidade é limitado por uma superfície que representa a DS e a CC afim.

Acima da SBRF se depositou o primeiro TSNB, encontrado restritamente na porção basal da linha, e composto exclusivamente pela unidade 14 (Figura 26). A unidade possui majoritariamente terminações em *onlap*, padrão de refletores paralelo, e é limitada no topo por uma SRM.

Sobreposta a SRM tem-se um TST, composto pelas unidades 15 e 16 (Figura 27). A unidade 16 apresenta registro em toda extensão da seção, e é marcada por sucessivos *onlaps* basais, variação de espessura, e de padrões dos refletores, ora paralelos, subparalelos e divergentes.

No topo do TST identificou-se uma SIM, sobre a qual se deposita o segundo TSNA do intervalo (Figura 28). O trato é constituído pelas unidades 17 e 18, e possui registro exclusivamente na porção proximal da seção. As

unidades são marcadas por suc essões de *downlaps* basais, e padrões interno de refletores divergentes. Ainda, na unidade 17 é encontrada uma estrutura em *mound*, constituída no topo por terminações em *toplap* e truncamento erosivo, e na base por *downlaps*.

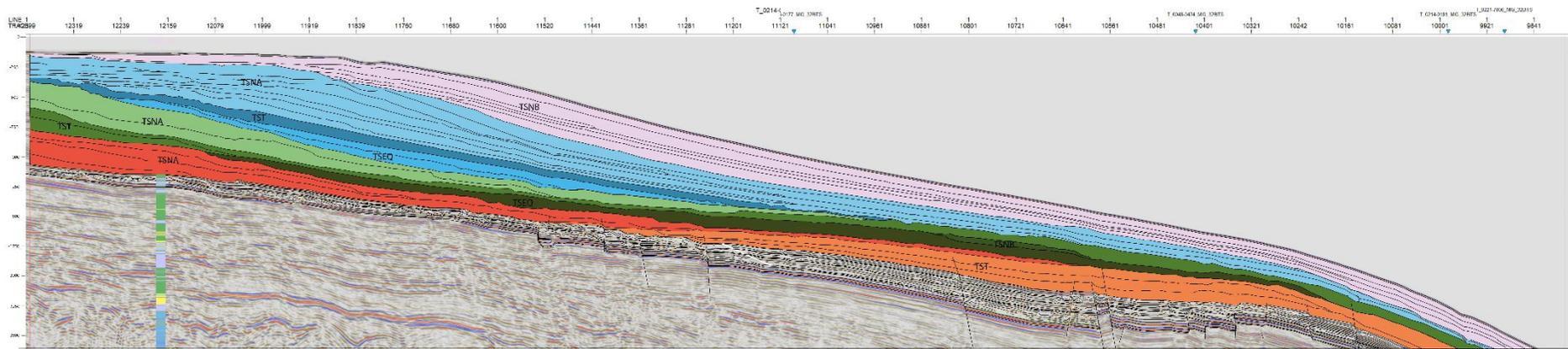


Figura 22: Tratos de sistemas identificados no intervalo.

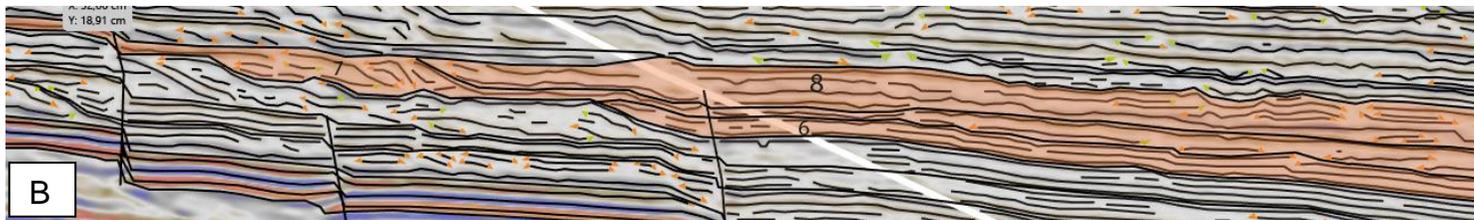
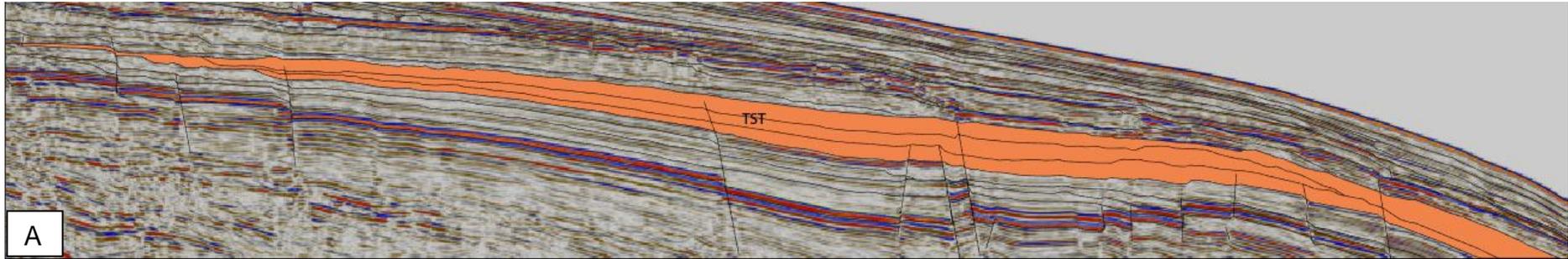


Figura 23: A) Em laranja as unidades de 6 a 8 compoendo o primeiro TST. B) Detalhe da porção mais proximal das unidades, mostrando as sequências de terminações em *onlap* sobre as superfícies limítrofes, caracterizando o TST. C) Detalhe das unidades 6 a 8 influenciadas pelas estruturas tectônicas.

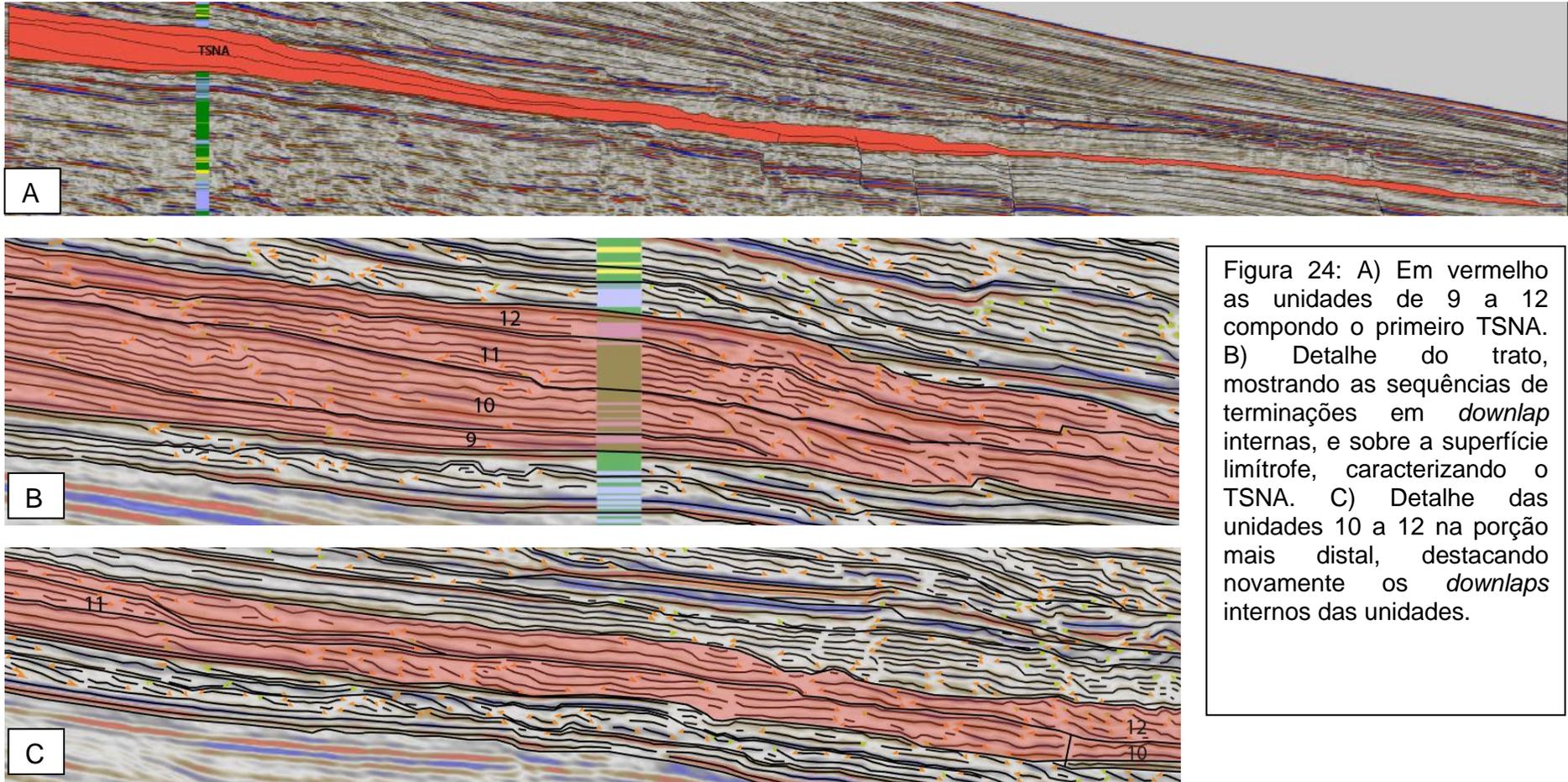


Figura 24: A) Em vermelho as unidades de 9 a 12 compoendo o primeiro TSNA. B) Detalhe do trato, mostrando as seqüências de terminações em *downlap* internas, e sobre a superfície limítrofe, caracterizando o TSNA. C) Detalhe das unidades 10 a 12 na porção mais distal, destacando novamente os *downlaps* internos das unidades.

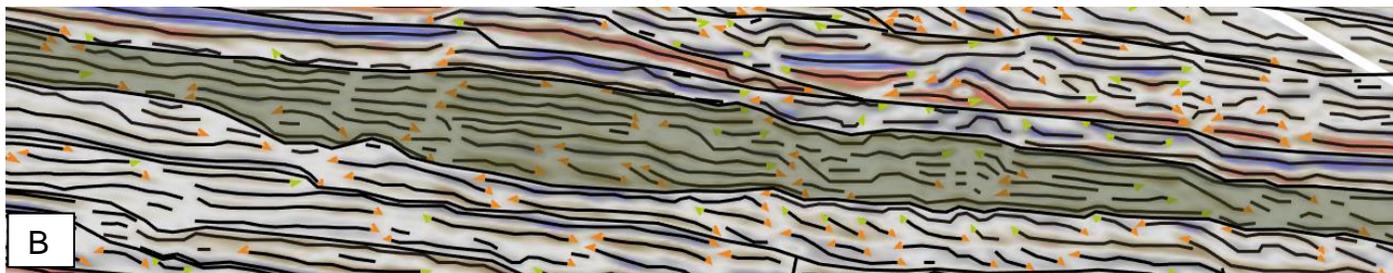
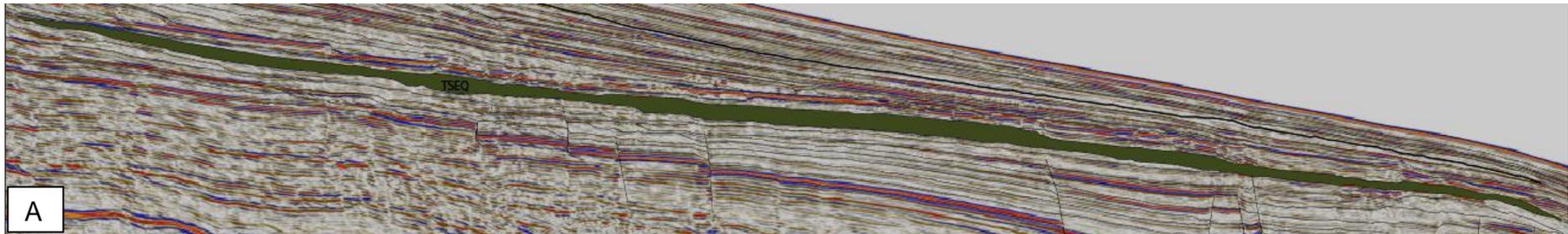


Figura 25: A) Em verde o TSEQ composto pela unidade 13. B) Detalhe da unidade, mostrando a superfície erosiva basal (SBRF), indicado pela relação da superfície com as terminações em truncamento erosivo da unidade inferior. C) Detalhe das unidades do trato, destacando as terminações em *onlap* e *downlap* internas.

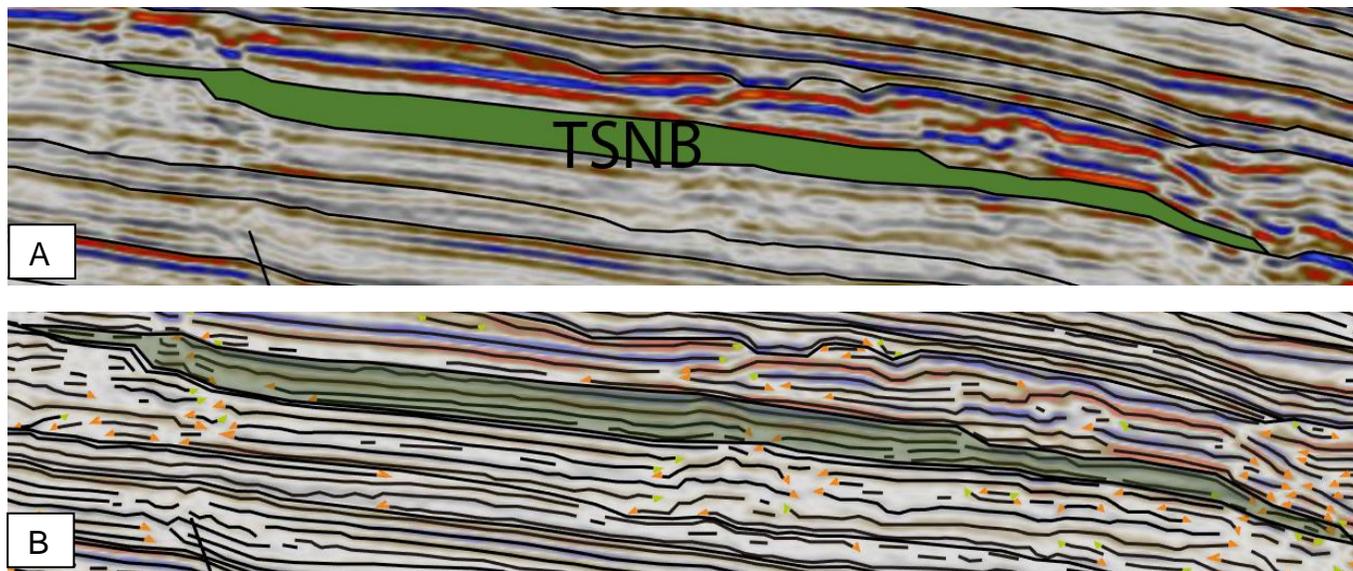


Figura 26: A) TSNB em verde. B) Detalhe da unidade 14, mostrando as terminações em *onlap*, e o padrão de refletores paralelo.

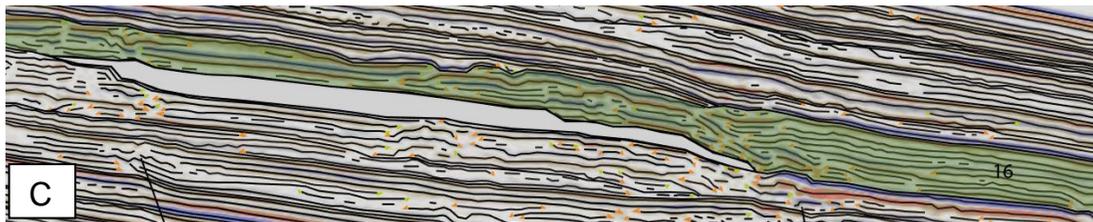
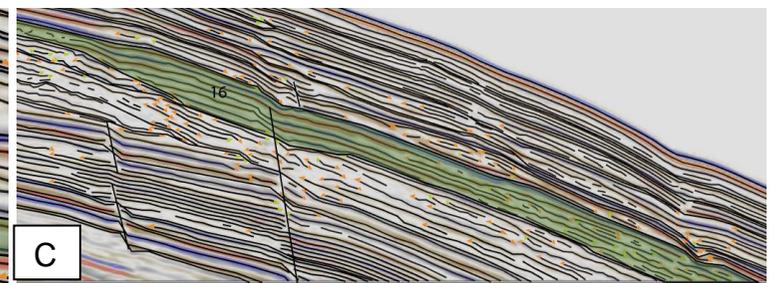
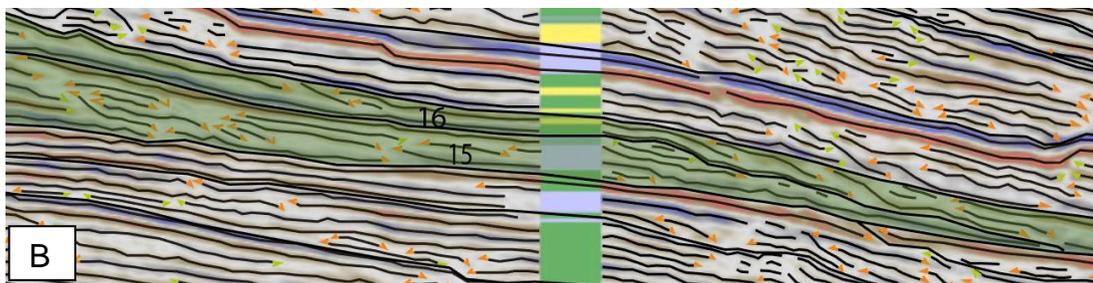
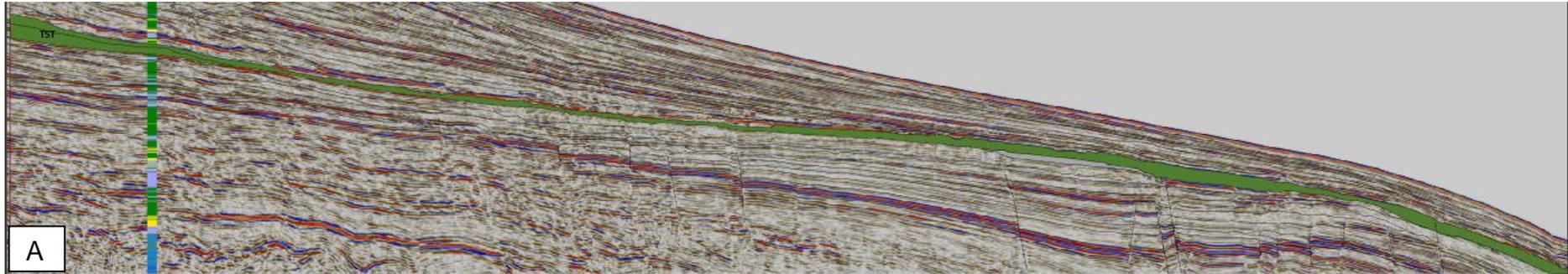


Figura 27: A) Unidades TST em verde. B) Terminações em *onlap* e *downlap* internas das unidades sismoestratigráficas 15 e 16. Variação do padrão interno dos refletores da unidade 16, divergentes (C) e paralelos em (D).

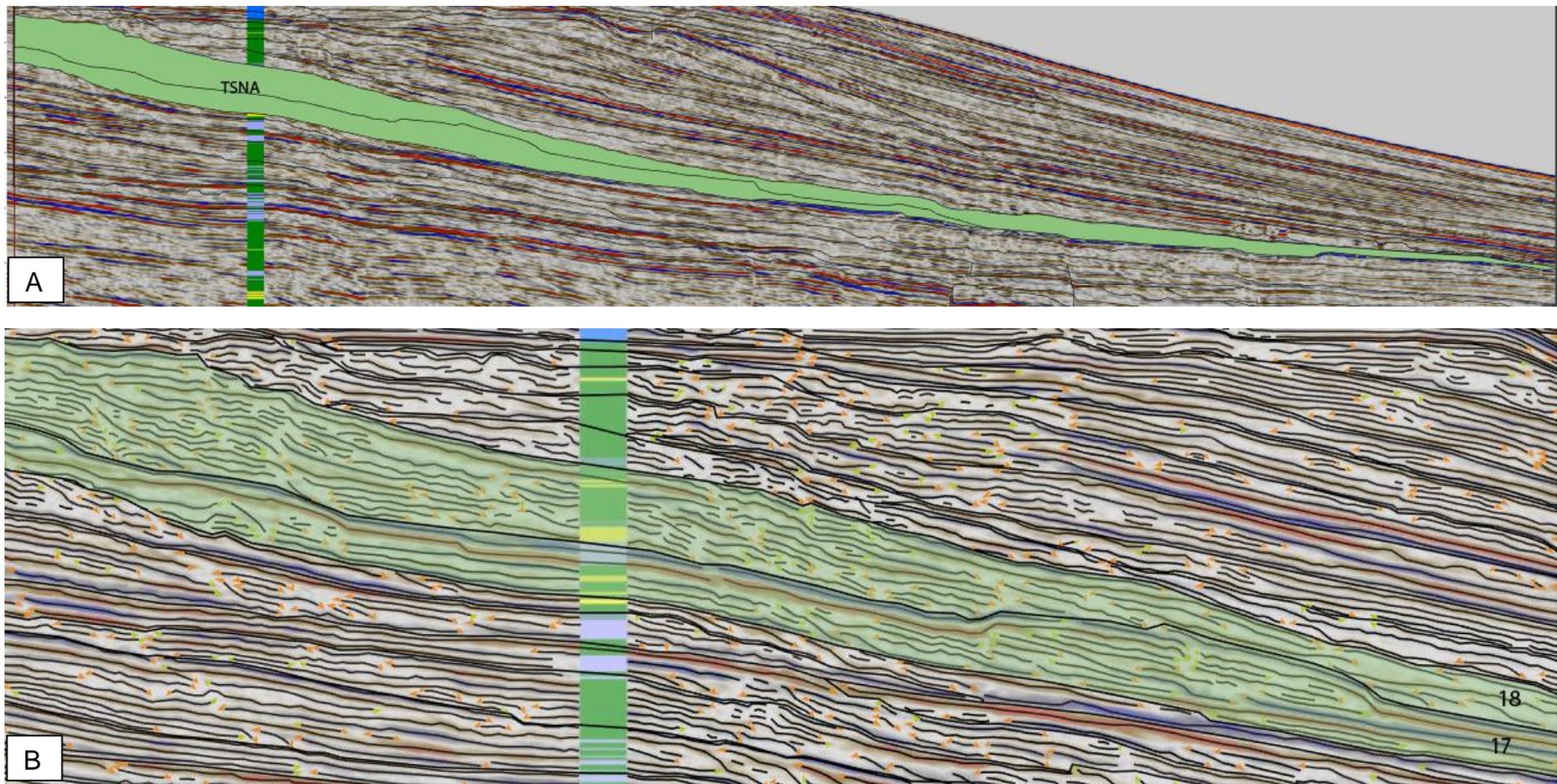


Figura 28: A) TSNA em verde, composto pelas unidades 17 e 18. B) Detalhe das unidades 17 e 18, mostrando o padrão interno divergente dos refletores, sucessões de terminações em *downlap*, e a estrutura em *mound* encontrada na unidade 17.

Sequência 3

A sequência 3 inicia com o registro do segundo TSEQ sobre uma SBRF (Figura 29). A SBRF possui indicação de erosão por terminações de refletores em truncamento erosivo com a unidade inferior. O trato é composto pelas unidades 19 e 20, que se encontram restritas a porção proximal da seção, marcados por sucessivos *downlaps* basais e padrão interno de refletores subparalelos. A TSEQ é limitada no topo por uma superfície que representa ao mesmo tempo uma SRM e uma DS e sua CC. A relação entre o TSEQ e esta superfície de topo indica erosão, marcada pelas terminações de topo em truncamento erosivo.

Sobreposta, se encontra um TST composto pela unidade 21, formada por refletores com terminações majoritariamente em *onlap*, que se estende da porção proximal até o centro da seção (Figura 30). O topo da unidade é limitado por uma SIM.

A sequência 3 encerra em um novo TSNA, formado pelas unidades 22 a 29 que avançam umas sobre as outra no sentido distal da seção, tendo duas unidades (24 e 27) recobrimdo toda extensão do intervalo (Figura 31). As unidades se apresentam com uma geometria de complexo sigmoidal-oblívio, padrões de refletores predominantemente subparalelos a paralelos, com a unidade 27 expressando padrão caótico em uma parcela. Predominam terminações em *onlap* na porção mais proximal e majoritariamente *downlaps* com o avanço para a porção distal. No topo da unidade se encontra uma superfície que representa uma SBRF e uma DS com a CC afim, que encerra a sequência 3.

Sequência 4

A última sequência é composta por um TSNB formado pelas unidades 30 a 35 (Figura 32). O trato se apresenta com geometria sigmoidal, e padrão interno de refletores significativamente paralelos. As terminações de refletores são predominantemente em *onlap*, tanto internamente quando na base das unidades. As unidades do trato avançam umas sobre as outra no sentido proximal da seção, possuem ampla extensão lateral no intervalo, e a última unidade, 35, encerra a sequência e os depósitos, recobrimdo todo o arcabouço.

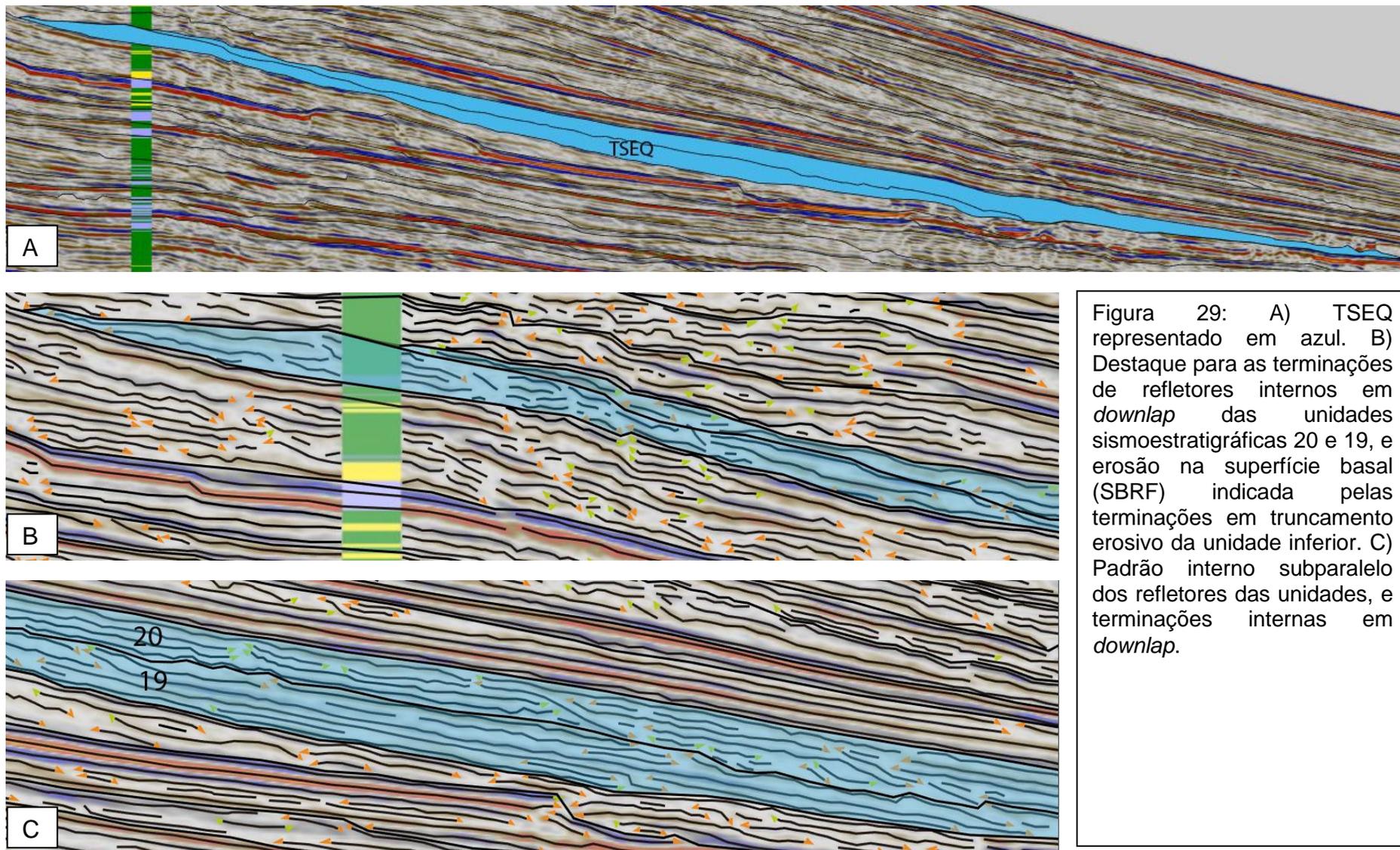


Figura 29: A) TSEQ representado em azul. B) Destaque para as terminações de refletores internos em *downlap* das unidades sismoestratigráficas 20 e 19, e erosão na superfície basal (SBRF) indicada pelas terminações em truncamento erosivo da unidade inferior. C) Padrão interno subparalelo dos refletores das unidades, e terminações internas em *downlap*.

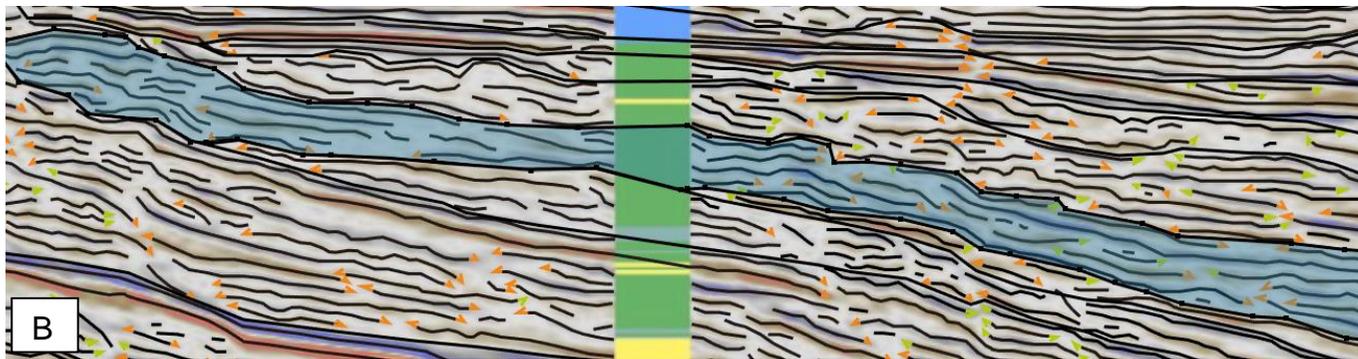
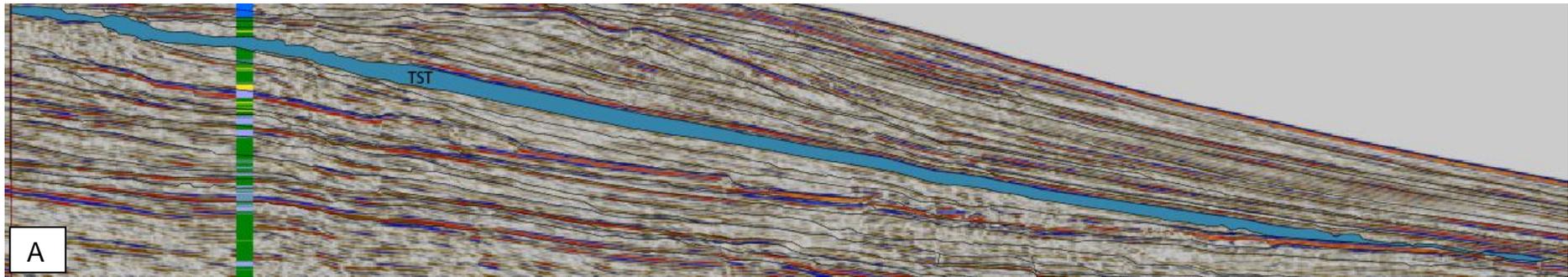


Figura 30: A) TST em azul composto pela unidade 21. B) Destaque para as terminações em *onlap* basais na unidade.

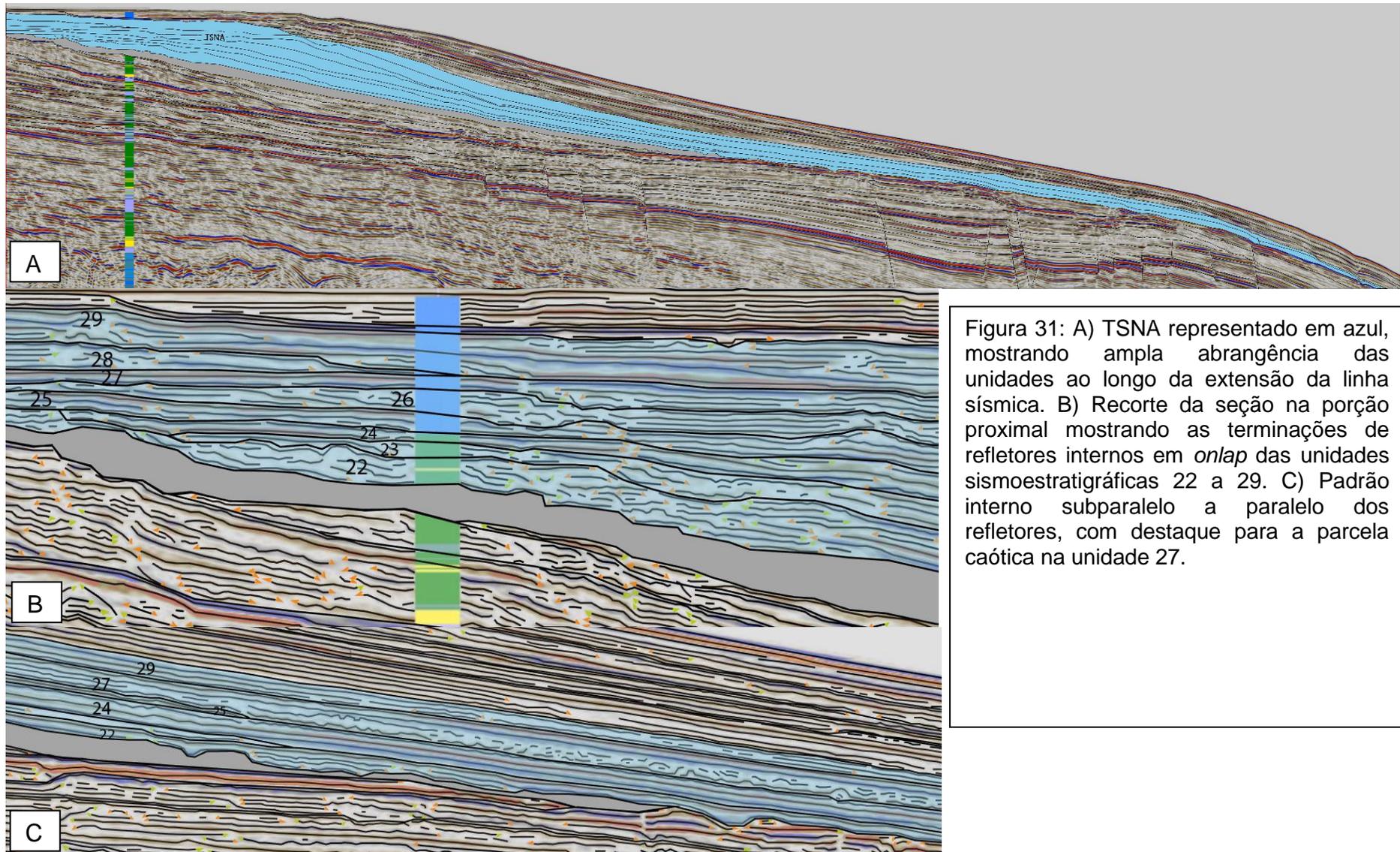


Figura 31: A) TSNA representado em azul, mostrando ampla abrangência das unidades ao longo da extensão da linha sísmica. B) Recorte da seção na porção proximal mostrando as terminações de refletores internos em *onlap* das unidades sismoestratigráficas 22 a 29. C) Padrão interno subparalelo a paralelo dos refletores, com destaque para a parcela caótica na unidade 27.

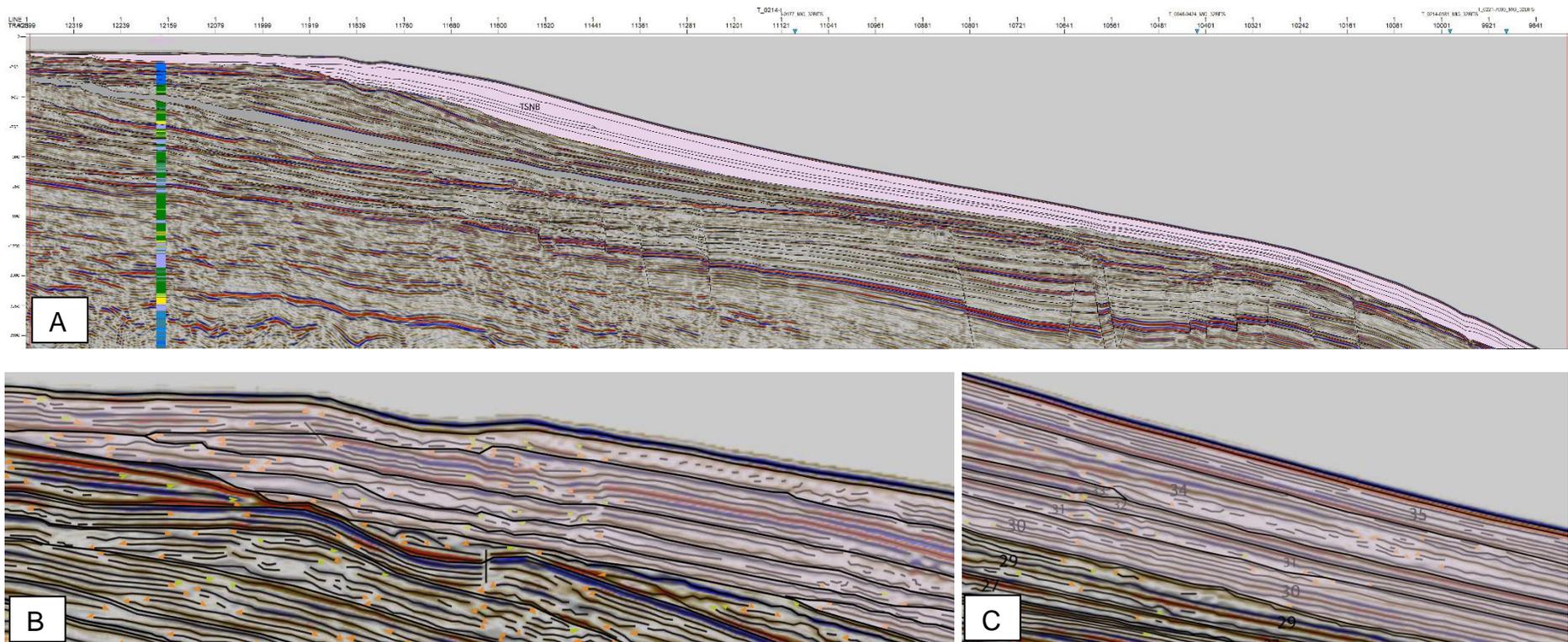


Figura 32: A) Segundo TSNB da seção, representado em rosa. B) Recorte da seção mostrando as terminações de refletores internos em *onlap* das unidades e o avanço das unidades 30 a 35 no sentido proximal da linha sísmica. C) Padrão interno predominantemente paralelo dos refletores, das unidades que compõe o trato.

6.2.3. Curva de Variação Relativa do Nível do Mar e sua correlação com a Curva eustática global

Para estimar a idade aproximada das sequências identificadas, com relação à carta cronoestratigráfica convencional da bacia de Campos (Winter et al., 2007), foi utilizado como referência as idades fornecidas nos dados de poço (dados de intervalos cronoestratigráficos a partir de bioestratigrafia), posicionadas nas respectivas profundidades do poço 1-RJS-101-RJ, calculadas a partir do dado de velocidade da onda sísmica, permitindo um posicionamento cronoestratigráfico das unidades (Figura 33). A Figura 34 apresenta o posicionamento das sequências identificadas no presente estudo e a curva eustática afim, construída através da identificação dos ciclos regressivos e transgressivos, conforme proposto por Vail et al. (1997) e Posamentier et al. (1988), e comparadas à curva eustática de Haq. et al. (1998).

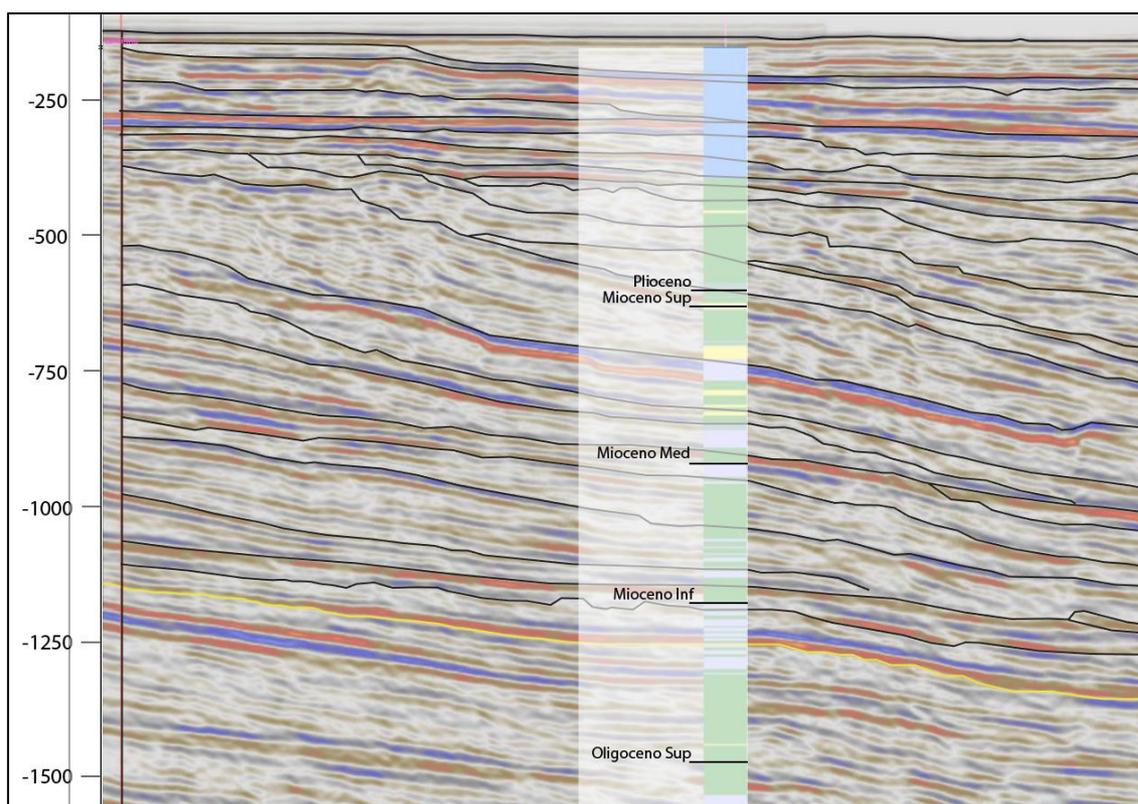


Figura 33: Idade relativa do intervalo no poço 1-RJS-101-RJ. Em preto, as superfícies limítrofes das unidades sismoestratigráficas.

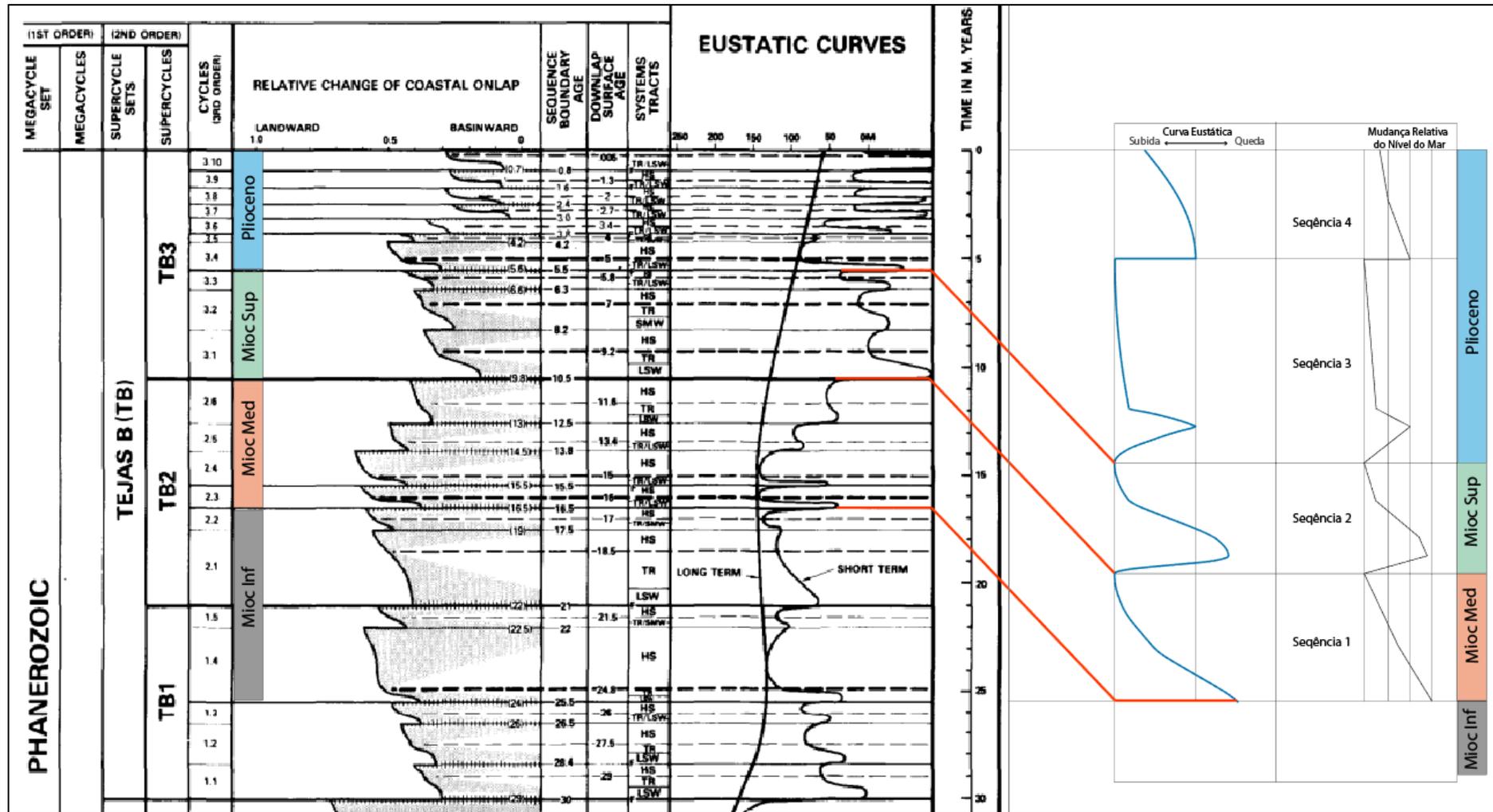


Figura 34: A esquerda, segmento da carta cronoestratigráfica elaborada por Haq. et al. (1998), modificada, com indicação das Séries. Curva eustática em azul, com indicação do posicionamento correlato cronoestratigráfico das sequências, em vermelho.

6.3. Sucessões de Acomodação

A fim de auxiliar na visualização e compreensão dos padrões de empilhamento, ainda foi gerada a Figura 36, ilustrando padrões de empilhamento associados às mudanças na criação de espaço de acomodação e preenchimento sedimentar, segundo Neal e Abreu (2009). Na classificação apresentada pelos autores, as unidades deposicionais são compostas pela sucessão de sets classificados como *progradation to aggradational (PA)*; *retrogradation (R)*; e *aggradation to progradation to degradation (APD)*, determinando os tratos de sistemas: *lowstand*, *transgressive* e *highstand* respectivamente.

Foram identificados no intervalo três tratos de nível alto (*highstand*), três tratos transgressivos (*transgressive*) e dois tratos de nível baixo (*lowstand*) (Figura 35). Observa-se o aumento de espessura dos tratos de nível alto para o topo do intervalo, bem como dos tratos de nível baixo. Ainda, percebe-se a predominância dos tratos regressivos (nível alto e nível baixo) comparados aos tratos transgressivos.

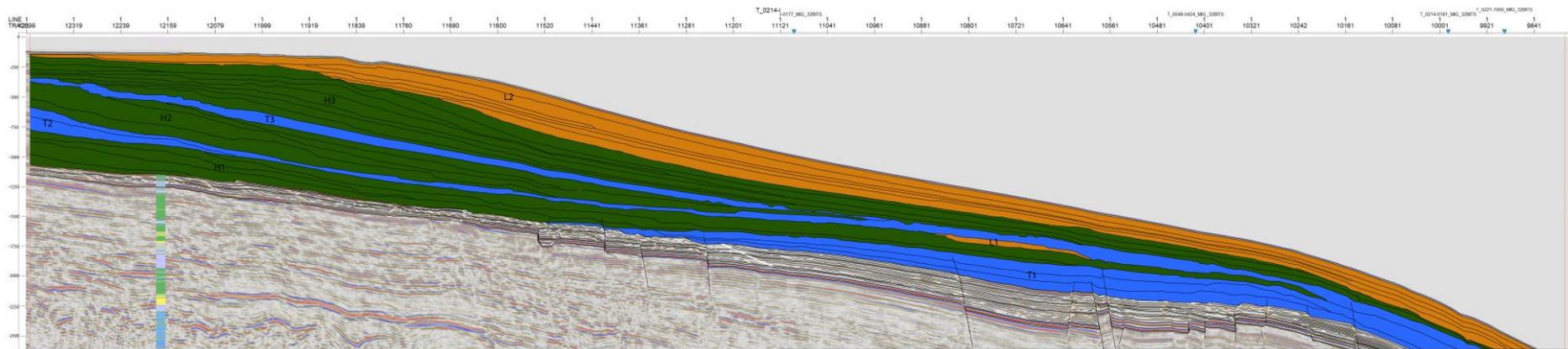


Figura 35: Interpretação das unidades sismoestratigráficas em sucessões de acomodação, baseada em Neal e Abreu (2009). Tratos de *lowstand* (laranja) L1 e L2; *transgressive* (azul) T1, T2 e T3; e *highstand* (verde) H1, H2 e H3.

7 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

7.1. Padrões de empilhamento

O intervalo estudado sugere uma tendência geral regressiva normal, marcada pela predominância de tratos de sistema regressivos frente aos transgressivos. Observa-se aumento do espaço de acomodação para o topo, marcado pelo crescente espessamento dos TSNA. Também é possível observar na curva eustática a relativa subida do nível do mar, indicada pela “subida” do nível relativo do mar mínimo a cada queda, o que sugere que a regressão ocorra pelo aumento do aporte sedimentar na bacia. A curva eustática apresentada por Haq. et al. (1998) também apresenta a mesma tendência geral regressiva das sequências neste intervalo.

A quarta regressão possui uma ordem distinta das três primeiras. As regressões 1 a 3 marcam mudanças de Época, e a última representa uma regressão de ordem menor, indicando um processo regressivo durante o Plioceno que gerou uma descontinuidade identificada no intervalo pela última superfície limítrofe.

7.2. Sequências Depositionais e mecanismo de variação eustático

As sequências 1, 2 e a 3 (onde se inclui a 4) identificadas no estudo marcam ciclos de aproximadamente 5 milhões de anos, correspondendo a ciclos de terceira ordem (Haq. et al., 1998), possuindo como mecanismo de controle deposicional a variação global do nível do mar, sobre a qual apresenta-se uma boa correlação comparativa, e assinaturas de variação local da Bacia de Campos, relacionadas possivelmente a atividade tectônica exclusivas da Bacia de Campos.

No presente estudo foram identificados dois Tratos de Sistema de Estágio de Queda (TSEQ), associados a primeira e a segunda regressão, que marcam a passagem do Mioceno médio para o Mioceno Superior e do Mioceno Superior para o Plioceno. Para o mesmo intervalo, Haq. et al. (1998) não identificam TSEQ nas suas sequências, indicando que os eventos regressivos não deixaram registro

deposicional. Tal diferença entre a curva aqui produzida e a curva global (Haq et al. 1988), é interpretada como efeito de diferenças de criação e destruição de espaço de acomodação locais – da Bacia de Campos, possivelmente relacionados a atividade tectônica particular da bacia.

As superfícies limítrofes identificadas representam hiatos de tempo diferentes. Assim como exposto no item 6.2.1. e 6.2.3. é possível inferir a idade relativa das unidades sismoestratigráficas, agrupadas em tratos de sistema, porém não precisamente. As diferentes descontinuidades identificadas no registro do intervalo de estudo, mesmo possuindo mesma ordem, marcam apenas períodos de não-deposição ou erosão do registro sedimentar em determinado tempo, como explicado por Catuneanu (2006).

Assim como descrito em detalhe por Castro e Picolini (2015), e Carminatti e Scarton (1991), observa-se no intervalo que o arcabouço estratigráfico da Era Cenozóica é marcada por subsequentes episódios prográdantes, observados pelo espesso registro de tratos de sistema de nível alto.

Na interpretação realizada baseada em Neal e Abreu (2009), os tratos de nível alto (*highstand*), são compostos pelos tratos de sistema de nível alto (TSNA) e de estágio de queda (TSEQ) da sequência deposicional apresentada por Cantuneanu (2006).

Analisando a Figura 35, interpretada com base em Neal e Abreu (2009), a tendência geral regressiva normal no intervalo pode ser observada claramente pela subordinação dos tratos transgressivos em relação aos regressivos. Sendo assim, sugere-se que a predominante subida do nível do mar é acompanhada por um alto aporte sedimentar, caracterizando a regressão normal.

7.3. Arcabouço do Intervalo

Na Unidade Sismoestratigráfica 17 que compõe, juntamente com a unidade 18, o segundo TSNA da sessão é observada uma estrutura em *mound*, datada relativamente como do período Mioceno Superior (Figura 36), sobre o qual se depositam as unidades 19 e 20 que compõe um TSEQ. Apresenta-se a possibilidade

da estrutura representar uma construção carbonática que, assim como descrito por Raja-Gabaglia e Milani (1990), são estruturas formadas nesse período associadas ao ápice de transgressões, seguidas de quedas relativas do nível do mar. Nota-se que, ainda, é possível realizar a correlação com os dados litológicos de poço, que apresentam em azul a presença de rochas carbonáticas na Unidade 17, onde se transpõe na linha sísmica dois refletores de alta amplitude, posicionados no topo da unidade, observados na Figura 37. Para os autores, ainda, as subseqüentes quedas no nível do mar estariam associadas com deposição de turbiditos (reservatórios em potencial) na porção mais distal da plataforma, porém, não há o registro de TSNB após a regressão, podendo ser este causado pela erosão associada ao ciclo posterior transgressivo que se sobrepõe.

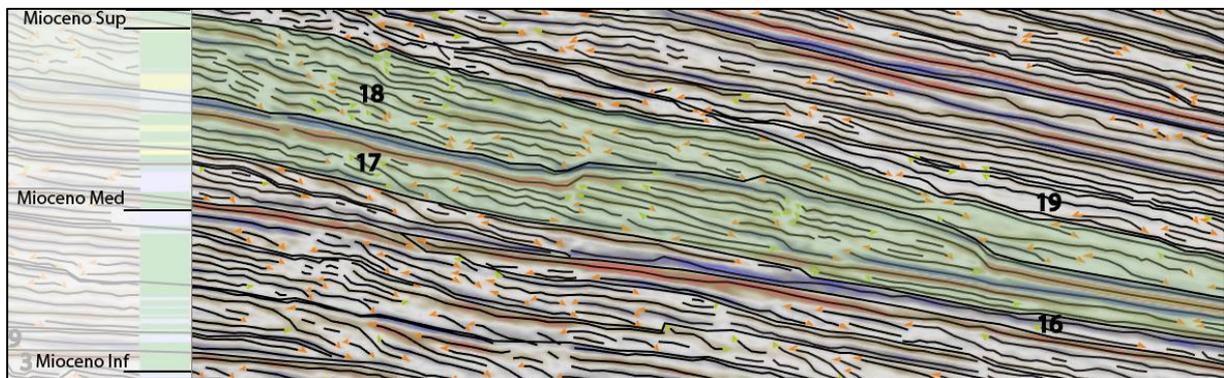


Figura 36: Estrutura em *mound* na Unidade Sismoestratigráfica 17.

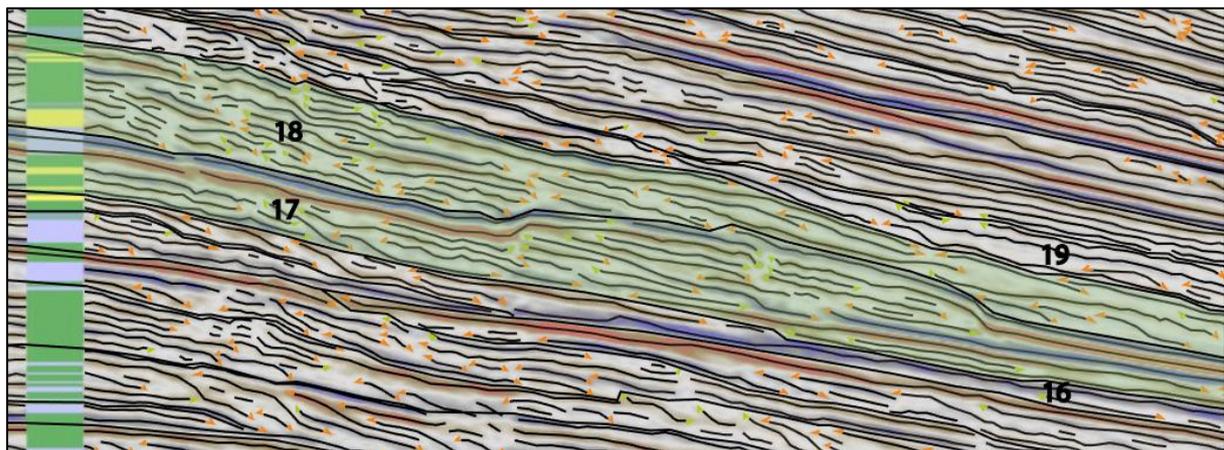


Figura 37: Correlação da unidade 17 com os dados litológicos de poço, indicando a possível presença de carbonatos (azul).

REFERÊNCIAS

- ALVARENGA, R. D. S. (2016). Análise sismoestratigráfica de bacias rifte: definição de sismofácies e arcabouço tectono-estratigráfico.
- BASTOS, G; BASTOS, Ildeson Prates. Bacia de Campos: Sumário geológico e setores em oferta: Rio de Janeiro. **Brasil, Superintendência de Definição de Blocos, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**, 2017.
- BARNES, Arthur E. (Ed.). **Handbook of poststack seismic attributes**. Society of Exploration Geophysicists, 2016.
- CARMINATTI, Mario; SCARTON, Julio Cesar. Sequence stratigraphy of the Oligocene turbidite complex of the Campos Basin, offshore Brazil: an overview. In: **Seismic facies and sedimentary processes of submarine fans and turbidite systems**. Springer, New York, NY, 1991. p. 241-246.
- CATUNEANU, Octavian. **Principles of sequence stratigraphy**. Elsevier, 2006.
- CATUNEANU, Octavian. **Scale in sequence stratigraphy**. Marine and Petroleum Geology, v. 106, p. 128-159, 2019.
- CHEN, Q., & SIDNEY, S. (1997). Seismic attribute technology for reservoir forecasting and monitoring. *The Leading Edge*, 16(5), 445-448.
- CHOPRA, Satinder; MARFURT, Kurt J. **Seismic attributes for prospect identification and reservoir characterization**. Society of Exploration Geophysicists and European Association of Geoscientists and Engineers, 2007.
- CORDANI, Umberto Giuseppe et al. Tectonic Evolution of South America. 31st International Geological Congress, 2000.
- DE CASTRO, Ricardo Defeo; PICOLINI, João Paulo. Principais Aspectos da Geologia Regional da Bacia de Campos. In: **Geologia e Geomorfologia**. Campus, 2015. p. 1-12.
- HAQ, Bilal U.; HARDENBOL, Jan; VAIL, Peter R. **Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and cycles of sea-level change**. 1988.
- KUCHLE, Juliano; SCHERER, C. M. S. Sismoestratigrafia de bacias rifte: técnicas, métodos e sua aplicação na Bacia do Recôncavo. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, v. 18, n. 2, p. 33-60, 2010.
- MOHRIAK, Webster Ueipass. Bacias sedimentares da margem continental Brasileira. **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil**, v. 3, p. 87-165, 2003.
- NEAL, Jack; ABREU, Vitor. Sequence stratigraphy hierarchy and the accommodation succession method. **Geology**, v. 37, n. 9, p. 779-782, 2009.

RANGEL, H. D. et al. Bacia de campos. **Boletim de Geociencias da PETROBRAS**, v. 8, n. 1, p. 203-217, 1994.

RIDER, M. H. The geologic interpretation of well logs. 1999.

RAJA RAJA-GABAGLIA, G. P.; MILANI, E. J. Origem e evolução de bacias sedimentares. **Rio de Janeiro, PETROBÊS**, 1990.

RANGEL, H. D. et al. Campos Basin; Bacia de Campos. **Boletim de Geociencias da Petrobras**, v. 8, 1994.

Superintendência de Desenvolvimento e Produção (SPD) - ANP: **Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural**, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Brasil, n.132, 2021.

VAIL, P. R.; MITCHUM JR, R. M. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level: Part 1. Overview. Application of Seismic Reflection Configuration to Stratigraphic Interpretation. 1977.

WINTER, W. R. et al. Bacia de campos. **Boletim de Geociencias da PETROBRAS**, v. 15, n. 2, p. 511-529, 2007.