



LUIZA GONÇALVES MAGGI

**ANÁLISE SISMOESTRATIGRÁFICA DA SEÇÃO ALBIANA-CENOMANIANA NO
SETOR CENTRAL DA BACIA DE CAMPOS**

Porto Alegre

2022

LUIZA GONÇALVES MAGGI

**ANÁLISE SISMOESTRATIGRÁFICA DA SEÇÃO ALBIANA-CENOMANIANA NO
SETOR CENTRAL 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

2022

CIP - Catalogação na Publicação

Maggi, Luiza Gonçalves
ANÁLISE SISMOESTRATIGRÁFICA DA SEÇÃO
ALBIANA-CENOMANIANA NO SETOR CENTRAL DA BACIA DE
CAMPOS / Luiza Gonçalves Maggi. -- 2022.
75 f.
Orientador: Juliano Kuchle.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Geociências, Curso de Geologia, Porto Alegre,
BR-RS, 2022.

1. Sismoestratigrafia. 2. Bacia de Campos. 3. Grupo
Macaé. 4. Albiano-Cenomaniano. I. Kuchle, Juliano,
orient. II. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

A Comissão Examinadora, abaixo-assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso **ANÁLISE SISMOESTRATIGRÁFICA DA SEÇÃO ALBIANA-CENOMANIANA NO SETOR CENTRAL DA BACIA DE CAMPOS**, elaborada por LUIZA GONÇALVES MAGGI, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Claiton Scherer

Prof. Dr. Daniel Bayer

MSc. Ricardo Maahs

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais pelos diversos apoios durante toda a minha graduação. Ao meu pai, Rubem Maggi Junior, que sempre torceu por mim e me apoiou de forma tranquila durante toda a minha jornada, não podendo estar presente fisicamente nessa etapa final, mas sei que de alma e coração está à sorrir e a chorar de felicidade com a filha graduada. À minha mãe, Solange Simone Gonçalves, que me acolheu e me incentivou com palavras sábias me dando todo o auxílio para passar por todas essas etapas da vida e que permanece sempre a comemorar comigo minhas conquistas. À minhas irmãs, Lara e Mirela, pela presença e pela felicidade de poder contar com essas companhias que são tão parecidas comigo.

Gostaria de agradecer à toda minha família, meus tios e tias, meus primos e primas, que sempre me fizeram rir e tornaram a minha trajetória mais leve e cofiante após churrascos de domingo. Gostaria de agradecer ao meu namorado Pedro, por todo apoio, paciência, auxílio e palavras tranquilizantes que foram fundamentais para tornar tudo mais leve de se viver.

Gostaria de agradecer a todos os meus amigos, por todas as conversas, trabalhos de campo e união, por todos os momentos que podemos compartilhar juntos pois sem eles eu não seria nada nessa graduação. Agradeço a LIMPEAO: Isadora, Martin, Paula e Elisa pelas gargalhadas e pela cumplicidade nesses anos de amizade, que irão durar a vida inteira.

Agradeço a todos moradores do Geoape e agregados: Lau, João, Rafa, Jey, Eva, Andrey, Vitor e Adri pelas jantãs, pelos cafés da manhã, pela oportunidade de ter tido um lugar para chamar de lar durante esses anos. Agradeço ao Gui pela amizade e pela época do 408 que também foi um lar para mim nessa graduação.

E por fim, não menos importante, agradeço ao meu orientador Juliano Kuchle, pela orientação de verdade, a tranquilidade, a compreensão e a paciência. Por encarar o desafio de realizar uma monografia completamente remota com muita atenção e dedicação, sou eternamente grata.

*“Liberdade é pouco. O que eu desejo
ainda não tem nome.”*

Clarice Lispector

RESUMO

A Bacia de Campos é a segunda maior bacia petrolífera do país e compreender sua evolução tectono-estratigráfica é fundamental para a descoberta e desenvolvimento de reservatórios de hidrocarbonetos e para a evolução do conhecimento científico. Este projeto temático visou realizar uma análise sismoestratigráfica da seção Albiana-Cenomaniana da Bacia de Campos, afim de obter um arcabouço estratigráfico compreendendo as unidades e as superfícies limítrofes da bacia. Para o mapeamento e interpretação do intervalo da bacia, foi utilizada a linha sísmica R0258-3105 e os poços 1RJS-0131 e 1RJS-0095. A metodologia adotada neste trabalho incluiu a identificação e definição dos refletores, unidades sísmicas e sismofácies e a elaboração de diagramas cronoestratigráficos. À vista disso, primeiramente foi realizado um mapeamento de topo e base do intervalo de estudo, onde foram interpretadas terminações de refletores sísmicos que conseqüentemente definiram quatro superfícies limítrofes gerando cinco unidades sismoestratigráficas. Foram identificadas três sismofácies distintas, sendo a SFA caracterizada, de acordo com os poços presentes, por calcarenitos, enquanto a SFB e a SFC foram inferidas como correspondentes a calcilutitos e margas, respectivamente. O modelo evolutivo desenvolvido para o intervalo de estudo indica uma deposição contínua da US1 até a US5, pois não há evidências de discordâncias internas. O padrão de deposição é de *onlap* transgressivo associados à movimentação do sal. A halocinese gera diápiros e incursões verticais do sal, isolando os blocos do Grupo Macaé que anteriormente estavam todos conectados. Com relação às unidades litoestratigráficas, não foram identificadas as Formações Goitacás e Namorado e nem o Membro Búzios. A Formação Quissamã foi identificada como a SFA, composta por calcarenitos e calcirruditos de água rasa, a Formação Outeiro foi associada à SFB, composta por calcilutitos finos e a Formação Imbetiba foi associada como a SFC, composta por margas em zonas mais distais. O principal reservatório do Grupo Macaé da Bacia de Campos é a Formação Quissamã, que possui características porosas adequadas para o armazenamento de petróleo, sendo assim este trabalho vem contribuir com critérios de reconhecimento desta formação.

Palavras-Chave: Bacia de Campos, Grupo Macaé, Albiano-cenomaniano, Sismoestratigrafia;

ABSTRACT

Campos Basin is the second largest petroleum basin in the country and understanding its tectonostratigraphic evolution is critical for the discovery and development of hydrocarbon reservoirs and for the evolution of scientific knowledge. This project aims to perform a seismostratigraphic analysis of the Albian-Cenomanian section of the Campos Basin in order to obtain a stratigraphic framework comprising the units and its stratigraphic surfaces. For the mapping and interpretation of this interval the seismic line R0258-3105 and wells 1RJS-0131 and 1RJS-0095 were used. The methodology adopted in this work included the interpretation of reflectors terminations, seismic units, seismic facies and the elaboration of chronostratigraphic diagrams. Initially, an mapping of the top and bottom of the study interval was carried out, where seismic reflector terminations were interpreted that consequently defined four bounding surfaces and five seismostratigraphic units. Three distinct seismofacies were identified, the SFA being characterized by calcarenites according to the used wells, the SFB was inferred to be calcilutites and the SFC was inferred to be marls. The evolutionary model developed for the study interval indicates a continuous deposition from US1 to US5 as there is no evidence of internal unconformities. The pattern of deposition is a transgressive *onlap* associated with salt movement. The halokinesis generates diapirs and vertical salt incursions, isolating the blocks of Macaé Group that were previously all connected. Regarding the lithostratigraphic units, the Goitacás and Namorado Formations and the Búzios Member were not identified. The Quissamã Formation was identified as the SFA, composed of shallow-water calcarenites and calcirrudites, the Outeiro Formation was associated with the SFB, composed of thin calcilutites, and the Imbetiba Formation was identified as the SFC, composed of marls in more distal zones. The main reservoir of the Macaé Group in the Campo Basin is the Quissamã Formation, which has porous characteristics suitable for oil storage. Thus, this work contributes with criteria for recognition of this formation.

Keywords: Campos Basin, Macaé Group, Albian-Cenomanian, Seismic-stratigraphy;

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Mapa de localização da Bacia de Campos. Detalhe para a linha sísmica R0258-3105. Fonte: BDEP (2021).	11
Figura 2: Reconstituição paleogeográfica para o Albiano conforme Azevedo (2004).	12
Figura 3: Carta Cronoestratigráfica da Bacia de Campos com destaque para o intervalo de estudado (Winter <i>et al.</i> , 2007).....	18
Figura 4: Paleogeografia e modelo de fácies da sequência nerítica carbonática, retirada de Guardado <i>et al.</i> (1990).	19
Figura 5: Escala de tamanho de grãos para Rochas Carbonáticas (Modificado de Folk, 1962)	21
Figura 6: Esquema dos limites inferiores e superiores de refletores (Mitchum <i>et al.</i> , 1977a).	22
Figura 7: Padrões de terminações de refletores em sequências sísmicas (Mitchum <i>et al.</i> , 1977b).	22
Figura 8: Representação de padrões de configurações de fácies sísmicas (Fonte: Barboza (2005) modificado de Mitchum <i>et al.</i> , 1977a).	24
Figura 9: Principais geometrias externas de sismofácies (Fonte: Barboza (2005) modificado de Mitchum <i>et al.</i> , 1977a).....	25
Figura 10: Mapa de localização da linha sísmica e dos poços 1RJS-00995 e 1RJS-0131 estudados. Fonte: BDEP (2021).....	27
Figura 11: A) Linha sísmica R0258-3105 inteira em fase normal com topo e base interpretados. B e C) Detalhe da porção proximal da linha sísmica. Para todos os painéis a base do intervalo de estudo é o horizonte laranja (topo dos evaporitos da Fm. Retiro), e o topo do intervalo de estudo é o horizonte azul (topo dos carbonatos do Gr. Macaé).	30
Figura 12: D) Detalhe da porção central da linha sísmica. E e F) Detalhe da porção distal da linha sísmica. Para todos os painéis a base do intervalo de estudo é o horizonte laranja (topo dos evaporitos da Fm. Retiro), e o topo do intervalo de estudo é o horizonte azul (topo dos carbonatos do Gr. Macaé).....	31
Figura 13: Detalhe da base e do topo da linha sísmica R0258-3105. A base do intervalo de estudo é o horizonte laranja (topo dos evaporitos da Fm. Retiro), e o	

topo do intervalo de estudo é o horizonte azul (topo dos carbonados do Gr. Macaé).	32
Figura 14: A) Linha sísmica R0258-3105 completa em fase normal sem interpretação. B) Detalhe da porção proximal da linha sísmica. C) Detalhe da porção distal da linha sísmica.	34
Figura 15: A) Linha sísmica R0258-3105 inteira com terminação de refletores e falhas interpretadas. B) Detalhe da porção mais proximal da linha sísmica. Para todos os painéis, os refletores e as falhas estão representados em preto.....	35
Figura 16: C) Detalhe da porção mais proximal da linha sísmica. Os refletores e as falhas estão representados em preto.	36
Figura 17: D) Detalhe da porção central da linha sísmica. Os refletores e as falhas estão representados em preto.....	37
Figura 18: E) Detalhe da porção distal da linha sísmica. Os refletores e as falhas estão representados em preto.....	38
Figura 19: F) Detalhe da porção distal da linha sísmica. Os refletores e as falhas estão representados em preto.....	39
Figura 20: Quadro de exemplos de terminações de refletores com e sem interpretação.	40
Figura 21: Arcabouço Estratigráfico observando a US1 em verde, a US2 em rosa, a US3 em laranja, a US4 em azul e a US5 em vermelho. Também pode-se observar as superfícies 1,2,3 e 4 mapeadas.....	42
Figura 22: A) Seção sísmica R0258-3105 inteira com todas unidades e superfícies mapeadas. B e C) Detalhe da porção mais proximal da linha sísmica. Para todos os painéis, a US1 está representada em verde, a US2 em rosa, a US3 em laranja, a US4 em azul e por fim a US5 em vermelho.	43
Figura 23: D) Detalhe da porção central da linha sísmica. E e F) Detalhe da porção distal da linha sísmica. Para todos os painéis, a US1 está representada em verde, a US2 em rosa, a US3 em laranja, a US4 em azul e por fim a US5 em vermelho.	44
Figura 24: Tabela das fácies sísmicas com exemplos em diferentes atributos e características.	47
Figura 25: Seção proximal da linha sísmica com a localização dos poços 1RJS-0131 e 1RJS-0095 no intervalo interpretado como a Sismofácies A.....	48
Figura 26: A) Linha sísmica R0258-3105 inteira com todas as sismofácies mapeadas. B e C) Detalhe da porção mais proximal da linha sísmica. Para todos os	

painéis, a SFA está representada em azul escuro, a SFB está representada em azul claro e a SFC em lilás.	49
Figura 27: D) Detalhe da porção central da linha sísmica. E e F) Detalhe da porção distal da linha sísmica. Para todos os painéis, a SFA está representada em azul escuro, a SFB está representada em azul claro e a SFC em lilás.	50
Figura 28: A) Seção sísmica R0258-3105 inteira com todas unidades mapeadas e abaixo a carta cronoestratigráfica referente às unidades sismoestratigráficas. B) Detalhe da porção mais proximal da linha sísmica. Para todos os painéis, na carta cronoestratigráfica e na linha sísmica a US1 está representada em verde, a US2 em rosa, a US3 em laranja, a US4 em azul e por fim a US5 em vermelho.	52
Figura 29: C) Detalhe da porção distal da linha sísmica. Para todos os painéis, na carta cronoestratigráfica e na linha sísmica a US1 está representada em verde, a US2 em rosa, a US3 em laranja, a US4 em azul e por fim a US5 em vermelho.	53
Figura 30: A) Seção sísmica R0258-3105 inteira com todas sismofácies mapeadas e abaixo a carta cronoestratigráfica referente às mesmas. B) Detalhe da porção mais proximal da linha sísmica. Para todos os painéis, na carta cronoestratigráfica e na linha sísmica a SFA está representada em azul escuro, a SFB está representada em azul claro e a SFC em lilás.	54
Figura 31: C) Detalhe da porção distal da linha sísmica. Na carta cronoestratigráfica e na linha sísmica a SFA está representada em azul escuro, a SFB está representada em azul claro e a SFC em lilás.	55
Figura 32: Bloco diagrama esquemático do modelo deposicional do Grupo Macaé (criado por Guardado <i>et al.</i> (1990) e modificado por Okubo <i>et al.</i> (2015) e Armelenti <i>et. al.</i> 2021).	59
Figura 33: Tempo 1: início da deposição do Grupo Macaé na unidade sismoestratigráfica 1.	60
Figura 34: Tempo 2: Perfil de deposição da US2.	60
Figura 35: Tempo 3: Perfil de deposição da US3.	61
Figura 36: Tempo 4: Perfil de deposição da US4.	61
Figura 37: Tempo 5: Perfil de deposição da US5, com linha de erosão.	62
Figura 38: Carta cronoestratigráfica da Bacia de Campos com recorte para o Grupo Macaé. (modificado de Winter <i>et al.</i> (2007).	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP: Agência Nacional do Petróleo, Gás-Natural e Biocombustíveis

ASC: Atlântico Sul Central

ASM: Atlântico Sul Meridional

Fm: Formação

Gr: Grupo

Ma: Milhões de anos

SF: Sismofácies

US: Unidade Sísmica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivo	13
1.2	Justificativa	13
2	ESTADO DA ARTE	15
2.1	Bacia de Campos	15
2.2	Plataforma carbonática	19
2.3	Conceitos de Sismoestratigrafia	21
3	METODOLOGIA	26
3.1	Levantamento Bibliográfico	26
3.2	Aquisições de Dados.....	26
3.3	Sismoestratigrafia.....	27
4	RESULTADOS	29
4.1	Mapeamento do Topo e da Base	29
4.2	Padrão de Refletores e Terminações	33
4.3	Unidades Sismoestratigráficas.....	41
4.4	Sismofácies.....	46
4.5	Carta Cronoestratigráfica.....	51
5	DISCUSSÃO	58
5.1	Correlação das Sismofácies com as Unidades Litoestratigráficas.....	62
6	CONCLUSÕES	64
	REFERÊNCIAS	66
	ANEXO A – Linha sísmica R0258-3105 completa em fase normal sem interpretação	69

1 INTRODUÇÃO

A Bacia de Campos está situada na região sudeste da margem continental brasileira, entre os paralelos 21 e 23 sul. Possui aproximadamente 115 mil km² e seu limite ao sul, com a Bacia de Santos, é o Alto de Cabo Frio, e ao norte, com a Bacia de Espírito Santo, é o Alto de Vitória. O trabalho desenvolvido se encontra na parte central da Bacia de Campos. (Figura 1).

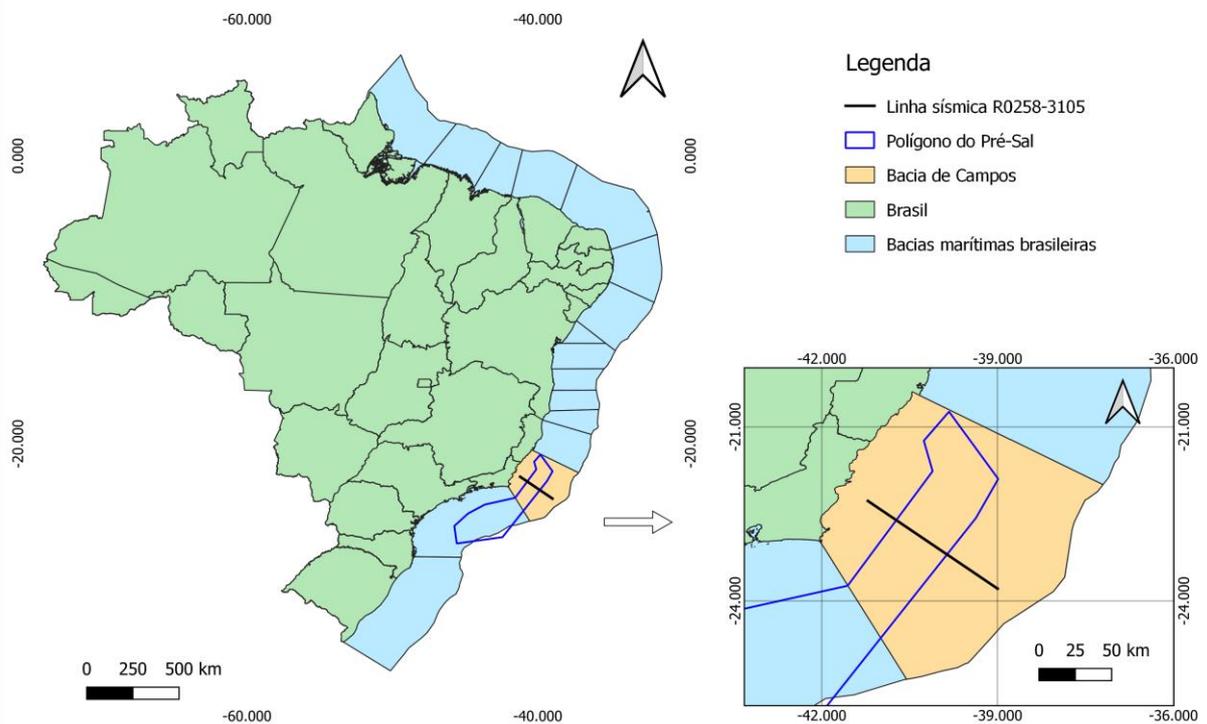


Figura 1: Mapa de localização da Bacia de Campos. Detalhe para a linha sísmica R0258-3105. Fonte: BDEP (2021).

Este trabalho está inserido no intervalo Albiano-Cenomaniano da bacia (94-113 Ma), pois esta fase representa grandes depósitos de rochas carbonáticas do Pós-sal. Esse intervalo está inserido na Megasequência de Plataforma Carbonática Rasa, definida por Chang *et al.* (1992), que se caracteriza por uma época de gradual abertura do Golfo do Atlântico Sul, quebra da barreira do alto de São Paulo e por um progressivo aumento do caráter restritivo do ambiente deposicional.

Azevedo (2004) dividiu o Atlântico Sul em dois mares restritos: Atlântico Sul Central (ASC) e Atlântico Sul Meridional (ASM) (Figura 2), e apoiado em dados de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$ de várias partes do mundo, definiu que a área ocorreu em condições de clima muito quente e árido. A área de estudo se encontra no ASC, que possuía um balanço hídrico negativo e um padrão de circulação lagunar, ocorrendo o enriquecimento progressivo da salinidade por evaporação no seu deslocamento para o interior do mar restrito, o que ocasionou um crescimento do sistema carbonático na região. Essa área pode ser vista como análoga ao atual Mar Vermelho, que se localiza entre as placas Arábica e Sul-africana.

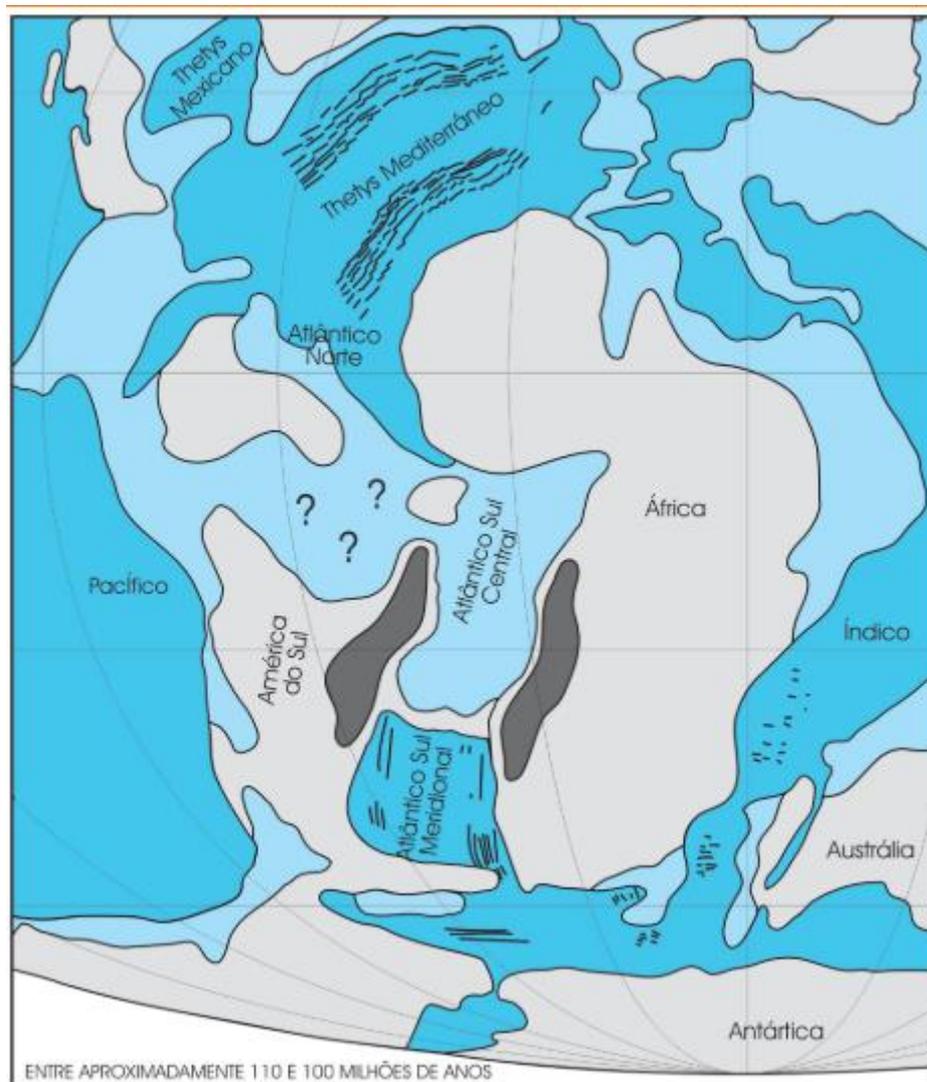


Figura 2: Reconstituição paleogeográfica para o Albiano conforme Azevedo (2004).

Embora a área possua uma grande quantidade de dados, tanto geológicos quanto sísmicos, não há um modelo de arcabouço sismoestratigráfico publicado na região de estudo. Em decorrência disso, o estudo a ser desenvolvido será de grande interesse para a compreensão geológica e estratigráfica deste intervalo dentro da bacia, e também para o entendimento dos reservatórios a ele associados. O intervalo Albiano-Cenomaniano do Grupo Macaé compreende um evento transgressivo retratado pelas Formações Quissamã, Outeiro e Imbetiba. A hipótese deste trabalho espera que essas formações apresentem este padrão transgressivo na sísmica, bem como a assinatura de suas litologias características.

Este estudo foi desenvolvido através dos conceitos e metodologia da sismoestratigrafia, para a determinação do arcabouço estratigráfica da área. Dessa maneira, com a realização de um mapeamento das unidades identificadas e a caracterização das estruturas e potenciais reservatórios de petróleo, será possível desenvolver um modelo geológico e compreender os arranjos deposicionais que ocorreram durante a sedimentação.

1.1 Objetivo

Este estudo tem como objetivo principal estabelecer o modelo evolutivo e deposicional do Grupo Macaé, baseado em sismoestratigrafia, para o setor central da Bacia de Campos. Como objetivos específicos destacam-se: definir o controle estrutural na sedimentação e a variação na dinâmica deposicional ao longo do tempo geológico; identificar os horizontes estratigráficos e os intervalos e estruturas sedimentológicas-estruturais; investigar o modelo deposicional e evolutivo do intervalo.

1.2 Justificativa

Segundo EIA Energy Atlas (2020), o petróleo compreende em torno de 30% da matriz energética mundial, sendo a fonte de energia mais utilizada do mundo. Estima-se que a indústria petrolífera permanecerá forte no mundo por ainda 40 a 50 anos, e com o avanço da tecnologia nos métodos de exploração e produção, tende a aumentar o descobrimento de novos reservatórios e a eficiência na exploração.

No Brasil, a produção de petróleo atingiu a média recorde de 2,95 milhões de barris por dia em 2020, sendo um crescimento de 5,5% em comparação a 2019, de acordo com o Boletim Mensal de Produção de Petróleo e Gás (ANP, 2021). Esses dados ressaltam a importância do petróleo como recurso estratégico para o país, que além da fonte energética também possui diversas aplicações de seus derivados. A maior parte das reservas petrolíferas brasileiras estão localizadas em campos marítimos, o que incentivou os investimentos em tecnologia de exploração e tecnologia de exploração e perfuração *offshore*.

Os reservatórios carbonáticos representam 60% do petróleo do mundo e 40% das reservas mundiais de gás (Schulumberger, 2021). No Brasil, 15% dos campos produtores de óleo e gás pertencem a reservatórios carbonáticos. Entre os dez maiores produtores, nove possuem ao menos um reservatório em rocha carbonática e o Campo de Lula e Sapinhoá são campos principalmente carbonáticos (ANP, 2015). A Bacia de Campos foi a primeira grande descoberta com significativo potencial de exploração e atualmente é a segunda maior bacia produtora de petróleo do país (ANP, 2021).

À vista disso, este trabalho busca definir melhor o modelo deposicional e evolutivo do intervalo carbonático do Grupo Macaé, na Bacia de Campos, a fim de fornecer subsídios a exploração de petróleo. O setor central da bacia é produtor de petróleo desde 1980, e o Grupo Macaé é um dos principais reservatórios do pós-sal. Atualmente não há publicado um arcabouço sismoestratigráfico estabelecido na área de estudo.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Bacia de Campos

A Bacia de Campos é uma bacia sedimentar localizada na margem leste brasileira, entre o litoral norte do Estado do Rio de Janeiro e o sul do Espírito Santo. Esta bacia possui uma área de aproximadamente 115.000 km² com mais de 160.000 poços perfurados (Winter *et al.*, 2007).

A bacia foi originada a partir da ruptura do supercontinente Gondwana, como resultado de um rifteamento mesozoico que gerou as bacias sedimentares marginais brasileiras e o assoalho oceânico do Oceano Atlântico (Milani & Filho, 2000). A estratigrafia das bacias da margem leste pode ser dividida em cinco Megasequências: continental, transicional evaporítica, plataforma carbonática rasa, marinha transgressiva e marinha regressiva, conforme Chang *et al.* (1992).

A Megasequência Continental é composta por três sequências deposicionais: Sin-rifte I, Sin-rifte II e Sin-rifte III. A sequência Sin-rifte I é a sequência basal, ocorrida no Jurássico, com sedimentos depositados em uma larga depressão África-Brasil. A sequência Sin-rifte II ocorre durante o Neocomiano, e a parte basal consiste em basaltos intercalados com vulcanoclastos e rochas sedimentares (Formação Cabiúnas); esta sequência vulcânica é recoberta por sedimentos da Formação Itabapoana que pertence ao Grupo Lagoa Feia (Chang *et al.*, 1992; Winter *et al.*, 2007).

Durante o Barremiano, desenvolveu-se a sequência Sin-rifte III na qual ocorreu a sedimentação dos lagos no interior dos sistemas rifte. Na margem leste, plataformas carbonáticas compostas por bivalves e ostracodes foram acumulados em altos estruturais, enquanto sedimentos fluviais-deltaicos e lacustres foram depositados nas partes baixas adjacentes (Chang *et al.*, 1992).

A Megasequência Evaporítica Transicional é limitada na base por uma discordância angular que marca o limite rifte/pós-rifte. Uma espessa seção de sedimentos clásticos e evaporíticos constitui essa Megasequência, recobrando os sedimentos sin-rifte (Chang *et al.*, 1992). A Formação Retiro, anteriormente conhecida como Membro Retiro, que atualmente compõe o topo do Grupo Lagoa Feia, designa uma suíte evaporítica composta essencialmente por halita hialina e

anidrita branca. Nessa megasequência, ocorreu uma forte movimentação do sal que moldou o assoalho oceânico, tendo um papel importante na arquitetura da Bacia de Campos, criando caminhos preferenciais para as areias depositadas no Cretáceo Superior (Rangel *et al.*, 1994; Winter *et al.*, 2007).

Na Megasequência de Plataforma Carbonática Rasa os evaporitos aptianos foram capeados pela plataforma carbonática marinha Albiana (Formações Quissamã, Outeiro e Imbetiba do Grupo Macaé). Durante essa megasequência, ocorreu a abertura gradual do Golfo do Atlântico Sul, a quebra da barreira do alto de São Paulo e uma gradual restrição ao longo deste ambiente. Segundo Chang *et al.* (1992), a plataforma carbonática Albiana extensiva e contínua de alta energia consistiu na deposição de oólitos, oncolitos, pelletoidal e pequenos bioclastos limestones, refletindo a condição semi-restritiva do ambiente deposicional.

Na borda oeste da bacia, encontra-se a Formação Goitacás que é caracterizada pela associação de leques aluviais, leques deltaicos e fan deltas, além de bancos e lagunas calco-pelíticas (sistema misto) conhecido como Macaé proximal. Nas porções intermediárias predominam os sedimentos carbonáticos depositados em ambiente de alta a moderada energia, representados por bancos de calcarenitos oolíticos, oncólitos e micro-oncólitos, característicos da Formação Quissamã. Já as porções distais possuem um aumento significativo no teor de argilas (Winter *et al.*, 2007).

Por fim, na Megasequência Marinha Aberta, ao final do Albiano, ocorreu um gradual aprofundamento da bacia, acompanhado de uma transgressão marinha, que resultou em um afogamento da plataforma carbonática de alta energia (Chang *et al.*, 1988). A Formação Outeiro, presente nas porções proximais e mediana, é composta por calcilutitos com biota planctônica, principalmente calciferulídeos e foraminíferos. Em águas mais profundas, há um considerável enriquecimento em folhelhos e margas. Na parte mais distal da bacia ocorre a Formação Namorado, caracterizada por depósitos arenosos de sistemas originados por fluxos hiperpicnais, que representam reservatórios arenosos encaixados em baixos deposicionais gerados pela tectônica salífera albiana (Winter *et al.*, 2007).

A Formação Imbetiba, segundo Winter *et al.* (2007), representa o afogamento da plataforma carbonática albiana e é composta predominantemente por rochas pelíticas representadas por margas bioturbadas com foraminíferos bentônicos e planctônicos de idade cenomaniana. Esses pelitos compõem uma

cunha clástica que selou definitivamente a ocorrência dos carbonatos do Grupo Macaé.

Sotoposto ao Grupo Macaé, encontra-se o Grupo Campos, que possui maiores variações faciológicas. Segundo Schaller (1973), este grupo é caracterizado por fácies deltaica, uma prodeltaica a marinha, uma parálica e um banco algáceo. O grupo é composto pelas Formações Ubatuba, Carapebus, Emborê e Barreiras.

2.2 Plataforma carbonática

Guardado *et al.* (1990) define como Sequência Nerítica Carbonática o intervalo do Grupo Macaé depositado do início até o meio do Albiano da Bacia de Campos. As áreas proximais desta sequência são compostas por depósitos clásticos de fan-delta, e as áreas mais distais esses clastos graduan num misto depósito de plataforma carbonática-clástica. No entanto, no interior da bacia, a unidade basal é constituída essencialmente por sedimentos carbonáticos.

As plataformas carbonáticas são caracterizadas por uma variedade litológica em ciclos de empilhamento granoacrescente ascendente. Cada ciclo é composto de packstones oncolíticos na base graduando-se para cima em packstone peloidal e grãos oolíticos no topo. Toda a margem evoluiu para uma plataforma carbonática, no entanto na parte central da bacia se desenvolveu bancos alongados de tendência nordeste-sudoeste que pode ter sido por influência da movimentação salina (Guardado *et al.*, 1990). Um modelo deposicional pode ser descrito como uma rampa carbonática inclinada, conforme a Figura 4 abaixo:

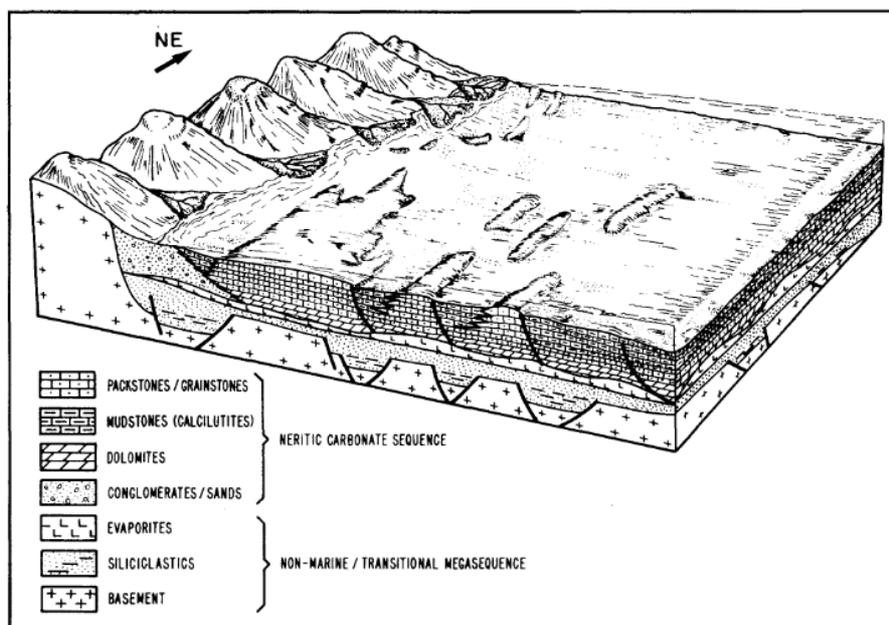


Figura 4: Paleogeografia e modelo de fácies da sequência nerítica carbonática, retirada de Guardado *et al.* (1990).

Segundo Guardado *et al.* (2000), a plataforma carbonática de águas rasas do Albiano compreende um amplo espectro de reservatórios. As unidades com maior qualidade, com porosidade maior que 28% e permeabilidade $>1d$, são relacionadas com facies deposicionais de oolitos em um ambiente de alta energia. Houve uma cimentação secundária, e, portanto, muito da porosidade intergranular original se preservou. Reservatórios com porosidade maior que 30%, todavia menos permeáveis, são relacionados com oncolitos packstones e grainstones depositados em um ambiente marinho raso com moderada agitação da água. Grãos finos de limestone depositados no fundo da bacia em um contexto de baixa energia também constituem reservatórios, mas apesar da sua porosidade alta, possuem relativamente baixa permeabilidade.

Em relação a classificação dos carbonatos, existem diversas terminologias baseadas em feições como a abundância e tipo de grãos, matriz e cimento, o arredondamento dos grãos e o tamanho dos grãos. Folk (1962) estabelece uma terminologia para variados tamanhos de material transportado ou para precipitado autigênico conforme Figura 5.

Tamanho de Grão	Constituintes transportados	Constituintes autigênicos	Tamanho de Grão
64 mm	Calcirrudito muito grosso	Cristalino extremamente grosso	4 mm
16 mm	Calcirrudito grosso		
4 mm	Calcirrudito médio		
1 mm	Calcirrudito fino	Cristalino muito grosso	1 mm
0,5 mm	Calcarenito grosso	Cristalino grosso	0,25 mm
0,25 mm	Calcarenito médio		
0,125 mm	Calcarenito fino	Cristalino médio	0,062 mm
0,062 mm	Calcarenito muito fino		
0,031 mm	Calcilutito grosso	Cristalino fino	0,016 mm
0,016 mm	Calcilutito médio		
0,008 mm	Calcilutito fino		
	Calcilutito muito fino	Afanítica	0,004 mm

Figura 5: Escala de tamanho de grãos para Rochas Carbonáticas (Modificado de Folk, 1962)

2.3 Conceitos de Sismoestratigrafia

A sismoestratigrafia é o estudo da estratigrafia e das fácies deposicionais interpretadas a partir dos dados sísmicos (Mitchum *et al.*, 1977a). Uma sequência sísmica é uma relativa sucessão de refletores interpretados como um trato de sistemas deposicionais que podem ser identificados em uma seção sísmica. As terminações desses refletores são o principal critério para o reconhecimento dos limites da sequência sísmica (Mitchum *et al.*, 1977a).

Na Figura 6 é possível observar os tipos de terminações de refletores existentes definidas por Mitchum *et al.* (1977a) como: truncamento erosivo, *toplap* e concordante (no limite superior) e *onlap*, *downlap* e concordante (no limite inferior). Abaixo são descritas as terminações utilizadas na interpretação dos refletores que podem ser observados nas Figura 6 e Figura 7.

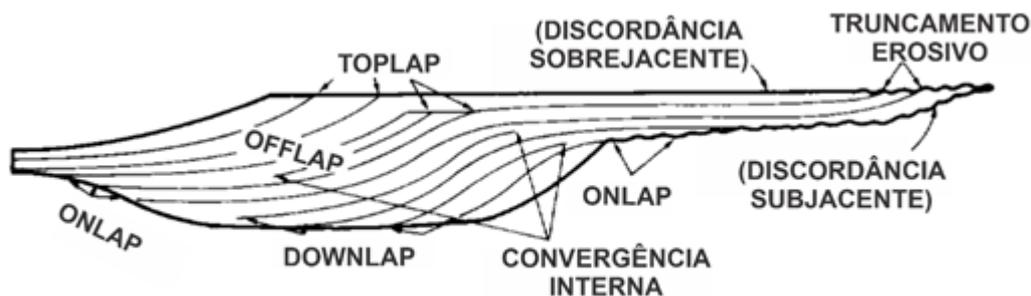


Figura 6: Esquema dos limites inferiores e superiores de refletores (Mitchum *et al.*, 1977a).

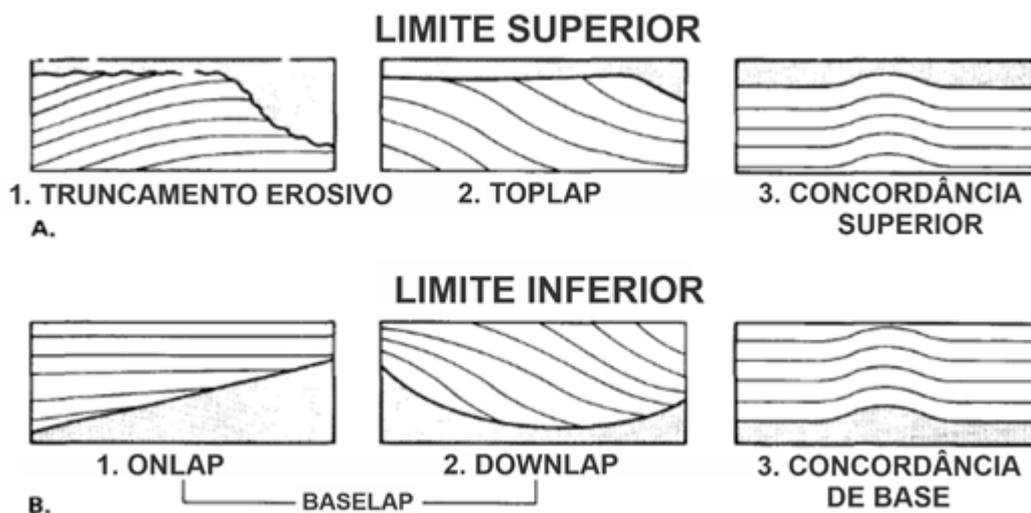


Figura 7: Padrões de terminações de refletores em seqüências sísmicas (Mitchum *et al.*, 1977b).

- Truncamento Erosivo: os estratos no topo de determinada seqüência terminam contra o limite superior erosivo (superfície irregular).
- *Toplap*: estratos inicialmente inclinados no topo de determinada seqüência terminam contra o limite superior (superfícies regular) principalmente como resultado da não-deposição.

- Concordância superior: relação na qual os estratos no topo de determinada sequência não terminam no limite superior, sendo concordante a ele.
- *Onlap*: na base da sequência, os estratos inicialmente horizontais terminam ascendentes progressivamente contra a superfície de maior inclinação inicial.
- *Downlap*: na base da sequência, os estratos inicialmente inclinados terminam se horizontalizando contra a superfície horizontal ou inclinada.
- Concordância de base: estratos na base da sequência não terminam contra o limite inferior, sendo concordante a ele.

Essas terminações de refletores delimitam superfícies que diferenciam os horizontes estratigráficos da seção, tendo então as unidades sismoestratigráficas. Conforme Kuchle & Scherer (2010), nem todos os limites de unidades sismoestratigráficas representam discordâncias, podendo somente demarcar limites de eventos deposicionais distintos e temporalmente sucedidos.

Dentro do método da sismoestratigrafia são analisadas as sismofácies que, conforme Mitchum *et al.* (1977a), podem ser definidas como unidades sísmicas tridimensionais mapeáveis compostas por grupos de reflexões cujos parâmetros diferem daqueles de unidades de sismofácies adjacentes. Além disso, após a caracterização das unidades sismoestratigráficas, são observados os padrões de empilhamento para o intervalo de estudo. Os principais tipos de padrões de reflexão estão apresentados na Figura 8 e são elucidados conforme Mitchum *et al.* (1977a):

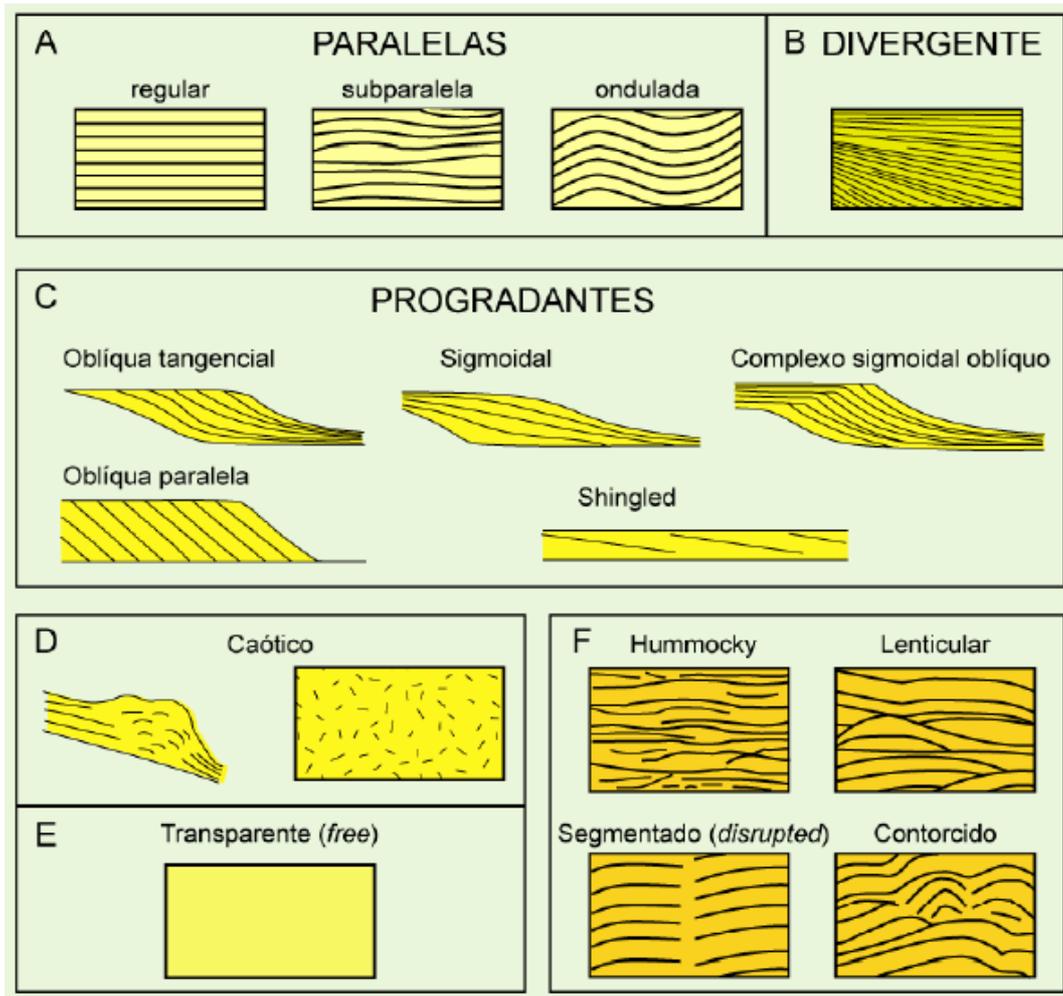


Figura 8: Representação de padrões de configurações de fácies sísmicas (Fonte: Barboza (2005) modificado de Mitchum *et al.*, 1977a).

- Padrão paralelo/subparalelo: sugere uma taxa de deposição constante e uniforme sobre uma superfície plana ou bacia estável.
- Padrão divergente: sugere variação lateral na taxa de deposição ou inclinação progressiva da superfície de deposição.
- Configuração progradante: são interpretadas como estratos em que a deposição significativa ocorre por sobreposição lateral ou progradante, podendo ser sigmoidal, oblíqua paralela, oblíqua tangencial, complexo sigmoidal-oblíquo e *shingled*.
- Configuração *hummocky*: pequenos refletores descontínuos, subparalelos e irregulares que podem ser interpretados como fluxos gravitacionais em sistemas deltaicos ou leques submarinos.

- Configuração caótica: são reflexões descontínuas e discordantes que podem ser interpretadas como um ambiente de alta energia ou um estrato que foi deformado.

Além disso, uma compreensão das formas externas e associações com as unidades de sismofácies são importantes nas análises. A Figura 9 mostra importantes formas externas, algumas delas podendo ser subdivididas em subtipos, dependendo da origem, configuração das reflexões internas e modificações da forma externa.

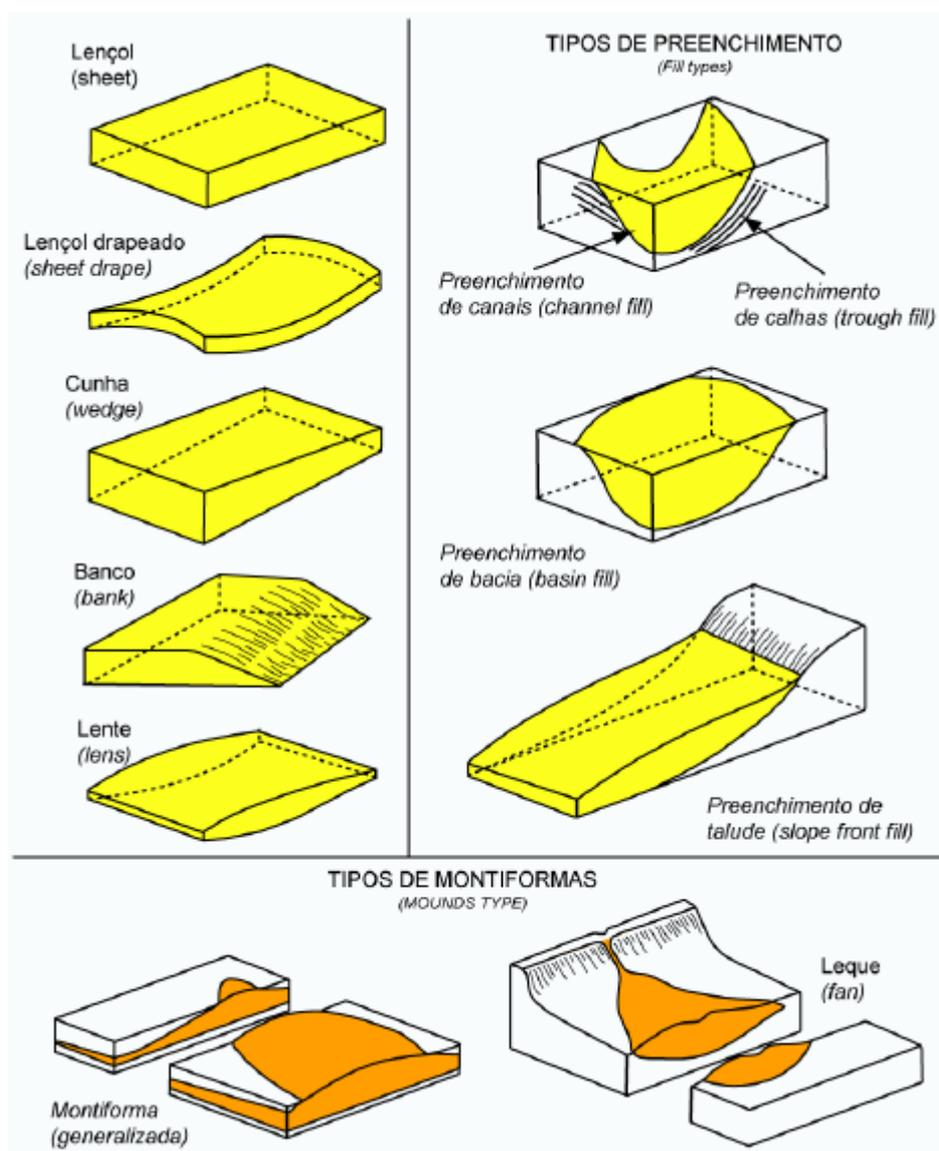


Figura 9: Principais geometrias externas de sismofácies (Fonte: Barboza (2005) modificado de Mitchum *et al.*, 1977a).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo estão descritas as metodologias utilizadas para se atingir o objetivo deste trabalho.

3.1 Levantamento Bibliográfico

O levantamento bibliográfico foi realizado através da busca por livros, artigos e trabalhos relacionados à sismoestratigrafia e a área de estudo, dentro do contexto geológico da Bacia de Campos. Essa etapa foi feita durante toda a produção deste trabalho, a fim de se aprimorar o conhecimento sobre os tópicos do projeto.

3.2 Aquisições de Dados

Os dados utilizados no estudo foram fornecidos pela ANP, a partir de suas bases públicas de dados de exploração e produção de petróleo. Esses dados consistem em linhas sísmicas regionais 2D da Bacia de Campos com precisão vertical em torno de 20m, volumes sísmicos 3D de detalhe da Bacia de Campos e perfilagens geofísicas (raios-gama, potencial espontâneo, densidade, resistividade, sônico, etc.) de poços exploratórios na área de estudo. Na Figura 10 é possível observar a localização exata da linha sísmica utilizada neste trabalho. A linha sísmica selecionada é a 0258-3105, do levantamento 0258_GRAND_CAMPOS, disponibilizado pela ANP, por cortar grande parte da bacia, juntamente com os dados dos poços adjacentes à linha, 1RJS-0131 e 1RJS-0095, em sua porção proximal. Esta linha sísmica 2D é utilizada a partir do processamento final PSDM (Kirchoff), em profundidade (metros).

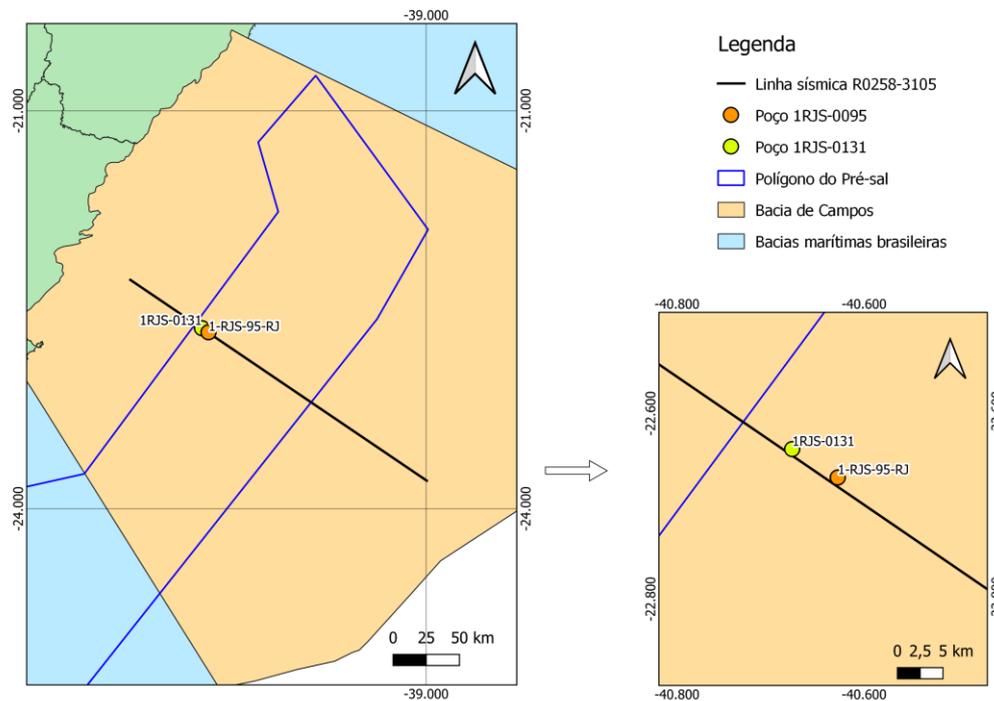


Figura 10: Mapa de localização da linha sísmica e dos poços 1RJS-00995 e 1RJS-0131 estudados. Fonte: BDEP (2021).

3.3 Sismoestratigrafia

Após a aquisição dos dados e organização dos mesmos, foi realizada a delimitação do intervalo a ser mapeado. Os critérios utilizados para a interpretação têm como base a sismoestratigrafia, que é o estudo da estratigrafia e das fácies deposicionais interpretadas a partir dos dados sísmicos (Mitchum *et al.*, 1977a).

Primeiramente foram demarcados os refletores sísmicos com suas terminações, que auxiliam para uma melhor visualização da seção sísmica. A partir de uma análise dos padrões de terminações de refletores, foram reconhecidas as superfícies limitantes que diferenciam os horizontes estratigráficos dentro da seção, tendo por fim uma caracterização das unidades sismoestratigráficas.

Em seguida, foram determinadas as sismo fácies. Após a caracterização das unidades sismoestratigráficas, foram determinados os padrões de empilhamento para o intervalo estudado e sua geometria externa.

Por fim, foi produzida uma carta cronoestratigráfica (conforme (Wheeler, 1958; Vail *et al.*, 1977), com o intuito de se observar as unidades geometricamente e temporalmente. O contexto paleogeomorfológico de deposição pode ser observado através da geometria de cada unidade, assim como o arcabouço estratigráfico e estrutural, além dos padrões de preenchimento da bacia. Além disso, foi feita a correlação dos dados sismoestratigráficos com os dados de perfis de poços para o desenvolvimento de um modelo sismoestratigráfico da área estudada.

4 RESULTADOS

4.1 Mapeamento do Topo e da Base

Com a área de estudo delimitada, foi realizado o mapeamento do topo e da base do intervalo de estudo na região de interesse da seção sísmica. O limite basal do arcabouço interpretado foi escolhido como um refletor de alto valor de amplitude e expressiva continuidade ao longo da linha sísmica R0258-3105 que representa a discordância entre o Aptiano (125 a 133 Ma) e o Albiano (113 a 100,5 Ma). Este limite representa o contato entre a Formação Retiro e o Grupo Macaé na litoestratigrafia da Bacia (Winter *et al.*, 2007). O limite basal corresponde a uma relexão sísmica de alta amplitude que marca a transição do pacote evaporítico (base) e para o carbonático (topo) (Figura 11 e Figura 12), geralmente na forma de domos diápiros e zonas de escape do sal, evidenciados na Figura 13, às vezes também com expressivos falhamentos associados à halocinese.

O limite de topo do intervalo de estudo representa a discordância no tempo geológico do Cenomaniano (100,5 a 93,9 Ma) ao Turoniano (93,9 a 89,8 Ma), marcado litoestratigraficamente pelo topo do Grupo Macaé e pela base do Grupo Campos (Winter *et al.*, 2007), podendo envolver uma erosão de até 5Ma. O topo é marcado por carbonatos e margas de idade Albiana a Cenomaniana na forma de uma discordância regional (Figura 11 e Figura 12). Pode ser observado na Figura 11 e Figura 12 o topo e a base do intervalo de estudo interpretados em fase normal.

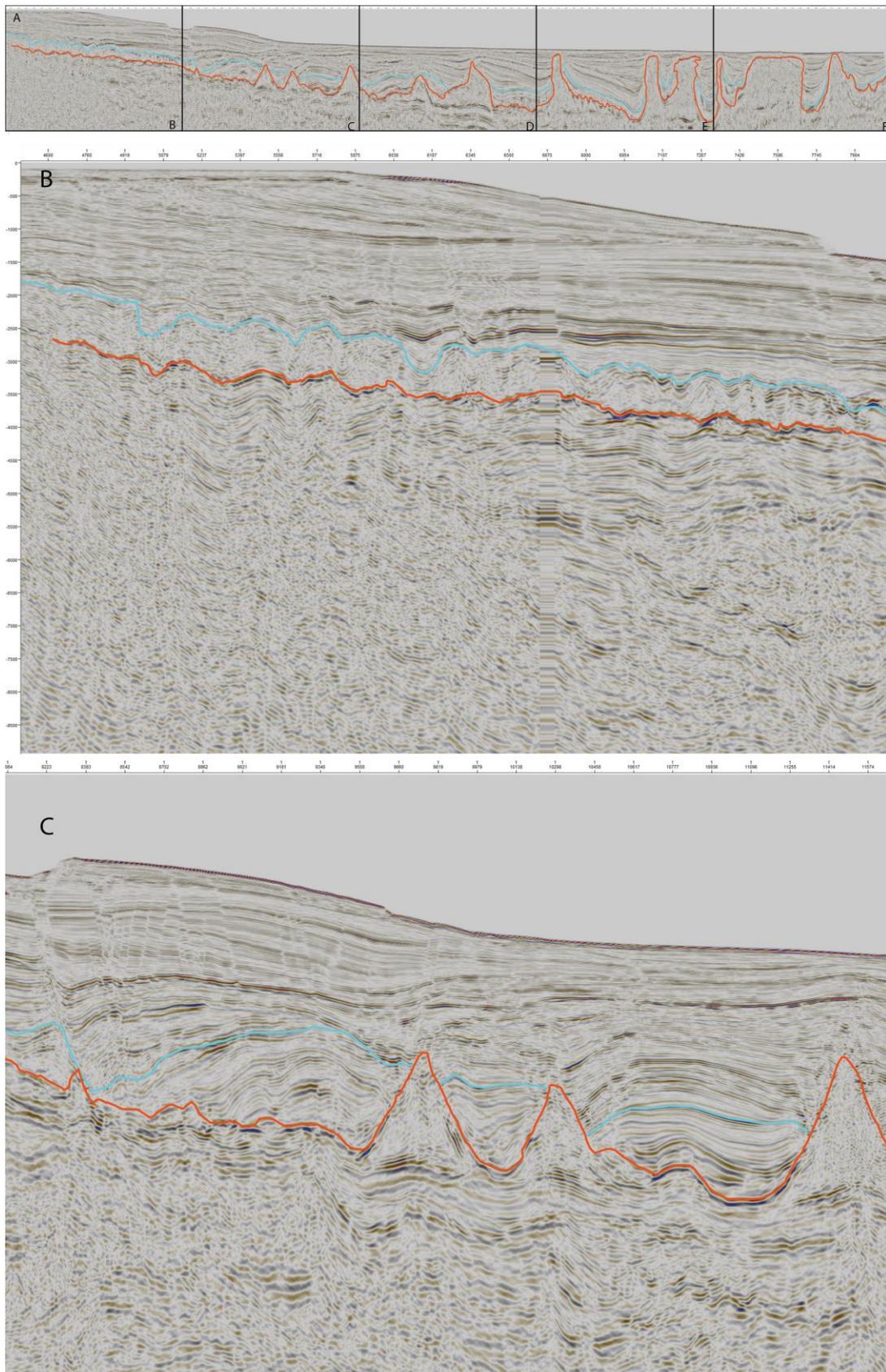


Figura 11: A) Linha sísmica R0258-3105 inteira em fase normal com topo e base interpretados. B e C) Detalhe da porção proximal da linha sísmica. Para todos os painéis a base do intervalo de estudo é o horizonte laranja (topo dos evaporitos da Fm. Retiro), e o topo do intervalo de estudo é o horizonte azul (topo dos carbonatos do Gr. Macaé).

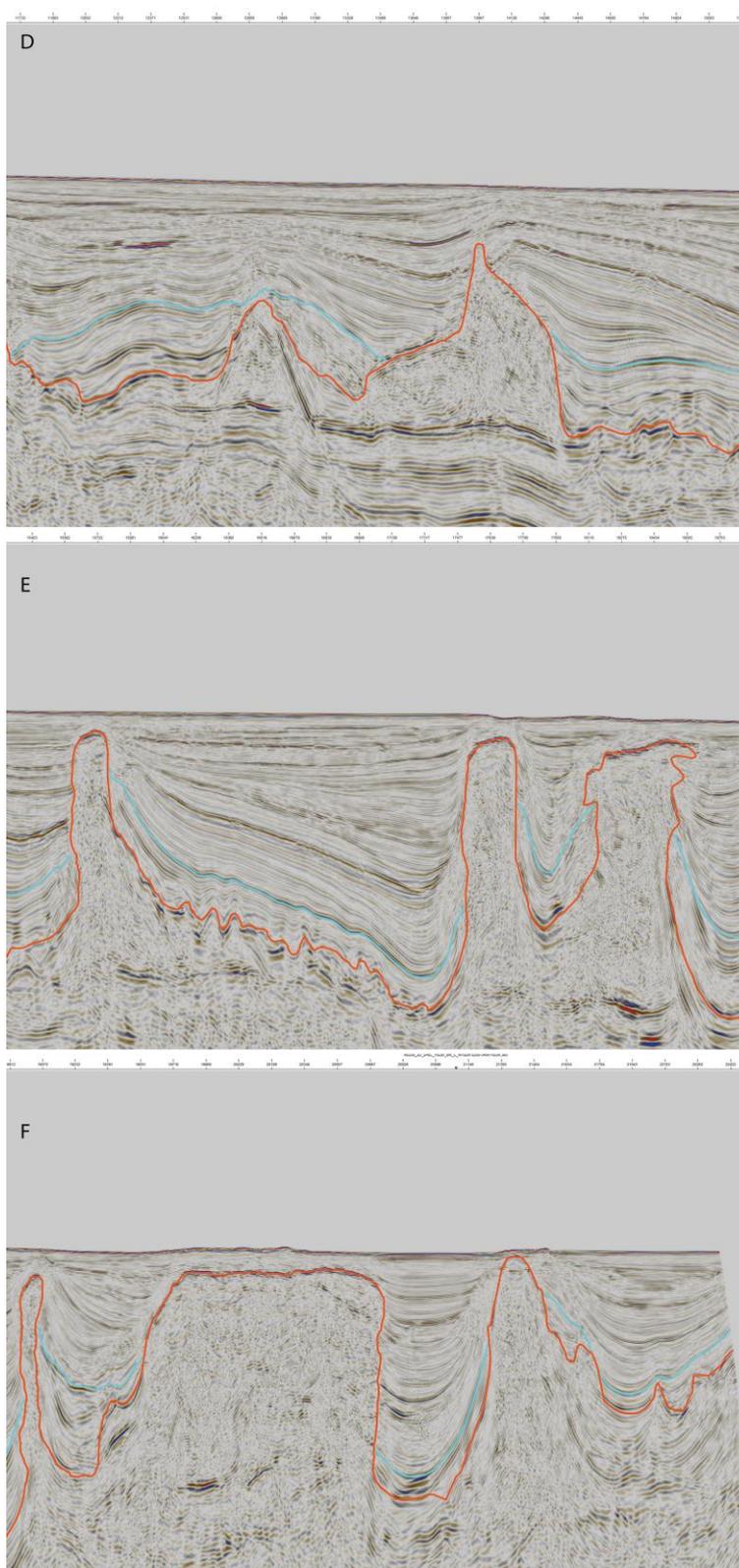


Figura 12: D) Detalhe da porção central da linha sísmica. E e F) Detalhe da porção distal da linha sísmica. Para todos os painéis a base do intervalo de estudo é o horizonte laranja (topo dos evaporitos da Fm. Retiro), e o topo do intervalo de estudo é o horizonte azul (topo dos carbonatos do Gr. Macaé).

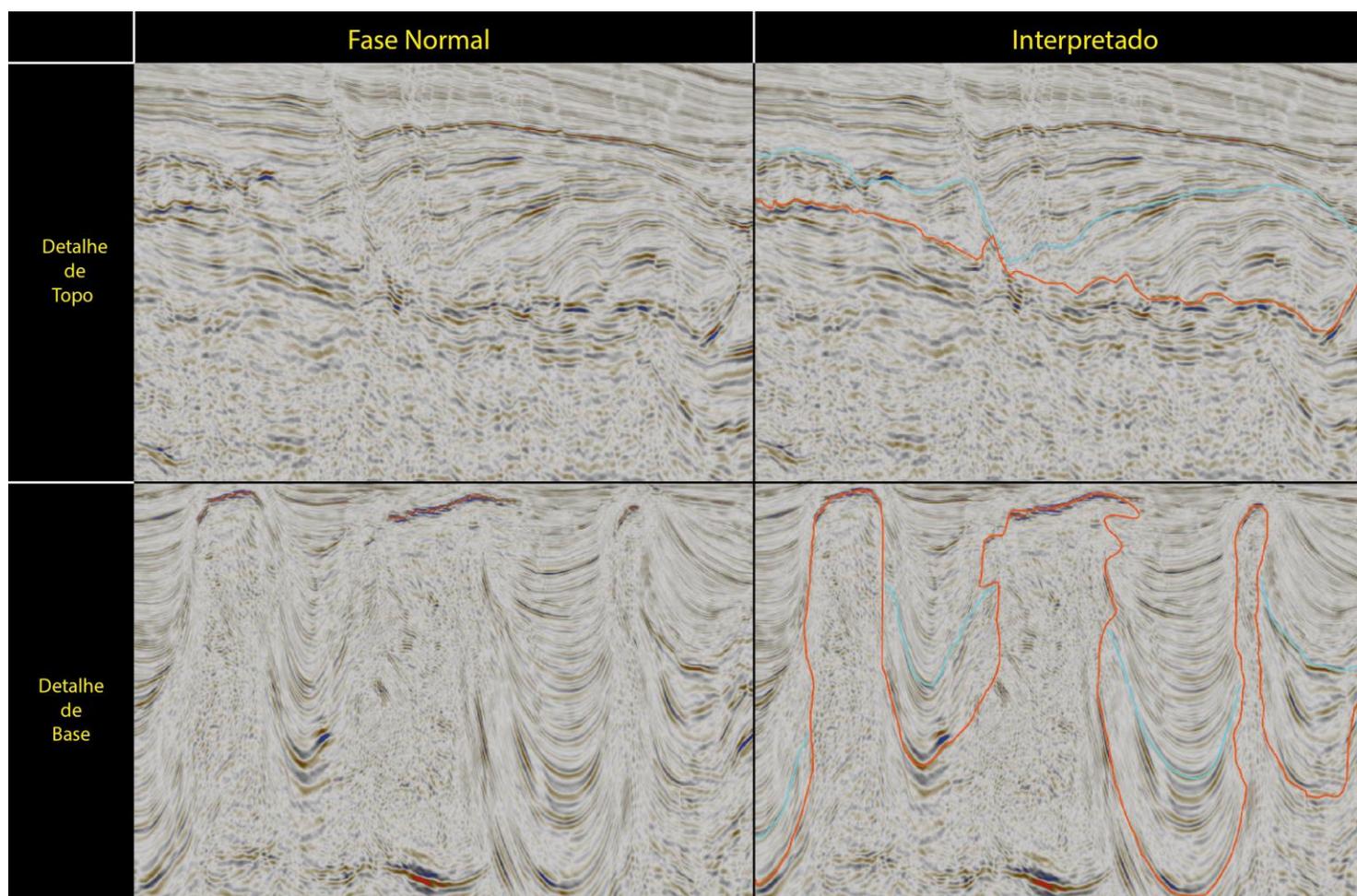


Figura 13: Detalhe da base e do topo da linha sísmica R0258-3105. A base do intervalo de estudo é o horizonte laranja (topo dos evaporitos da Fm. Retiro), e o topo do intervalo de estudo é o horizonte azul (topo dos carbonados do Gr. Macaé).

4.2 Padrão de Refletores e Terminações

A interpretação dos refletores e das terminações sísmicas foi realizada no intervalo de estudo de forma completa, ou seja, todas as reflexões, tanto positivas quanto negativas foram traçadas e suas terminações definidas. A partir do dado completo foi possível identificar as terminações principais, predominando *onlaps* e *downlaps* na base do intervalo, e truncamento erosivo no topo. Ao longo da seção, foram também observados *toplaps* e *downlaps* dispersos. A Figura 14 mostra a seção sísmica inteira (em fase normal), com a qual é possível verificar o dado não interpretado. Por outro lado, as Figuras Figura 15 a Figura 19 correspondem a porções da seção sísmica com as interpretações de todos os refletores.

Nas partes proximais observa-se um padrão de refletores caóticos devido à alta atividade tectônica existente na região com muitos falhamentos. Já na parte central e distal, foram identificados *downlaps*, *onlaps* e *toplaps*. Os *onlaps* ocorrem geralmente na seção mais basal do intervalo de estudo (Figuras Figura 16, Figura 17, Figura 18, Figura 19 e Figura 19).

Os *toplaps* e os *downlaps* ocorrem por todo Grupo Macaé. Na seção de topo do intervalo, há ocorrência de maior densidade de truncamento erosivos (Figuras Figura 16, Figura 17, Figura 18, Figura 19 e Figura 19). É possível observar em detalhes essas terminações na Figura 20.

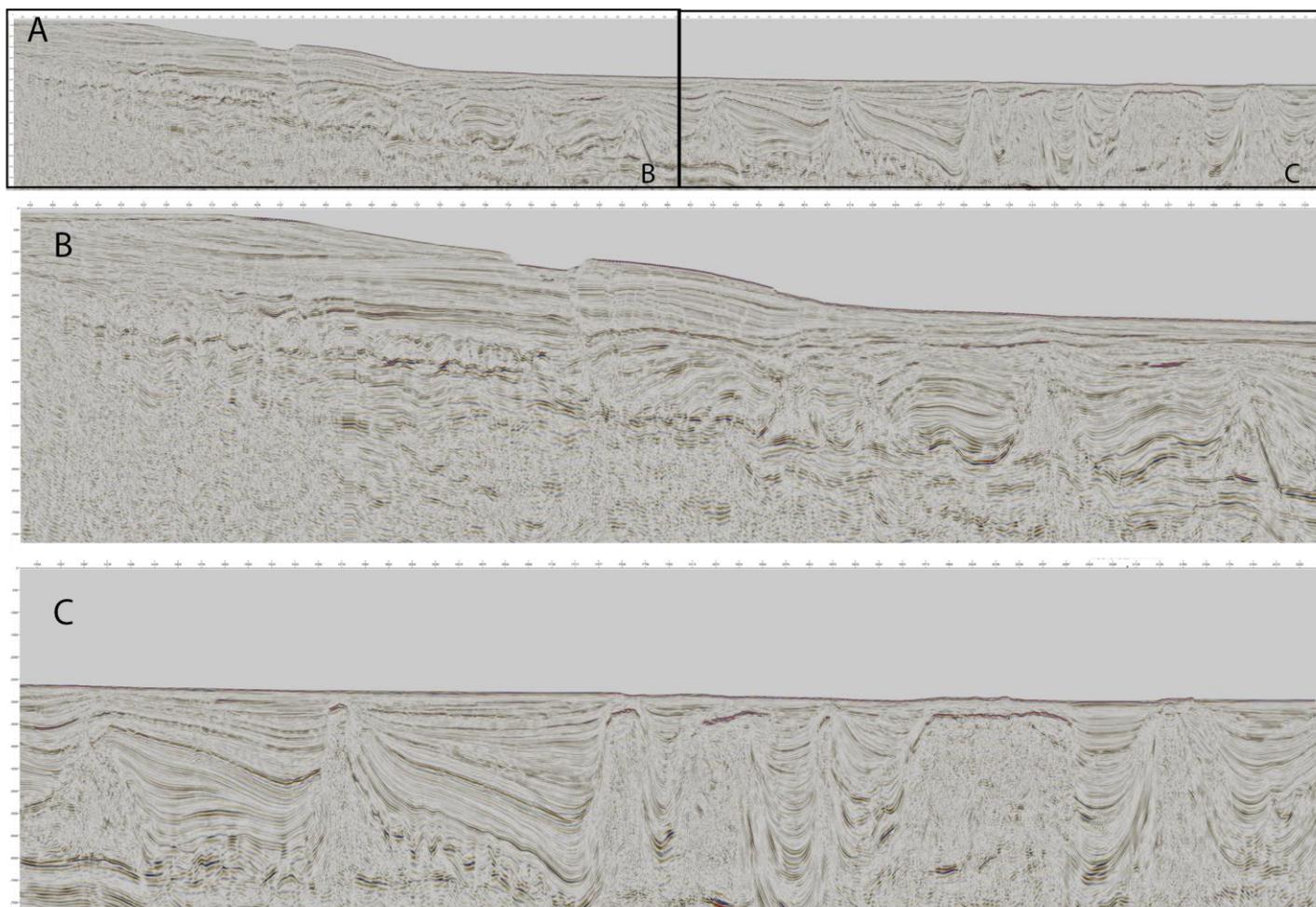


Figura 14: A) Linha sísmica R0258-3105 completa em fase normal sem interpretação. B) Detalhe da porção proximal da linha sísmica. C) Detalhe da porção distal da linha sísmica.

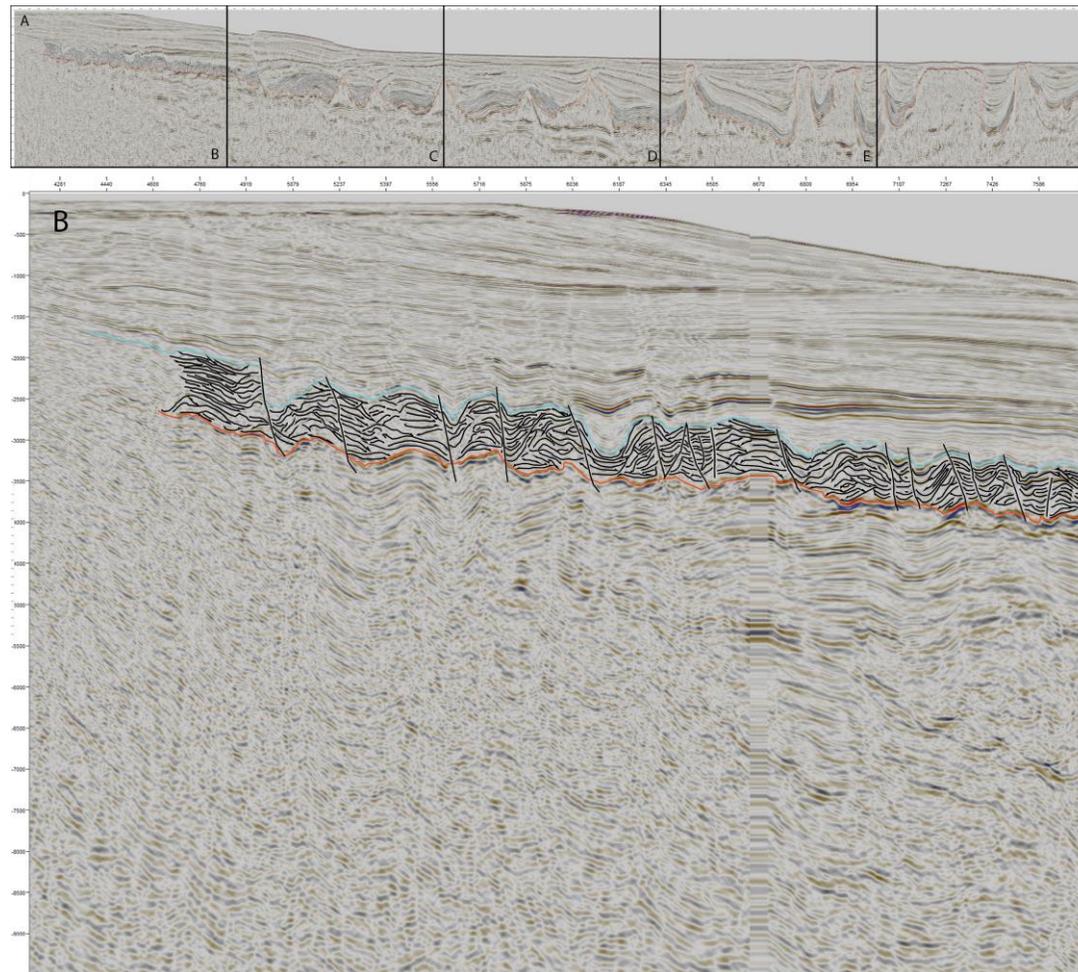


Figura 15: A) Linha sísmica R0258-3105 inteira com terminação de refletos e falhas interpretadas. B) Detalhe da porção mais proximal da linha sísmica. Para todos os painéis, os refletos e as falhas estão representados em preto.

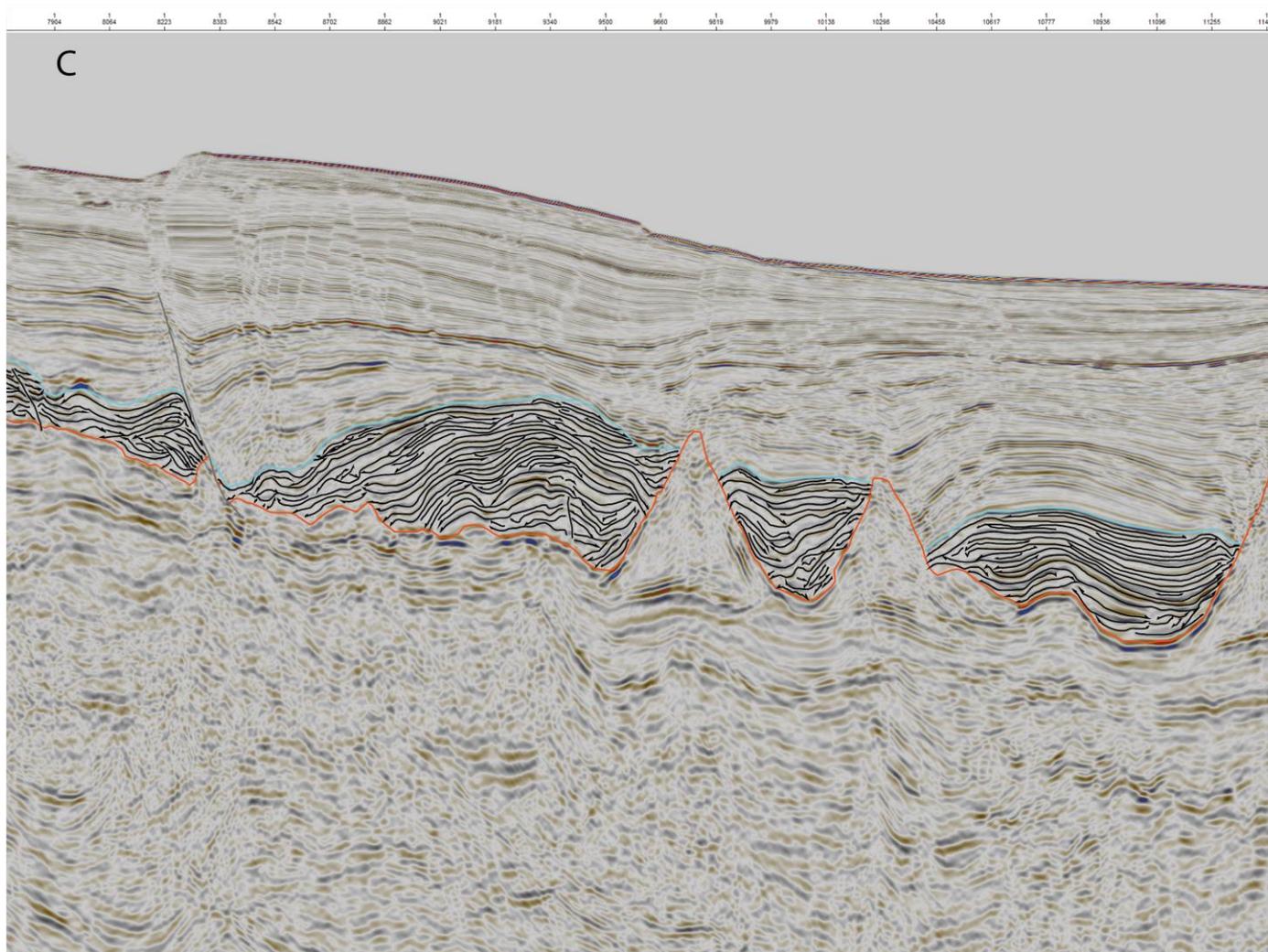


Figura 16: C) Detalhe da porção mais proximal da linha sísmica. Os refletores e as falhas estão representados em preto.

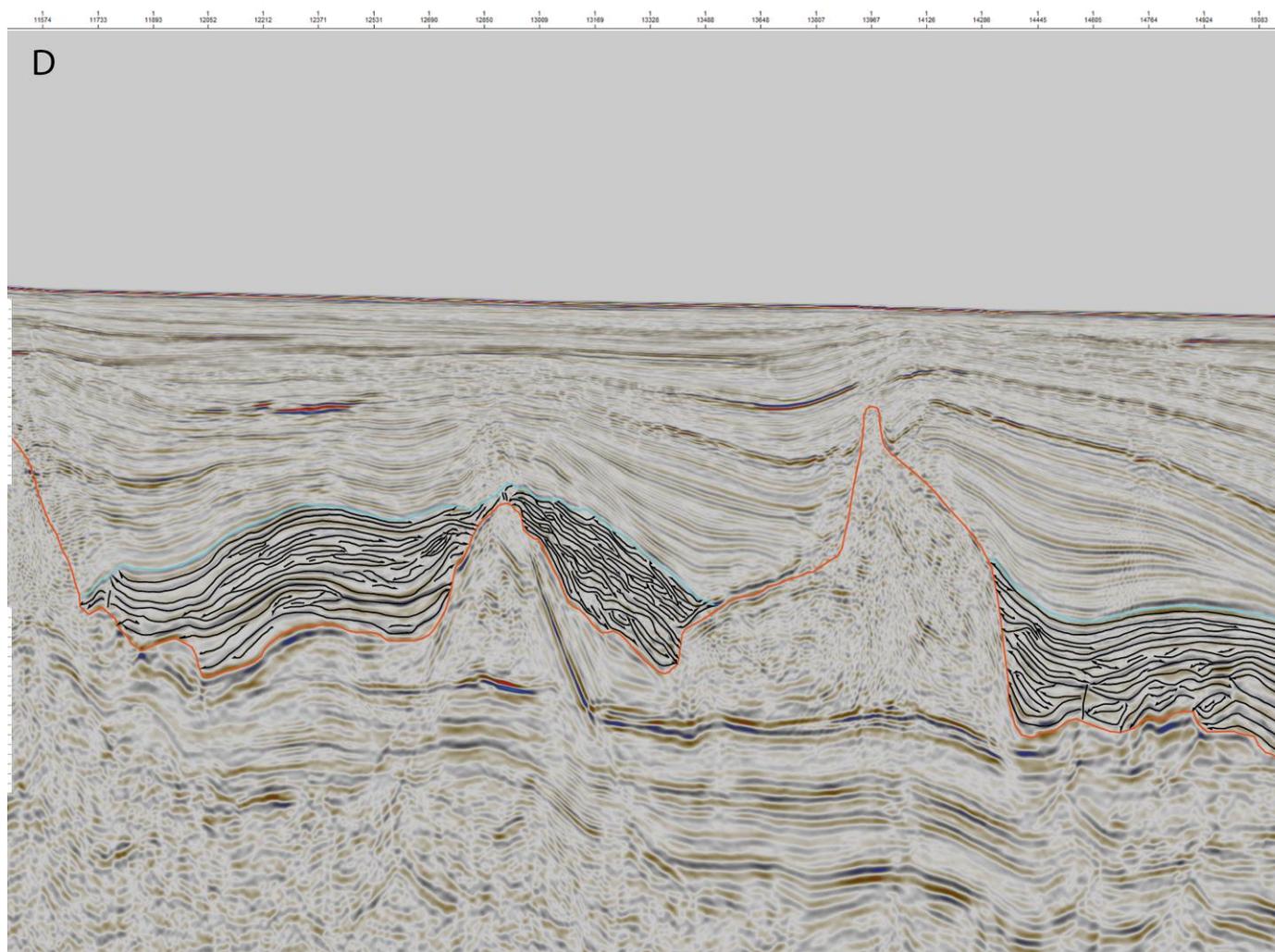


Figura 17: D) Detalhe da porção central da linha sísmica. Os refletores e as falhas estão representados em preto.

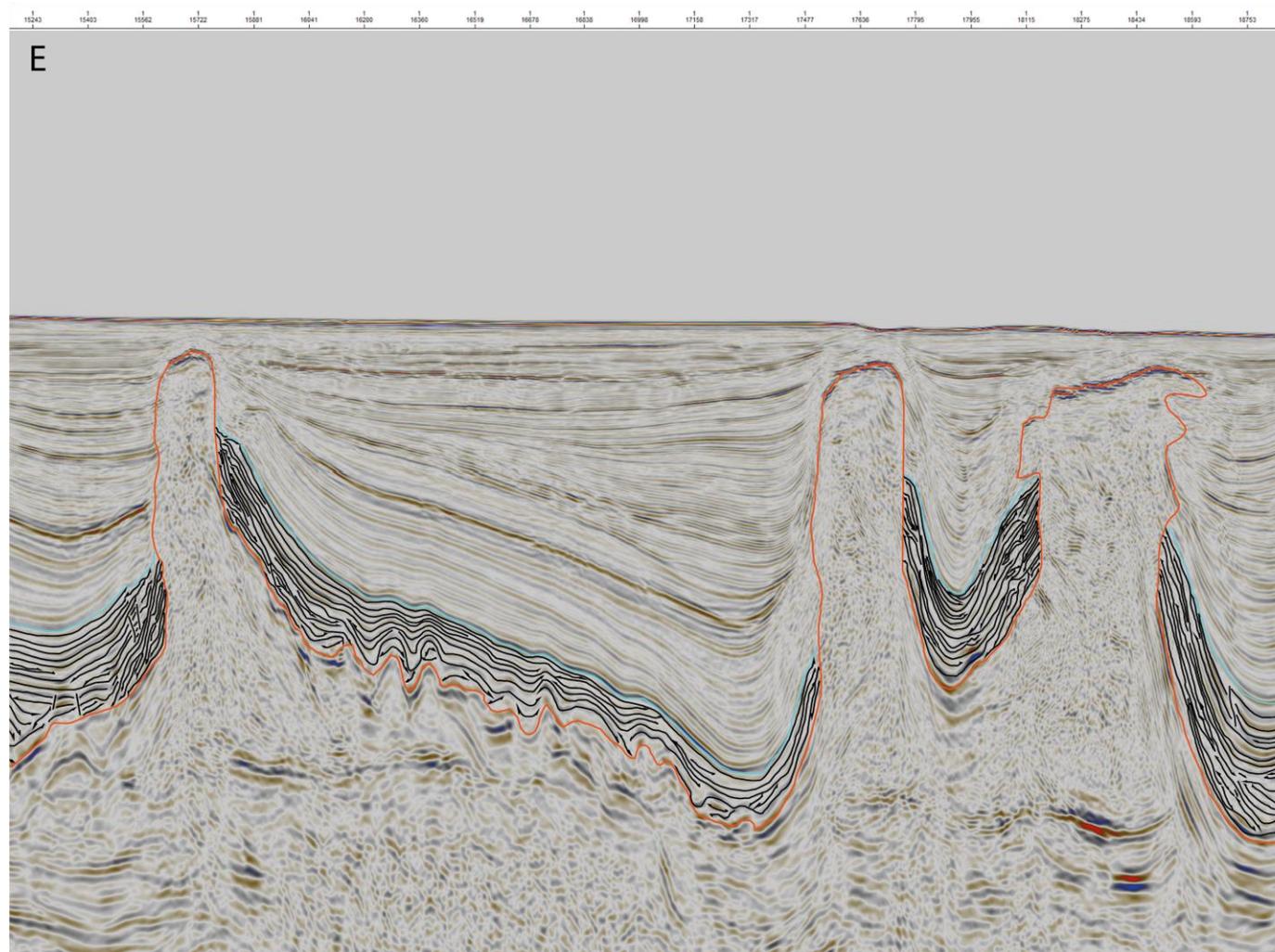


Figura 18: E) Detalhe da porção distal da linha sísmica. Os refletores e as falhas estão representados em preto.

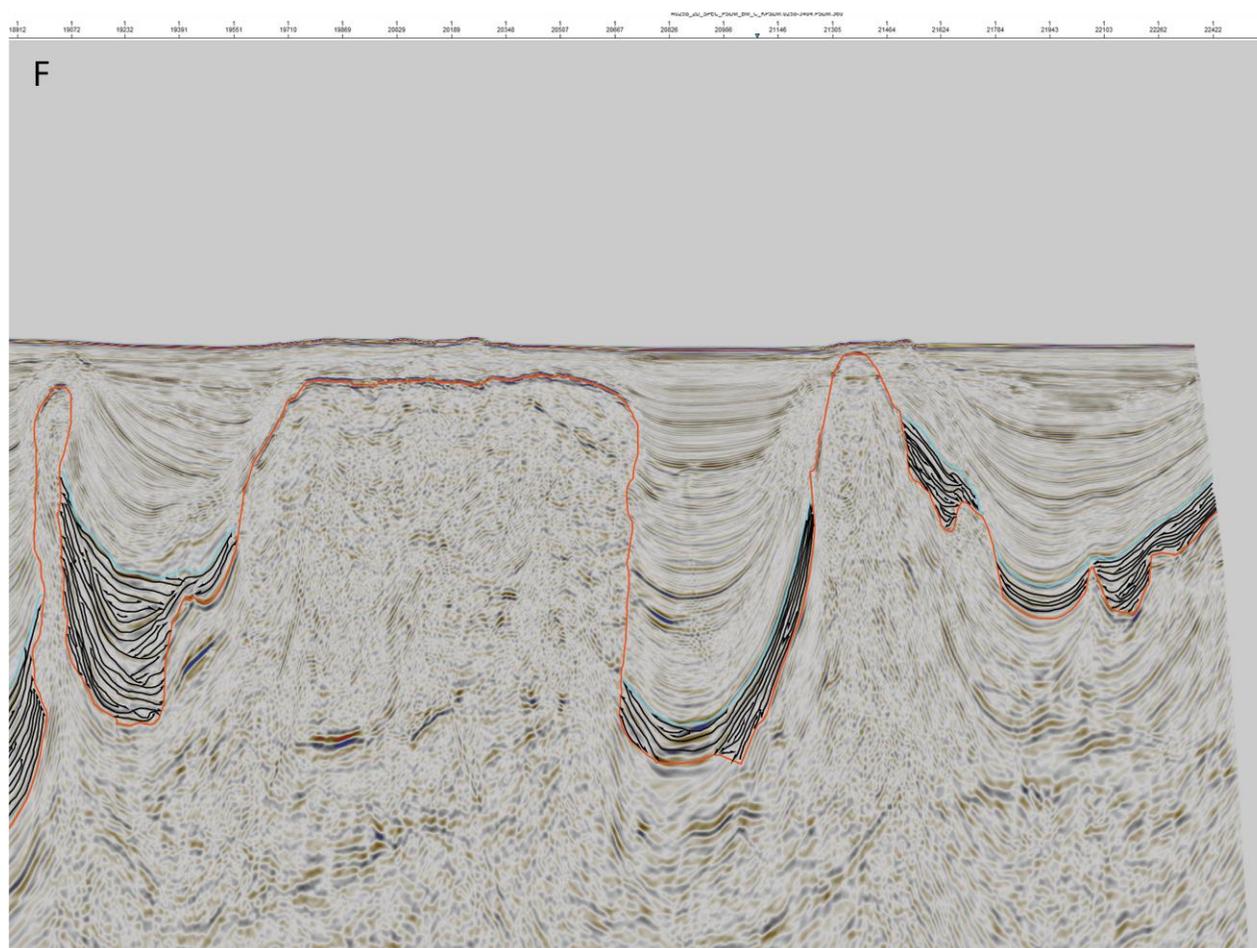


Figura 19: F) Detalhe da porção distal da linha sísmica. Os refletores e as falhas estão representados em preto.

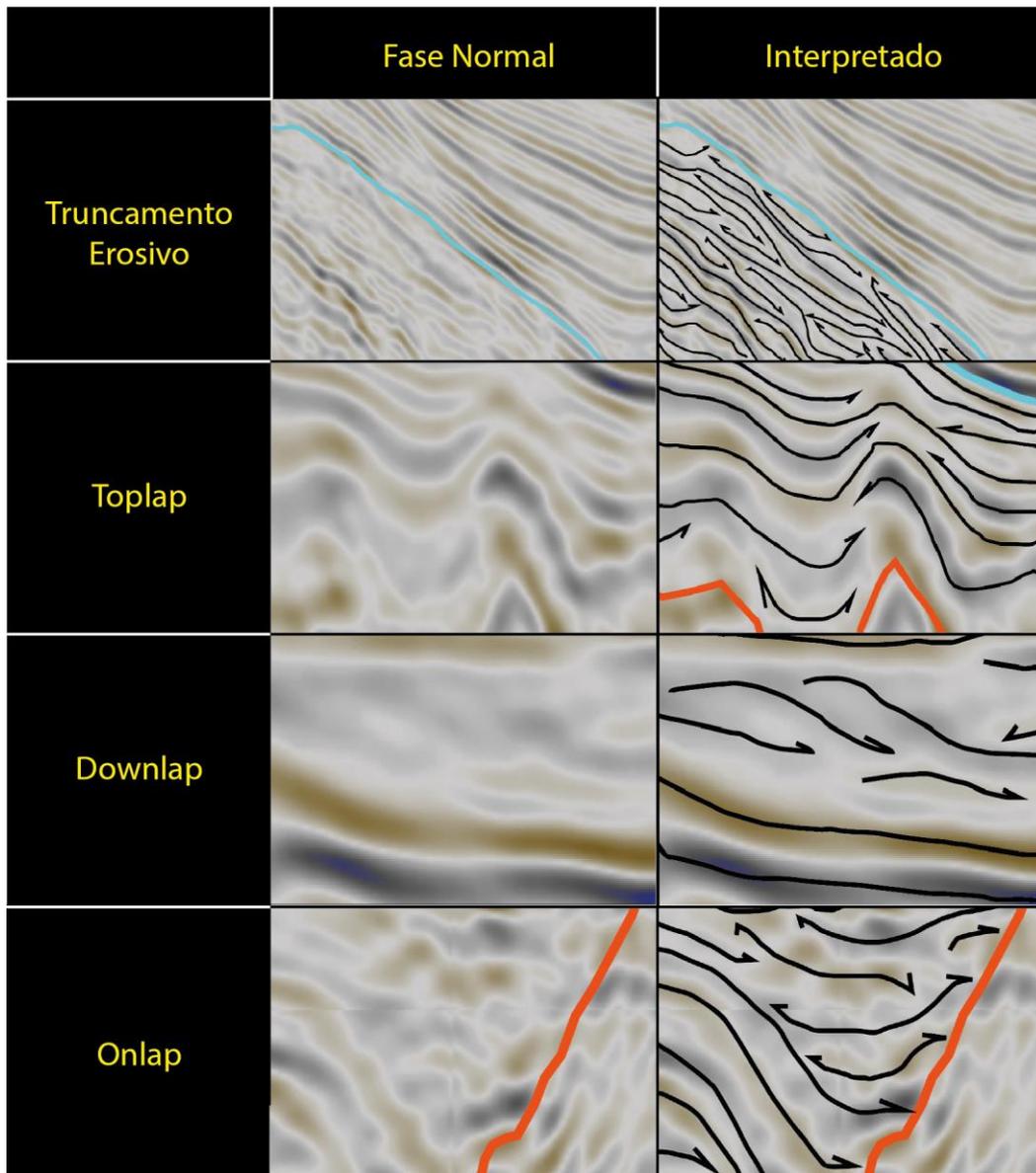


Figura 20: Quadro de exemplos de terminações de refletores com e sem interpretação.

4.3 Unidades Sismoestratigráficas

O conjunto de terminações de refletores ao longo de um padrão sucessivo define uma superfície estratigráfica que separa unidades sismoestratigráficas distintas. As unidades sismoestratigráficas são compostas por conjuntos de sistemas deposicionais geneticamente relacionados e dispostos lateralmente (Brown & Fisher, 1977; Alvarenga et al., 2021). De acordo com Brown & Fisher (1977), o modelo deposicional interpretado para cada unidade sismoestratigráfica fornece a base para inferir a evolução tectônica e deposicional durante o preenchimento da bacia.

No intervalo de estudo foram identificadas 5 unidades sismoestratigráficas individualizadas por 4 superfícies limítrofes, sendo a unidade sísmica um (US1) a mais antiga e a unidade sísmica cinco (US5) a mais nova. Pode ser observado o arcabouço estratigráfico do intervalo estudado na Figura 21 e a linha sísmica interpretada na Figura 22 e Figura 23.

ARCABOUÇO ESTRATIGRÁFICO

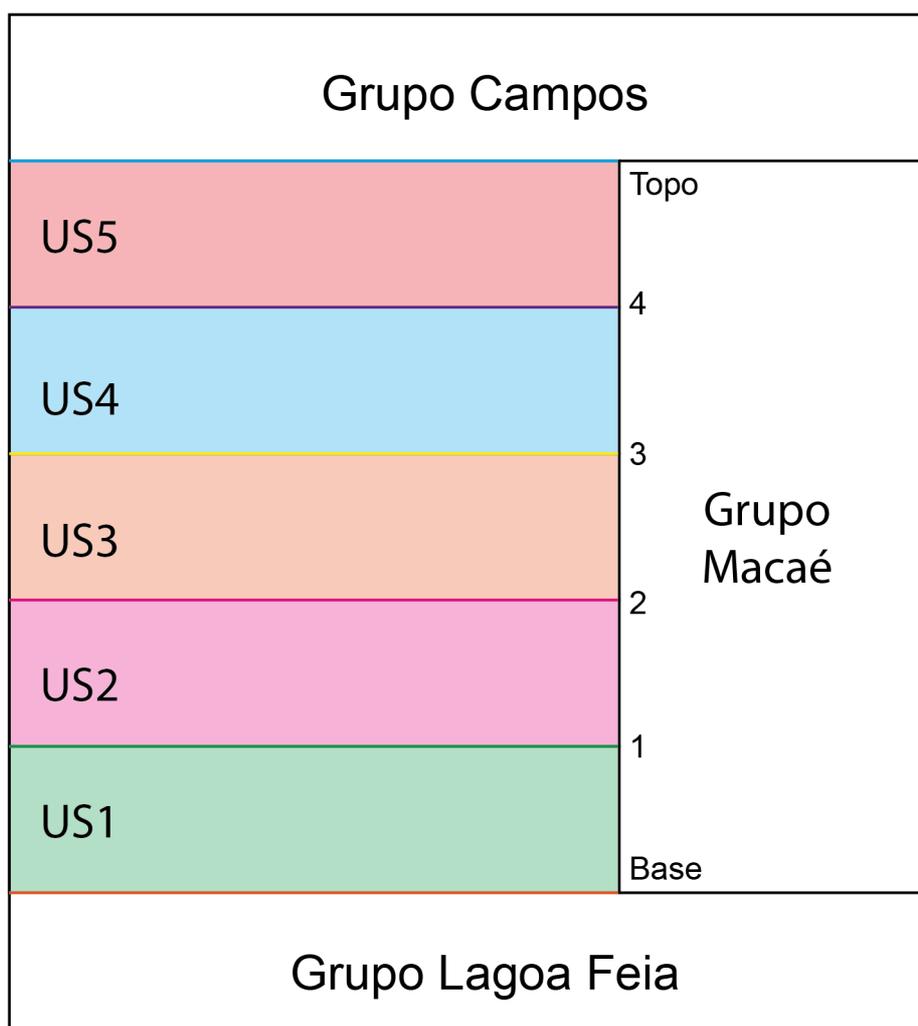


Figura 21: Arcabouço Estratigráfico observando a US1 em verde, a US2 em rosa, a US3 em laranja, a US4 em azul e a US5 em vermelho. Também pode-se observar as superfícies 1,2,3 e 4 mapeadas.

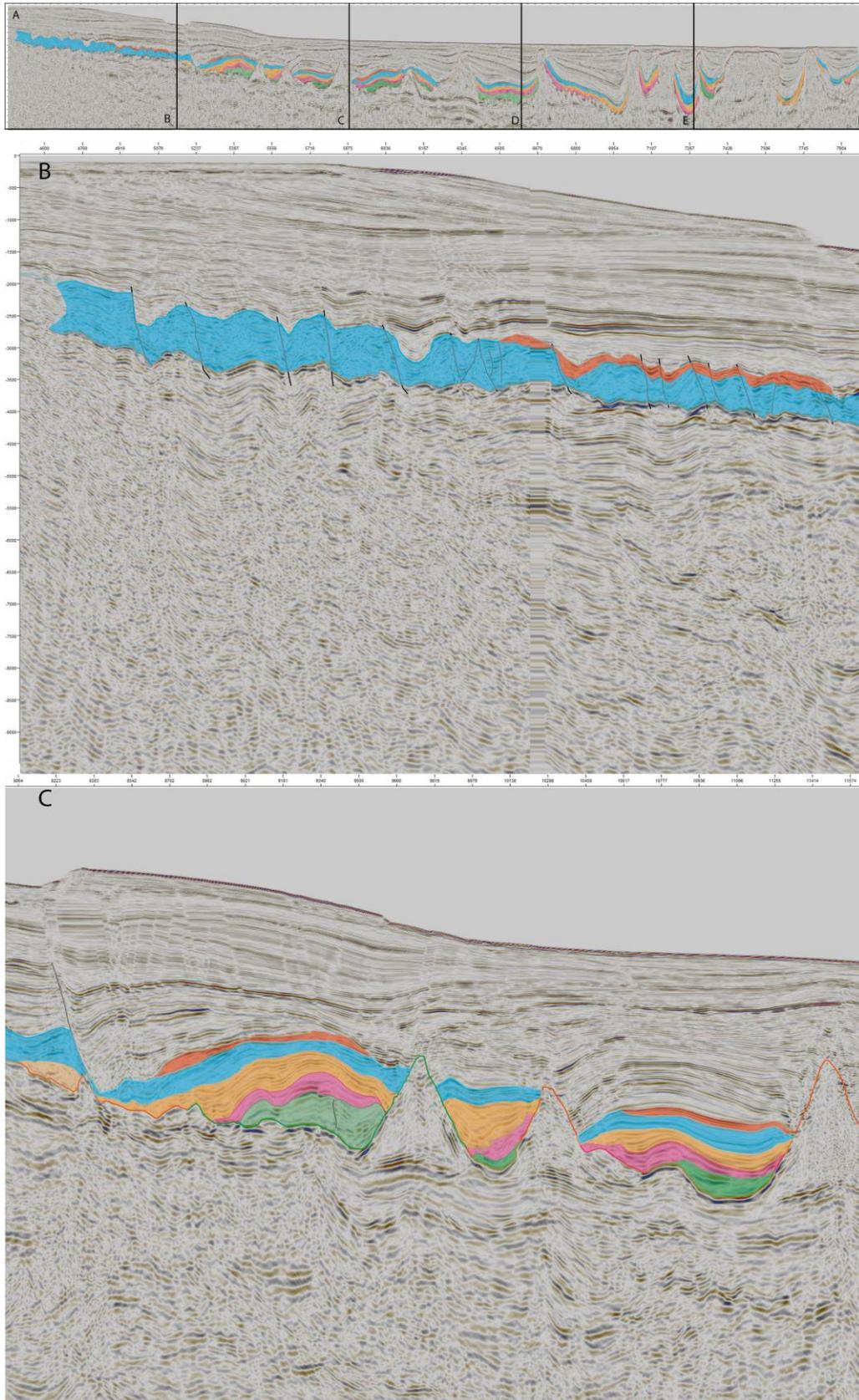


Figura 22: A) Seção sísmica R0258-3105 inteira com todas unidades e superfícies mapeadas. B e C) Detalhe da porção mais proximal da linha sísmica. Para todos os painéis, a US1 está representada em verde, a US2 em rosa, a US3 em laranja, a US4 em azul e por fim a US5 em vermelho.

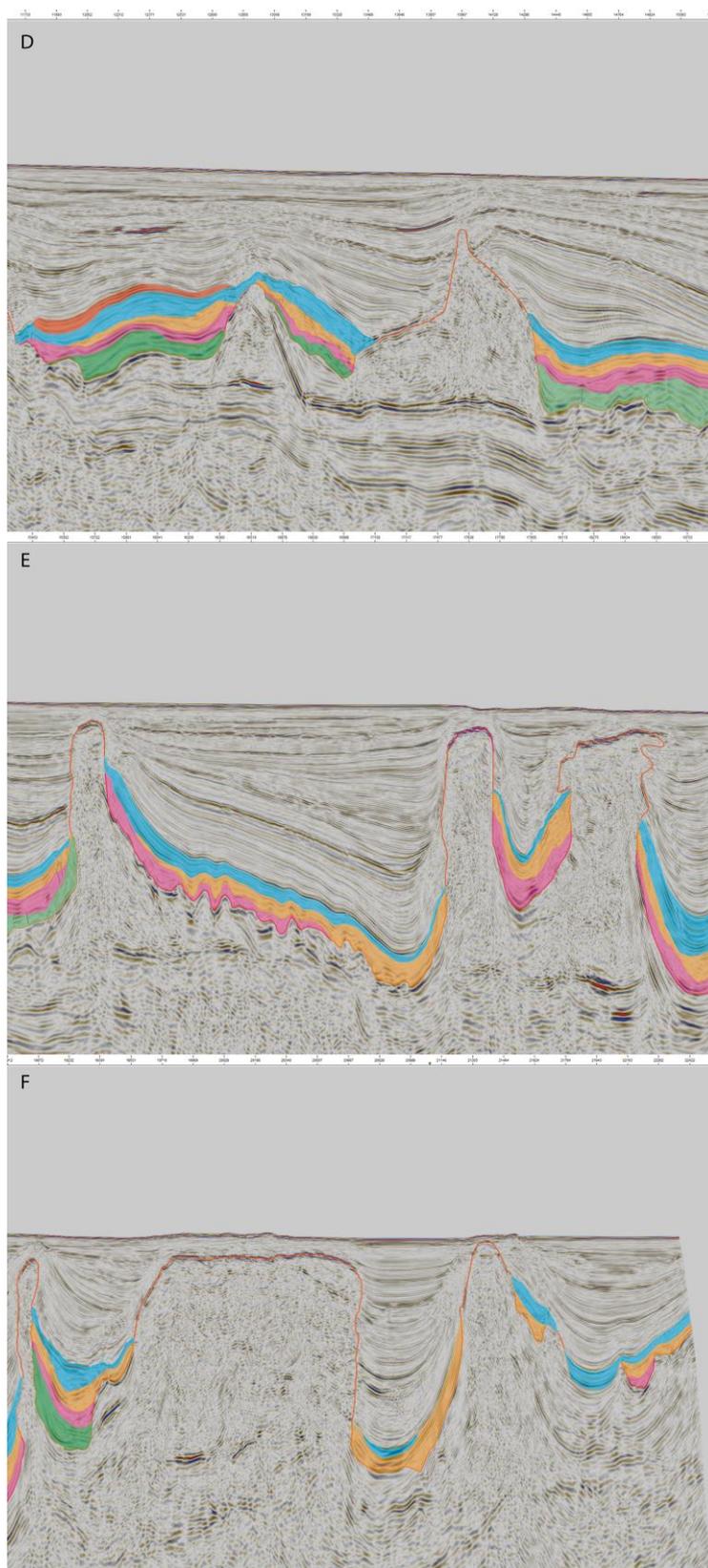


Figura 23: D) Detalhe da porção central da linha sísmica. E e F) Detalhe da porção distal da linha sísmica. Para todos os painéis, a US1 está representada em verde, a US2 em rosa, a US3 em laranja, a US4 em azul e por fim a US5 em vermelho.

A unidade sismoestratigráfica 1 (US1), como pode ser observada em verde na Figura 22 e na Figura 23, ocorre de forma restrita, descontínua, apenas na porção central da linha sísmica devido a controles estruturais basais. É limitada na base por terminações de refletores, geralmente *onlap* e *downlap*, e no topo por *toplaps*. Possui uma espessura constante na parte central e não ocorre nas porções proximais e nem distais da seção sísmica. É limitada ao topo com a unidade sismoestratigráfica dois (US2).

A unidade sismoestratigráfica 2 (US2) ocorre de forma ampla, desde a porção central até a porção distal, no entanto a sua espessura diminui significativamente nas porções mais profundas da bacia. É limitada na base por *downlaps* e *onlaps* e no topo por *toplaps*. Faz contato basal com a US1 pela superfície 1 mapeada e localmente pode fazer contato com a base do intervalo quando a US1 não ocorrer. Ao topo limita-se com a unidade sismoestratigráfica 3 (US3) de forma ampla pela superfície 2 e contato com a unidade sismoestratigráfica 4 (US4) de forma mais isolada pela superfície 3. A US2 pode ser observada na Figura 22 e na Figura 23 em rosa.

Na unidade sismoestratigráfica 3 (US3), localizada em laranja na Figura 22 e na Figura 23, é possível observar uma ocorrência de forma mais ampla que a US2, desde a porção um pouco mais proximal até a porção distal, de forma não expansiva. Superfícies de *downlap* são encontradas no limite inferior e superfícies de *toplap* são encontradas no limite superior da unidade de forma frequente. De forma geral, a US3 apresenta maior espessura na porção mais proximal, afinando ao longo da seção, sem desaparecer de forma contínua. A US3 se encontra entre as unidades US2 e US4 e entre as superfícies 2 e 3; entretanto, na porção mais distal, em algumas porções onde não ocorrem as unidades US1 e US2, corresponde ao limite basal do intervalo como um todo.

A unidade sismoestratigráfica 4 (US4) é a unidade mais espessa do intervalo de estudo, ocorrendo amplamente por toda a seção sísmica, principalmente na porção proximal até a porção distal da bacia. É limitada na base principalmente por superfícies de *onlap*, e alguns *downlaps* e, no topo, majoritariamente por superfícies de truncamento erosivo e alguns *toplaps*. Na porção proximal, faz contato com a base e o topo do intervalo e na porção central faz contato com a US3 pela superfície três e com a unidade US5 de

forma muito isolada pela superfície quatro. A US4 pode ser analisada na Figura 22 e na Figura 23 em azul.

Por fim, a unidade sismoestratigráfica 5 (US5) ocorre de forma isolada pois é afetada pelos processos erosivos que limitam seu registro geológico. Ocorre apenas na porção proximal e central da seção sísmica, com pouca espessura e limitado na base por superfícies de *downlap* e *onlap* e no topo por truncamentos erosivos bastante expressivos. Está no contato entre a US4, através da superfície 4 e pela superfície de topo do intervalo estudado, sendo o último registro do Grupo Macaé. Na Figura 22 e na Figura 23 está representada na cor vermelha.

4.4 Sismofácies

Foram identificadas três sismofácies no intervalo de estudo a partir de parâmetros sísmicos (geometria, e textura sísmica - amplitude e continuidade): Sismofácies A (SFA), Sismofácies B (SFB) e Sismofácies C (SFC). A Figura 24 abaixo mostra exemplos de cada sismofácies em diferentes texturas sísmicas, junto com suas características e interpretação e a Figura 26 e a Figura 27 mostram a seção sísmica interpretada com as sismofácies.

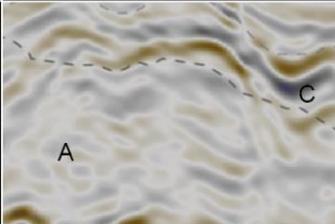
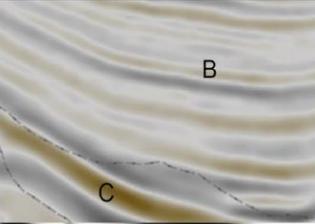
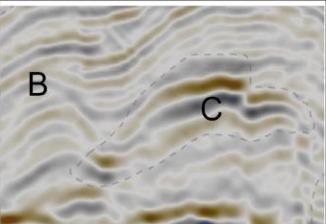
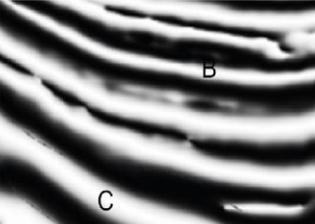
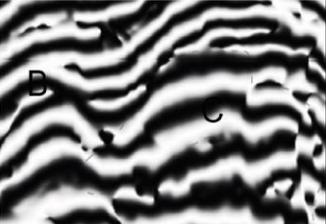
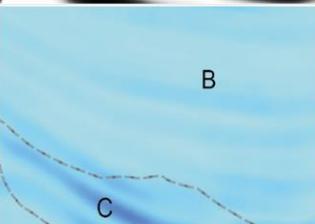
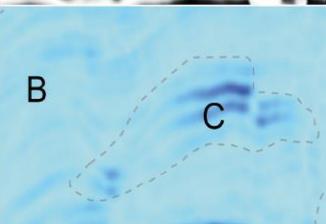
	Fácies Sísmica A	Fácies Sísmica B	Fácies Sísmica C
Fase Normal			
Atributos Sísmicos Fase Cosine			
Atributos Sísmicos Fase Amplitude RMS			
Características Sísmicas	Refletores com baixa amplitude, caóticos, descontínuos e geometria banco	Refletores semi-contínuos, de baixa amplitude, intercalados com reflexões de alta amplitude subordinados, geometria lençol	Refletores contínuos, de alta amplitude, geometria lentes ou lençol
Litologia e Interpretação	Predominância de calcarenitos e calcirruditos Bancos carbonáticos (shoals)	Predominância de calcilutitos Offshore proximal	Predominância de Marga Offshore distal

Figura 24: Tabela das fácies sísmicas com exemplos em diferentes atributos e características.

A Sismofácies A (SFA) ocorre apenas na porção proximal e central da seção sísmica, sendo mais frequente na porção proximal. No atributo sísmico em Fase Normal e Fase Cosine se caracteriza por refletores com baixa amplitude, descontínuos e caóticos. Já na Amplitude RMS os refletores praticamente não se destacam, pela sua baixa amplitude. A sua geometria em relação à linha sísmica toda pode ser interpretada como banco (bank, conforme Vail *et al.*, 1977). Foi constatada a litologia desta sismofácies como uma predominância de calcarenitos e calcirruditos, tratando-se de um intervalo de bancos carbonáticos, conforme Figura 25.

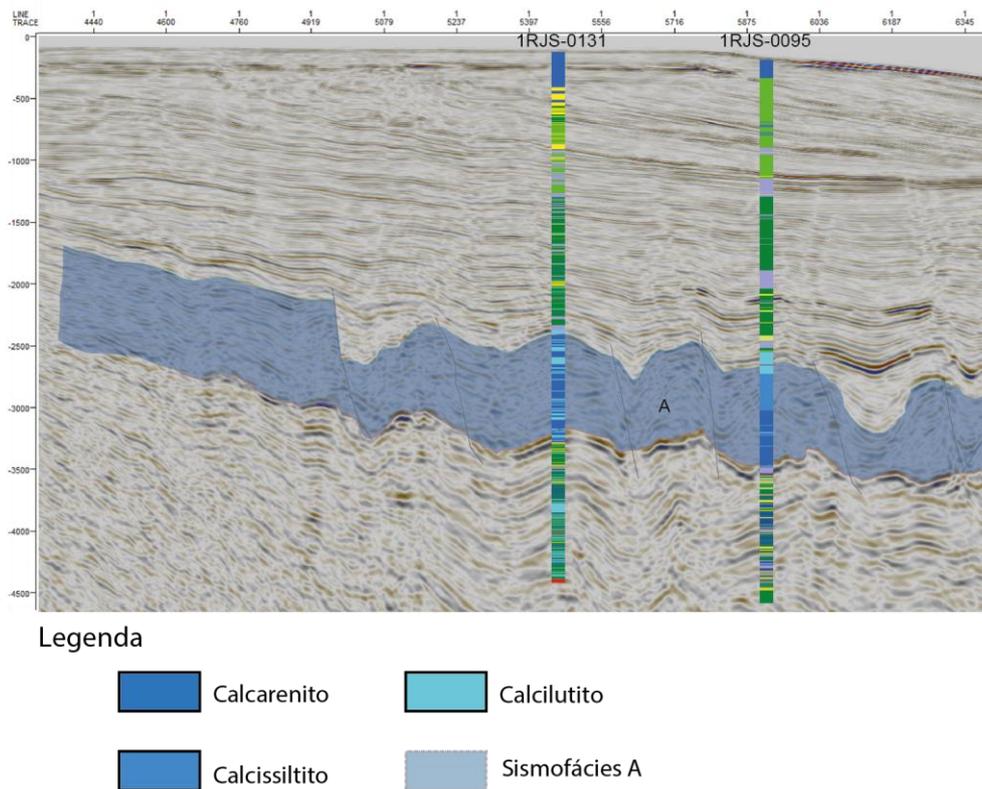


Figura 25: Seção proximal da linha sísmica com a localização dos poços 1RJS-0131 e 1RJS-0095 no intervalo interpretado como a Sismofácies A.

A Sismofácies B (SFB) ocorre de forma bem distribuída da porção central até a porção distal da linha sísmica. Na Fase Normal e Cosine possui refletores semi-contínuos, de baixa amplitude, intercalados com refletores de alta amplitude subordinadas. Na AMPLITUDE RMS a sismofácies se apresenta com textura sísmica fraca porém visível. A geometria externa identificada foi a de lençol (*sheet*, conforme Vail *et al.* 1977). A litologia da SFB foi interpretada como predominância de calcilutitos em um *offshore* proximal, por sua extensão e continuidade.

Já a Sismofácies C (SFC) aparece em volumes isolados por toda a seção sísmica, mas predominando na região distal. Nas Fases Normal, Cosine e Amplitude RMS é possível observar os refletores com alta amplitude, contínuos e com geometria em forma de lentes ou lençol (*lens* ou *sheets*, conforme Vail *et al.* 1977). A interpretação litológica da SFC indica uma predominância de margas em um ambiente *offshore* distal.

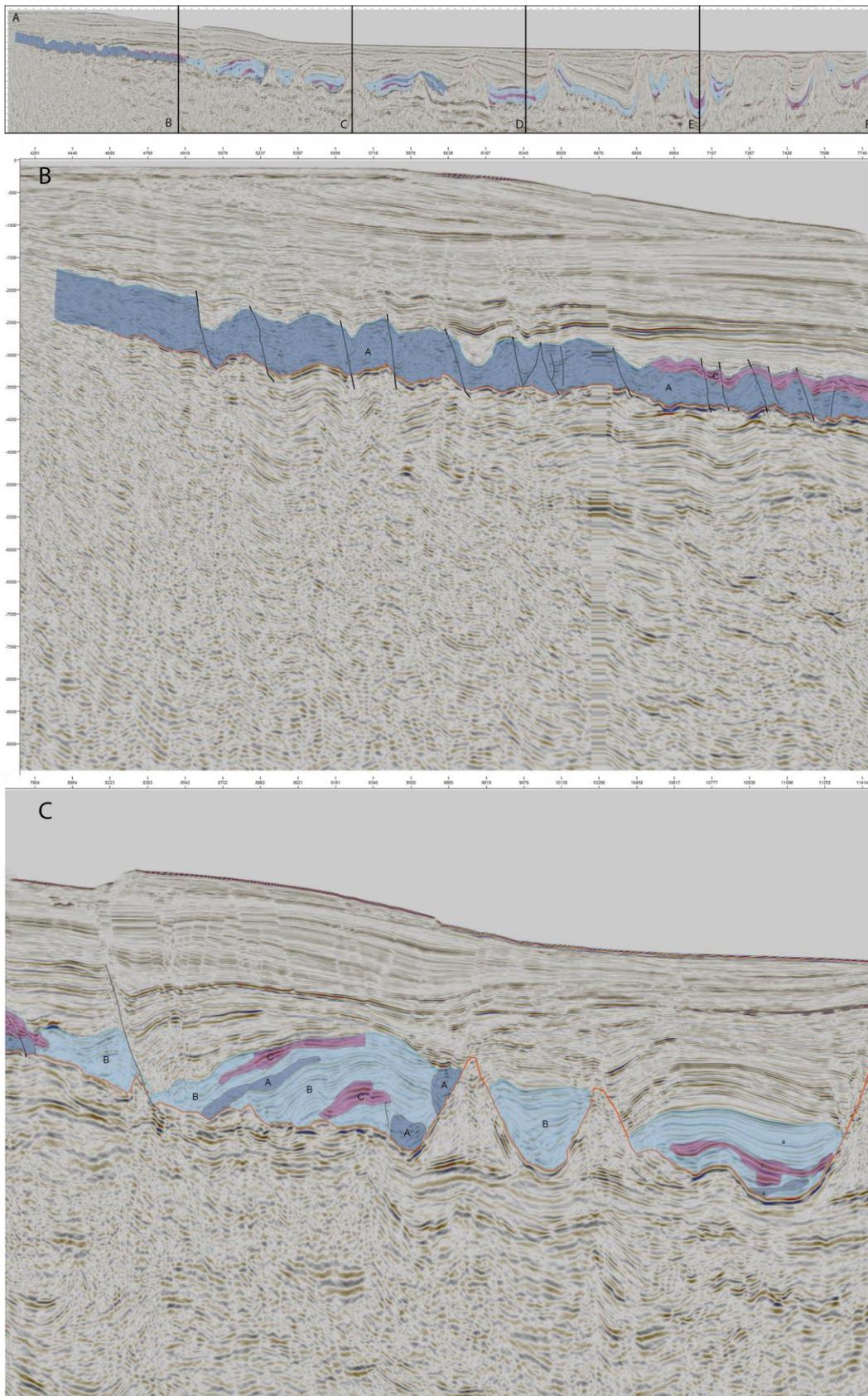


Figura 26: A) Linha sísmica R0258-3105 inteira com todas as sismofácies mapeadas. B e C) Detalhe da porção mais proximal da linha sísmica. Para todos os painéis, a SFA está representada em azul escuro, a SFB está representada em azul claro e a SFC em lilás.

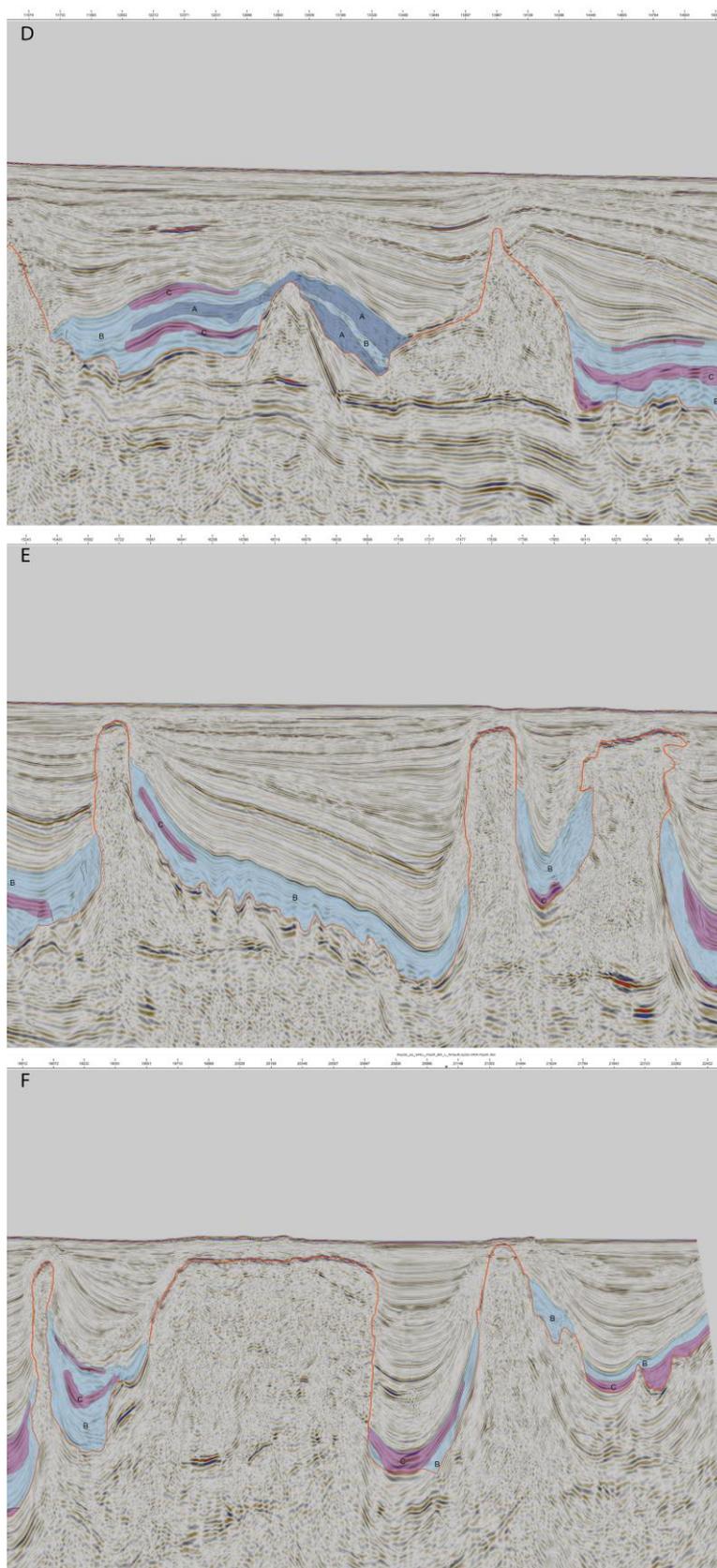


Figura 27: D) Detalhe da porção central da linha sísmica. E e F) Detalhe da porção distal da linha sísmica. Para todos os painéis, a SFA está representada em azul escuro, a SFB está representada em azul claro e a SFC em lilás.

4.5 Carta Cronoestratigráfica

A carta cronoestratigráfica é uma transformação da seção geológica da carta sísmica em um perfil de tempo, no qual o eixo vertical é o tempo geológico correlativo separado pelas unidades sísmicas. Possivelmente nem todas as unidades tenham o mesmo período de tempo, no entanto, pela ausência de dados de datações relativas, como bioestratigráficos, e absolutas, como cronoestratigráficos de datação radiométrica, considerou-se que todas as unidades possuem o mesmo intervalo temporal entre elas.

Esse diagrama foi criado por Wheeler em 1958 e adaptado e transformado por Vail *et al.* (1977) em uma das bases de exibição de dados da estratigrafia de sequências. A carta cronoestratigráfica é muito útil para a observação de variação espacial ao longo de um perfil dentro de um contexto temporal geológico. Na Figura 28 e na Figura 29 é possível observar a carta cronoestratigráfica com as unidades sismoestratigráficas e na Figura 30 e na Figura 31 a carta com as sismofácies.

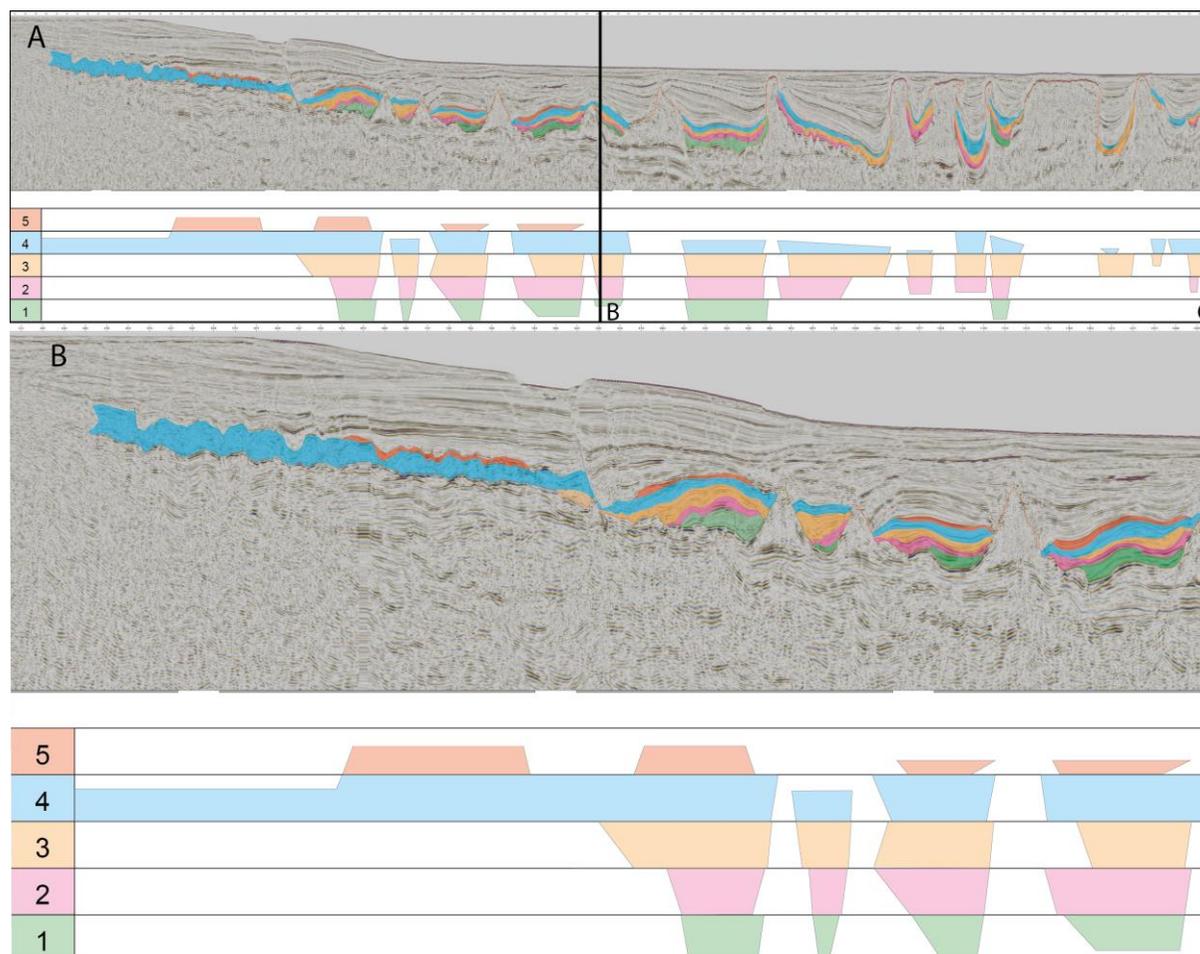


Figura 28: A) Seção sísmica R0258-3105 inteira com todas unidades mapeadas e abaixo a carta cronoestratigráfica referente às unidades sismoestratigráficas. B) Detalhe da porção mais proximal da linha sísmica. Para todos os painéis, na carta cronoestratigráfica e na linha sísmica a US1 está representada em verde, a US2 em rosa, a US3 em laranja, a US4 em azul e por fim a US5 em vermelho.

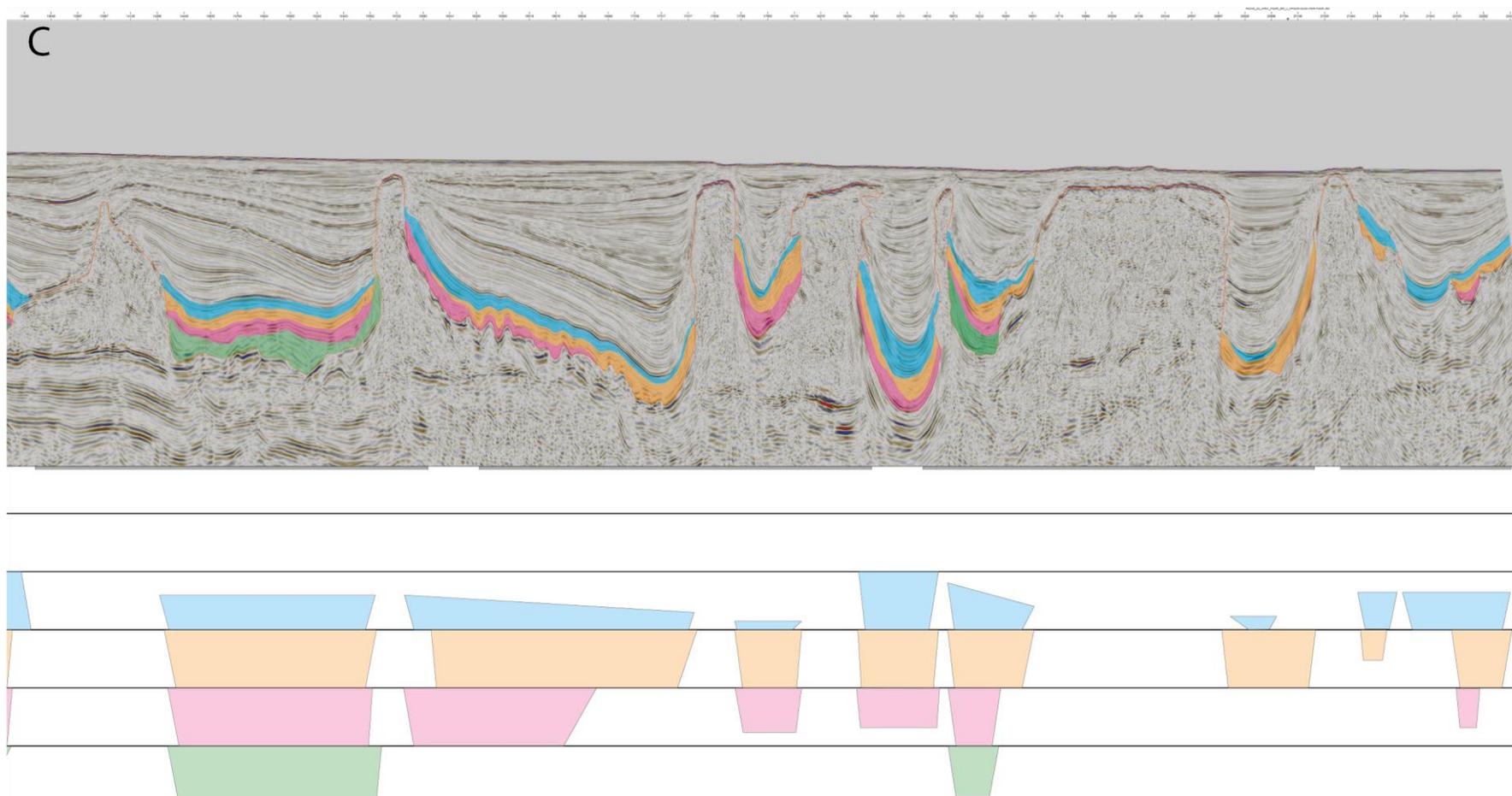


Figura 29: C) Detalhe da porção distal da linha sísmica. Para todos os painéis, na carta cronoestratigráfica e na linha sísmica a US1 está representada em verde, a US2 em rosa, a US3 em laranja, a US4 em azul e por fim a US5 em vermelho.

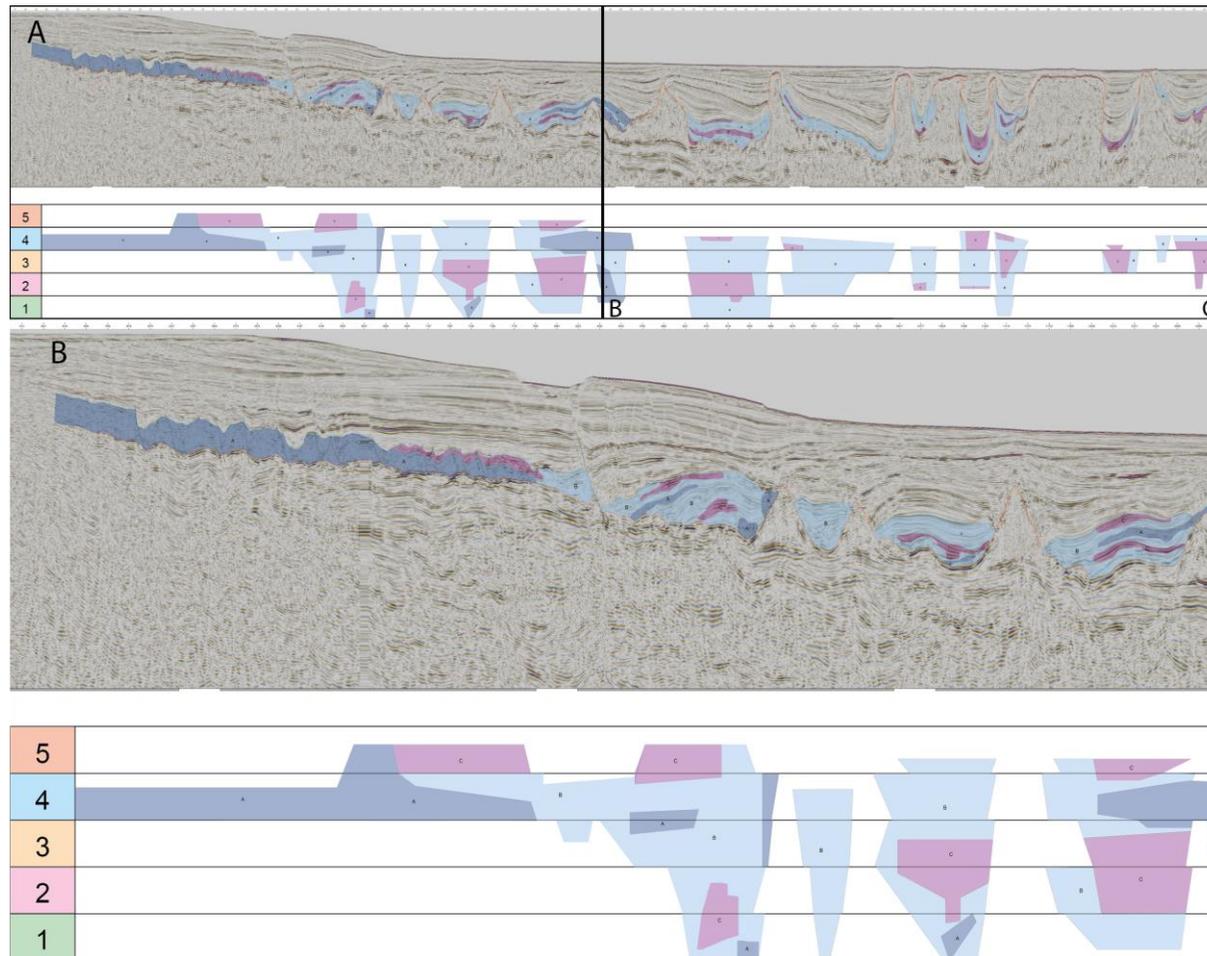


Figura 30: A) Seção sísmica R0258-3105 inteira com todas sismofácies mapeadas e abaixo a carta cronoestratigráfica referente às mesmas. B) Detalhe da porção mais proximal da linha sísmica. Para todos os painéis, na carta cronoestratigráfica e na linha sísmica a SFA está representada em azul escuro, a SFB está representada em azul claro e a SFC em lilás.

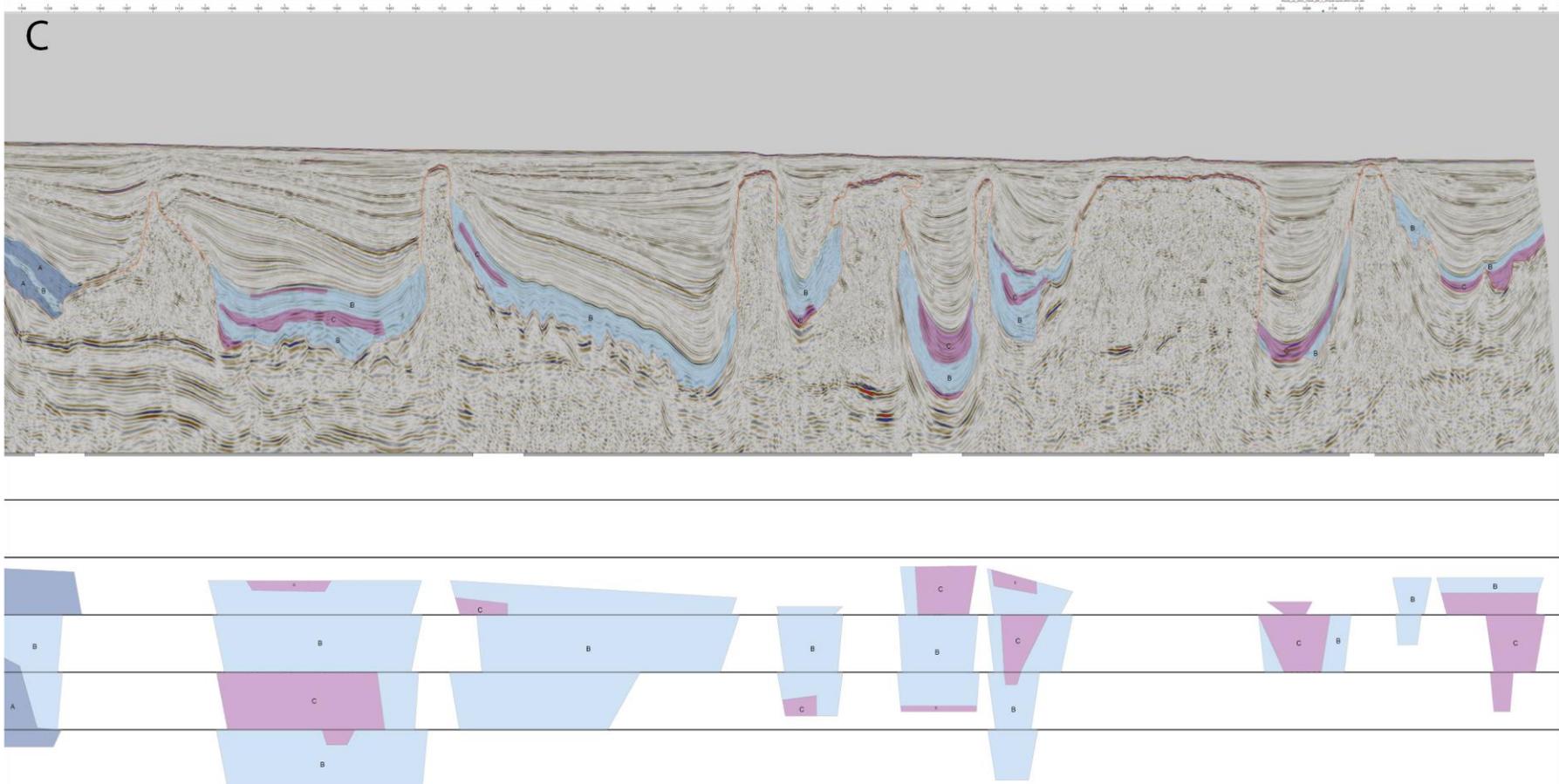


Figura 31: C) Detalhe da porção distal da linha sísmica. Na carta cronoestratigráfica e na linha sísmica a SFA está representada em azul escuro, a SFB está representada em azul claro e a SFC em lilás.

A unidade sismoestratigráfica 1 (US1) inicia a deposição na porção central da carta cronoestratigráfica, que é onde se concentra, e termina antes do final da carta ocorrendo de forma restrita, com diversos hiatos, como pode ser observado nas Figura 28 e Figura 29. Nela ocorrem a sismofácies A (SFA) em forma de bolsões na parte inicial, a sismofácies C (SFC) se apresenta restrita ao início da deposição e a sismofácies B (SFB) pode ser encontrada do início ao fim da deposição no diagrama dentro da US1 representado nas Figura 30 e Figura 31.

A unidade sismoestratigráfica 2 (US2) inicia a deposição na porção central junto com a US1, e se expande até o final do diagrama. A SFA se encontra apenas no centro da unidade em forma de bolsão, já a sismofácies B e C ocorrem por toda unidade, no entanto a SFC se concentra mais no inicial deposicional da US2 e a SFB se concentra mais ao final da deposição (Figuras Figura 28, Figura 29, Figura 30 e Figura 31).

A unidade sismoestratigráfica 3 (US3) inicia a deposição levemente anterior às US1 e US2 e se expande até o final do diagrama, com maior deposição na parte final da carta em relação às anteriores. A SFA ocorre de forma restrita apenas no início da unidade, a SFB ocorre por toda unidade na carta no entanto a SFC se deposita por todo final da US3 no diagrama e em alguns pontos na parte central da deposição (Figuras Figura 28, Figura 29, Figura 30 e Figura 31).

A unidade sismoestratigráfica quatro (US4), representado na Figura 28 e na Figura 29, inicia a deposição logo no início da carta cronoestratigráfica e se estende por toda carta. Apresenta-se com maior espaço de acomodação e menos hiatos em relação às outras unidades. A SFA ocorre principalmente na porção proximal do diagrama, de forma evidente e se estende até a parte central. A SFB ocorre na porção central até a distal. A SFC ocorre na porção distal da unidade na carta (observar Figura 30 e Figura 31).

A unidade sismoestratigráfica cinco (US5) possui a menor ocorrência na carta cronoestratigráfica, provavelmente devido a eventos erosivos que sobre esta unidade, ocorrendo, portanto, apenas de forma restrita na porção inicial e central do diagrama. Apresenta a SFA apenas no

seu início, a SFB e SFC na parte central e distal, sendo a mais evidente a fácies C (Figuras Figura 28 a Figura 31).

5 DISCUSSÃO

Com base na interpretação da linha sísmica, foi possível estabelecer um modelo evolutivo integrado para a área de estudo. Embora com toda qualidade do dado e da análise sismoestratigráfica realizada, na região ocorrem apenas dois poços que cortam a linha, sendo eles na região mais proximal da mesma. O poço 1RJS-0131 e o poço 1RJS-0095 cortam a SFA, e nos indicam que a litologia mais presente nela são os calcarenitos predominantes, com quantidades subordinadas de calcissiltitos e calcilutitos, conforme a Figura 25.

De acordo com Armelenti *et al.* (2021), esses calcarenitos com calcilutitos correspondem a uma deposição em águas rasas, de energia moderada a alta, constituídos por depósitos oolíticos, oncolíticos, peloidais, calcarenitos/calciruditos intraclásticos e por calcarenitos oolíticos/oncolíticos. Esses calcarenitos são interpretados como a sismofácies A da linha sísmica interpretada, sendo mais frequente na área proximal da seção, que se depositou em bancos carbonáticos alongados paralelos à linha de costa com direção NE/SO constituída por oólitos – *shoal banks* (Guardado *et al.*, 1990).

Essa é a única sismofácies possível de se identificar através dos poços para a correlação. No entanto, isto não impede a interpretação das outras sismofácies identificadas. Carbonatos de granulação mais finos, como calcilutitos predominantes, influenciam na perda da amplitude sísmica, no entanto mantendo a reflexão. Com base nisso, a SFB com refletores contínuos com baixa amplitude foram interpretados como possivelmente calcilutitos predominantes.

Quando há uma mistura entre sedimento siliciclástico fino (tamanho argila) com carbonatos finos, isso se traduz em um uma perda de continuidade, mas com amplitude alta, compatível com as margas mais distais interpretadas como a SFC. Na Figura 32 abaixo é possível observar o modelo deposicional de Armelenti *et al.* (2021) modificado onde está representado a deposição das sismofácies A, B e C conforme as litologias interpretadas.

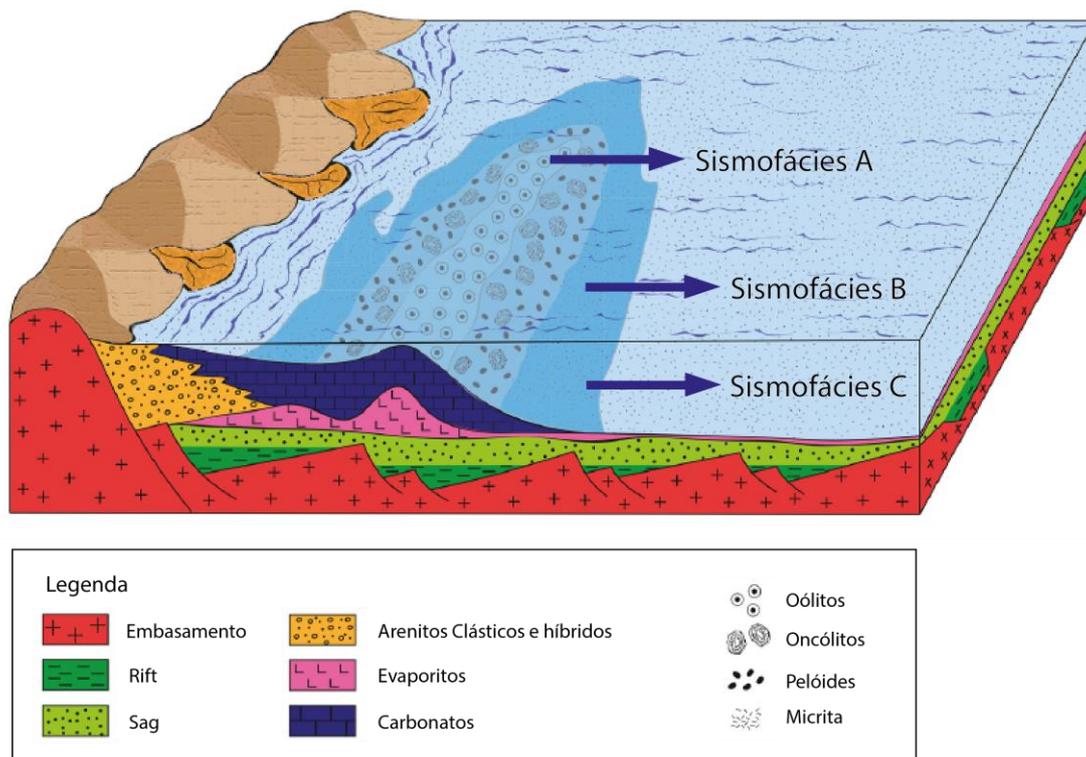


Figura 32: Bloco diagrama esquemático do modelo deposicional do Grupo Macaé (criado por Guardado *et al.* (1990) e modificado por Okubo *et al.* (2015) e Arnelenti *et al.* (2021)).

Existe uma referência direta entre as sismofácies interpretadas e o modelo deposicional proposto por Arnelenti *et al.* (2021). Por fim, conclui-se que a Sismofácies A foram interpretadas como calcarenitos, a Sismofácies B como possivelmente calcilutitos e a Sismofácies C como possivelmente margas. Todas as litologias aqui nominadas nas sismofácies são predominantes, sempre podendo haver conteúdos subordinados das outras ou até mais litologias aqui não identificadas nos poços ou artigos.

A partir disso, a seção sísmica interpretada junto com a carta cronoestratigráfica e as sismofácies, permitem desenvolver um modelo evolutivo para o intervalo de estudo. Na Figura 33 é possível observar o início da deposição do Grupo Macaé, marcado pela US1, sob os evaporitos da Formação Retiro. Possivelmente a estruturação suave de altos e baixos já estava associada aos primeiros movimentos halocinéticos, e poderia encaixar os bancos carbonáticos rasos iniciais.

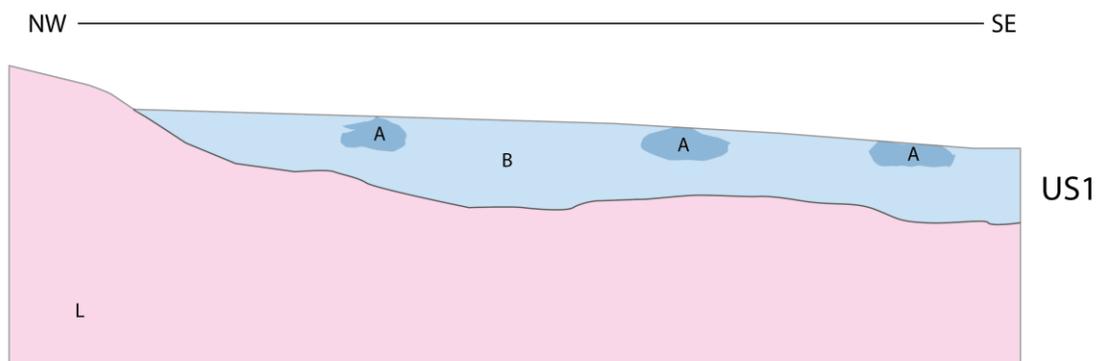


Figura 33: Tempo 1: início da deposição do Grupo Macaé na unidade sismoestratigráfica 1.

Na Figura 34 a área deposicional se expande um pouco mais, tendo também a deposição da US2 e o aparecimento da SFC. Na Figura 35 a expansão continua com a deposição da US3. Na US2 há um predomínio de litologias carbonáticas finas (SFB), com uma diminuição nos bancos carbonáticos (SFA), porém aparecimento de margas (SFC). Na US3, a contínua criação de espaço mantém a deposição como predominantemente fina, com intercalações de sismofácies SFB e SFC, sem bancos carbonáticos (SFA).

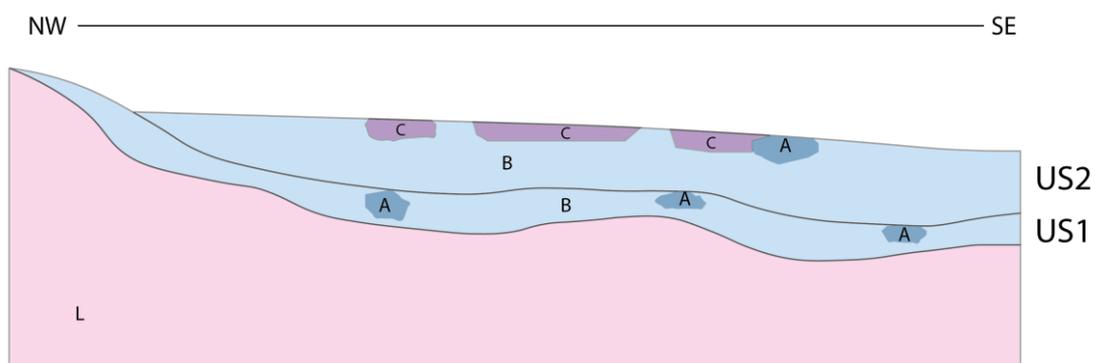


Figura 34: Tempo 2: Perfil de deposição da US2.

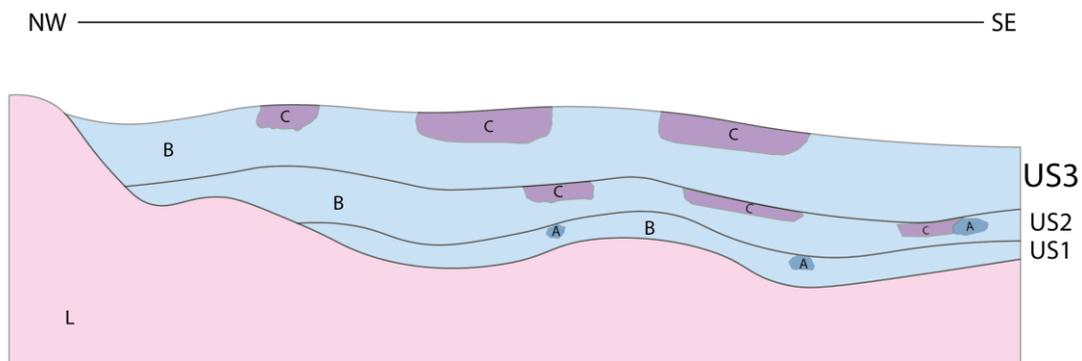


Figura 35: Tempo 3: Perfil de deposição da US3.

Na Figura 36 há a deposição da US4 e uma notável expansão em *onlap* entre as unidades sismoestratigráficas 3 e 4. Na US4 há uma expansão na área deposicional, mas com um arranjo mais estruturado, possivelmente associado a uma maior movimentação do sal durante este período. Assim, voltam a ocorrer bancos carbonáticos e em maior volume (SFA), envoltos em carbonatos finos (SFB) e a ocorrência de forma mais distal das margas (SFC).

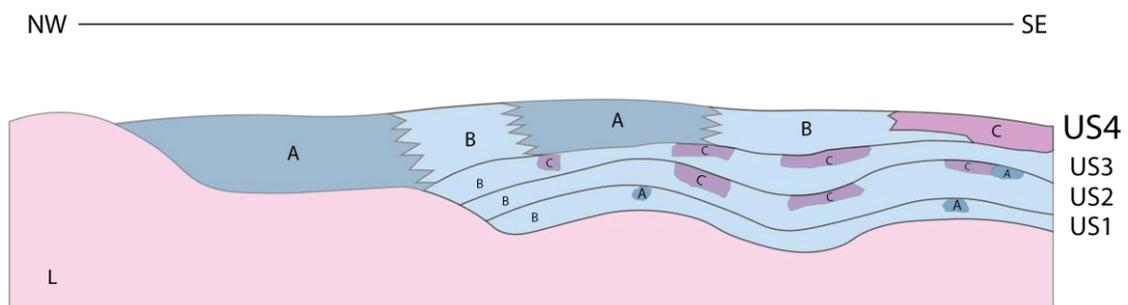


Figura 36: Tempo 4: Perfil de deposição da US4.

Por fim, na Figura 37, pode-se observar que a deposição termina com a US5, de difícil visualização e interpretação por estar bastante erodida. Trata-se do topo do Grupo Macaé, que, devido à erosão marcada pela discordância, está pouco preservada. A extensiva erosão da US5, predominantemente composta da SFC, aumenta a quantidade relativa da SFA na área como um todo.

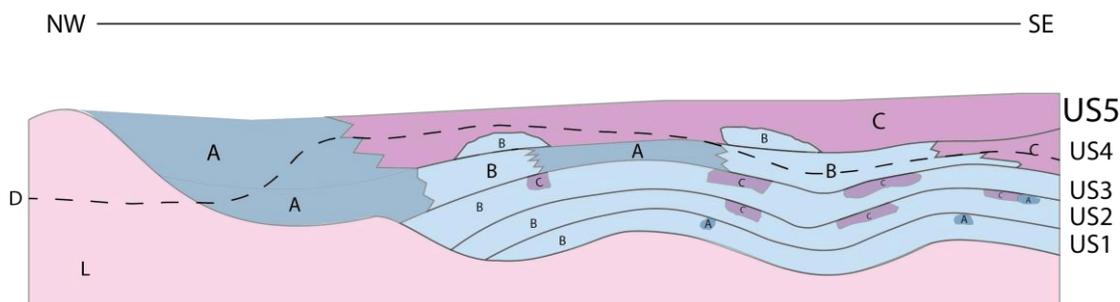


Figura 37: Tempo 5: Perfil de deposição da US5, com linha de erosão.

O pacote de sal começa a elevar e subsidir áreas, e nas regiões que estão mais próximas ao topo começam a se depositar os calcarenitos de água rasa, a SFA. Entre a SFA, se depositam a SFB e na zona mais distal a SFC, todas em zona mais restritas. Em seguida, a área deposicional é expandida e sucessiva, associada a um grande evento transgressivo contínuo.

Em geral, as US1, US2 e US3 apresentam-se mais isoladas enquanto que as US4 e US5 expandem de modo considerável, isso indica que a taxa de criação de espaço sempre esteve positiva, entretanto aumentou nas unidades sismoestratigráficas 4 e 5. Isso significa que essas unidades fazem uma transgressão com retrogradação da plataforma carbonática, a Sismofácies A.

Todo este intervalo possui um caráter transgressivo muito evidente, na US4 e US5 não há discordâncias internas evidenciadas, o que indica eventos deposicionais distintos e temporalmente sucedidos, sem erosão significativa da US1 até a US5. Integralmente esse padrão é de *onlap* transgressivo sempre associados a movimentação do sal, ao final da deposição o sal rompe e fragmenta o intervalo Macaé em vários blocos isolados. A halocinese gera diápiros, muralhas e incursões verticais do sal, isolando os blocos do Grupo Macaé que anteriormente estavam todos conectados.

5.1 Correlação das Sismofácies com as Unidades Litoestratigráficas

Com as sismofácies já caracterizadas e inferidas suas litologias, foi possível estabelecer uma correlação entre elas e as unidades

litoestratigráficas definidas por Winter *et al.*, (2007). Dentro do Grupo Macaé, na Bacia de Campos, é possível identificar as Formações Goitacás, Namorada, Quissamã, Outeiro e Imbetiba, e além disso o Membro Búzios, conforme Figura 38.

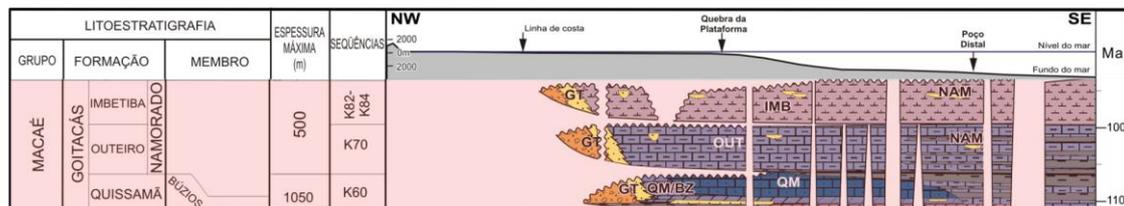


Figura 38: Carta cronoestratigráfica da Bacia de Campos com recorte para o Grupo Macaé. (modificado de Winter *et al.* (2007).

A Formação Goitacás compreende os conglomerados e arenitos de borda de forma discreta, na região mais proximal da bacia. Não existe correlação desta formação com as sismofácies identificadas.

A Formação Namorado constitui pacotes de turbiditos isolados, sem ultrapassar 5km de extensão laterais, em zonas bem distais da bacia. Não foram identificados esses pacotes dentro das sismofácies caracterizadas.

O Membro Búzios trata-se de uma dolomitização no topo do sal, diagenética, na interface sal-carbonato, que também não foi identificada nas sismofácies descritas.

A Formação Quissamã é composta por calcarenitos e calcirruditos de água rasa com oolitos e oncolitos presentes na região mais proximal da bacia. Essa Formação foi identificada na SFA interpretada da linha sísmica.

A Formação Outeiro são calcilutitos finos associados a zona mais distal e lateral à Fm Quissamã. Ela foi constatada como a SFB da sísmica interpretada. Já a Formação Imbetiba são margas e calcilutitos muito finos com teor de argila intercalados, e foi identificada como a SFC da seção sísmica.

6 CONCLUSÕES

A partir da aplicação dos métodos de interpretação sismoestratigráfica adotados neste trabalho foram definidas cinco unidades sismoestratigráficas sendo a mais antiga US1 e a mais nova US5. Foram mapeadas a base e o topo do intervalo de estudo referente ao Grupo Macaé da Bacia de Campos. As superfícies limítrofes entre as unidades foram identificadas com base nas terminações de refletores, sendo onlaps e downlaps na base e toplaps e truncamentos erosivos no topo. Com as cartas cronoestratigráficas foi possível visualizar a disposição das US e das SF, permitindo uma interpretação dos padrões deposicionais ao longo das unidades reconhecidas e inferir uma história evolutiva do Grupo Macaé no área de estudo.

Foram identificadas 3 sismofácies. A SFA possui padrão de refletores caóticos de baixa amplitude e descontínuos e foi interpretada como calcarenitos e calcirruditos, em um intervalo de bancos carbonáticos. A SFB é caracterizada por refletores semi-contínuos de baixa amplitude intercalados com alta amplitude e foi interpretada como calcilutitos com geometria de lençol. Já a SFC possui um padrão de refletores com alta amplitude, contínuos e foi interpretada como margas em um ambiente offshore distal com geometria em lentes ou lençol.

Foi possível observar uma correlação entre as sismofácies identificadas e a litoestratigrafia da bacia, sendo a SFA correlacionada à Formação Quissamã, a SFB à Formação Outeiro e a SFC à Formação Imbetiba. Não foram identificadas sismofácies para as Formações Namorado, Goitacás e o Membro Búzios.

Conforme Guardado *et al.* (1990), o principal reservatório do Grupo Macaé da Bacia de Campos é a Formação Quissamã, que possui características porosas boas para o armazenamento de petróleo, e é o principal produtor em diversos campos descobertos. Assim, este trabalho vem a contribuir com critérios de reconhecimento da Formação Quissamã (SFA), bem como sua caracterização na linha sísmica, e sua ocorrência ao longo dos cinco eventos deposicionais reconhecidos no arcabouço

estratigráfico. Além disso, permite utilizar os mesmos critérios para definir as unidades não reservatório (Formações Outeiros e Imbetiba), indicando padrões paleogeográficos que possam ser utilizados de forma preditiva em outras linhas sísmicas e áreas de estudo adjacentes.

Por fim, o presente trabalho representa uma pequena parte de toda Bacia de Campos, na qual a evolução sismoestratigráfica do Grupo Macaé foi detalhada dentro de um intervalo de uma linha sísmica. Para uma melhor compreensão da bacia é necessário ampliar os estudos para uma área de maior abrangência, integrando dados e interpretações de diferentes linhas sísmicas, além de maior dados de poços.

REFERÊNCIAS

ALVARENGA, R. DOS S.; KUCHLE, J. Techniques and Tools for Seismic Stratigraphic Analysis and Seismic facies: Case Study in the Rift Section of Campos Basin - Brazil. *SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica*, 2021.

ANP. *Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural*, 2015.

ANP. *Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural*, 2021.

ARMELENTI, G.; GOLDBERG, K; ALVARENGA, R.; KUCHLE, J.; AMARANTE, F. B.; SCHERER, C. M. S.; BASTOS, A. C.; CONCEIÇÃO, J. C.; ALVES, J. L. D.; DE ROS, L. F. Depositional and diagenetic impacts on the porosity of post-salt carbonate reservoirs of southern Campos Basin, southeastern Brazilian margin. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 112, n. September, 2021.

AZEVEDO, R. L. M. DE. Paleoceanografia e a evolução do Atlântico Sul no Albiano. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 12, n. n. 2, p. 231–249, 2004.

BARBOZA, E. G. 2005. *Análise Estratigráfica do Campo de Namorado (Bacia de Campos) com base na Interpretação Sísmica Tridimensional*. Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BROWN, L. F.; FISHER, W. L. Seismic-Stratigraphic Interpretation of Depositional Systems: Examples from Brazilian Rift and Pull-Apart Basins. *Application of seismic reflection configuration to stratigraphic interpretation*, p. 213–248, 1977.

- CHANG, H. K.; KOWSMANN, R. O.; FIGUEIREDO, A. M. F.; BENDER, A. A. Tectonics and stratigraphy of the East Brazil Rift system: an overview. *Elsevier Science Publishers B. V.*, v. II, n. Case History Studies on Rifts: North and South America and Africa. *Tectonophysics*, 213, p. 97–138, 1992.
- CHANG, H. K.; KOWSMANN, R. O.; DE FIGUEIREDO, A. M. F. New concepts on the development of east Brazilian marginal basins. *Episodes*, v. 11, n. 3, p. 194–202, 1988.
- EIA ENERGY ATLAS. World energy statistics & World energy balances. p. 703, 2020.
- FOLK, R. L. *Spectral subdivision of limestone types*, in Ham, W.E., ed., *Classification of carbonate Rocks-A Symposium: American Association of Petroleum Geologists Memoir 1*, p. 62-84, 1962.
- GUARDADO, L. R.; SPADINI, A. R.; BRANDÃO, J. S. L.; MELLO, M. R. Petroleum system of the Campos Basin, Brazil. *Petroleum systems of South Atlantic margins: AAPG Memoir 73*, p. 317–324, 2000.
- GUARDADO, L. R.; GAMBOA, L. A. P.; LUCCHESI, C. F. Petroleum geology of the Campos Basin, Brazil, a model for a producing Atlantic type basin. *Divergent/passive margin basins*, n. January, p. 3–79, 1990.
- KUCHLE, J.; DOS SANTOS SCHERER, C. M. Seismic stratigraphy of rift basins: Techniques, methods and its application in the Recôncavo Basin. *Sismoestratigrafia de bacias rifte: Técnicas, métodos e sua aplicação na Bacia do Recôncavo*, v. 18, n. 2, p. 179–206, 2010.
- MILANI, E. J.; FILHO, A. T. Sedimentary Basins of South America. *Tectonic Evolution of South America*, n. Rio de Janeiro, p. 389–449, 2000.
- MITCHUM, R. M.; VAIL, P. R.; SANGREE, J. B. Seismic Statigraphy and

Global Changes of Sea Level, Part 6: Stratigraphic Interpretation of Seismic Reflection Patterns in Depositional Sequence. *AAPG Memoir 26: Seismic Stratigraphy-Applications to Hydrocarbon Exploration*, p. 117–133, 1977a.

MITCHUM, R. M.; VAIL, P. R.; THOMPSON, S. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 2: The Depositional Sequence as a Basic Unit for Stratigraphic Analysis. *AAPG Memoir 26: Seismic Stratigraphy-Applications to Hydrocarbon Exploration*, p. 53–63, 1977b.

OKUBO, J.; LYKAWKA, R.; WARREN, L. V.; FAVORETO, J.; DIAS-BRITO D. Depositional, diagenetic and stratigraphic aspects of Macaé Group carbonates (Albian): Example from an oilfield from Campos Basin. *Brazilian Journal of Geology*, v. 45, n. 2, p. 243–258, 2015.

RANGEL, H. D.; MARTINS, F. A. L.; ESTEVES, F. R.; FEIJÓ, F. Bacia de Campos. *Boletim de Geociências da Petrobras*. Rio de Janeiro, 1994.

SCHALLER, H. Estratigrafia da Bacia de Campos. *Congresso Brasileiro de Geologia*, v. 3, p. 247–258, 1973.

SCHLUMBERGER. *Carbonate Reservoirs*. Disponível em: <<https://www.slb.com/technical-challenges/carbonates>>.

VAIL, P. R.; MITCHUM JR, R. M.; THOMPSON III, S. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 3: Relative Changes of Sea Level from Coastal Onlap. *AAPG Memoir 26: Seismic Stratigraphy-Applications to Hydrocarbon Exploration*, p. 63–81, 1977.

WHEELER, H. E. Time-stratigraphy. *AAPG Bulletin*, v. 42.5, n. 5, p. 1047–1063, 1958.

WINTER, W. R.; JAHNERT, R. J.; FRANÇA, A. B. Bacia de Campos. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 15, n. 2, p. 511–529, 2007.

ANEXO A – Linha sísmica R0258-3105 completa em fase normal sem interpretação