

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**TECTÔNICA CENOZOICA E SISMOESTRATIGRAFIA NA PORÇÃO TERRESTRE  
DA BACIA DO ESPÍRITO SANTO, REGIÃO DO DELTA DO RIO DOCE.**

TF-23/01

ALESSANDRO GONÇALVES

SÃO PAULO  
2023

**“TECTÔNICA CENOZOICA E SISMOESTRATIGRAFIA NA  
PORÇÃO TERRESTRE DA BACIA DO ESPÍRITO SANTO,  
REGIÃO DO DELTA DO RIO DOCE. “**

Alessandro Gonçalves

Monografia apresentada para a disciplina  
0440500 - Trabalho de Formatura (2023)  
sob orientação de:

Prof. Dr. André Pires Negrão (Orientador)  
Departamento de Geologia Sedimentar e  
Ambiental (GSA) do Instituto de  
Geociências da Universidade de São  
Paulo (IGc-USP).

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente o Projeto de Formação em Recursos Humanos na área de Petróleo e Gás, vinculado ao Instituto de Geociências, o PRH 43.1, da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, à Finep, que apoiaram minha especialização na área, além do presente trabalho. Um agradecimento especial para Larissa Natsumi, que tanto faz pelo PRH 43.1 e pelos bolsistas.

Ao meu orientador, André Pires Negrão, por todo o apoio, trocas de experiência e discussões que abriram uma nova perspectiva em relação à graduação.

Ao Instituto de Geociências e todos seus docentes e funcionários, por ter sido minha casa nos últimos 5 anos, onde pude me aprimorar como indivíduo e futuro profissional, por todos os ensinamentos e experiências.

As minhas grandes amigas, Catarina e Thayná, que a USP me deu, importantíssimas para que meus dias se tornassem mais suportáveis e que as dificuldades no caminho não parecessem tão ruins assim. Mesmo com nossa relação tendo altos e baixos durante o período de graduação, quero levar vocês para o restante da minha vida, uma vez que realizei sua importância e que não é fácil encontrar pessoas como vocês.

A Tamires, minha companheira de vida por 4 anos durante a graduação, que me ajudou nos piores momentos durante a pandemia, e com quem pude amadurecer e crescer como pessoa. Com certeza esses 4 anos não foram em vão.

Ao Prof. Dr. Claudio Mora, que hoje posso chamar de amigo, por ter me dado muito apoio durante o último ano de graduação.

Ao Colégio Técnico de Limeira e todos os seus docentes e funcionários, por terem diminuído a distância entre mim e a graduação, algo que parecia inalcançável em alguns momentos, se tornou uma transição natural graças aos ensinamentos que adquiri no colégio, tanto no sentido acadêmico como em experiências interpessoais. Local onde conheci pessoas muito especiais e que ainda fazem parte da minha vida de alguma forma, tais como Henrique, Gustavo, Camila, Laura, Renata, Giovana, Lucas, Leticia, Letícia, Pedro e Anna.

Finalmente, gostaria de agradecer a minha família, que sempre acreditou no meu potencial, muito mais do que eu mesmo. A minha mãe, Gilene de Souza Almeida, por ser a pessoa mais doce e amorosa do mundo, por ter me ensinado tanto, me dado confiança em todas as fases da minha vida e colo nos momentos difíceis. Ao meu pai, Alenilson Batista Gonçalves, por ter sido meu espelho desde criança, me ensinado tanto e do seu jeito, demonstrado seu carinho e preocupação por mim. Um agradecimento conjunto, pai e mãe, por terem me dado as condições para estudar, mudando a realidade da nossa família, que não mais precisou deixar os estudos para trabalhar. A minha irmã, Pamela Cristina Gonçalves, por ser minha maior companheira desde que eu sou pequeno, ter ajudado a me educar, me ensinado sobre responsabilidade e ter um papel fundamental em quem sou hoje como pessoa.

## **Sumário**

1.	INTRODUÇÃO .....	1
2.	OBJETIVO E METAS .....	2
3.	FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
4.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	11
5.	RESULTADOS OBTIDOS.....	14
6.	DISCUSSÕES .....	20
7.	CONCLUSÕES .....	22
8.	REFERÊNCIAS .....	23

## **RESUMO**

A tectônica cenozoica é tema de diversas publicações e estudos recentes, principalmente na Margem Atlântica do Sudeste do Brasil, porém, a principal abordagem utilizada é o levantamento estrutural de campo e a análise morfotectônica de lineamentos, redes de drenagens e paleo superfícies de aplanamento. Os principais eventos tectônicos cenozoicos reconhecidos no estado do Espírito Santo são: i) distensão NW-SE holocena; ii) transcorrência dextral E-W pleistocena e iii) transcorrência sinistral E-W miocena. Entretanto, não existem até o momento trabalhos publicados que busquem demonstrar esta tectônica cenozoica e seus efeitos na Margem Atlântica Leste (Região compreendida desde a Bacia do Espírito Santo até a Bacia de Sergipe-Alagoas) em subsuperfície. Deste modo, o presente estudo busca investigar, de maneira exploratória, a tectônica que afetou a porção emersa adjacente à Bacia do Espírito Santo, a partir da integração, amarração e interpretação de dados geofísicos, como seções sísmicas 2D e dados de poços exploratórios.

Palavras-chave: Bacia do Espírito Santo, tectônica cenozoica, sísmica, Delta do Rio Doce.

## **ABSTRACT**

Cenozoic tectonics is the subject of several recent publications and studies, mainly in the Atlantic Margin of Southeastern Brazil, however, the main approach used is field structural survey and morphotectonic analysis of lineaments, drainage networks and paleo-flattening surfaces. The main Cenozoic tectonic events recognized in the state of Espírito Santo are: i) Holocene NW-SE extension; ii) Pleistocene E-W dextral transcourse and iii) Miocene E-W sinistral transurrence. However, to date, there are no published works that seek to demonstrate this Cenozoic tectonics and its effects on the East Atlantic Margin (Region ranging from the Espírito Santo Basin to the Sergipe-Alagoas Basin) in the subsurface. Therefore, the present study seeks to investigate, in an exploratory manner, the tectonics that affected the emerged portion adjacent to the Espírito Santo Basin, based on the integration, mooring and interpretation of geophysical data, such as 2D seismic sections and data from exploratory wells.

Keywords: Espírito Santo Basin, cenozoic tectonics, seismics, Rio Doce Delta.

## **1. INTRODUÇÃO**

A Margem Atlântica Brasileira foi alvo de diversos estudos ao longo dos últimos 50 anos por conta do grande potencial na produção de hidrocarbonetos, principalmente quando se trata das bacias de Campos, Santos e do Espírito Santo, as principais produtoras de petróleo do país.

Neste contexto, mais precisamente na Margem Atlântica do Leste e Sudeste do Brasil, diversos trabalhos buscaram caracterizar os esforços tectônicos de idade cenozoica, buscando os registros dos esforços deixados na superfície.

Riccomini (1989), Salvador (1994) e Salvador e Riccomini (1995) definiram a ocorrência de vários esforços tectônicos que afetaram e condicionaram a formação do *Rift Continental* do Sudeste do Brasil (RCSB), além da região do Alto Estrutural de Queluz, esforços esses reconhecidos e caracterizados também em áreas adjacentes ao RCSB, desde áreas do Rio de Janeiro, como por exemplo encontrado em Ferrari (2001) e Brêda (2012), até o norte do Espírito Santo, como em Bricalli (2011) e Miranda (2009).

A área de estudo se estende pela porção Centro-Norte do Delta do Rio Doce, a norte do canal principal do rio, área essa bem caracterizada nos estudos de Bricalli (2011), Ribeiro (2010) entre outros, quanto a influência da tectônica cenozoica e suas consequências no relevo. Entretanto, a abordagem utilizada nos estudos acima referenciados, se baseia no mapeamento dos esforços tectônicos cenozóicos na superfície, utilizando-se dos conceitos morfotectônicos, mapeando estruturas em escala de mapa, como lineamentos e drenagens afetadas por tectônica, além do reconhecimento de falhas em escala de afloramento, demonstrando de forma clara a influência dos esforços tectônicos cenozóicos no relevo.

A proposta do presente trabalho de formatura, é buscar, de forma exploratória, estruturas que indiquem a atividade tectônica cenozoica e o regime de esforços reconhecidos na literatura atual, porém, em dados sísmicos de subsuperfície na área emersa da Bacia do Espírito Santo, região do Delta do Rio Doce. Desta maneira, pretende-se gerar seções interpretadas e definição de estilos estruturais, a fim de relacionar as deformações encontradas com os eventos reconhecidos em literatura.

## **2. OBJETIVO E METAS**

O objetivo do trabalho proposto é investigar a tectônica cenozoica e seus efeitos em subsuperfície na Margem Atlântica Brasileira Leste. As principais metas do trabalho consistem em organizar e apresentar o mapeamento de estruturas interpretadas em seções sísmicas 2D nos pacotes sedimentares cenozoicos, buscando a correlação entre as deformações encontradas e os eventos tectônicos cenozoicos caracterizados na literatura, que, na área do presente estudo, se limitam a estudos em superfície.

Para atingir o objetivo proposto, as etapas estipuladas para o presente Trabalho de Formatura foram:

1. Organização da base de dados de dados sísmicos e seleção do material a ser utilizado de fato no projeto;
2. Seleção e importação dos dados de poço adquiridos;
3. Definição da área de estudo definitiva, seguido da criação de um ambiente no software OpendTect, com a importação dos dados sísmicos 2D e de poços;
4. Aplicar os atributos sísmicos nos perfis sísmicos 2D para auxiliar nas interpretações;
5. Reconhecimento dos refletores de interesse utilizando os dados sísmicos e de poço, buscando delimitar os pacotes de idade correspondente ao objetivo do estudo;
6. Realizar análise detalhada das linhas sísmicas buscando por falhas e deformações presentes nos refletores, traçando as possíveis falhas;
7. Classificar as estruturas interpretadas conforme os estilos tectônicos atuantes;
8. Relacionar, se possível, os estilos tectônicos encontrados com os eventos cenozoicos reconhecidos na literatura.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Área de Estudo

A área de estudo do presente trabalho está situada na porção emersa da Bacia do Espírito Santo, a leste da cidade de Linhares, acima do canal principal do Rio Doce, na região da plataforma de Regência. Como pode ser observado na figura 1, que também apresenta a disposição dos dados utilizados no projeto.

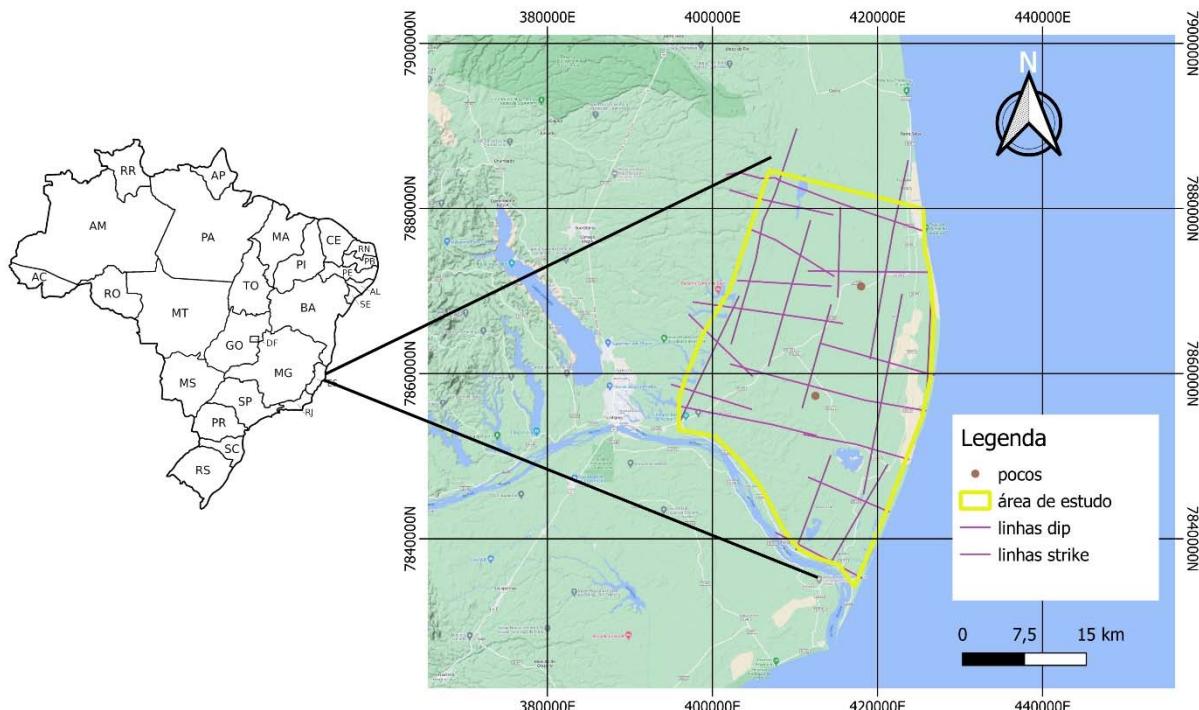


Figura 1: Mapa de Localização da Área de Estudo e dos dados sísmicos e de poços.

#### 3.2 Contexto Geológico

A Bacia do Espírito Santo está localizada entre as Bacias de Campos e a Bacia de Mucuri, limitada ao sul pelo Alto de Vitória, possuindo uma área terrestre de 3000 km<sup>2</sup> (França *et al.*, 2007). Seu embasamento é formado pelas rochas da Faixa Araçuaí, que compõem a porção norte da Província Mantiqueira e limita o Cráton do São Francisco à sudeste. A faixa de dobramentos Araçuaí foi definida por Almeida *et al.* (1977) como a faixa de dobramentos brasilianos adjacente às bordas sul e sudeste do Cráton do São Francisco, em Minas Gerais e regiões vizinhas da Bahia. Segundo Heilbron *et al.* (2004), o Orógeno Araçuaí faz parte do segmento setentrional da Província Mantiqueira, ademais, sintetizaram os compartimentos tectônicos principais:

- Domínio tectônico externo, que compreende porções da Serra do Espinhaço, e se caracteriza pelo transporte tectônico com direção ao Cráton do São Francisco. O metamorfismo é da fácie xisto verde a anfibolito nas rochas supracrustais e não há indícios de magmatismo orogênico;

- b) Domínio tectônico interno, sendo o núcleo metamórfico-anatético do orógeno, com a formação de numerosas rochas graníticas, produzidas em diversos estágios da Orogenese Brasiliana. Na parte mais profunda do núcleo metamórfico se encontram rochas de fácies granulito. Apresentam-se componentes de transporte para sodoeste na região ocidental do domínio, entretanto, na região oriental a direção do transporte é para leste.
- c) Inflexão setentrional, compartimento tectônico que representa a inflexão dos traços estruturais brasileiros. O metamorfismo neste domínio aumenta de norte a sul, partindo da fácies xisto verde no limite com o Cráton do São Francisco, atingindo fácies anfibolito superior na transição com o núcleo interno anatético. O principal componente de transporte está em direção ao norte, contra o Cráton do São Francisco.

A Bacia do Espírito Santo, como outras bacias sedimentares costeiras de margem passiva do Brasil, tem sua formação relacionada a 3 estágios principais, que controlaram a sedimentação e compartimentação dos depósitos (como encontrado em França et al., 2007):

- a) fase rifte (entre 140 e 122 Ma), relacionada com a fragmentação do supercontinente Gondwana e as supersequências deposicionais continentais;
- b) fase pós rifte (entre 123 e 111 Ma), atrelada as sequências transicionais;
- c) fase drifte (111 Ma até o presente), sedimentação marinha, com presença de depósitos siliciclásticos nas áreas mais proximais;

A figura 2 apresenta a geologia regional da área de estudo e a figura 3 apresenta as cartas estratigráficas da Bacia do Espírito Santo, ilustrando as unidades encontradas e sua disposição na bacia.

O Grupo Nativo, de idade cretácea inferior, compreende formações depositadas durante as fases rifte (Fm Cricaré) e pós-rifte (Fm. Mariricu). A Formação Cricaré é dividida em dois Membros, um proximal, Mb. Jaguaré formado por arenitos e conglomerados, que grada para um mais distal, Mb. Sernambi, formado por folhelhos, carbonatos e margas (França et al., 2007). Também ocorrem intercalações derrames vulcânicos e tufo da Fm. Cabiúnas. A Formação Mariricu é formada pelos membros Mucuri e Itaúnas. O primeiro, formado por rochas conglomeráticas na sua base, gradando para arenitos de variadas granulometrias e por fim depósitos lagunares lamosos (VIEIRA, 1998). Já o membro Itaúnas compreende as rochas evaporíticas formadas durante o aptiano.

O Grupo Barra Nova, de idade albiana, correspondente à sequência drifte, se divide em duas formações, que possuem contato gradacional, passando de arenitos da Formação São Mateus, para calcários de alta e baixa energia da Formação Regência (França et al., 2007).

O Grupo Espírito Santo compreende o preenchimento sedimentar da bacia desde cenomaniano até o holoceno. A Formação Urucutuca, formada por folhelhos resultantes do

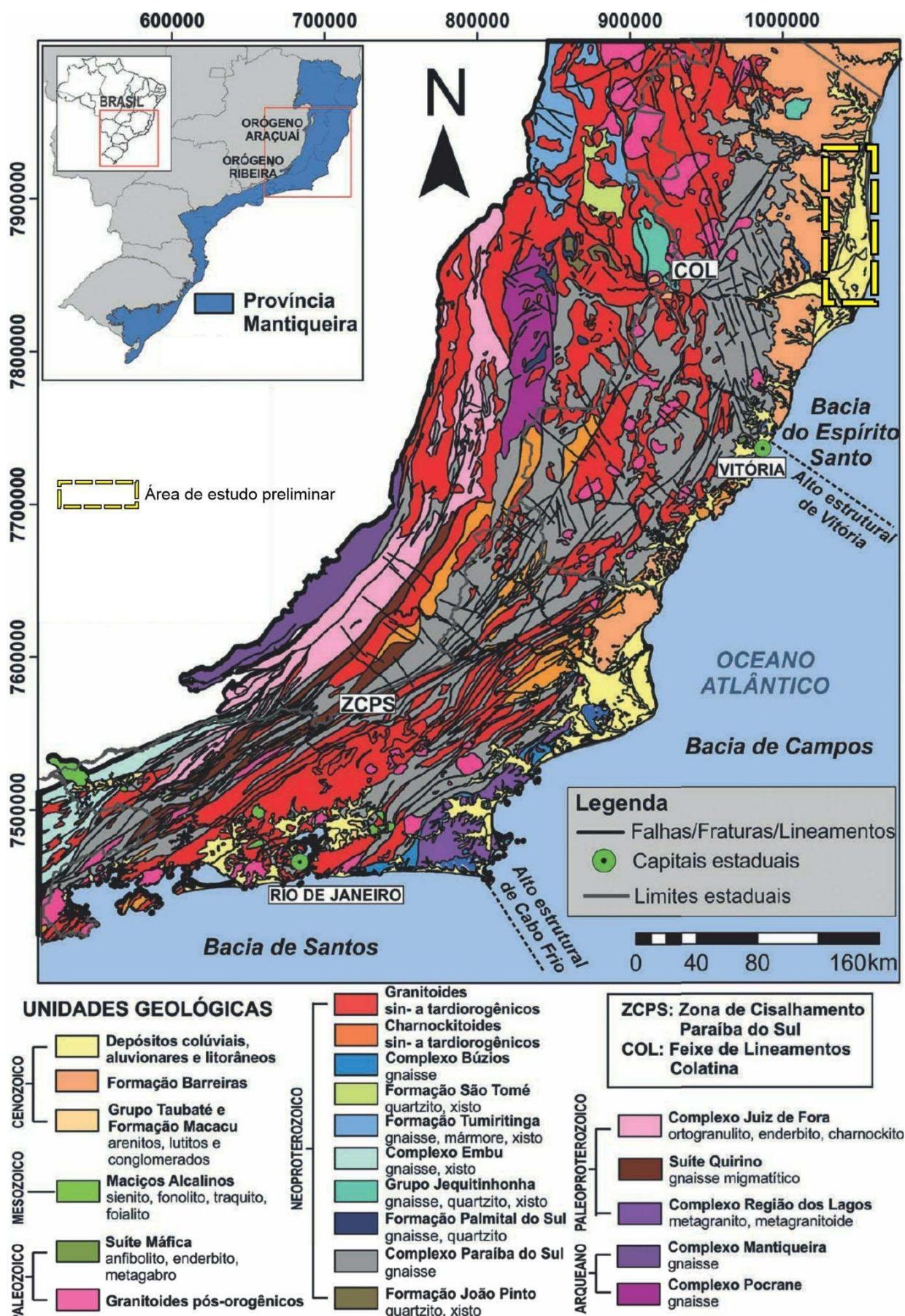


Figura 2: Mapa geológico regional da área de estudo preliminar. Fonte: Breda et al., 2018 a partir de Bizzi et al., 2013.

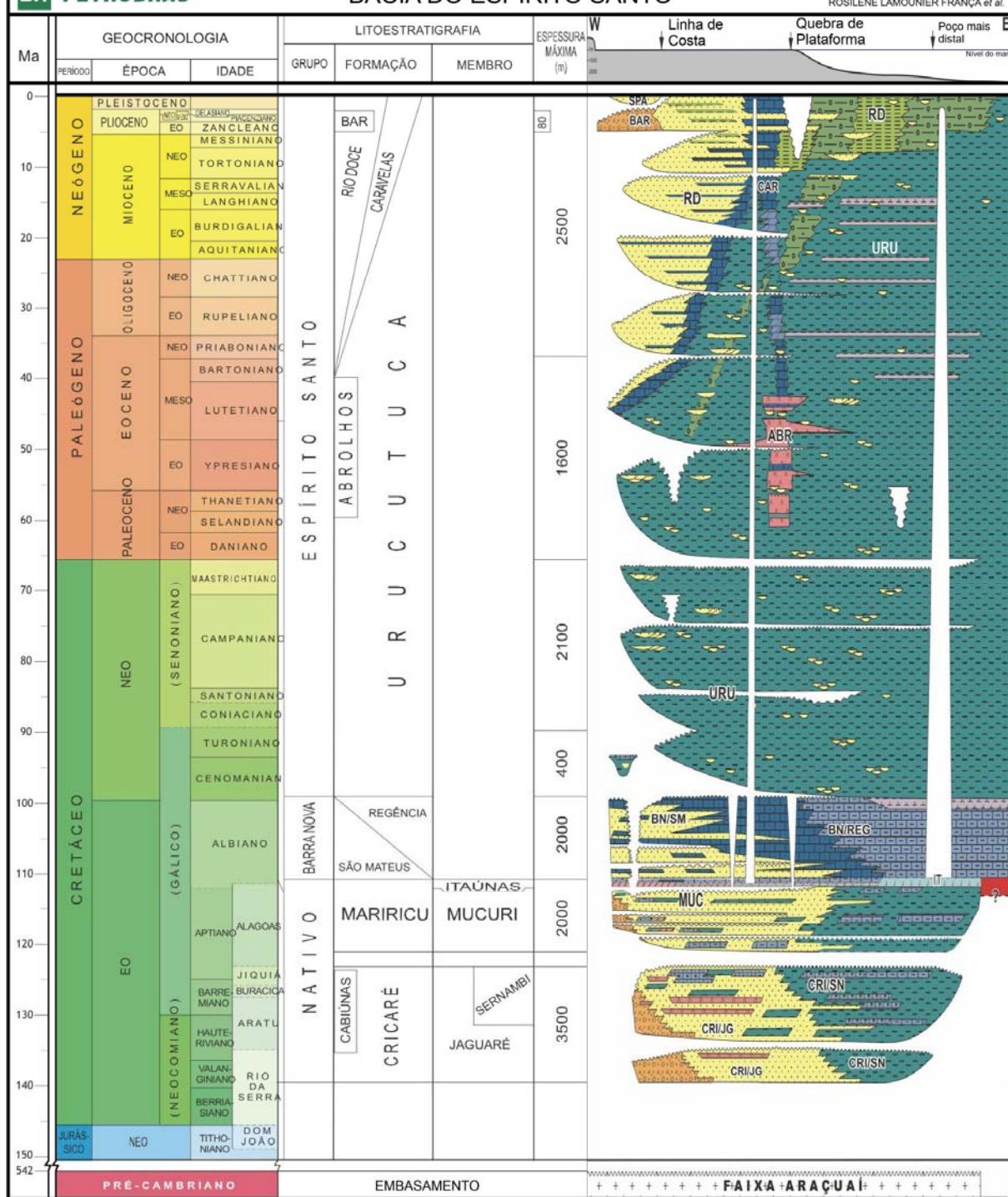


Figura 3: Composição com a Carta Estratigráfica Simplificada e a Carta Litoestratigráfica da Bacia do Espírito Santo. Fonte: França et al., 2007.

afogamento da plataforma carbonática albiana, além de arenitos turbidíticos. Partindo para o Eoceno Médio, inicia-se a deposição concomitante dos arenitos e argilitos da formação Rio Doce, além dos calcários da formação Caravelas, que gradam para os folhelhos da Fm. Urucutuca em porções mais distais. (França et al., 2007).

Além das unidades já citadas, a formação Barreiras de idade pliocênica, que aflora na superfície é formada por sedimentos depositados em condições continentais fluvio/aluviais (França et al., 2007).

Na figura 4 está apresentada uma seção geológica ao longo da bacia do Espírito Santo, apresentando a distribuição das unidades.

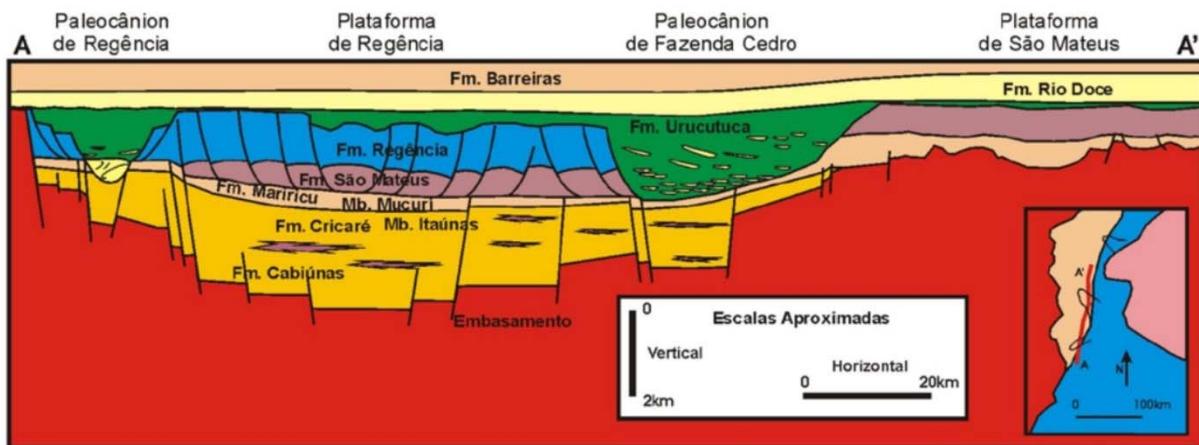


Figura 4: Seção esquemática da parte emersa da bacia do Espírito Santo. Fonte: Bonora e Tschiedel, 2001, relatório interno apud Franca e Tokutake, 2004.

Observando a estratigrafia, uma importante discordância visualizada se trata da passagem do Grupo Barra Nova para o Grupo Espírito Santo, a Discordância Pré-Urucutuca (DPU), que se instalou no final do albiano e que demarca as escavações dos cânions de Regência e Fazenda Cedro (França et al., 2007) e o início do seu preenchimento.

Além disso, outra discordância foi reconhecida na porção emersa da bacia do Espírito Santo, a chamada Discordância Pré-Euceno Superior, se tratando do início da deposição dos sedimentos no Euceno Superior, no caso, das Formações Rio Doce e Caravelas, e o fim dos sedimentos albianos, erodidos no Paleogeno (TAGLIARI et al., 2013).

### **3.3 Tectônica Cenozoica da Margem Atlântica Sudeste/Leste**

A tectônica cenozoica da Região da Margem Atlântica, entre as Bacias de Santos e Espírito Santo, vem sendo caracterizada por trabalhos importantes, como em Riccomini (1989), Salvador e Riccomini (1995) e Riccomini *et al.* (2004), que descreveram o *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) e sua evolução, que foi controlada por diversos eventos tectônicos. Desde então, buscou-se caracterizar e reconhecer melhor, na região do RCSB e suas adjacências, tais eventos tectônicos, utilizando-se principalmente de estudos morfológicos. A figura 5, extraída de Breda *et al.* (2018) apresenta um quadro reunindo os principais trabalhos que reconheceram os eventos tectônicos cenozóicos nas bacias marginais entre Santos e Espírito Santo.

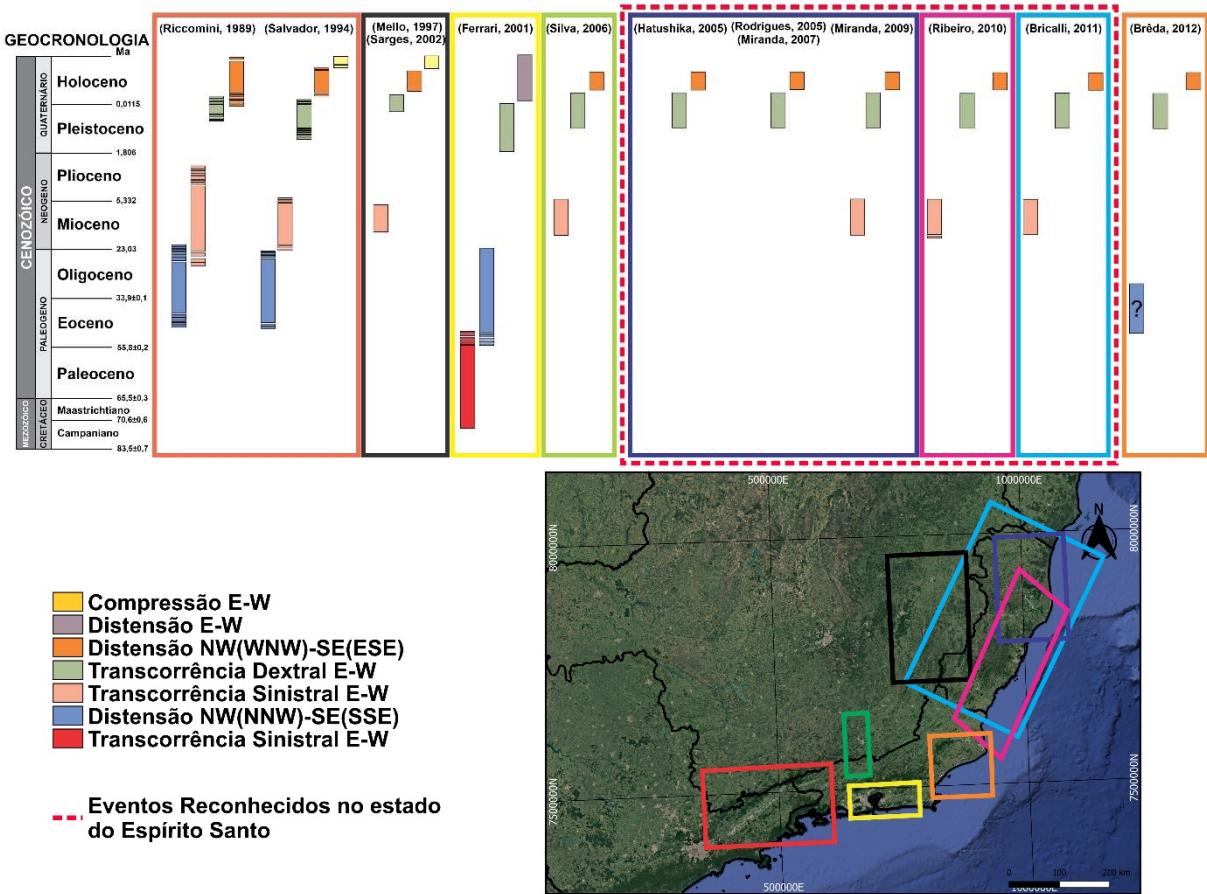


Figura 5: Quadro da Tectônica Cenozoica na Margem Atlântica Sudeste/Leste, com os eventos reconhecidos por diversos autores; Mapa de localização dos estudos citados, classificados por cor. Extraído de Breda et al., 2018.

Os eventos reconhecidos, compilando os estudos realizados nas áreas apresentadas na figura 4 são:

- Transcorrência Sinistral NE-SW: descrita por Ferrari (2001), atuou entre o Campaniano e o Eoceno Inferior (entre 80 e 50 Ma);
- Distensão NW-SE (NNW-SSE): esforço de idade eocênica-oligocênica, formando depressão na forma de hemi-graben, responsável pela deposição das formações Resende, Tremembé e São Paulo, no contexto do RCSB descrita por Riccomini (1989);
- Transcorrência Sinistral E-W: esforço de idade neogênica, descrita por Riccomini (1989);
- Transcorrência Dextral E-W: esforço classificado entre Pleistocênico e Holocênico (Riccomini, 1989);
- Distensão NW-SE (WNW-ESE): descrito por Riccomini (1989), do final do Pleistoceno, mas principalmente caracterizado como um esforço holocênico;
- Distensão E-W: evento extensivo, caracterizado por Ferrari (2001), como um esforço holocênico;

- g) Compressão E-W: definida por Salvador (1994) e Salvador & Riccomini (1995), indicada por famílias de juntas conjugadas. Evento holocênico, que teria se instalado após o regime extensional E-W, perdurando ainda nos dias de hoje.

Os eventos citados acima, além de suas primeiras definições, foram reconhecidos em diversas áreas da Margem Atlântica Sudeste/Leste, o que pode ser observado no quadro apresentado na figura 5, sendo o objetivo deste trabalho, mapear as deformações, principalmente as falhas em subsuperfície, e interpretar os estilos tectônicos, buscando a correlação com eventos reconhecidos na área do Delta do Rio Doce no Espírito Santo e adjacências.

As marcas deixadas por esforços tectônicos na superfície podem ser observadas a partir de falhas, lineamentos no relevo e orientação de drenagens, além de outras várias feições morfológicas. A figura 6 apresenta uma seção de afloramento interpretada, que demonstra as consequências da tectônica cenozoica na superfície, afetando pacotes saprolitizados e coberturas neogênicas.

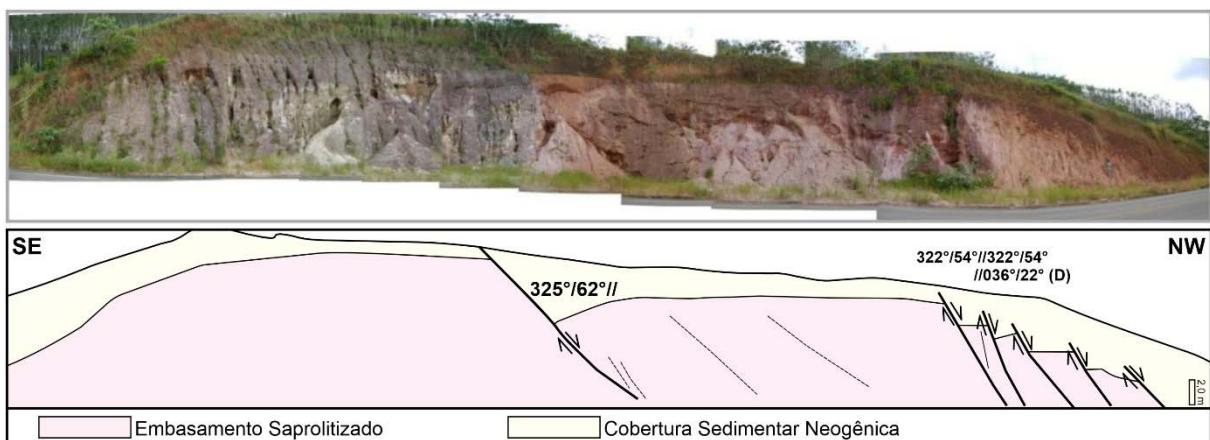


Figura 6: Fotointerpretação do Afloramento MIMOSO DO SUL 04, com a representação das estruturas afetando o embasamento saprolitizado e a cobertura neogênica. Fonte: Ribeiro (2010).

No Espírito Santo são 3 os principais eventos cenozoicos reconhecidos, que estão eles destacados no quadro da figura 4 pela linha tracejada vermelha, e receberam maior destaque na figura 7 abaixo, que além de reunir os 3 eventos apresenta uma visão em mapa dos esforços envolvidos em cada um deles, além das principais falhas formadas e suas direções. São eles:

- 1) Distensão Holocena de direção NW-SE (D)
- 2) Transcorrência Dextral Pleistocena (TD)
- 3) Transcorrência Sinistral Miocena (TS)

A partir desses eventos, as estruturas e estilos tectônicos encontrados serão comparados e discutidos no decorrer deste trabalho.

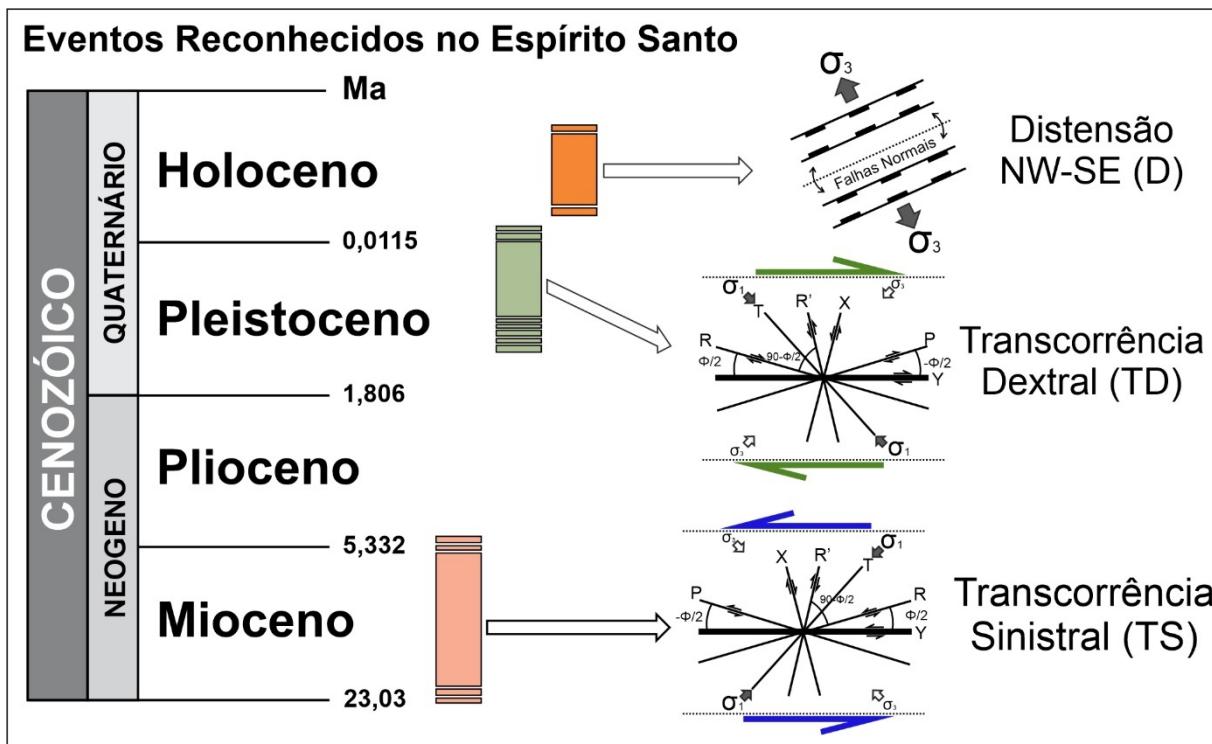


Figura 7: Eventos tectônicos cenozoicos reconhecidos no Espírito Santo, com a representação em mapa das falhas criadas e direção dos esforços envolvidos.

### 3.4 Sísmica de Reflexão

A sísmica de reflexão é o método geofísico mais largamente utilizado e bem conhecido, sendo muito importante para a exploração de hidrocarbonetos, seu avanço tecnológico ao longo da história foi graças aos grandes investimentos da indústria do petróleo e gás natural, juntamente do desenvolvimento eletrônico e computacional empregados nesse método (KEAREY, BROOKS e HILL, 2009).

As seções sísmicas revelam detalhes de estruturas geológicas em várias escalas, desde feições métricas até englobam toda a litosfera (KEAREY, BROOKS e HILL, 2009). A partir do processamento dos dados brutos, são produzidas as seções sísmicas, que se trata de imagens que revelam estruturas em subsuperfície, que dependem do entendimento e conhecimento do método pelo intérprete para receber um significado geológico.

As ondas sísmicas se propagam em subsuperfície em velocidades que dependem da impedância acústica e densidade do meio pelo qual viajam, sendo a impedância acústica ( $Z$ ), é expressa por:

$$Z = V \cdot p \text{ (LINER, 2004)}$$

Onde  $V$  é a velocidade da onda sísmica e  $p$  é a densidade da rocha. Quando uma onda viajando em subsuperfície encontra um limite entre dois meios de diferentes impedâncias acústicas, uma parte da energia reflete, enquanto a outra parte refrata. (MISRA e YADAV, 2018).

A aquisição de sísmicas de reflexão dependem de uma fonte e receptores, que variam com o método de aquisição, além do meio, que pode ser na porção emersa (*onshore*) ou imersa (*offshore*).

Para gerar a perturbação (onda sísmica), um tiro ou vibração é realizado na superfície do mar ou da terra. À medida que a onda se propaga e encontra diferentes meios, cada camada reflete a onda em múltiplos ângulos de incidência, que são medidos em superfície por receptores, hidrofones (mar) ou geofones (terra), como demonstrado na figura 8 abaixo.

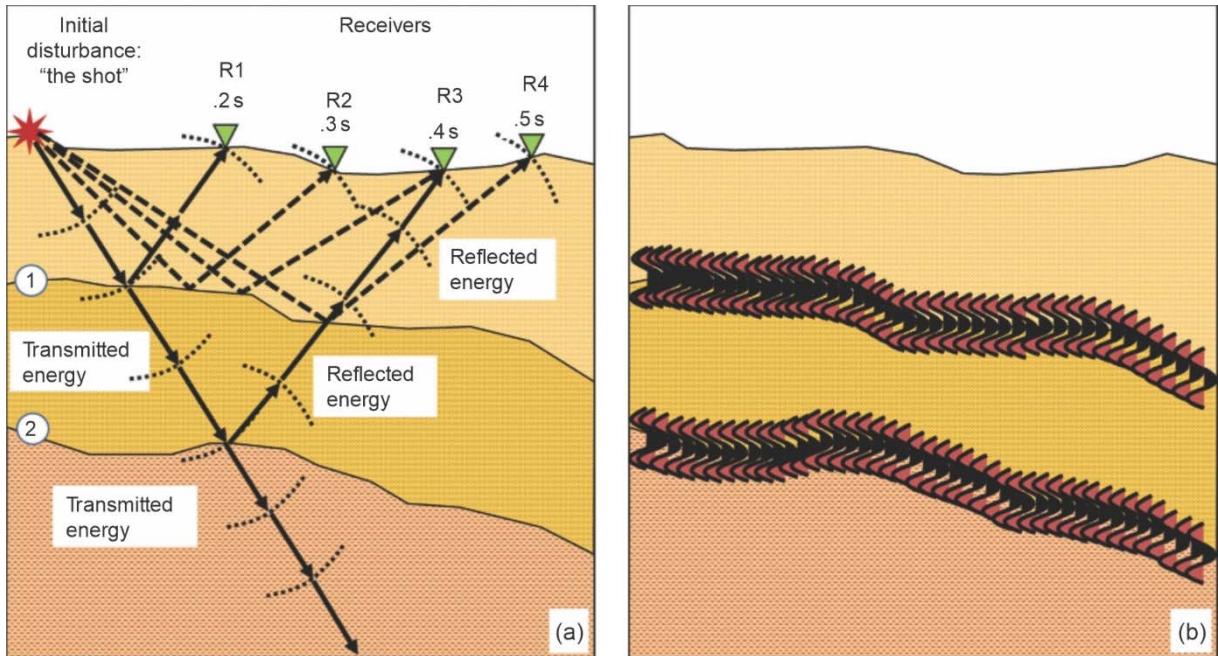


Figura 8: (a) Diagrama esquemático demonstrando o arranjo de transmissão da energia inicial e refletida do ponto de disparo até os receptores individuais; (b) Mostra os traços sísmicos *wiggle* simplificados correspondentes.

A partir do empilhamento dos traços sísmicos *wiggle* os perfis sísmicos são formados, e podem ser convertidos em amplitude do sinal, que é a visualização mais comum das linhas sísmicas.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Dados Sísmicos

Os perfis sísmicos 2D migrados foram obtidos gratuitamente através plataforma REATE (<https://reate.cprm.gov.br/anp/TERRESTRE>), uma parceria entre o Serviço Geológico Brasileiro - CPRM e a Agência Nacional do Petróleo (ANP) para a disponibilização dos dados geofísicos públicos das Bacias Terrestres Brasileiras.

Diversos projetos sísmicos interceptam a região da área de estudo, certamente por conta do interesse na exploração de hidrocarbonetos. O projeto selecionado foi o 0229\_ESPIRITO\_SANTO\_39, projeto da Petrobrás adquirido na década de 1980, que apresenta 113 seções sísmicas 2D migradas, das quais foram selecionadas, com base na qualidade e representatividade espacial da área de estudo selecionada, 10 linhas sísmicas, para a análise detalhada e interpretação.

O conjunto de dados sísmicos selecionados e importados no ambiente do software OpendTect estão representados na figura 9.

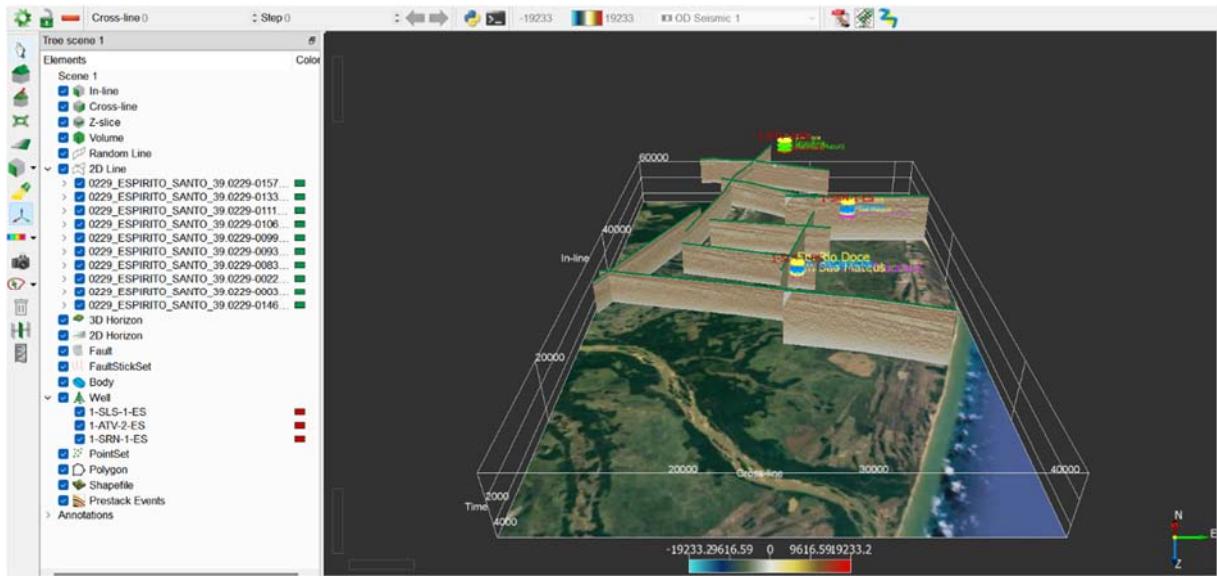


Figura 9: Ambiente do software OpendTect com as sísmicas 2D e os poços importados. O mapa adicionado ajuda na visualização espacial dos dados.

#### 4.2 Dados Geofísicos Não Sísmicos

Além dos dados sísmicos, outros importantes dados geofísicos utilizados serão os dados de poço (perfis geofísicos e compostos), utilizando da malha obtida gratuitamente pela plataforma REATE, e filtrada a partir dos poços com informação da relação entre tempo e profundidade (dados de *checkshot*), que permitem uma amarração entre os poços e dados sísmicos, suportados pelos dados de perfil composto.

Para a importação dos dados de poço, além do uso das coordenadas da perfuração e profundidade da plataforma até o mar, os arquivos de tempo e profundidade (*checkshot*) precisaram ser convertidos para tempo duplo e profundidade (TWT), se tornando compatíveis com os dados de sísmica de reflexão.

Após esse procedimento, foram inseridos os topôs das unidades reconhecidas nos poços, a partir do perfil composto. Também foi realizada a comparação entre os topôs das unidades, a litoestratigrafia e o perfil gama, de forma a confirmar de maneira mais segura a temporaneidade dos refletores. Ao fim da seleção, foram utilizados 3 poços para a correlação dos refletores.

#### 4.3 Interpretação dos Dados Sísmicos

A interpretação dos dados sísmicos, deve ser acompanhada, quando possível, de dados litoestratigráficos de poços e perfis geofísicos, e a caracterização de refletores, sismofácies e estruturas são fundamentados nas propostas metodológicas e princípios encontrados em: Catuneanu (2006); Ashcroft (2011); Veenken (2006); Goudswaard e Jenyon (1988) e Brooks et al (2009).

O software utilizado para a importação e interpretação dos dados sísmicos e de poços será o OpendTect 6.6 (dGB Beheer B.V., 2002-2023), programa gratuito, que possibilita a importação visualização espacial dos perfis sísmicos e a implantação dos atributos sísmicos, além importação de dados de poços.

Além disso, o software aberto QGIS 3.24.2 (QGIS Development Team, 2023), foi utilizado para reunir as informações espaciais dos dados sísmicos e de poços, auxiliando também na integração com as informações presentes na literatura.

#### 4.3.1 Atributos Sísmicos

Os atributos sísmicos são definidos como parâmetros e medidas derivados de dados sísmicos, como tempo, amplitude, frequência e atenuação de ondas sísmicas (CHOPRA e MARFURT, 2005). Os atributos são utilizados para destacar feições ou melhorar a visualização lateral de refletores.

No presente trabalho, os atributos sísmicos foram empregados principalmente para identificar zonas de falhamentos e verificar de forma mais simples a lateralidade de refletores, importante para estabelecer a geometria dos mesmos. Os atributos utilizados foram:

- i) TecVA (Técnica de Volume de Amplitude): proposto inicialmente por BULHÕES (1999) e aprimorado por BULHÕES e AMORIM (2005), esse atributo parte da amplitude RMS, ou amplitude absoluta, além de uma rotação na fase, atribuindo um aspecto de relevo aos refletores, sendo possível identificar falhas mais facilmente.
- ii) Cosine of Phase: também conhecido como amplitude normalizada, este atributo ajuda a melhorar a lateralidade dos refletores sísmicos, além do delineamento de estruturas (BARNES, 2007). O atributo normaliza os valores de amplitude, que variam entre -1 a 1.
- iii) Similarity (MSA): Este atributo é utilizado para a identificação de falhas e estruturas, demonstrando uma espécie de ruído nas regiões deformadas.
- iv) Amplitude RMS: Esse atributo sísmico, corresponde ao correspondente intervalar da amplitude instantânea. Esse atributo destaca refletores com grandes amplitudes, sejam negativas ou positivas.

A figura 10 apresenta os atributos sísmicos utilizados, a partir da sísmica 0229-0157. Os atributos em questão foram aplicados de forma concomitante nas sísmicas, de forma a construir arranjos que combinam 1 ou mais atributos com o dado original, a fim de facilitar a interpretação. Alguns dos arranjos utilizados foram apresentados na figura 11.

# Atributos Sísmicos

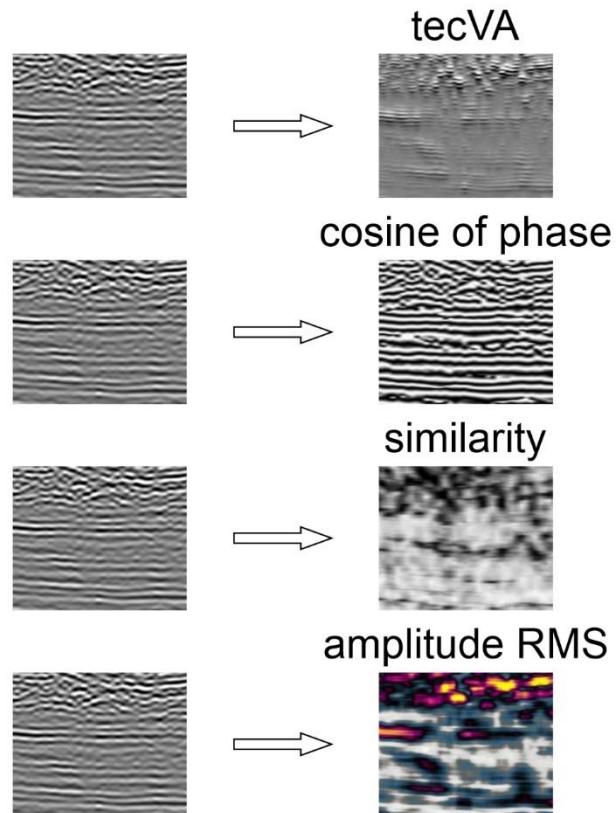


Figura 10: A imagem apresenta a aplicação de 4 atributos sísmicos em uma porção da seção sísmica 0229-0157.

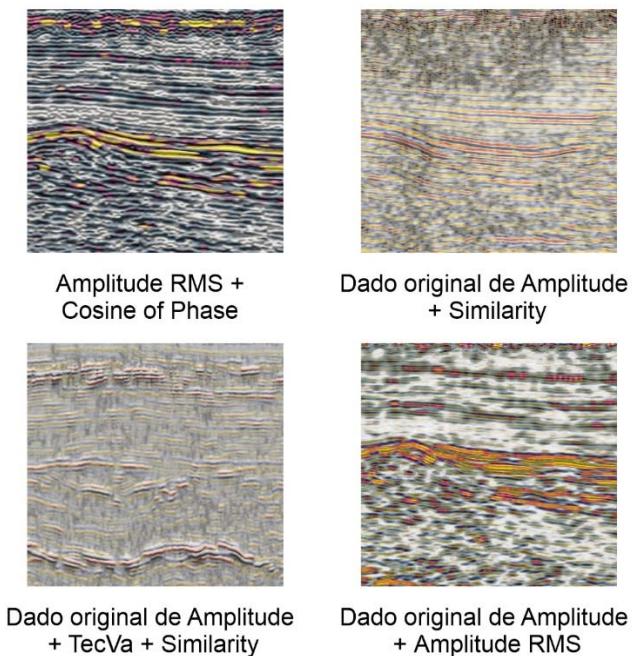


Figura 11: A imagem apresenta arranjos de atributos sísmicos utilizados durante o processo de interpretação de refletores e falhas.

## 5. RESULTADOS OBTIDOS

Para alcançar os resultados esperados, foi necessário um laborioso trabalho de carregamento e correta configuração dos dados sísmicos e de poços no software OpendTect, que culminou na configuração apresentada na figura 10.

A escolha das linhas sísmicas teve como base sua posição e consequentemente representatividade da área de estudo, buscando perfis que apresentam estruturas com a ajuda do atributo sísmico *similarity*, que auxilia no reconhecimento de regiões afetadas por falhas ou outras deformações na continuidade dos refletores.

Na figura 11 abaixo, estão representados o poço 1-SRN-1-ES, o perfil sísmico 0229\_157 e os marcadores dos topos das unidades interceptadas por ele, além do perfil gama natural.

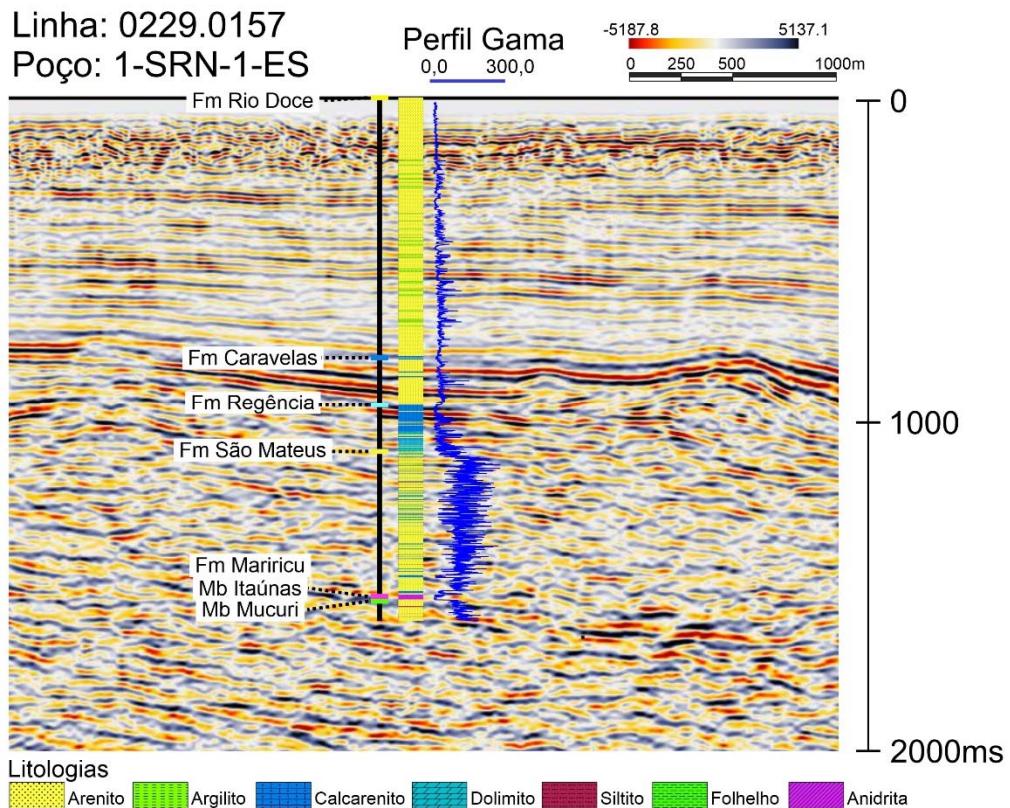


Figura 11: Poço importado associado a sísmica 0229-0157, onde é possível observar os marcadores das unidades Fm Rio Doce, Fm Caravelas, Fm Regência, Fm São Mateus, Fm Mariricu (dividida em Membro Itaúnas e Membro Mucuri).

É possível observar a relação entre as litologias e o perfil gama, que reporta os menores valores de radiotividade nos pacotes de sal (anidrita), nos calcarenitos e dolomitos. Os maiores valores reportados estão relacionados a Fm. São Mateus, correspondendo principalmente aos argilitos e siltitos, além de alguns picos nos arenitos, que provavelmente se trata de rochas com maior concentração de arcóseos.

Com a integração desses dados, juntamente com a carta estratigráfica da bacia do Espírito Santo foi possível definir com mais precisão os pacotes cenozoicos, que estão acima do refletor que demarca o topo da Fm. Regência. A base dos pacotes das Formações Caravelas e Rio Doce são reportadas, na região próxima da linha de costa, como sendo do Eoceno Médio, por volta de 45 Ma (França et al., 2007), porém, como não há subdivisões estratigráficas dentro dessas formações, além de terem sido depositadas de forma simultânea em várias porções da bacia, não foi possível atribuir idade para os refletores dos pacotes

cenozoicos. Assim, o único refletor com controle temporal interpretado nos perfis sísmicos foi a transição entre o topo da Fm. Regência e os pacotes cenozoicos depositados a partir do Eoceno Superior das Formações Caravelas e Rio Doce, a chamada DPES (descontinuidade pré eoceno superior), que marca o final dos efeitos da halocinese nos pacotes sedimentares albianos (Formações Regência e São Mateus) da porção emersa da bacia do Espírito Santo (Tagliari et. Al 2013).

Nas figuras 12, 13 e 14 abaixo estão representadas, duas seções sísmicas *dip* e uma *strike* à bacia interpretadas, o refletor que corresponde à DPES foi demarcado, sendo mais simples identificar essa descontinuidade nas linhas paralelas ao crescimento da bacia, por conta dos refletores terminando em *top lap* ou com a formação da descontinuidade erosiva propriamente dita. Além disso, foram interpretados refletores afetados pelas falhas, que auxiliam na caracterização das deformações nos pacotes sedimentares e posterior definição dos estilos estruturais.

A partir da análise da seção sísmica 0229-0003, que possui uma orientação SSW – NNE, localizada próxima das escarpas formadas pela Fm Barreiras, é possível observar inúmeras falhas, de prolongamentos e mergulhos distintos. As regiões mais falhadas parecem estar relacionadas às localidades com geometrias sinclinais suaves, uma vez que há um claro arqueamento dos refletores mais superficiais, alterando entre sinclinais e anticlinais.

No setor encontrado na imagem a) da figura 15, correspondente à linha 0229-0003 é observado um setor da linha sísmica com diversas falhas, algumas aparentemente normais e outras inversas. É difícil inferir a classificação das falhas sem observar o possível rejeito lateral das falhas, uma vez que se trata de uma região afetada por regimes transcorrentes. Ainda assim, é possível afirmar que, num geral, o setor apresenta um estilo predominante extensional, demarcado por falhas à sul mergulhando para norte e falhas à norte mergulhando para sul.

No setor da imagem b) da figura 15, as falhas possuem menor extensão que as observadas anteriormente. Algumas formam pequenos grábens, evidenciando um estilo extensional na região.

No setor da imagem c), da figura 15, está representada a porção mais à noroeste da linha sísmica 0229-0022, que apresenta um claro arqueamento dos refletores, praticamente dobrados, além de apresentar falhas inversas, que suportam a deformação, que nesse setor, aparenta ser de caráter compressivo.

No setor da imagem d), da figura 15, apresenta um segmento da linha sísmica 0229-

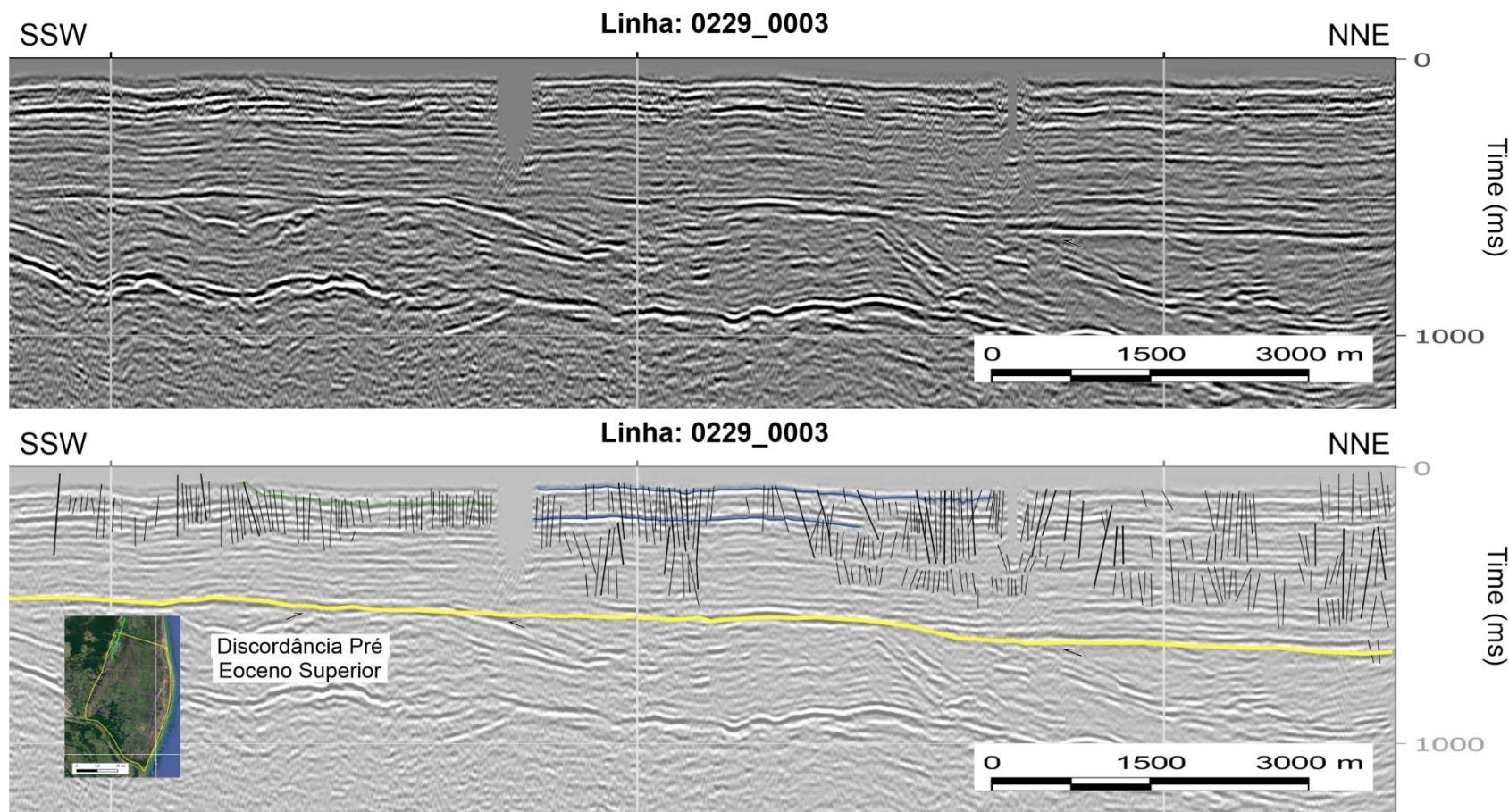


Figura 12: Seção sísmica 0229-0003, strike à bacia. Acima a linha original e abaixo interpretada, com as falhas que cortam os pacotes das Formações Rio Doce e Caravelas, acima da discordância pré-euceno superior. Linha cortada verticalmente em aproximadamente 1300 ms.

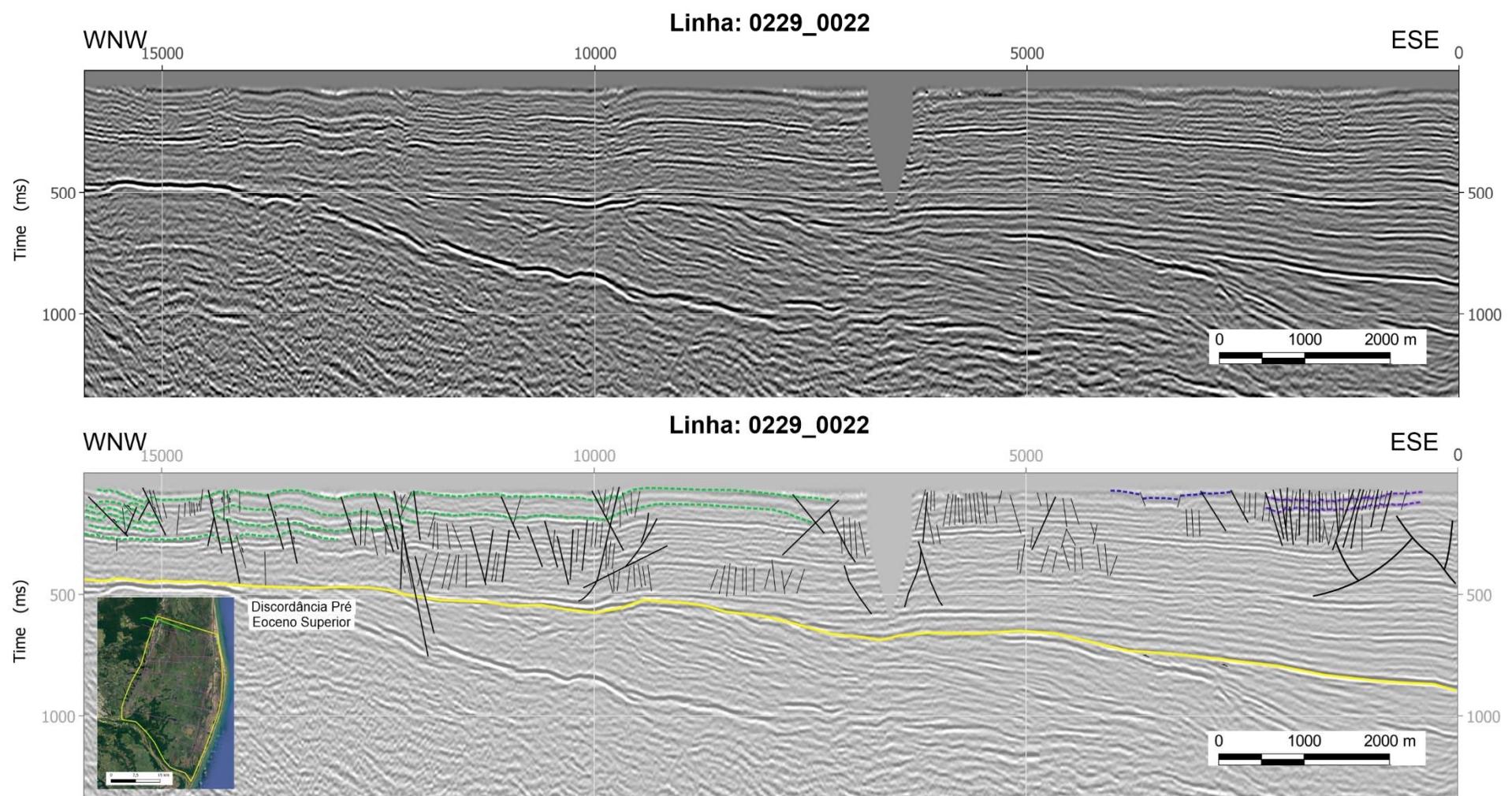


Figura 13: Seção sísmica 0229-0022, dip à bacia. Acima a linha original e abaixo interpretada, com as falhas que cortam os pacotes das Formações Rio Doce e Caravelas, acima da discordância pré-euceno superior, além de refletores interpretados com linhas pontilhadas que auxiliam na observação da geometria dos pacotes. Linha cortada verticalmente em aproximadamente 1300 ms.

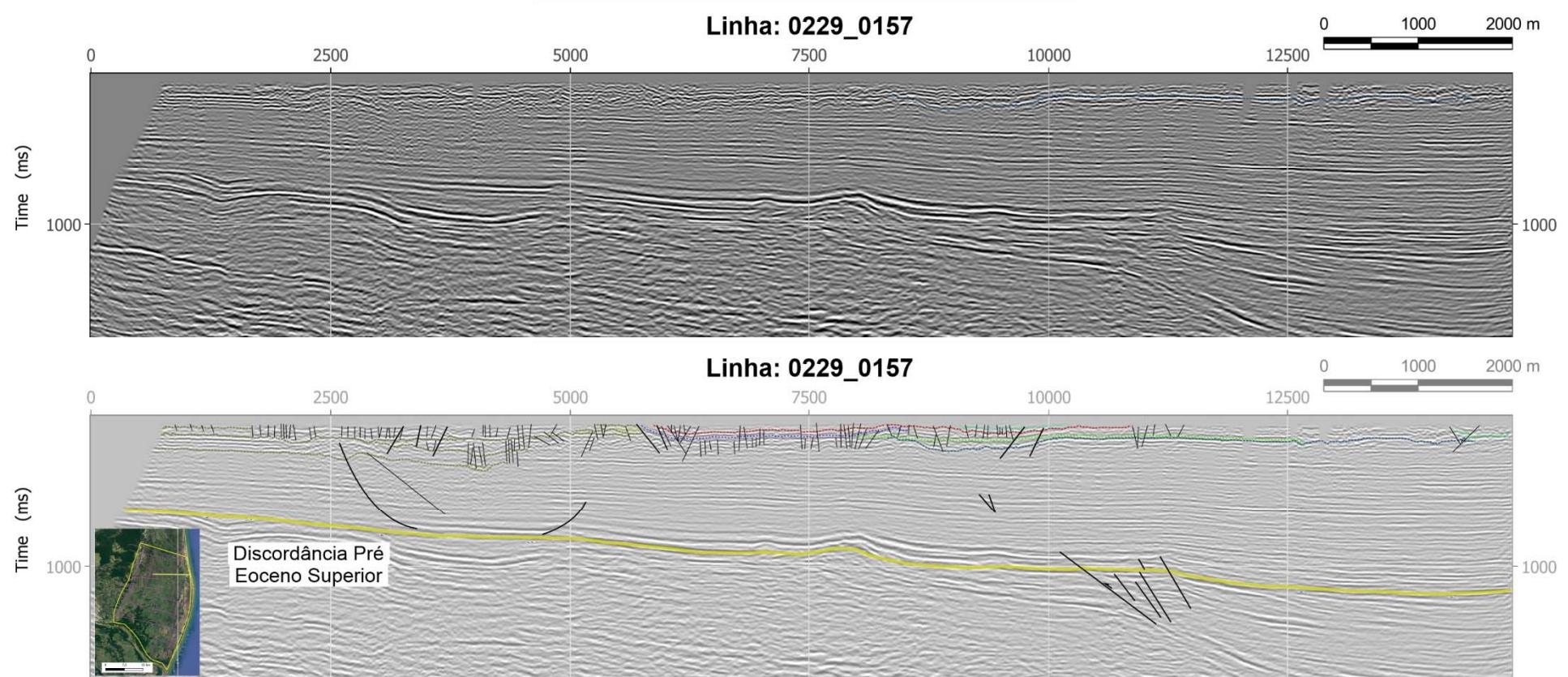


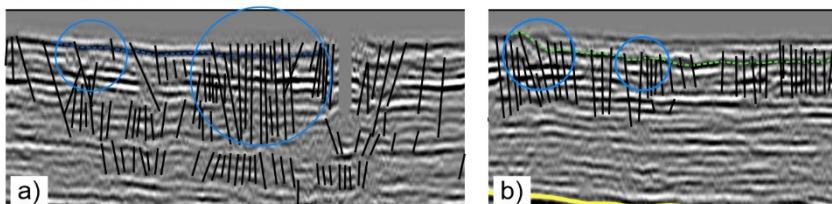
Figura 14: Seção sísmica 0229-0157, dip à bacia. Acima a linha original e abaixo interpretada, com as falhas que cortam os pacotes das Formações Rio Doce e Caravelas, acima da discordância pré-euceno superior, além de refletores interpretados com linhas pontilhadas que auxiliam na observação da geometria dos pacotes. Linha cortada verticalmente em aproximadamente 1700 ms.

0022, à sudeste do setor da imagem c), limita por duas regiões de falhas em flor positiva, que são formadas em regimes transpressionais. Ainda são observadas falhas antitéticas que vão até a base dos pacotes das Formações Rio Doce e Caravelas.

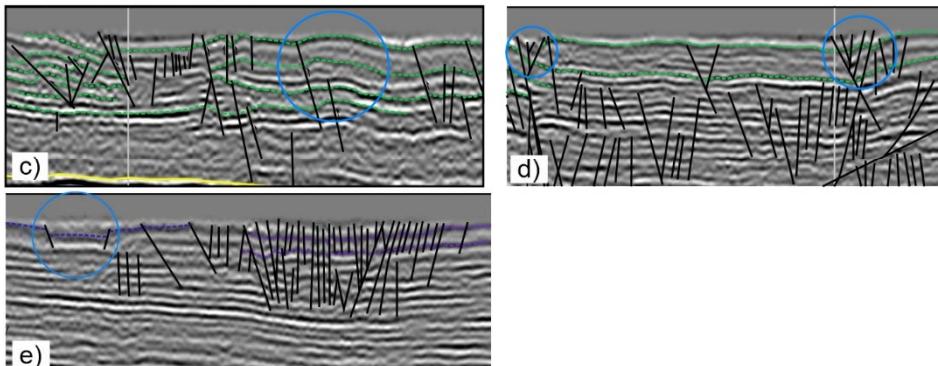
No setor representado pela imagem e) da figura 15, que está localizado na porção mais sudeste da seção sísmica 0229-0022, é possível observar um gráben formado por duas falhas normais. Além disso, mais a sudeste, existe um grande conjugado de falhas, que parecem formar uma grande estrutura de caráter transtensivo.

No setor representado pela imagem f) da figura 15, referente a porção central do perfil sísmico 0229-0157, apresenta-se uma região em forma de vale, talvez um vale inciso preenchido, que acomoda falhas que formam uma flor positiva, característica de ambientes transpressivos, além de algumas falhas normais nas extremidades do possível vale. Ao mesmo tempo, é possível ver um arqueamento de refletores no limite esquerdo desse setor, evidenciando um regime compressivo.

Linha 0229-0003



Linha 0229-0022



Linha 0229-0157

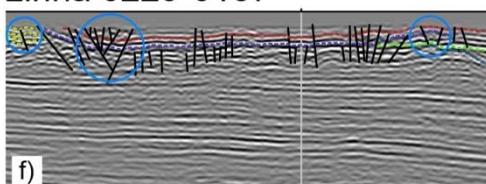


Figura 15: Ampliações das seções sísmicas interpretadas, com foco para algumas estruturas, circuladas em azul.

## 6. DISCUSSÕES

A partir da análise das estruturas e estilos estruturais encontrados, é possível fazer correlações com os eventos cenozoicos reconhecidos em superfície. A orientação das sísmicas analisadas é muito importante para caracterizar as estruturas que aparecem nelas. Já que não foi possível trabalhar com volumes sísmicos 3D, o que se pode fazer é supor a orientação original das falhas, partindo da ideia empírica que as falhas que aparecem nas

sísmicas são perpendiculares ou oblíquas à orientação das sísmicas, já que, se fossem paralelas ou subparalelas, as estruturas não apareceriam de forma clara nas sísmicas.

O primeiro evento cenozoico que teria afetado os pacotes é de idade miocena, a transcorrência sinistral E-W. Esse regime de esforços causa, de forma concomitante, uma compressão de direção NE-SW e uma distensão de direção NW-SE, além disso, as principais falhas que apareceriam nesse contexto, imaginando um cenário que não geraria rejeito direcional de direção E-W, e que a energia desses eventos não teria poder suficiente para isso, seriam as T, X e R' (observar figura 7). Essas falhas, de direção NE-SW, NNW-SSE e NNE-SSW respectivamente, são compatíveis com seções sísmicas de direção NW-SE e W-E, por se apresentarem de forma praticamente perpendicular, evidenciando as estruturas, garantindo um rejeito próximo ao real. Além disso, com a compressão de direção NE-SW, podem se formar dobras, de eixo NW-SE.

As seções compatíveis para a observação dessas estruturas são as duas dip à bacia, 0229-0022 e 0229-157, que possuem direção NW-SE, além disso, a compressão poderia aparecer na seção strike.

Inicialmente, as dobras com eixo de direção NW-SE, apareceriam na seção strike, já que o eixo delas é perpendicular à direção da sísmica. O arqueamento regional dos pacotes superiores, que pode ser visualizado na figura 12, pode ter sido causado por essa compressão.

Outro componente seriam as falhas de rejeito direcional, que teriam sua visualização possível nas sísmicas dip, caso exista uma componente compressiva ou distensiva, gerando estruturas em flor positiva e negativa, respectivamente. Isso pode ser observado no setor d) e f) da figura 15, setores correspondentes das linhas dip, estão destacadas estruturas em flor positiva, características de regimes transpressivas.

O segundo evento cenozoico reconhecido se trata de uma transcorrência dextral E-W de idade pleistocena. Um regime com essas características causa concomitantemente uma compressão NW-SE e uma distensão NE-SW. Pensando na energia do evento, que não atingiria as falhas Y, último estágio de uma transcorrência, as principais falhas geradas por esse regime seriam as T, X e R' (observar na figura 7). Tais falhas teriam direção NW-SE, NNE-SSW e NNW-SSE respectivamente. As falhas T, por fazerem um ângulo muito agudo com as sísmicas de direção NW-SE, principalmente a linha 0229-0022, provavelmente, não sejam contempladas nas linhas dip, além disso, o rejeito direcional das falhas transcorrentes não apareceria nas seções, apenas um rejeito vertical se o regime for transpressivo ou transtensivo. Além disso, a compressão NW-SE, poderia criar dobramentos, de eixo NE-SW, perpendiculares à direção das linhas sísmicas dip, tornando-as boas seções para a visualização desse dobramento.

Esse arqueamento pode estar registrado no setor c) da figura 15, referente à seção sísmica 0229-0022. Além disso, são reconhecidas estruturas de regimes transpressivos, como as

estruturas em flor positiva presentes no setor d) da figura 15, além do setor f), referente à sísmica 0229-0157. Não foi possível definir se as estruturas transpressivas identificadas estão relacionadas somente a TD ou a TS, provavelmente estão relacionadas as duas, sendo nucleadas durante a TS e reativadas durante a TD.

No setor e), referente a sísmica 0229-0022, foram interpretadas diversas falhas conjugadas, de caráter transtensivo, formando uma espécie de flor negativa, porém, que não possui a geometria ideal. Este regime também poderia estar associado a TS, assim como o conjunto de falhas transpressivas já citadas.

Finalmente, a distensão NW-SE holocena, se tornaria presente na forma de falhas normais de direção NE-SW. Com essa direção, a boa visualização delas nas seções sísmicas dependeria de sua orientação exata, ao mesmo tempo, é possível estimar que essa deformação poderia ser observada tanto nas linhas símicas *dip* quanto a *strike*.

Uma clara estrutura de regime distensional está representada no setor e) da figura 15, um gráben formado por duas falhas normais. Além disso, outras falhas normais se tornam presentes em regiões sinclinais em refletores arqueados, como por exemplo no setor b), referente à sísmica *strike* 0229-0003, em que um pequeno gráben se forma na região de charneira de uma dobra suave sinclinal. Além disso, as falhas lístricas, presentes na figura 14, referente à sísmica 0229-0157, podem ter sido originadas por essa distensão, atingindo a base dos pacotes das formações Caravelas e Rio Doce.

## 7. CONCLUSÕES

Os arqueamentos que foram reconhecidos nas seções de orientação NW-SE, são compatíveis e devem estar relacionadas à compressão NW-SE da TD, devido ao eixo das dobras que seriam formadas nesse contexto serem perpendiculares à direção da sísmica, tornando possível o reconhecimento dos dobramentos em 2D.

Quanto as estruturas transpressivas e transtensivas observadas, por conta da falta de controle cronológico dos pacotes da Formação Rio Doce, que ocupam praticamente todo o registro cenozoico da bacia do Espírito Santo, sem divisões internas que possibilitem a atribuição temporal das falhas, não foi possível definir com certeza qual dos eventos transcorrentes teve mais participação no falhamento observado. O que se pode presumir, é que um falhamento originado durante a TS, mais antiga, pode muito bem ter sido reativado durante a TD, mais recente, mesmo que o movimento no plano de falha tenha sentido oposto nos dois eventos, a zona de fraqueza já nucleada seria um caminho mais fácil para a deformação do que a nucleação de novas falhas.

Já as estruturas distensivas correspondentes a D holocena, reconhecidas amplamente em afloramentos, foram interpretadas em apenas alguns setores das sísmicas analisadas, além de pequenas falhas normais em porções sinclinais dos arqueamentos observados.

Com base nos estilos estruturais, é possível supor que os eventos reconhecidos na superfície em literatura, sendo: i) distensão NW-SE holocena; ii) transcorrência dextral E-W pleistocena e iii) transcorrência sinistral E-W miocena, deixaram deformações também em subsuperfície, a partir de falhas normais, inversas, transpressivas e transtensivas, além da provável reativação de falhas mais antigas por eventos mais recentes, como por exemplo falhas nucleadas durante a TS serem reativadas durante a TD, algo que também já foi reconhecido em superfície.

## 8. REFERÊNCIAS

- Almeida, F. F. M. D. (1977). O cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de geociências*, 7(4), 349-364.
- Ashcroft, W. (2011). *A petroleum geologist's guide to seismic reflection*. John Wiley & Sons.
- Biassusi, A. S., Maciel, A. A., & Carvalho, R. S. (1990). Bacia do Espírito Santo: o estado da arte da exploração. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 4(1), 13-19.
- Bizzi, L. A., SCHOBENHAUS, C., GONÇALVES, J. H., BAARS, F. J., DELGADO, I. D. M., ABRAM, M. B., ... & SANTOS, J. O. S. (2003). Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: texto, mapas e SIG.
- Brêda, T. C. (2012). Análise multiescalar da Formação Barreiras na área emersa da bacia de Campos, entre Búzios e Campos dos Goytacazes (RJ). [Dissertação de Mestrado]: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Bricalli, L. L. (2011). *Padrões de lineamentos e fraturamento neotectônico no estado do Espírito Santo (Sudeste do Brasil)* [Dissertação de Doutorado]: Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Brooks, M., Kearey, P., Hill, I. (2009). *Geofísica de Exploração*. Tradução de M. C. Coelho. Oficina de Textos
- Catuneanu, D. (2006). Principles of sequence stratigraphy: Elsevier radarweg publishing. 29. PO Box, 211(1000), 42-54.
- dGB Beheer B.V. (2002-2023). *OpendTect*. (6.6).
- Ferrari, A. L. (2001). *Evolução tectônica do graben da Guanabara*. 412 f (Doctoral dissertation, [Tese de Doutorado] Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- França, R. L., Del Rey, A. C., Tagliari, C. V., Brandão, J. R., & Fontanelli, P. D. R. (2007). Bacia do Espírito Santo. *Boletim de Geociências da PETROBRAS*, 15(2), 501-509.

- Goudswaard, W. B., Jenyon, M. K. (1988). *Seismic atlas of structural and stratigraphic features*. European Association of Exploration Geophysicists. PO box 298.
- Heilbron, M., Pedrosa-Soares, A.C., Campos Neto, M.C., Silva, L.C., Trouw, R.A.J., Janasi, V.A. (2004). Província Mantiqueira. In: V. Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C. D. R., Brito-Neves, B. B. (orgs.), *Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida* (203-235). São Paulo: Beca.
- Miranda, D. J. D. (2007). Análise de Estruturas Rúpteis Associadas a Deformações Neotectônicas na Região Centro-Norte do Estado do Espírito Santo. [Trabalho Final do Curso de Bacharelado]: Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Morais, R. M. O. (2007). Sistemas fluviais terciários na área emersa da Bacia do Espírito Santo (Formações Rio Doce e Barreiras). 144 p. [Tese de Doutorado]: Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- QGIS Development Team, (2023). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>
- REATE, (2020). Programa de Revitalização da Atividade de Exploração e Produção de Petróleo e Gás Natural em Áreas Terrestres. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Ministério de Minas e Energia. <https://reate.cprm.gov.br/anp/TERRESTRE> (acessado em março de 2023).
- Ribeiro, C. S. (2010). *Influência da tectônica pós-deposicional na distribuição da Formação Barreiras entre o rio Paraíba do Sul (RJ) e rio Doce (ES)*. 164 p. [Tese de Doutorado]: Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Riccomini, C. (1989). *O rift continental do sudeste do Brasil*. 256 p. [Tese de Doutorado]: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Riccomini, C., Sant'Anna, L. G., Ferrari, A. L. (2004). Evolução geológica do rift continental do sudeste do Brasil. In: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C. D. R., Brito-Neves, B. B. (orgs.). *Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. p.383-405. São Paulo: Beca.
- Salvador, E. D. (1994). *Análise neotectônica da região do vale do rio Paraíba do Sul compreendida entre Cruzeiro, SP e Itatiaia, RJ* (Doctoral dissertation).
- Salvador, E. D., Riccomini, C. (1995). Cectônica da região do alto estrutural de Queluz (SP-RJ, Brasil). *Revista Brasileira de Geociências*, 25(3), 151-164.
- Tagliari, C. V. (2013). Ambientes de sedimentação mista (silicástica e carbonática), cicloestratigrafia e halocinese durante o Albiano, Plataforma de Regência, Bacia do Espírito Santo. [Tese de Doutorado]: Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Porto Alegre.
- Veeken, P. P. (2006). *Seismic stratigraphy, basin analysis and reservoir characterisation*. Elsevier.