



**Antonio Felipe Terra Pinto de Queiroz**

**ANÁLISE ESTRUTURAL DO EMBASAMENTO NA PORÇÃO  
CENTRAL DA BACIA DE CAMPOS, SUDESTE DO BRASIL:  
COMPREENSÃO SOBRE A EVOLUÇÃO TECTÔNICA DAS  
UNIDADES DO PRÉ-SAL**

**Trabalho Final de Curso  
(Geologia)**

UFRJ  
Rio de Janeiro  
2024



UFRJ

**Antonio Felipe Terra Pinto de Queiroz**

**ANÁLISE ESTRUTURAL DO EMBASAMENTO NA PORÇÃO CENTRAL  
DA BACIA DE CAMPOS, SUDESTE DO BRASIL: COMPREENSÃO  
SOBRE A EVOLUÇÃO TECTÔNICA DAS UNIDADES DO PRÉ-SAL**

Trabalho Final de Curso de Graduação  
em Geologia do Instituto de Geociências,  
Universidade Federal do Rio de Janeiro –  
UFRJ, apresentado como requisito  
necessário para obtenção do grau de  
Geólogo.

Orientador(es):

Leonardo Fonseca Borghi de Almeida

Coorientador(es):

João Paulo Miranda Oliveira

Rafael André Belotto Plawiak

Rio de Janeiro

JULHO 2024



UFRJ

QUEIROZ, Antonio Felipe Terra Pinto de

**ANÁLISE ESTRUTURAL DO EMBASAMENTO NA  
PORÇÃO CENTRAL DA BACIA DE CAMPOS, SUDESTE  
DO BRASIL: COMPREENSÃO SOBRE A EVOLUÇÃO  
TECTÔNICA DAS UNIDADES DO PRÉ-SAL/** Antonio  
Felipe Terra Pinto de Queiroz - - Rio de Janeiro: UFRJ /  
IGeo, 2024.

xii, 054p. : il.; 30cm

Trabalho Final de Curso (Geologia) – Universidade Federal  
do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento  
de Geologia, 2024.

Orientador(es): Leonardo Fonseca Borghi de Almeida, João  
Paulo Miranda Oliveira, Rafael André Belotto Plawiak

1. Geologia. 2. Setor da Graduação – Trabalho de  
Conclusão de Curso. I. Leonardo Fonseca Borghi de  
Almeida. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro,  
Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. III.  
Análise da estrutura estrutural do embasamento na porção  
central da Bacia de Campos, Sudeste do Brasil:  
compreensão sobre a evolução tectônica das unidades  
do pré-sal.

UFRJ  
Rio de Janeiro  
2024



UFRJ

Antonio Felipe Terra Pinto de Queiroz

ANÁLISE ESTRUTURAL DO EMBASAMENTO NA PORÇÃO CENTRAL DA  
BACIA DE CAMPOS, SUDESTE DO BRASIL: COMPREENSÃO SOBRE A  
EVOLUÇÃO TECTÔNICA DAS UNIDADES DO PRÉ-SAL

Trabalho Final de Curso de Graduação  
em Geologia do Instituto de Geociências,  
Universidade Federal do Rio de Janeiro –  
UFRJ, apresentado como requisito  
necessário para obtenção do grau de  
Geólogo.

Orientador(es):  
Prof. Dr. Leonardo Borghi  
MSc. João Paulo Miranda Oliveira  
Dr. Rafael André Belotto Plawiak

Aprovada em: 16.julho.2024  
Por:

---

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Borghi (UFRJ)

---

Prof. Dr. André Ribeiro (UFRJ)

---

MSc. Priscilla Alvarez (Fundação COOPETEC)

UFRJ  
Rio de Janeiro  
2024

Dedico este TCC à minha família e amigos, que através de seu apoio ao longo da graduação e também para este TCC, onde me fizeram ter a força e confiança para a realização desta pesquisa e a conclusão da graduação em Geologia.

## AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço a minha família por todo o suporte durante a vida. Tudo conquistado até aqui e além, eu dedico à Alcioni, Reyla, Antonio, Adalberto e Luma. Aos amigos Ana Cristina, Cláudia, Luccas, Gisele e Guilherme, eu dedico minha gratidão por todo suporte durante a graduação. Aos meus amigos da Geologia UFRJ, especialmente Bruna, Amanda, Bruno e Sarah, que estiveram do meu lado na maior parte da minha trilha desde o BCMT. Amo todos vocês.

Aos colegas do Projeto Campos, que foram pessoas fundamentais na conclusão deste trabalho, em especial, Rafael, Vinícius, Renata e João Paulo, pelos quais tive o privilégio de trabalhar junto. Agradeço por terem me selecionado para ser aluno de IC e por serem compreensivos comigo durante fases turbulentas. Um agradecimento especial aos meus colegas de IC, Ana Clara e Enzo, que me auxiliaram em toda a trajetória deste trabalho. Ao LAGESED/UFRJ, em especial ao Prof. Leonardo Borghi, agradeço por oferecer toda a infraestrutura deste trabalho e por dar oportunidades únicas de produzir ciência de alto nível para os alunos de graduação em Geologia.

Aos professores da Geologia UFRJ, por todo o conhecimento compartilhado, com um agradecimento especial para o Prof. André Ribeiro, que me ajudou a reunir forças para finalizar o curso de Geologia após 2 anos difíceis de pandemia. Também agradeço a todo corpo técnico de motoristas do IGEO, em especial Damião e Vanderlei, com os quais compartilhei memórias no decorrer das viagens Brasil afora.

## Resumo

Terra Pinto de Queiroz, Antonio Felipe. **ANÁLISE ESTRUTURAL DO EMBASAMENTO NA PORÇÃO CENTRAL DA BACIA DE CAMPOS, SUDESTE DO BRASIL: COMPREENSÃO SOBRE A EVOLUÇÃO TECTÔNICA DAS UNIDADES DO PRÉ-SAL**. 2024. xii. 54f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

No contexto do rifte oblíquo da margem brasileira no Cretáceo Inferior, este trabalho objetiva identificar as estruturas que controlam o arcabouço estrutural do embasamento e seus efeitos na evolução das unidades do pré-sal nos campos do Complexo de Marlim, na Bacia de Campos. Utilizaram-se dados sísmicos de reflexão 3D em profundidade e perfis de poços para amarração sísmica-poço. Foram interpretadas falhas e horizontes sísmicos, incluindo o topo do embasamento, discordância U1 e base do sal, gerando mapas de contorno estrutural e de isópacas (embasamento-U1, denominada unidade Rifte e U1-base do sal, denominada unidade Sag). As falhas identificadas, predominantemente sintéticas orientadas na direção NE, segmentadas *en échelon*, formam grábens, hemigrábens e altos estruturais em padrão *right-stepping*. A partir da influência das falhas na arquitetura sedimentar e da geometria do topo do embasamento nas unidades sismoestratigráficas do Rifte e Sag, observaram-se diferentes tempos de atividades de falhas e também foram definidos 3 domínios estruturais, Central, Leste e Oeste. A integração dos mapas de contorno estrutural e isópacas das unidades Rifte e Sag sugerem que as falhas influenciaram até a base do sal, especialmente nas porções NE, NW e SE do domínio Central. Estas configuram um alto estrutural do embasamento, denominado alto central, onde, em suas margens, são observados depocentros segmentados *en échelon*, que configuram rampas de revezamento sintéticas. Conclui-se que o arcabouço estrutural do embasamento possui falhas se propagando até o topo da unidade Sag, com algumas deformando a base do sal. A deformação oblíqua causada em resposta à extensão WNW-ESE do rifte nas estruturas NE herdadas do embasamento Neoproterozóico, propiciou a disposição de depocentros *en échelon*. O padrão segmentado em *right-stepping* sugere uma componente oblíqua sinistral ativa durante a evolução das falhas das unidades Rifte e Sag, resultando em depocentros separados por rampas de revezamento sintéticas na região central da Bacia de Campos.

Palavras chave: Análise estrutural, embasamento, Pré-sal, Bacia de Campos, discordâncias erosivas

## Abstract

Terra Pinto de Queiroz, Antonio Felipe. **BASEMENT STRUCTURAL FRAMEWORK ANALYSIS IN CENTRAL CAMPOS BASIN, SOUTHEAST BRAZIL: INSIGHTS ON THE TECTONIC EVOLUTION OF THE PRE-SALT UNITS**. 2024. Xii. 54f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

In the context of the oblique rift in the Lower Cretaceous, this study aims to identify the structures that control the structural framework of the basement and their effects on the evolution of the pre-salt units in Marlim, in the Campos Basin. Depth 3D seismic data and well profiles for seismic-well tie were used. Faults and seismic horizons were interpreted, including the top of the basement, the U1 unconformity, and the base of the salt, generating structural contour and isopach maps (basement-U1, referred to as the Rift unit, and U1-base of the salt, referred to as the Sag unit). The identified faults, predominantly synthetic and oriented in the NE direction, segmented en échelon, form grabens, half-grabens, and structural highs in a *right-stepping* pattern. From the sedimentary influence of the faults and the geometry of the top of the basement in the Rift and Sag seismic stratigraphic units, different times of fault activity were observed, and three structural domains were defined: Central, East, and West. The integration of structural contour and isopach maps of the Rift and Sag units suggests that the faults influenced up to the base of the salt, especially in the NE, NW, and SE portions of the Central domain. These constitute a structural high of the basement, called the central high, where segmented depocenters en échelon are observed on its margins, forming synthetic relay ramps. It is concluded that the structural framework of the basement has faults propagating to the top of the Sag unit, with some deforming the base of the salt. The oblique deformation caused in response to the WNW-ESE extension of the rift on the NE inherited structures of the Neoproterozoic basement facilitated the arrangement of en échelon depocenters. The segmented *right-stepping* pattern suggests an active sinistral oblique component during the evolution of rift phase faults, resulting in depocenters separated by synthetic relay ramps in the central region of the Campos Basin.

**Key-Words:** Structural analysis, basement, Pre-salt, Campos Basin, erosive unconformities



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Mapa de localização da área de estudo, compreendendo o Complexo de Marlim, na porção central da Bacia de Campos. .... 3
- Figura 2: Diagrama estratigráfico da Bacia de Campos, com destaque para seção pré-sal (Adaptada de Winter et al., 2007). .... 7
- Figura 3: Fluxograma de trabalho, representando os materiais e métodos utilizados. .... 12
- Figura 4: Janela de calibração sísmica do poço 1-BRSA-182-RJS, realizada no software Petrel, com os perfis geofísicos densidade (DENS) e sônico (DT), amarração do perfil sintético com a sísmica 3D e *cross-correlation*. .... 16
- Figura 5: Seção *Strike* (*Crossline* 8000), do centro da área de estudo, onde foi realizada a calibração sísmica-poço. Os horizontes foram mapeados a partir dos *well tops* dos poços 1-BRSA-182-RJS e 6-BRSA-318-RJS e representam o topo do embasamento (vermelho), discordância U1 (azul) e base do sal (rosa). E.V. = 4. .... 17
- Figura 6: Seção *Dip* (*Inline* 1090), do Norte da área de estudo, onde foi realizada a calibração sísmica-poço. Os horizontes foram mapeados a partir dos *well tops* dos poços 1-BRSA-182-RJS e representam o topo do embasamento (vermelho), discordância U1 (azul) e base do sal (rosa). Note as características dos refletores e o truncamento dos refletores em direção ao topo do embasamento E.V. = 4. .... 19
- Figura 7: Mapa de contorno estrutural do topo do embasamento. a) Mapa com falhas e direções de mergulho. b) Mapa com falhas e identificação dos altos e baixos estruturais da área de estudo. Note o alto central em destaque na porção central da área de estudo e o baixo expressivo na porção NE. Os poços 6-BRSA-318-RJS e 1-BRSA-182-RJS estão localizados, respectivamente, ao centro e ao Norte da área de estudo, sendo representados por estrelas. .... 21
- Figura 8: Mapa dos domínios estruturais, sobre o mapa de contorno estrutural do topo do embasamento. À direita, tabela com características estruturais e estratigráficas de cada domínio. .... 22
- Figura 9: Seção randômica NE-SW. Observa-se a características individuais dos domínios estruturais, delimitados sobre as falhas representativas das mudanças. Note a diferença da espessura sedimentar e dos rejeitos em cada domínio, com as falhas deformando desde o embasamento até a base do sal. Exagero vertical (E.V) = 3.5. .... 23
- Figura 10: Seção *Dip* (*Inline* 1242), do Norte da área de estudo, abrangendo todos os domínios estruturais. As características da discordância U1 são apontadas pelas setas brancas, com os estratos sub-horizontais nos domínios Oeste e Leste e comportamento erosivo sobre as unidades Rife no domínio Central. E.V.=3. .... 26
- Figura 11: Mapa de contorno estrutural da discordância U1. a) Mapa com as falhas que se propagam até este horizonte em transparência, e], as falhas que cortam a discordância e se propagam para a unidade acima, representadas em preto. b) Mapa com falhas e identificação do alto central e altos e baixos periféricos do embasamento. .... 27
- Figura 12: Seção *Strike* (*Crossline* 8652), abrangendo o domínio Central, onde é possível observar as características da base do sal. Note a subsidência do sal na porção SW, associada à pouca espessura da unidade Sag. EV= 3.5. .... 29
- Figura 13: Mapa de contorno estrutural da base do Sal. Nota-se que as maiores profundidades estão localizadas nas porções SE e E do mapa, assim como as menores concentram-se desde o Sudoeste até o Norte. a) Mapa com as falhas que se propagam até este horizonte

(transparentes). b) Mapa com falhas e identificação dos altos e baixos estruturais do embasamento da área de estudo..... 30

Figura 14: Seção *Dip (Inline 4042)*, NW-SE, abrangendo os domínios estruturais Oeste e Central, na porção Sul da área de estudo. A figura mostra falhas em estilo dominó deformando a unidade Rífte e, para a unidade Sag, nota-se o afinamento da espessura dos depocentros na porção Sul, de NW para SE, na área de estudo. As setas brancas indicam terminações em *toplap* do Sag na base do sal. E.V=3..... 31

Figura 15: Mapa de isópacas da unidade Rífte, com as menores espessuras localizadas desde o NNE até o SE, passando pela parte central da área. Os maiores depocentros concentram-se nas margens NE e NW. a) Mapa com as falhas e direções de mergulho que se propagam a unidade Rífte b) Mapa com as falhas e a disposição *en échelon* dos depocentros. .... 312

Figura 16: Mapa de isópacas da unidade Sag, com as menores espessuras na margem SE e as maiores nas margens NE e SW. a) Mapa com as falhas que se propagam até a discordância U1 (transparentes) e as falhas com direções de mergulho que se propagam na unidade Sag (preto). b) Mapa das falhas e a disposição *en échelon* dos depocentros. .... 34

Figura 17: Sobreposição dos principais altos e baixos estruturais da Bacia de Campos sobre a área de estudo. a) Alto externo e Gráben Leste (Guardado et al., 2000) com a área de estudo em destaque. b) Alto Externo (vermelho) e Gráben Leste (azul) projetados sobre a área de estudo. Note que algumas falhas deste trabalho coincidem geograficamente e em *strike* aproximado com as falhas de Guardado et al. (2000)..... 37

Figura 18: Comparação entre os mapas de contorno estrutural com falhas, altos (1) e baixos (2) estruturais do embasamento. a) Mapa do Topo do embasamento; b) Mapa da discordância U1; c) Mapa da Base do Sal, com as falhas que se propagam até este horizonte, transparentes. O controle estrutural das falhas nas porções NW, NE e SE do alto central é indicado pela linha branca tracejada em b e c. .... 37

Figura 19: Seção *Dip (Inline 2842)*, NW-SE, do centro da área de estudo, abrangendo todos os domínios estruturais. Note o controle estrutural das falhas sintéticas, com os tempos de atividade divididos nas falhas que se propagam até a discordância U1 e falhas que se propagam até a base do sal, delimitando o domínio central. Note também que as falhas antitéticas se propagam até a discordância U1 e que o baixo periférico do embasamento no domínio Oeste, com grande preenchimento sedimentar. Exagero vertical = 3..... 39

Figura 20: Comparação entre os mapas de contorno estrutural do topo do embasamento com os mapas de isópacas. a) Mapa do topo do embasamento, com falhas e identificação dos altos e baixos estruturais; b) Mapa de isópacas da unidade Rífte, com as falhas e a disposição *en échelon* dos depocentros; c) Mapa de isópacas da unidade Sag, com as falhas e a disposição *en échelon* dos depocentros. Notar também o padrão das falhas sintéticas segmentadas por *relay ramps*, e o controle estrutural do alto central e baixos e altos periféricos do embasamento nas unidades do pré-sal. .... 42

Figura 21: Comparação dos modelos de zonas de acomodação (Faulds & Varga 1998) com a disposição das falhas observadas na área de estudo. Note o mesmo padrão tectônico no modelo proposto para sistemas sintéticos e antitéticos em mapa e seção. a) Modelo em mapa para zona de acomodação sintética oblíqua. b) Bloco diagrama mostrando o sistema sintético em seção da zona de acomodação c) Mapa de contorno estrutural do embasamento com destaque a zona de acomodação antitética oblíqua na margem SE do alto central. d) Seção *Dip (Inline 2842)*, NW-SE, interpretada, do centro da área de estudo, indicando as zonas de acomodação (Z.A) sintéticas e falhas antitéticas que configuram pequenos *horsts* observados..... 45



## Sumário

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>VI</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>IX</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo .....	2
1.2 Área de Estudo .....	2
<b>2 GEOLOGIA REGIONAL .....</b>	<b>4</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>10</b>
3.1 Materiais .....	10
3.1.1 Revisão Bibliográfica .....	10
3.1.2 Volume sísmico .....	10
3.1.3 Poços .....	11
3.1.4 Softwares .....	12
3.2 Métodos .....	12
3.2.1 Calibração sísmica-poço .....	13
3.2.2 Análise Estrutural .....	13
3.2.3 Análise sismoestratigráfica .....	14
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>16</b>
4.2 Análise estrutural e sismoestratigráfica .....	17
4.2.1 Descrição do topo do embasamento .....	18
4.2.1.1 Mapa de Contorno estrutural do topo do embasamento .....	20
4.2.1.2 Domínios estruturais .....	21
4.2.2 Descrição da discordância U1 .....	25
4.2.2.1 Mapa de contorno estrutural da discordância U1 .....	27
4.2.3 Descrição da Base do Sal .....	28
4.2.3.1 Mapa de contorno estrutural da Base do Sal .....	29
4.3 Unidades do pré-sal .....	30
4.3.1 Unidade Rife .....	30
4.3.1.1 Mapa de isópacas da unidade Rife .....	32
4.3.2 Unidade Sag .....	33
4.3.2.1 Mapa de isópacas da unidade Sag .....	33
<b>5 DISCUSSÕES .....</b>	<b>35</b>
5.1 Comparação de estruturas locais e regionais .....	35
5.2 Influência das estruturas do embasamento na discordância U1 e base do sal .....	37
5.3 Influência do arcabouço estrutural do embasamento nas unidades do pré-sal .....	41
5.4 Análise do timing da atividade das falhas e seus efeitos tectônicos nas unidades do pré-sal .....	46
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>50</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>52</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Na década de 70, foi iniciada a unidade exploratória na Bacia de Campos, inserida no contexto offshore da margem Leste do Brasil. Através da aplicação de levantamentos geofísicos, foram identificados potenciais reservatórios associados a turbiditos (Cenomaniano), carbonatos (Albiano) e arenitos (Eoceno) com potencial capacidade de armazenar hidrocarbonetos, nos quais, com a perfuração dos primeiros poços, ocorreu a confirmação do potencial produtor da bacia no campo de Garoupa, em 1974 (ANP, 2017). A partir disso, com a implantação de novos levantamentos nos anos subsequentes, ocorreu a descoberta dos campos de Marlim, área de estudo deste trabalho (Figura 1), um dos responsáveis por tornar a Bacia de Campos a maior produtora de hidrocarbonetos do país na década de 90, mantida até as descobertas no intervalo pré-sal da Bacia de Santos entrarem em produção (ANP, 2017).

Segundo dados divulgados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis (ANP), em novembro/2023, a Bacia de Campos foi considerada a 2ª maior produtora do país, concentrando 23% da produção brasileira de petróleo e 9% da produção de gás natural, aparecendo na 3ª posição nacional de produção deste produto. No mesmo relatório, os campos produtores de Marlim Leste, Marlim Sul e Marlim (Complexo de Marlim) aparecem, respectivamente, como os 13º, 14º e 20º maiores produtores de petróleo no país, com o campo Marlim Leste produzindo 70 Mbbl/d nos intervalos pré e pós sal, com 88% concentrada no intervalo pós sal (ANP, 2023).

Dentro deste contexto, a região do Complexo de Marlim, que abrange toda área de estudo, na porção central da bacia, desperta grande interesse para investigações em escala de detalhe, devido à inflexão observadas nas principais estruturas que controlam a região, do trend NE para

o trend N/NNE (Guardado et al., 1989). Isso resulta na configuração do sistema petrolífero e da migração dos hidrocarbonetos até os potenciais reservatórios.

Desta forma, a partir da utilização de dados recentes de sísmica de reflexão de alta resolução em 3D, uma ferramenta de trabalho crucial para caracterização e compreensão da evolução tectonoestratigráfica da área de estudo, foi possível interpretar com mais acurácia as falhas geológicas inseridas no contexto da bacia. Assim, considerando a análise estrutural e estratigráfica das unidades do pré-sal, este trabalho busca investigar a influência das falhas do embasamento acústico no controle estrutural, na deposição e na deformação das unidades do pré-sal na região do Complexo de Marlim.

## **1.1 Objetivo**

Este trabalho tem como objetivo principal a análise estrutural do embasamento acústico, visando compreender a evolução tectônica das unidades do pré-sal. Como objetivos secundários, pretende-se identificar horizontes sísmicos (topo do embasamento, discordância U1 e base do Sal), definir domínios estruturais e gerar mapas de contorno estrutural e de isópacas, com intuito de identificar o controle estrutural na deposição e deformação das unidades do pré-sal.

## **1.2 Área de Estudo**

A Bacia de Campos está localizada na região Sudeste do Brasil, possui aproximadamente 110.000 km<sup>2</sup>, e tem seus limites Norte e Sul definidos respectivamente pelo Alto de Vitória, na fronteira com a Bacia do Espírito Santo, e pelo Alto de Cabo Frio, que a separa da Bacia de Santos (Winter et, al. 2007).

A área de estudo localiza-se na porção central da Bacia de Campos, a aproximadamente 180 km do município de Macaé-RJ, e é representada por um polígono com área de aproximadamente 1160 km<sup>2</sup>, também correspondente à malha de dados sísmicos 3D utilizada neste trabalho e que abrange a região do Complexo de Marlim (Figura 1).

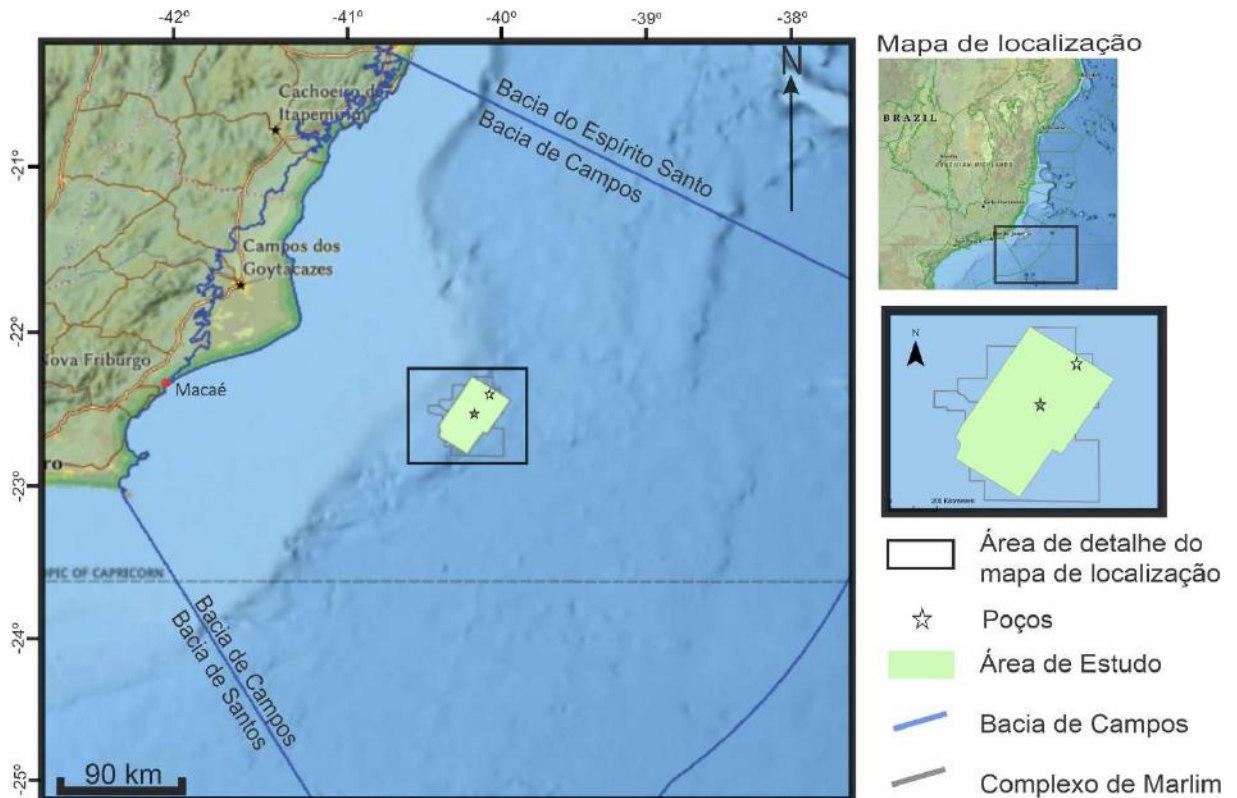


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo, compreendendo o Complexo de Marlim, na porção central da Bacia de Campos.

## 2 GEOLOGIA REGIONAL

O embasamento da Bacia de Campos compreende as rochas do Cinturão Ribeira, também designado como Orógeno Ribeira, além de rochas relacionadas ao DTCTF - Domínio Tectônico Cabo Frio (Heilbron et. al, 2008), que abrange o Sudeste do Brasil. Está inserido no contexto colisional que gerou o supercontinente Gondwana, durante o evento Brasiliano-Pan Africano, no Neoproterozóico (Almeida et al., 1981). A faixa faz parte de uma entidade geotectônica mais ampla conhecida como Província Mantiqueira (Almeida et al., 1981), e é caracterizada por uma sequência de eventos marcantes de colisões continentais e orogenias ao longo de sua história geológica.

A evolução tectonossedimentar de margem uma continental passiva é definida por White & McKenzie (1989) como sendo resultante do estiramento litosférico e afinamento crustal na fase Rife e, em sequência à subsidência termal (Mohriak, 2004; Mantesso-Neto et al., 2004; Domingues, 2011). Para a Bacia de Campos, alguns autores sugerem que a taxa de afinamento crustal foi acentuada devido à manifestações iniciais da pluma mantélica Tristão da Cunha, com derrames de rochas básicas correlatas à Província Magmática Paraná-Etendeka (Maia et al., 2003; Svensen et al., 2018), intensificando a subsidência térmica. Estes derrames fazem parte do embasamento acústico da Bacia e pertencem à Formação Cabiúnas (Winter et al., 2007).

Este processo de separação continental entre as placas Sul Americana e Africana foi responsável pela formação do oceano Atlântico Sul e, conseqüentemente, pela formação das diversas bacias sedimentares da margem continental leste brasileira (Mohriak et al., 1998a; Mohriak, 2003), como a Bacia de Campos, que é delimitada por altos estruturais do embasamento, como o Alto do Cabo Frio, ao Sul, localizado em águas profundas e é um alto



vulcânico. Já ao Norte, é delimitada pelo Alto de Vitória, que se localiza em águas rasas da plataforma continental. Durante esse processo, aproveitando a orientação NE-SW e NW-SE das estruturas existentes do embasamento, formaram-se grábens, hemigrábens e horsts de mesma orientação, controlados por falhas normais, configurando altos estruturais e depocentros na forma de blocos rotacionados chamado “padrão dominó” (Guardado et al., 1989). Dentre os principais altos e baixos estruturais, destacam-se o Alto Externo e o Gráben Leste, que se localizam na porção mais distal da bacia e são estruturas que tem uma grande influência estrutural na porção central da Bacia de Campos. Essas estruturas se configuram sub paralelas à linha de costa continental, onde, posteriormente, com a evolução tectônica, essas zonas de acumulação transformaram-se em grandes bacias de margem continental passiva (Mohriak et al., 1995).

Durante os estágios iniciais de rifteamento continental, os segmentos do rifte tendem a seguir zonas de fraquezas litosféricas pré-existentes (Corti, 2012). Como essas fraquezas são muitas vezes descontínuas, tendem a ser seguidas por segmentos de falhas extensionais no início de rifteamentos oblíquos, configurando o padrão *en échelon* (Morley et al., 2004). Para os riftes oblíquos, a direção de extensão não é ortogonal ao strike das estruturas (Bennett & Oskin, 2014). Neste contexto, a variação do ângulo entre a direção da extensão e o strike das estruturas resultantes pode gerar padrões sinistrais e/ou dextrais: os modelos de extensão oblíqua sinistral desenvolvem falhas internas *en échelon*, dispostas a direita (*right-stepping*), enquanto os modelos de extensão oblíqua dextral formam falhas internas *en échelon*, dispostas para a esquerda (*left-stepping*) (Zwaan & Schreurs, 2017). A conexão entre essas estruturas ocorre através de zonas de acomodação ou de rampas de revezamento (*relay ramps*), que acomodam a deformação em sistemas de falhas normais, podendo ser sintéticas e antitéticas. Zonas de acomodação sintéticas compreendem sistemas de falhas normais sobrepostas e mesmo

mergulho, enquanto zonas de acomodação antitéticas incorporam falhas normais sobrepostas e de mergulho oposto (Faulds & Varga, 1998).

A abordagem cronoestratigráfica utilizada no presente trabalho foi proposta por Winter et al. (2007) que compartimentou o preenchimento sedimentar em três grandes supersequências: Rifte, pós-Rifte e Drifte. Entretanto, como a área de interesse deste estudo contempla apenas as rochas do pré-sal que pertencem às unidades Rifte e pós-Rifte da Bacia de Campos (Figura 2), o estudo das unidades da supersequência Drifte não farão parte deste trabalho.

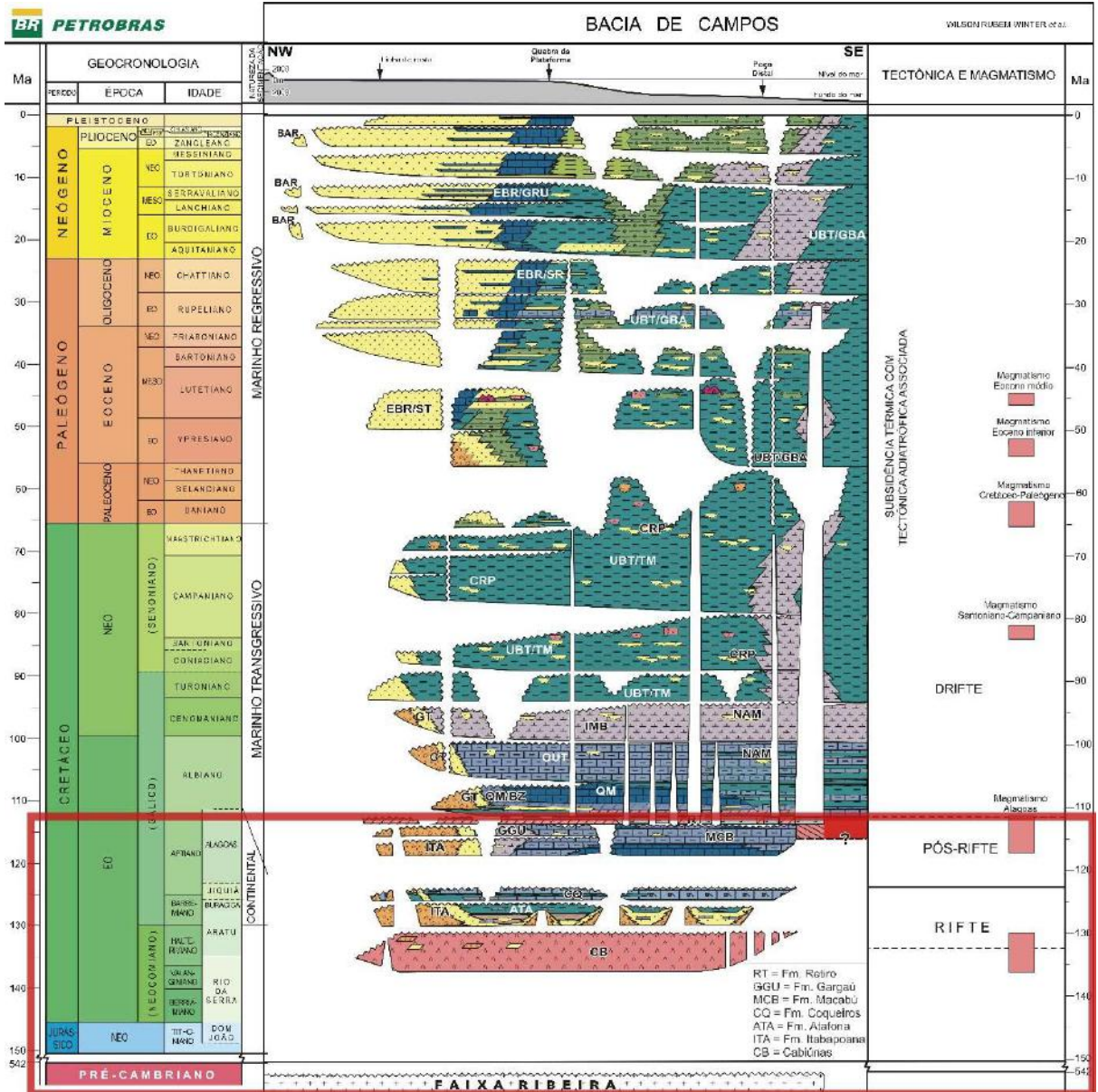


Figura 2: Carta estratigráfica da Bacia de Campos, com destaque para seção pré-sal (Adaptada de Winter et al., 2007).

A Supersequência Rifte tem seu início marcado pelo estiramento litosférico que levou à ruptura do Supercontinente Gondwana, em um movimento divergente entre a placa africana e Sul americana (Chang et al., 1992). Este processo gerou falhas normais sintéticas com mergulho para o oceano que afetaram toda a crosta continental, e coincide com o clímax da extrusão de lavas basálticas da Formação Cabiúnas (Winter et al., 2007). Isso culminou na formação de hemigrábens, com padrão dominó, que foram preenchidos por conglomerados, arenitos, siltos

e folhelhos avermelhados proximais de borda de bacia e de borda de falha da Formação Itabapoana (Winter et al., 2007).

Ao final da fase rifte ocorreu novamente um aumento da extensão litosférica marcado por grandes falhas que rotacionam os blocos rifte já formados, seguido do espalhamento oceânico a partir do Sul, com preenchimento sedimentar composto por intercalações de camadas de folhelhos e carbonatos lacustres compostos, predominantemente, por moluscos bivalves (Formação Coqueiros). O topo desta unidade é marcado pela discordância “pré-neo-Alagoas” (Winter et al., 2007), com os hemigrábens erodidos em escala regional (Mohriak, 2004; Kukla et al., 2018).

A Supersequência Pós-Rifte é definida a partir da ruptura continental do Gondwana, marcada por um período de quiescência tectônica, com sedimentação pouco afetada pela atividade das falhas, depositada em ambientes tectonicamente brandos (Winter et al., 2007). É composta pelas Formações Itabapoana, Gargaú e Macabu, sequências de sedimentos distais carbonáticos, margas e arenitos associados a ambientes rasos e transicionais. A Formação Gargaú depositou-se de forma discordante sobre as rochas carbonáticas da Formação Coqueiros, é representada por folhelhos, siltitos, margas e arenitos (Rangel et al., 1994), gradando para os carbonatos microbianos da Formação Macabu, presente na porção mais distal da Bacia (Winter et al., 2007). A sedimentação subsequente, durante o final do Aptiano Inferior e início do Albiano Inferior, culminou com a deposição de espessas camadas evaporíticas (Formação Retiro), principalmente anidrita e halita, que foram depositadas em um ambiente hipersalino em razão do clima árido e da cíclica evaporação em ambiente de golfo alongado (Mohriak, 2004), não discutida neste trabalho.

A Supersequência Drifte, composta por sedimentos marinhos, foi depositada sobreposta à Formação Retiro, influenciada por um regime de subsidência térmica associada a tectonismo adiastrófico (Winter et al., 2007). Os grupos Macaé e Campos representam a unidade Drifte, e são ricos em sedimentos siliciclásticos. Nesta época desenvolveu-se a crosta oceânica e a dorsal mesoatlântica (Stanton, 2009). Esta unidade também está associada ao tectonismo do sal, com a reativação de extensas falhas lítricas, deformando o pacote sedimentar, não discutido neste trabalho.

## **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **3.1 Materiais**

#### **3.1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Para embasar as discussões e interpretações realizadas neste estudo, foi conduzido um estudo bibliográfico e fundamentação teórica inicial. Este estudo teve como base artigos e trabalhos acadêmicos, relacionados à geologia da Bacia de Campos (Item 2), com foco no intervalo do Pré-sal e também de modelos propostos para a análise estrutural em bacias rifte análogas. Além disso, foram levantados artigos relacionados aos conceitos de sísmica de reflexão e interpretação sísmica dos horizontes de interesse.

Alguns trabalhos foram utilizados como referência para compreender a geologia estrutural e cronoestratigráfica, onde destaca-se Guardado et al., 1989, Guardado et al., 2000, Winter et al., 2007.

Em Guardado et al., 1989 e 2000, a compreensão de como configuração das falhas com trend NE-SW, influenciou a formação de uma série de grábens, hemigrábens e horsts, assim como altos estruturais e depocentros locais, na forma de blocos rotacionados no chamado “padrão dominó”, durante o processo de rifteamento, foi crucial para entender os resultados deste trabalho.

Em Winter et al., 2007, a compreensão cronoestratigráfica da bacia, juntamente com as observações detalhadas da composição litológica e da configuração estrutural das unidades do pré-sal, colaborou para análises mais precisas durante o desenvolvimento deste trabalho.

#### **3.1.2 VOLUME SÍSMICO**

O levantamento sísmico 3D utilizado no trabalho foi obtido através do Projeto Campos, intitulado “Evolução tectonossedimentar do intervalo Pré-sal da Bacia de Campos” (EQUINOR/COPPETEC/Lagesed-UFRJ), junto à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). É nomeado “R0258 3D SPEC MARLIM.3D.PSDM.1-001”, abrangendo uma área de aproximadamente 1160km<sup>2</sup> e profundidade máxima de 8 km, conforme representado pelo polígono destacado em verde (Figura 1). No dado sísmico utilizado neste estudo, o Datum geográfico é o SIRGAS 2000 UTM Zone 24S, e, além disso, o mesmo foi recebido já processado e migrado em profundidade (PSDM) e adquirido no formato SEG-Y.

### 3.1.3 POÇOS

Neste trabalho foram utilizados dois poços verticais: o 1-BRSA-182-RJS e o 6-BRSA-318-RJS. Esses possuem dados de perfilagem convencionais que proporcionaram uma base robusta para a interpretação do intervalo perfilado, como: caliper, densidade, neutrão, raios gama, resistividade e sônico, além de marcadores litológicos (*well tops*), tabela de checkshot e perfis compostos.

O poço 1-BRSA-182-RJS está localizado ao norte da área de estudo, e a profundidade final atingida foi de 5246m(TVD), onde foram descritas as rochas da Formação Cabiúnas, que compõem o embasamento acústico da Bacia de Campos. Já o poço 6-BRSA-318-RJS está localizado ao centro da área de estudo, e a profundidade final atingida foi de 5233m, onde também foram descritas as rochas da Formação Cabiúnas no fundo do poço.

### 3.1.4 SOFTWARES

Para este trabalho foram utilizados os seguintes softwares: 1- PETREL® (Schlumberger, versão 2020.4) para interpretação do volume sísmico; 2- ESRI ArcGis PRO, para georreferenciamento de imagens e confecção de mapas; 3- CorelDRAW 2021, para criação e edição de figuras; 4- OpenStereo 0.1.2, para geração de diagramas de Schmidt (Estereogramas), de igual área, projetados no hemisfério inferior.

### 3.2 Métodos

Foi elaborado um fluxograma de trabalho com o objetivo de organizar as atividades deste estudo (Figura 3). As etapas serão detalhadas no texto a seguir.

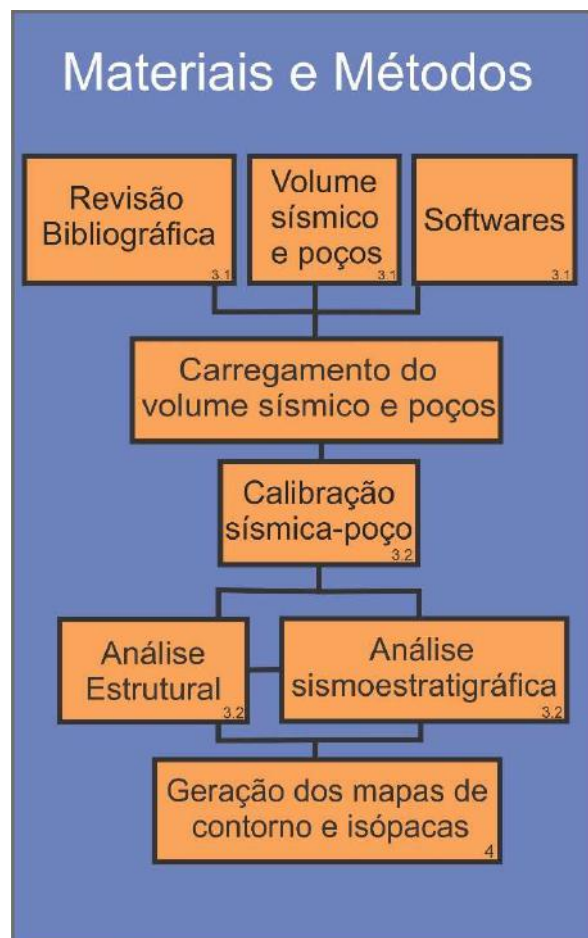


Figura 3: Fluxograma de trabalho, representando os materiais e métodos utilizados.



### 3.2.1 CALIBRAÇÃO SÍSMICA-POÇO

Os perfis convencionais dos poços fornecem informações medidas diretamente das rochas com excelente resolução vertical em profundidade, enquanto os dados sísmicos exibem a continuidade e resolução lateral dos refletores sísmicos. Mesmo assim é possível associar as informações dos dados de poço aos dados sísmicos, permitindo maior confiabilidade na interpretação.

Para correlacionar esses dados, é essencial estabelecer uma relação tempo vs. profundidade. Isso pode ser alcançado através do uso de um arquivo de checkshot, que fornece dados sobre o tempo de trânsito de uma onda sísmica em tempo simples (One Way Time - OWT) da superfície até determinadas profundidades (Measured Depth - MD) ao longo da coluna do poço. Para realizar a amarração do poço, foi realizada a relação tempo x profundidade através do perfil sônico (DT). A partir disso, foi necessária a utilização de uma *wavelet* analítica de Ricker com frequência de 20Hz, combinada com perfis de densidade (DENS) e sônico (DT) para gerar um sismograma sintético, a fim de garantir uma calibração satisfatória. Sendo assim, foram correlacionados ao sismograma sintético os *well tops* do poço e os refletores sísmicos positivos e negativos referentes a cada marcador litológico de topo de formação estudados neste trabalho (Figura 4). Além disso, foi realizado o controle de qualidade do sismograma sintético para estimar a verdadeira origem da resposta sísmica (Schinelli, 2013). Esse controle foi feito através da coluna de cross-correlation, que indica a qualidade da calibração entre os dados sísmicos e os dados do poço. Valores mais altos de cross-correlation representam um melhor ajuste entre o traço modelado e o dado sísmico real.

### 3.2.2 ANÁLISE ESTRUTURAL

Após o carregamento do dado sísmico, optou-se por utilizar exaíeros verticais, da ordem de até 4, para interpretação sísmica, a fim de ressaltar as falhas com relação à sua inclinação e deformação dos refletores. Com isso, a primeira etapa teve como objetivo o mapeamento estrutural ao longo do intervalo Pré-sal, com a identificação de falhas. Esse procedimento teve início a partir das *inlines* e, posteriormente, verificadas pelas *crosslines*, *depth slices* e linhas arbitrárias, utilizando espaçamentos de 50 linhas (630 metros) tanto *dip*, quanto *strike*, para melhor análise e confiabilidade dos resultados.

A partir das falhas mapeadas foi gerado um mapa estrutural de falhas e diagramas de Schmidt, apresentados no item 4 deste trabalho, de modo a suportar as discussões a respeito da influência tectônica na sedimentação.

Foram definidos domínios estruturais com base em características estruturais e estratigráficas particulares das falhas mapeadas, nos quais os critérios são a partir da propagação das falhas, direção, mergulho, comprimento, profundidade e os padrões de alinhamento observados. Alinhado a isso, os fatores estratigráficos também foram determinantes para definir os domínios estruturais, como a espessura das unidades sedimentares, afinamento e espessamento de sessão e a continuidade dos horizontes. A junção desses fatores permitiu subdividir a área de estudo, a partir das mudanças de comportamentos estruturais e estratigráficas das falhas, em 03 (três) domínios estruturais: 1- Domínio Oeste; 2- Domínio Central; 3- Domínio Leste, com limites sobre as falhas que marcam essas mudanças.

### 3.2.3 ANÁLISE SISMOESTRATIGRÁFICA

As distintas características físicas dos meios, como as variações de densidade e velocidade de propagação de onda - conhecidas como impedância acústica - desempenham um papel crucial

na sísmica, pois exercem uma influência significativa no sinal dos refletores sísmicos (Mitchum et al., 1977).

Um horizonte sísmico consiste em um refletor lateralmente contínuo que apresenta as mesmas características acústicas. Esse sinal indica a existência de uma interface entre duas camadas de sedimentos com diferentes propriedades físicas (Sheriff, 1991).

Para este trabalho, foram analisados 03 (três) horizontes sísmicos no intervalo pré-sal (Figura 5), referentes ao topo do embasamento acústico (Formação Cabiúnas e embasamento cristalino), a discordância U1 (topo da Formação Coqueiros, Aptiano Inferior) e a base do sal (Formação Retiro, Albiano Inferior), seguindo características particulares dos refletores, tais como amplitude, truncamento de refletores, sismofácies, observando refletores com boa continuidade lateral, por toda a área de estudo. Foi nomeada U1, pois é a primeira discordância regional observada no pré-sal da área de estudo. Para os horizontes sísmicos do topo do embasamento e da base do sal, foi utilizado o espaçamento de 64 linhas (780 metros) entre as linhas sísmicas *Dip*, *strike* e arbitrárias. Para o horizonte sísmico da discordância U1, o espaçamento foi de 100 linhas (1260 metros) para linhas *Dip* e *strike*. Além disso, o mapeamento desses horizontes foi baseado nas informações dos perfis compostos dos poços 1-BRSA-182-RJS e 6-BRSA-318-RJS amarrados (Figura 5).

Após o mapeamento das falhas e dos horizontes sísmicos, foi possível gerar mapas de contorno estrutural de cada horizonte. A partir deles, foram gerados os mapas de isópacas das unidades do pré-sal, onde foi possível interpretar as observações feitas no item 3.2.2 e discutir as possíveis correlações entre o arcabouço estrutural do embasamento e sua influência tectônica na sedimentação do pré-sal de Campos.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Amarração sísmica-poço

Após a realização da calibração sísmica-poço, foi realizada a amarração dos poços. Isto ocorreu através da correlação entre o coeficiente de refletividade dos horizontes, na janela de calibração (Figura 4) com a seção sísmica (Figura 5) que corta os poços e o sismograma sintético gerado pelos perfis de densidade e sônico. Para o poço 1-BRSA-182-RJS o valor de cross-correlation obtido foi de 0,57 (57%), enquanto para o poço 6-BRSA-318-RJS, foi de 0,34 (34%).

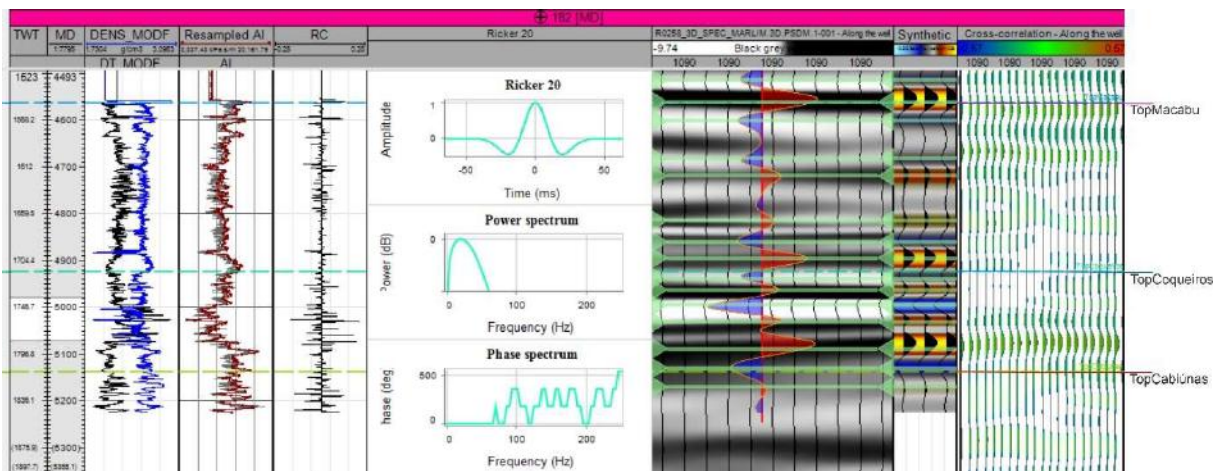


Figura 4: Janela de calibração sísmica do poço 1-BRSA-182-RJS, realizada no software Petrel, com os perfis geofísicos densidade (DENS) e sônico (DT), amarração do perfil sintético com a sísmica 3D e *cross-correlation*.

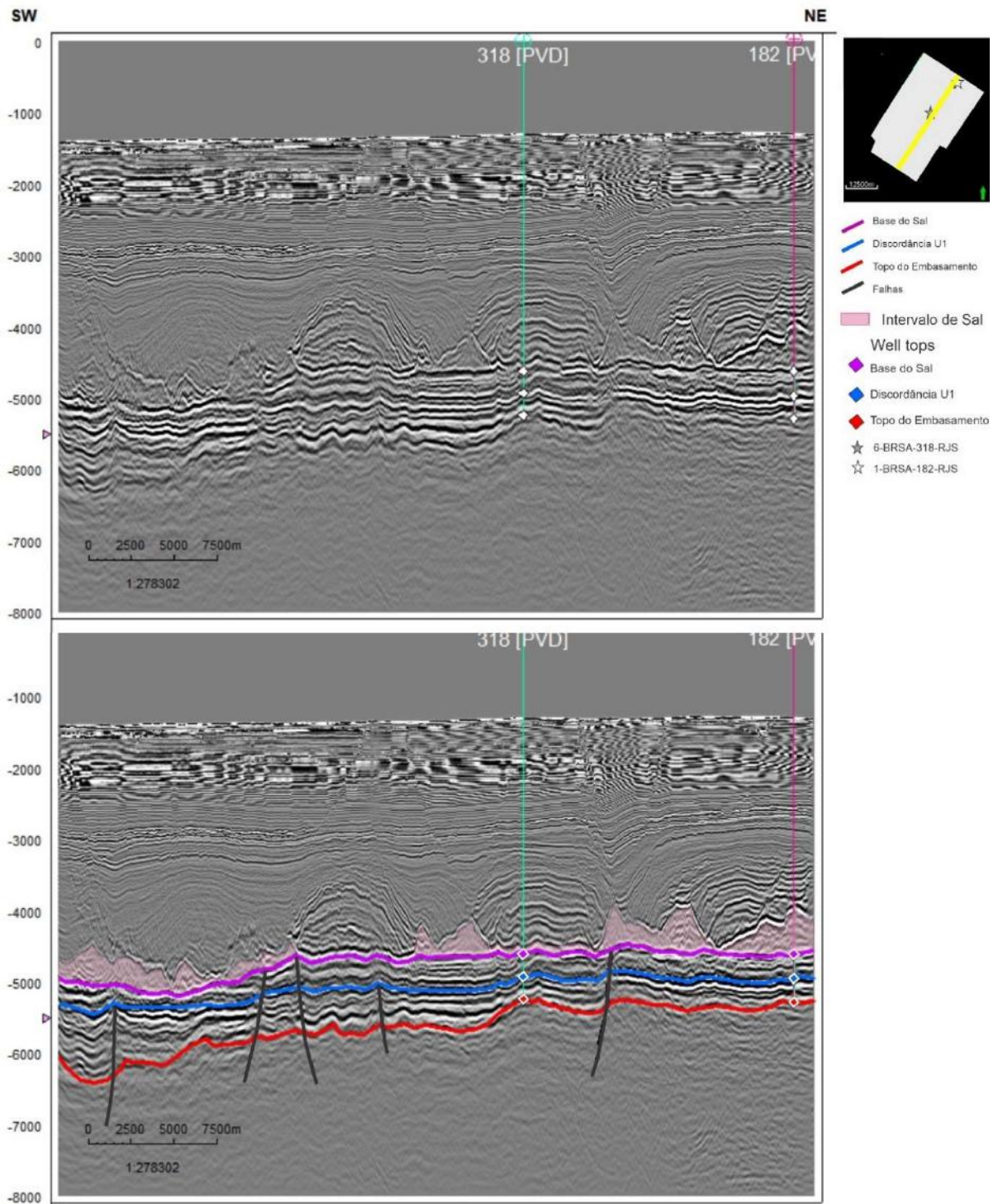


Figura 5: Seção *Strike* (*Crossline* 8000), do centro da área de estudo, onde foi realizada a calibração sísmica-poço. Os horizontes foram mapeados a partir dos *well tops* dos poços 1-BRSA-182-RJS e 6-BRSA-318-RJS e representam o topo do embasamento (vermelho), discordância U1 (azul) e base do sal (rosa). Exagero vertical (E.V) da ordem de até 4.

## 4.2 Análise estrutural e sismoestratigráfica

A partir do mapeamento das estruturas que afetam o pacote sedimentar correspondente ao pré-sal da Bacia de Campos foram identificadas 44 falhas, das quais 39 tem *trend* NE e 5, *trend* NW. Concomitantemente, foi realizado o mapeamento de 03 (três) horizontes sísmicos, que representam o topo do embasamento acústico (Formação Cabiúnas ou embasamento cristalino), a discordância U1 (topo da Formação Coqueiros) e a base do sal (Formação Retiro).

#### 4.2.1 DESCRIÇÃO DO TOPO DO EMBASAMENTO

O embasamento apresenta características sísmicas particulares como refletores com amplitudes positivas predominantemente baixas, fácies caóticas, baixa resolução e baixa continuidade lateral, principalmente no topo da unidade. No poço 1-BRSA-182-RJS, o topo do embasamento ocorre a 5137 m (TVD) e é representado por um refletor de amplitude positiva, da ordem de até 0,16. Já no poço 6-BRSA-318-RJS, o valor da amplitude positiva é de 0,24, a uma profundidade de 5226 m (TVD) no topo da Formação Cabiúnas. Na seção (Figura 6), o horizonte possui amplitudes da ordem de até 0.41, possuindo as mesmas características anteriores, além de apresentar frequências moderadas a altas. Nos altos estruturais é possível observar truncamentos, onde o topo do embasamento é truncado pelos refletores da unidade Rife com os refletores desta unidade apresentando convergência em direção a esses altos.

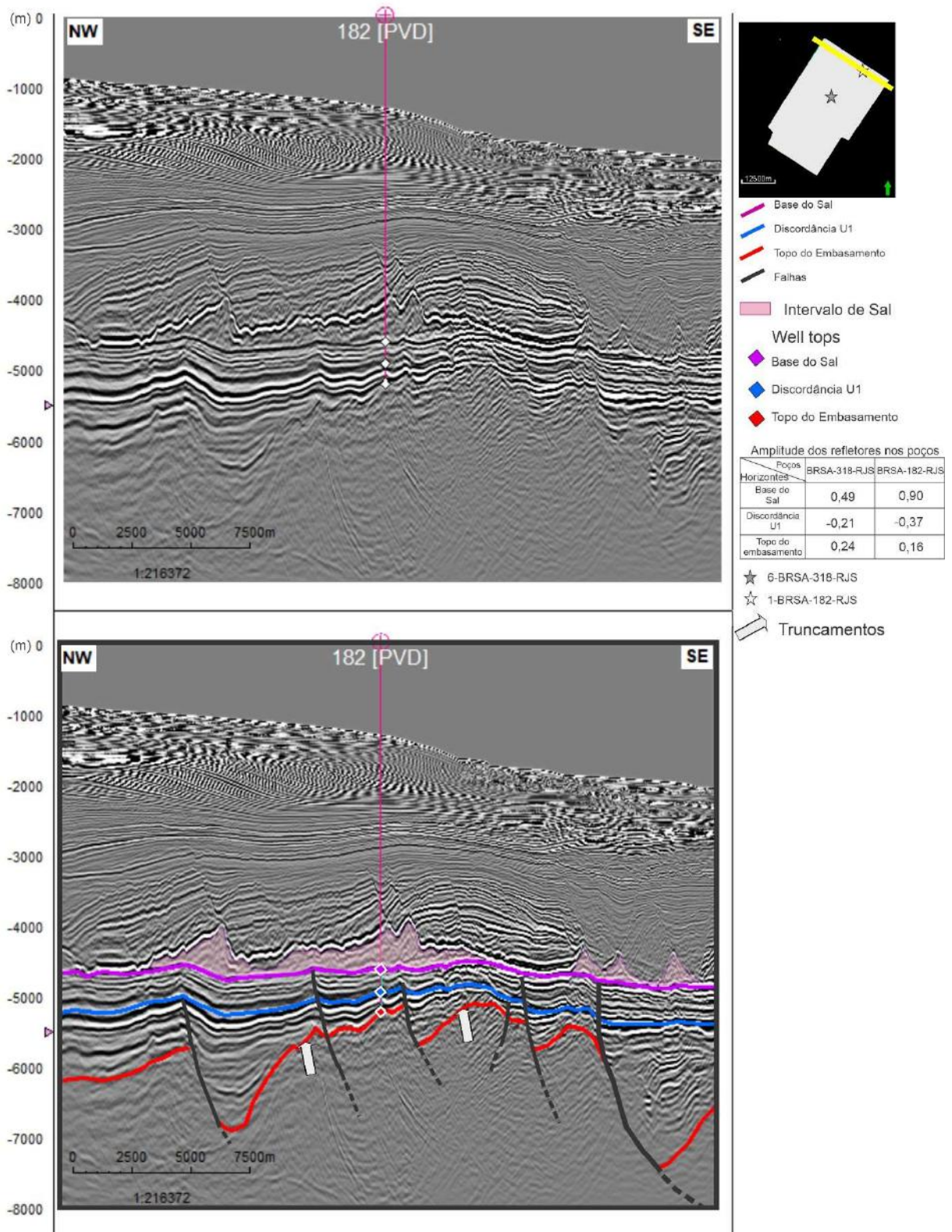


Figura 6: Seção *Dip* (Inline 1090), do Norte da área de estudo, onde foi realizada a calibração sísmica-poço. Os horizontes foram mapeados a partir dos *well tops* dos poços 1-BRSA-182-RJS e representam o topo do embasamento (vermelho), discordância U1 (azul) e base do sal (rosa). Note as características dos refletores e o truncamento dos refletores em direção ao topo do embasamento. E.V. = 3

#### 4.2.1.1 Mapa de Contorno estrutural do topo do embasamento

A partir do horizonte do topo do embasamento acústico, foi gerado um mapa de contorno estrutural (Figura 7a), que mostra um arcabouço composto por altos e baixos estruturais, grábens, hemigrábens e horsts em profundidades que variam entre 5250 a 8500 metros (TVD). Essas estruturas estão dispostas como feições alongadas, com trend preferencial NE/NNE, e são controladas por falhas sintéticas, com rejeitos variáveis da ordem de até 1500m e mergulho predominantemente para SE.

É possível notar um alto estrutural expressivo que ocupa grande parte da porção central da área de estudo, orientado para NE, que, neste trabalho, será denominado alto central (Figura 7b). Margeando o alto central, são observados altos e baixos estruturais, com profundidades variando de 5750 a 8500 metros (TVD) e, serão denominados como altos e baixos periféricos. Nota-se que há um baixo estrutural expressivo na margem NE do mapa, com profundidade entre 7500 e 8500 metros.



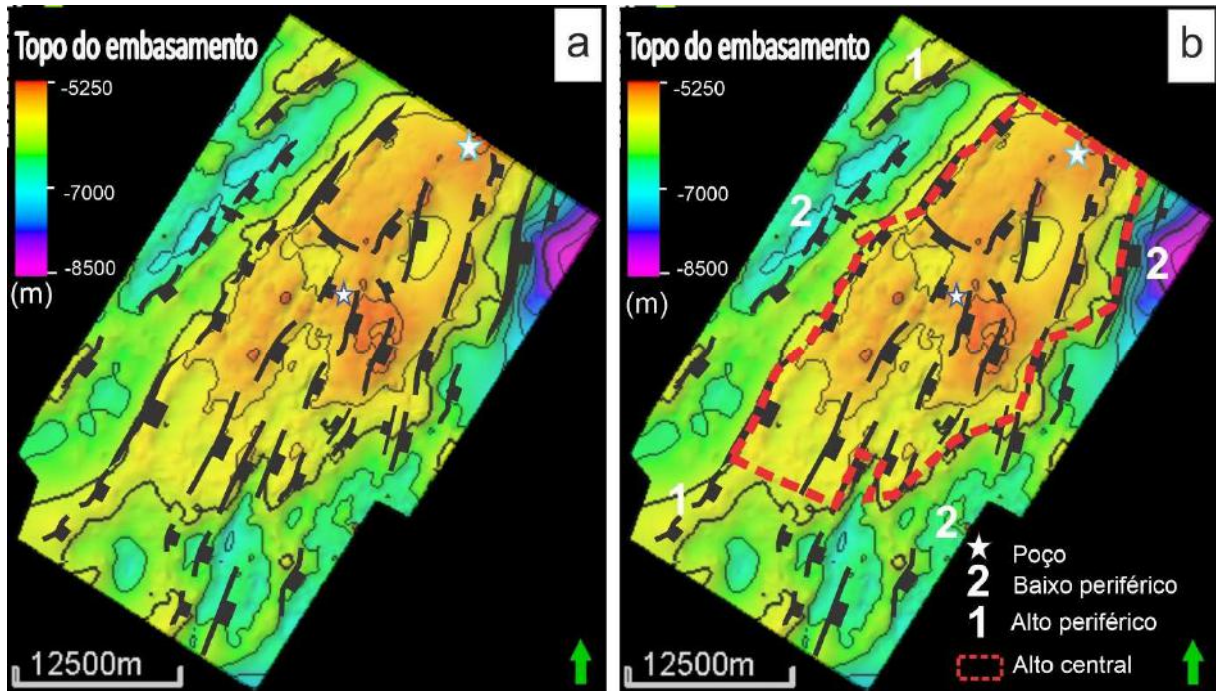


Figura 7: Mapa de contorno estrutural do topo do embasamento. a) Mapa com falhas e direções de mergulho. b) Mapa com falhas e identificação dos altos e baixos estruturais da área de estudo. Note o alto central em destaque na porção central da área de estudo e o baixo expressivo na porção NE. Os poços 6-BRSA-318-RJS e 1-BRSA-182-RJS estão localizados, respectivamente, ao centro e ao Norte da área de estudo, sendo representados por estrelas.

#### 4.2.1.2 Domínios estruturais

A definição dos domínios estruturais foi realizada a partir da interpretação do arcabouço do embasamento e da propagação das falhas, onde foram definidos 03 (três) domínios estruturais: 1- Domínio Oeste; 2- Domínio Central; 3- Domínio Leste, com limites sobre as falhas que marcam essas mudanças. Cada limite segue a mudança das características das falhas, como comprimento, profundidade, rejeito, atividade e direção (Figura 8).

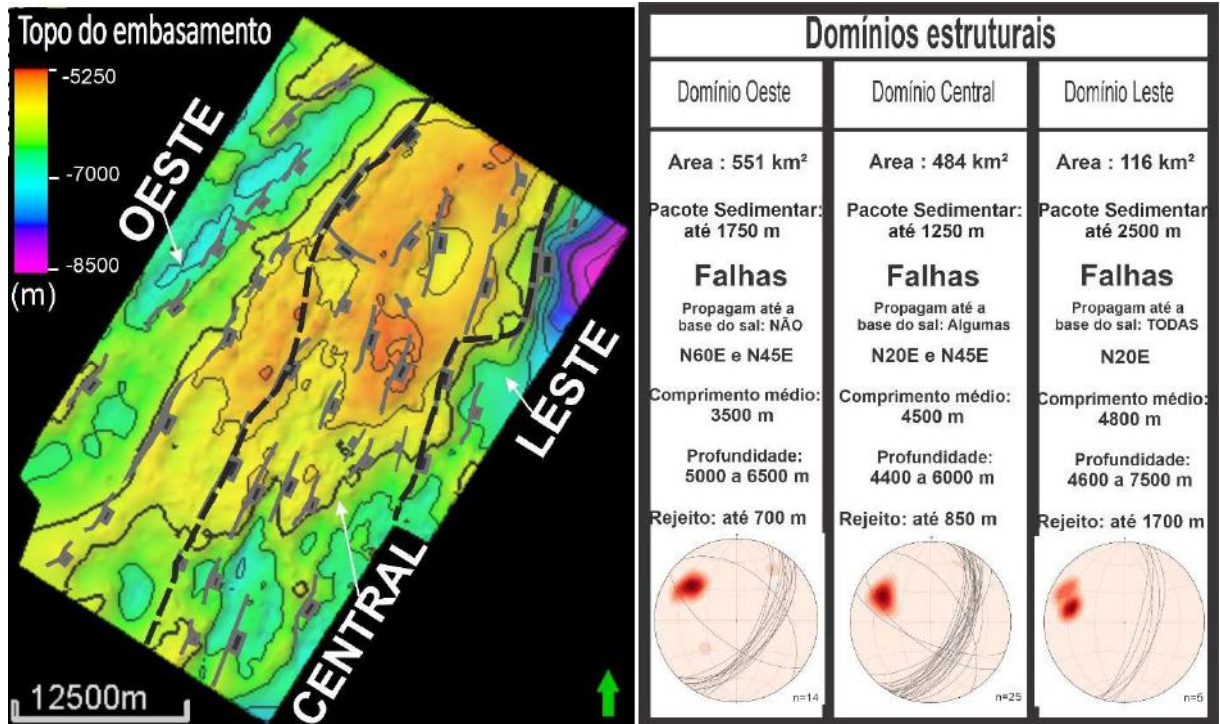


Figura 8: Mapa dos domínios estruturais, sobre o mapa de contorno estrutural do topo do embasamento. À direita, tabela com características estruturais e estratigráficas de cada domínio.

Os domínios estruturais têm em comum um estilo estrutural predominante em toda área, representado por falhas planares com blocos rotacionados (*domino style*) formando grábens e hemigrábens em seção (Figura 9), com escalonamento *en échelon* dispostas em segmentação para direita (*right-stepping*) em mapa.

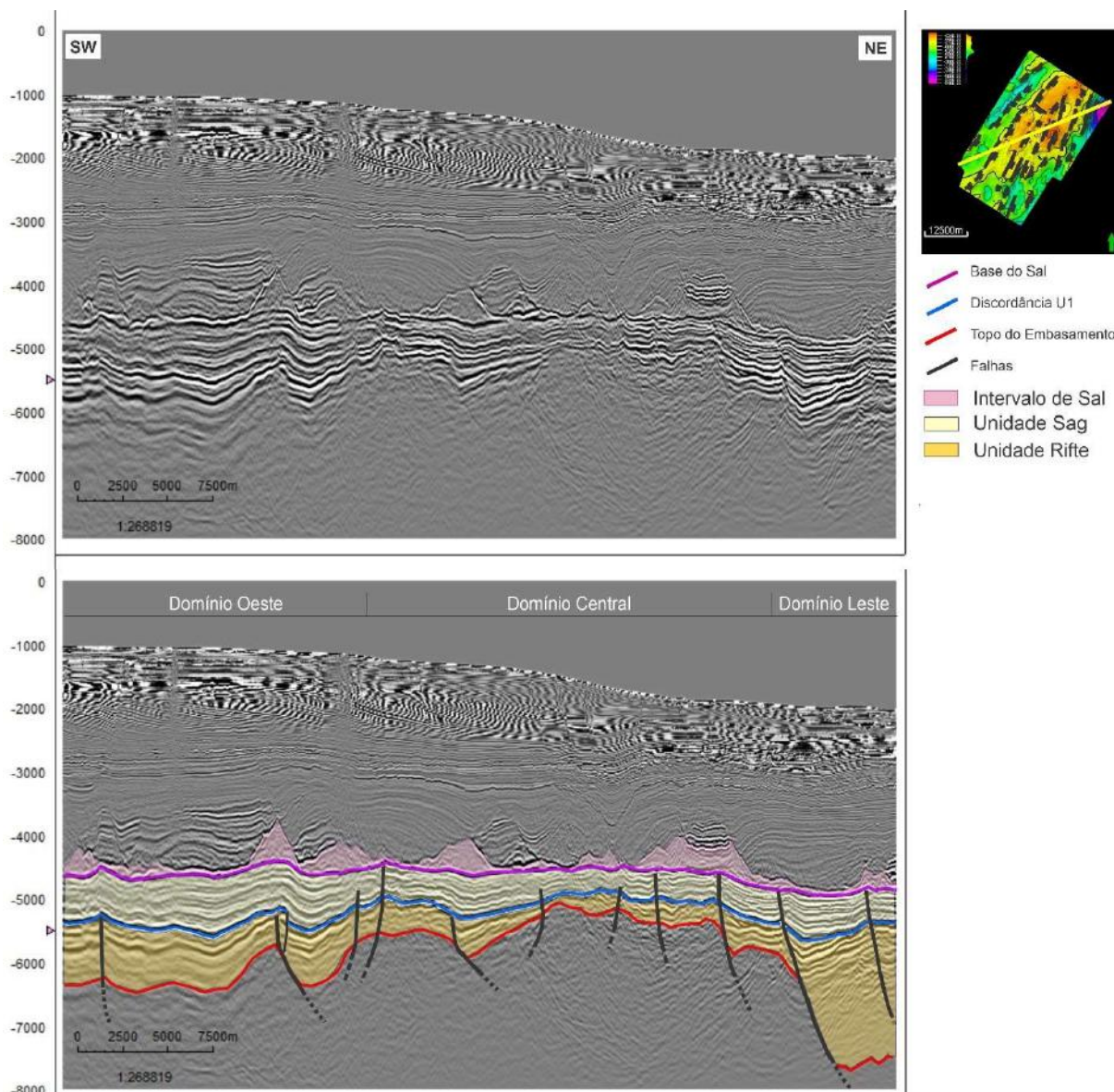


Figura 9: Seção randômica NE-SW. Observa-se as características individuais dos domínios estruturais, delimitados sobre as falhas representativas das mudanças. Note a diferença da espessura sedimentar e dos rejeitos em cada domínio, com as falhas deformando desde o embasamento até a base do sal. Exagero vertical (E.V) = 3.5

### Domínio Oeste

O domínio Oeste engloba as porções NW e SW da área de estudo, possui uma área de aproximadamente 551 km<sup>2</sup> e possui falhas normais sintéticas, com comprimentos médios de ordem 3500 m (Figura 8), profundidades de 5000 a 6500 m, rejeitos de até 700 m (Figura 9). As falhas atuam desde o embasamento até as duas unidades do pré. Neste domínio, a partir dos estereogramas gerados, observou-se que as estruturas apresentam trend preferencial para NE,

com 02 (duas) variações de *strike*: N30E, na porção Sudoeste e N45E na porção Noroeste. Observa-se também 01 (uma) falha com direção NW, com mergulho para NE (Figura 8).

#### Domínio Central

O domínio Central abrange desde o Norte até o Sudeste da área, possui uma área de aproximadamente 484 km<sup>2</sup> e apresenta falhas normais sintéticas, e, localmente, antitéticas (Figura 7). Os comprimentos observados, em média, são da ordem de 4500 m (Figura 8), em profundidades de 4400 a 7000 m, rejeito de até 850m e com espessura das unidades do pré-sal de até 1250 m (Figura 9). Neste domínio, a partir dos estereogramas gerados, observou-se que as estruturas apresentam 04 (quatro) trends preferenciais, onde as falhas N45E e N20E, possuem mergulho para ESE e a falha N25W, com mergulho SW, caracterizam-se por se propagar desde o embasamento até a base do sal. A falha N55W, mergulha para NE não se propaga até a base do sal. Neste domínio, é possível observar uma diminuição de espessura da unidade superior do intervalo pré-sal, em relação aos outros domínios (Figura 9).

#### Domínio Leste

O domínio Leste está localizado na porção NE da área de estudo, possui uma área de aproximadamente 116 km<sup>2</sup> e apresenta 05 falhas normais sintéticas, com comprimentos, em média, da ordem de 4800 m (Figura 8), profundidades de 4600 a 7500 m e rejeitos de até 1700 m (Figura 9). Neste domínio, a partir dos estereogramas gerados, observou-se que as estruturas afetam o embasamento e se propagam até a base do sal. Quanto à orientação das falhas, têm direção predominantemente para NNE, da ordem N20E e possuem mergulho preferencial para SE. É possível observar blocos rotacionados, formando cunhas deposicionais, que apresentam espessura de até 2500 m por todo o domínio.

#### 4.2.2 DESCRIÇÃO DA DISCORDÂNCIA U1

O horizonte da discordância U1 apresenta refletor com amplitudes negativas altas, possui grande continuidade lateral e baixa deformação se comparado com o topo do embasamento. Foram observadas pequenas variações de profundidade, devido a atividade das falhas. Também foram observados truncamentos erosivos (Figura 10) e que, a partir da amarração sísmica-poço, foi possível observar que esse refletor, está associado ao topo da Formação Coqueiros, que tem sua litologia formada por rochas carbonáticas de alta densidade (bioclastos) e folhelhos. No poço 1-BRSA-182-RJS, o marcador da discordância U1 representa o topo da unidade Rife, localizado a 4923 m (TVD). O refletor tem amplitude negativa, da ordem de até 0,37, onde, na seção do poço (Figura 6), o horizonte possui amplitudes da ordem de até 1,1. No poço 6-BRSA-318-RJS, o valor da amplitude para este horizonte foi de 0,21 a uma profundidade de 4934 m (TVD). Além disso, possui características subparalelas e angulares, onde refletores da base da unidade superior do pré-sal apresentam amplitudes mais baixas, se comparadas com o topo da unidade inferior. As características subparalelas observadas são referentes à configuração dos refletores do topo da unidade inferior e base da unidade superior do pré-sal, nos domínios Oeste e Leste. Já para as características erosivas e angulares, notam-se truncamentos erosivos entre os refletores das unidades do pré-sal, no domínio Central (Figura 10).

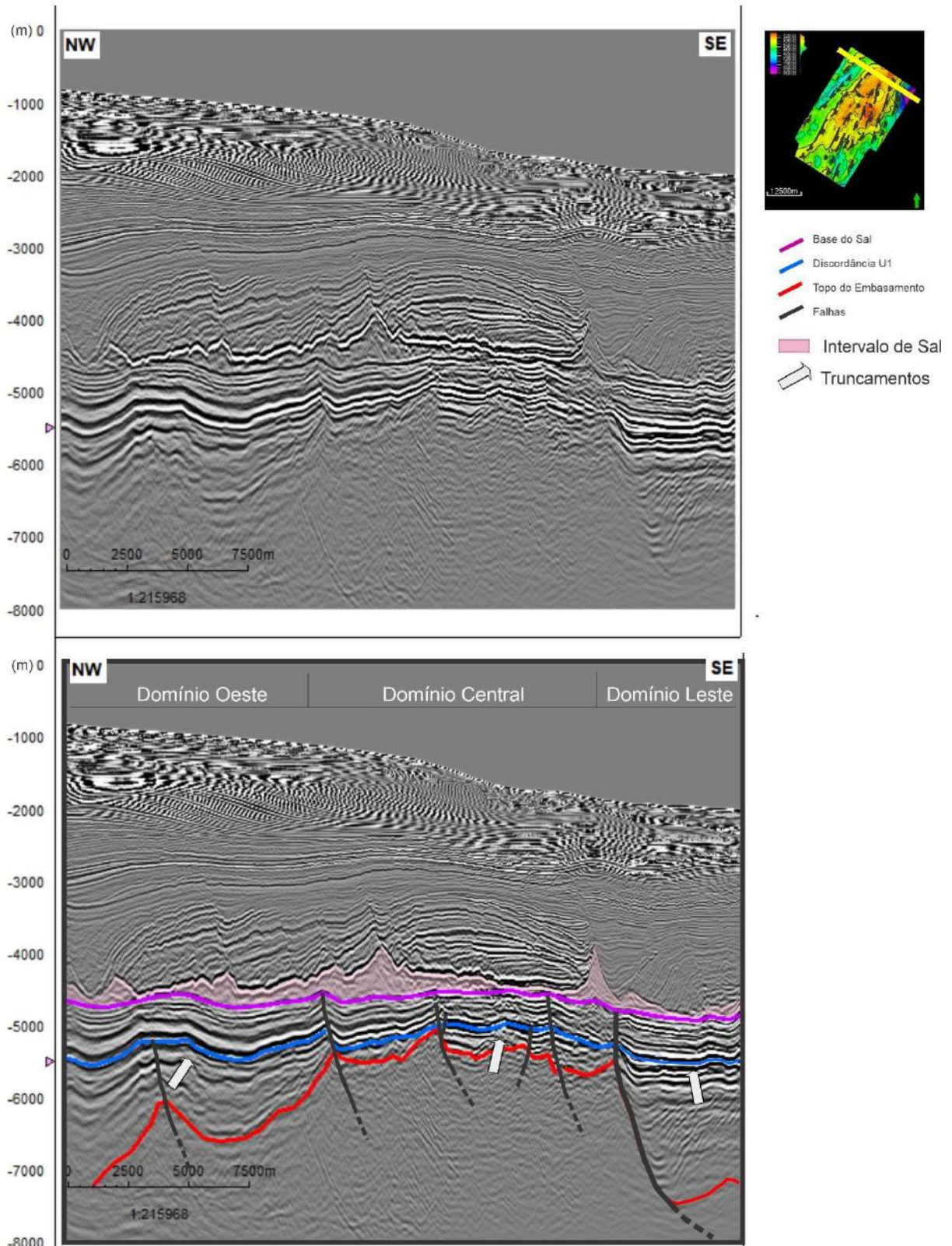


Figura 10: Seção *Dip* (*Inline* 1242), do Norte da área de estudo, abrangendo todos os domínios estruturais. As características da discordância U1 são apontadas pelas setas brancas, com os estratos sub-horizontais nos domínios Oeste e Leste e comportamento angular sobre as unidades Rife no domínio Central. E.V.=3.

#### 4.2.2.1 Mapa de contorno estrutural da discordância U1

O mapeamento desse horizonte sísmico permitiu elaborar o mapa de contorno estrutural desta superfície (Figura 11), onde é observado o arcabouço estrutural da discordância U1. A profundidade varia de 4800 a 6400m e é possível observar o alto central na porção centro-Norte, orientado para NE, margeado pelos altos e baixos periféricos de mesma orientação. As falhas, em sua maioria, são as falhas que controlam o embasamento e se propagam até a discordância, possuindo direção NE e mergulham para SE. Concentram-se sobre o alto central e nos baixos estruturais das margens E e SE dessa estrutura e estão subdivididas como falhas que se propagam até a base da discordância, representadas em transparente e as falhas que cortam a discordância e se propagam para a unidade acima, representadas em preto (Figura 11).

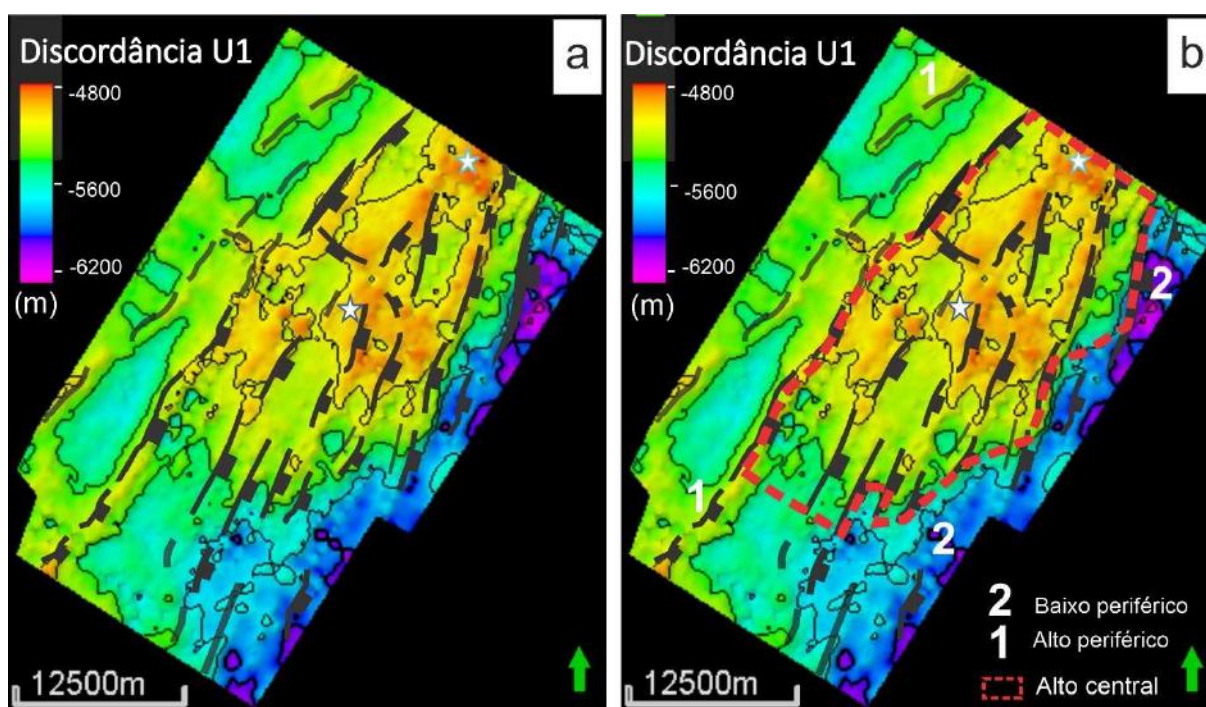


Figura 11: Mapa de contorno estrutural da discordância U1. a) Mapa com as falhas que se propagam até este horizonte em transparência, e, as falhas que cortam a discordância e se propagam para a unidade acima, representadas em preto. b) Mapa com falhas e identificação do alto central e altos e baixos periféricos do embasamento.

### 4.2.3 DESCRIÇÃO DA BASE DO SAL

O horizonte sísmico da base do sal apresenta características particulares que facilitam sua identificação, como a amplitude positiva, extensa continuidade lateral e truncamentos da unidade Sag subjacente, devido a discordância angular entre os refletores (Figuras 12). No poço 1-BRSA-182-RJS o horizonte sísmico da base do sal está localizado a 4600 m (TVD). É representado por um refletor de amplitude positiva, da ordem de até 0,90, onde, na seção do poço (Figura 6), o horizonte possui amplitudes da ordem de até 1,80. No poço 6-BRSA-318-RJS, o valor da amplitude é da ordem de 0,49 a uma profundidade de 4490 m (TVD). Além disso, foi possível observar que o horizonte da base do sal apresenta variações de profundidade, apresentando subsidência na porção SSE da área de estudo, concentrada no domínio central (Figura 12). Nos demais domínios, a base do sal permanece em profundidades com variações de 200m, apresentando, localmente, deformação relativa à atividade das falhas que se propagam até este horizonte, formando altos estruturais. Quando comparada aos horizontes da discordância U1 e topo do embasamento, a base do sal mostra-se muito pouco deformada pela atividade das falhas.



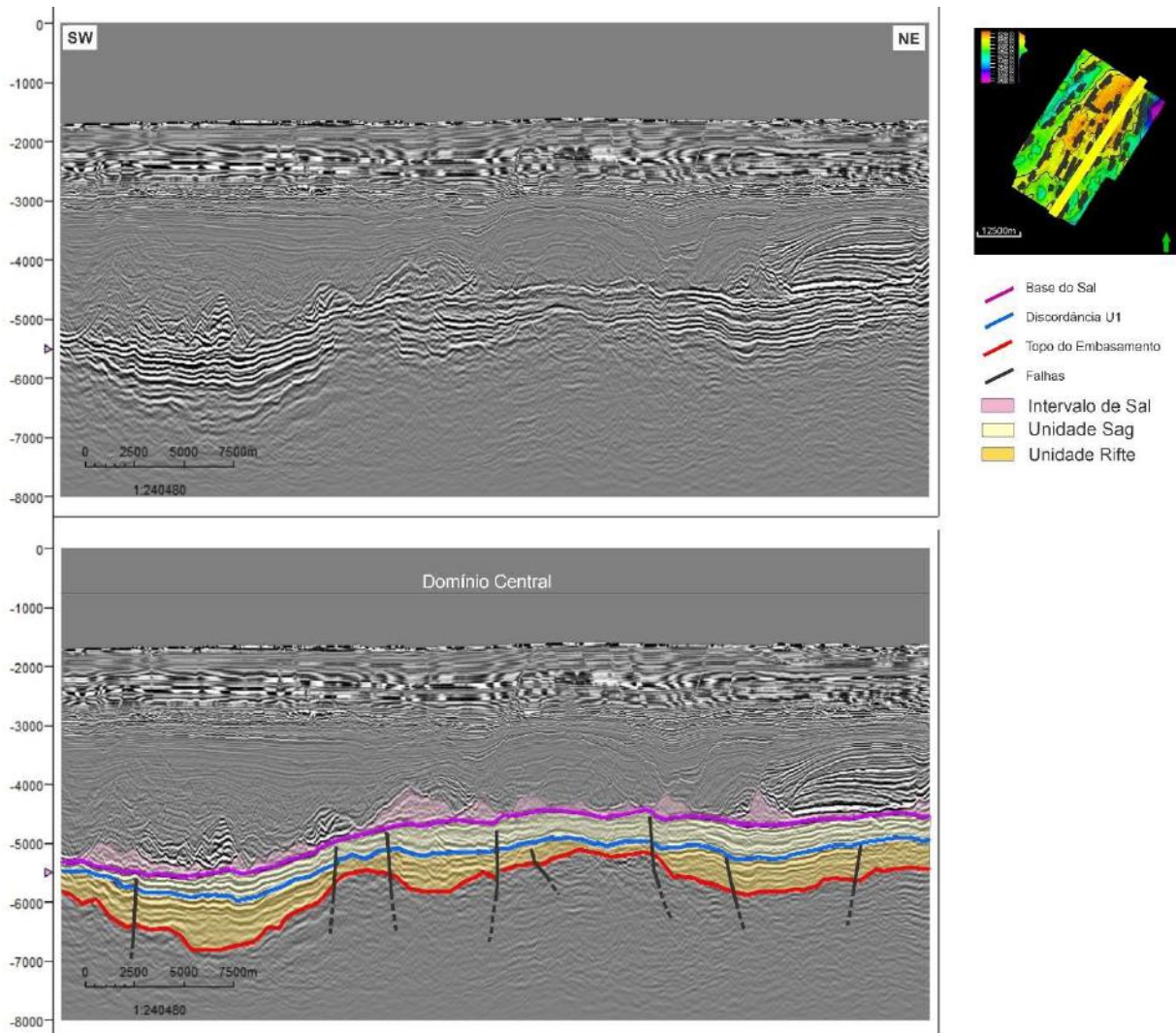


Figura 12: Seção *Strike* (*Crossline* 8652), abrangendo o domínio Central, onde é possível observar as características da base do sal. Note a subsidência do sal na porção SW, associada à pouca espessura da unidade Sag. EV= 3.5

#### 4.2.3.1 Mapa de contorno estrutural da Base do Sal

O mapa de contorno estrutural da Base do Sal (Figura 13) distribui-se entre as profundidades da ordem de 4400 a 5700 m (TVD). Observa-se o alto central, com trend NE que se estende do Norte-nordeste até o Sudoeste, passando pelo centro da área de estudo, com uma variação de profundidade da ordem de 400 metros. Nas margens Leste e Sudeste são observados baixos periféricos da ordem de 600 metros, com orientações também para NE. Dentre as falhas mapeadas na área de estudo, as que atingem a base do sal estão representadas na Fig. 11 em tons transparentes em relação ao mapa de contorno estrutural da base do sal.

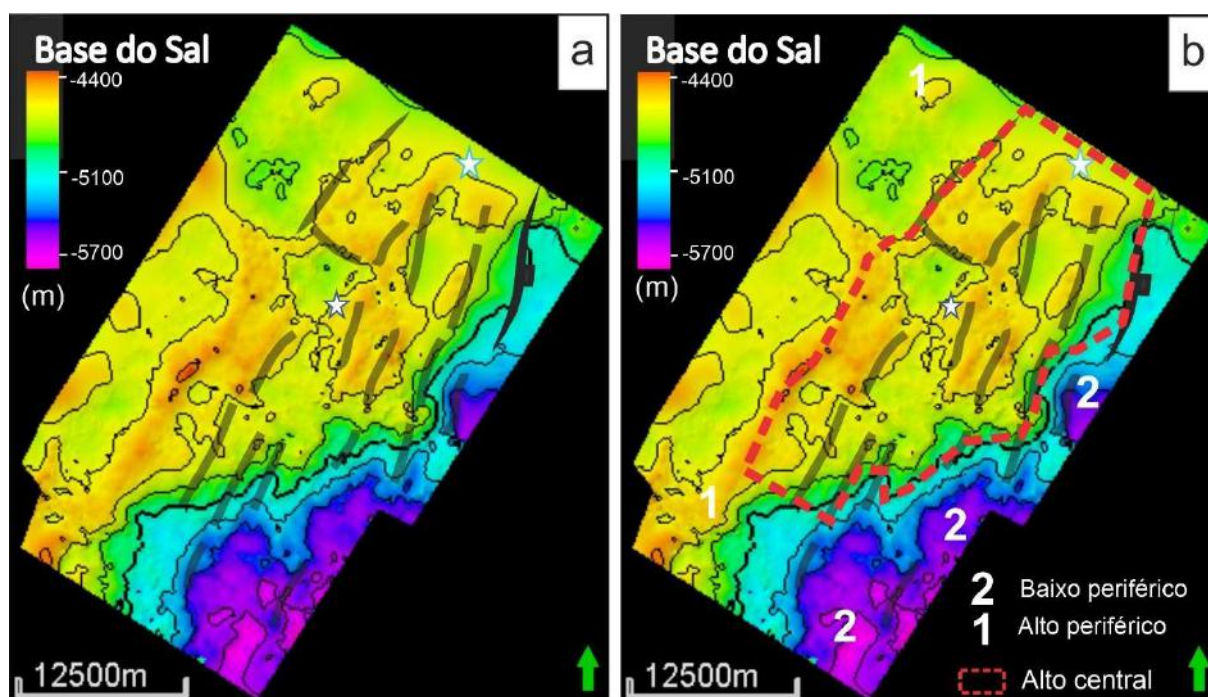


Figura 13: Mapa de contorno estrutural da base do Sal. Nota-se que as maiores profundidades estão localizadas nas porções SE e E do mapa, assim como as menores concentram-se desde o Sudoeste até o Norte. a) Mapa com as falhas que se propagam até este horizonte (transparentes). b) Mapa com falhas e identificação dos altos e baixos estruturais do embasamento da área de estudo.

### 4.3 Unidades do pré-sal

Neste trabalho, as unidades do pré-sal foram denominadas unidades Rife e Sag.

#### 4.3.1 UNIDADE RIFTE

A unidade Rife é definida pelo pacote de rochas sedimentares sobrejacente ao topo do embasamento, em sua base, e pelo horizonte da discordância U1 no topo, com seus refletores truncando este horizonte.

Algumas características da unidade Rife são que os refletores sísmicos apresentam menor continuidade lateral, com altas a baixas refletividades, além de um padrão geométrico menos definido. A tectônica segue o mesmo padrão observado no item 4.2, com as falhas sintéticas e

antitéticas em estilo dominó se propagando até o topo da unidade, com os blocos rotacionados em seção (Figura 14).

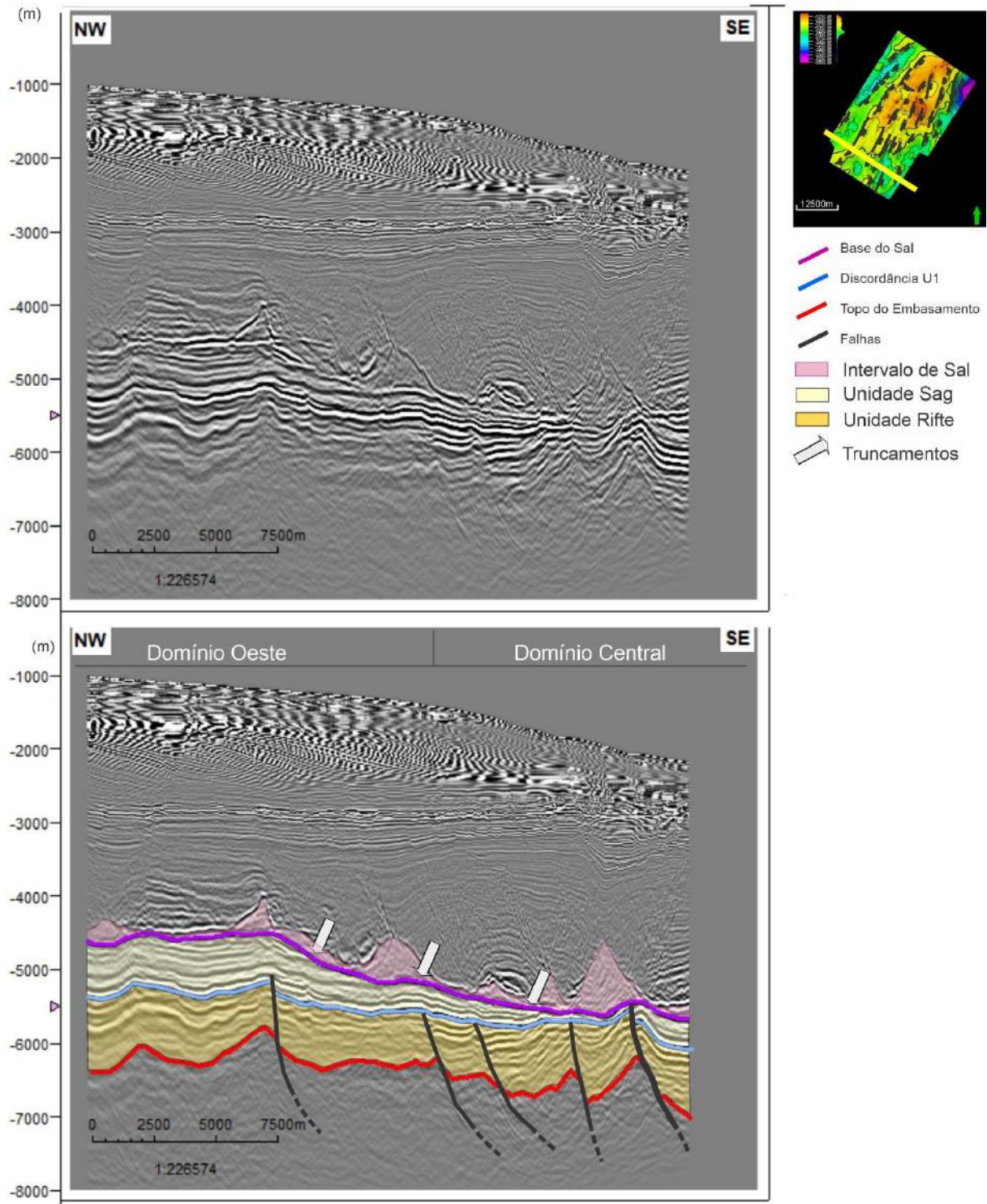


Figura 14: Seção *Dip* (*Inline* 4042), NW-SE, abrangendo os domínios estruturais Oeste e Central, na porção Sul da área de estudo. A figura mostra falhas em estilo dominó deformando a unidade Rife e, para a unidade Sag, nota-se o afinamento da espessura dos depocentros na porção Sul, de NW para SE, na área de estudo. As setas brancas indicam truncamentos do Sag na base do sal. E.V=3

#### 4.3.1.1 Mapa de isópacas da unidade Rifte

O mapa de isópacas da unidade Rifte (Figura 15), que representa a espessura sedimentar desta unidade, foi gerado a partir do cálculo da diferença de profundidades dos horizontes mapeados da discordância U1 e do topo do embasamento. Ele mostra uma espessura sedimentar com valores da ordem de até 2750 m. É possível observar que as menores estão localizadas nos depocentros da porção Centro-Norte da área, e as maiores localizadas nos depocentros das porções NW e NE do mapa. É possível notar uma segmentação dos depocentros na direção NE, com esses, apresentando variações de strike e seguem a direção das falhas nos domínios em que se localizam (item 4.2.1.2).

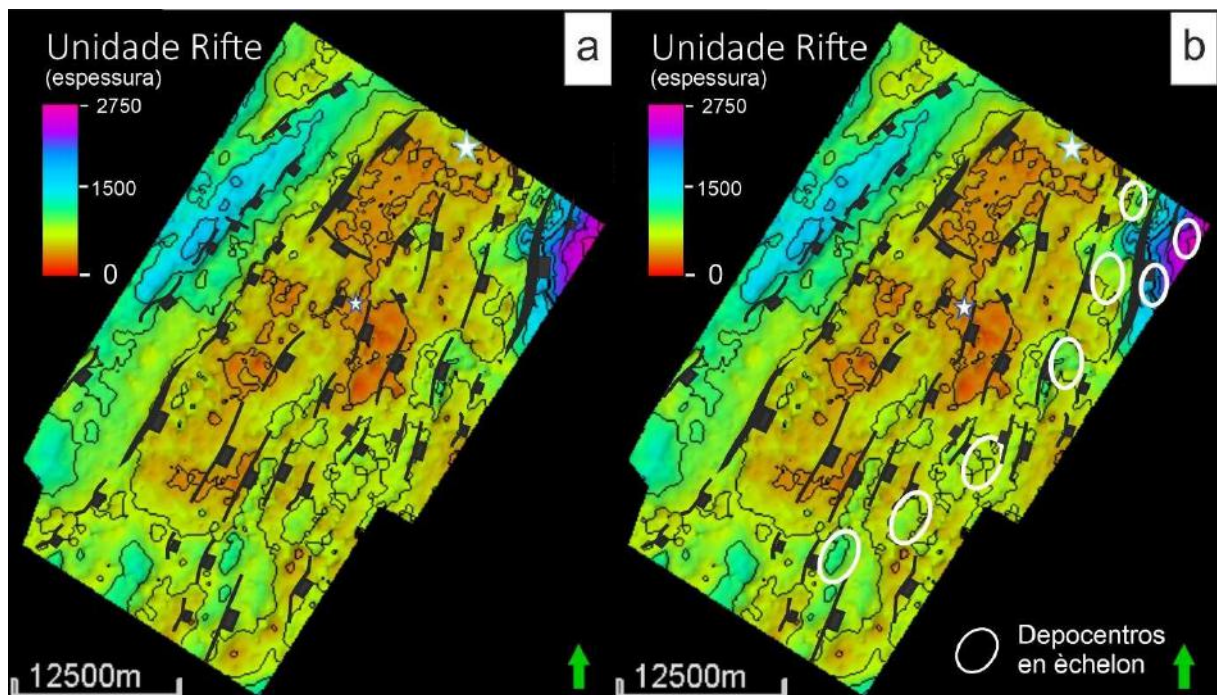


Figura 15: Mapa de isópacas da unidade Rifte, com as menores espessuras localizadas desde o NNE até o SE, passando pela parte central da área. Os maiores depocentros concentram-se nas margens NE e NW. a) Mapa com as falhas e direções de mergulho que se propagam a unidade Rifte b) Mapa com as falhas e a disposição *en échelon* dos depocentros.

#### 4.3.2 UNIDADE SAG

A unidade Sag é definida pelo pacote de rochas sedimentares sobrejacentes à discordância U1, em sua base, e pelo horizonte da base do sal no topo, com seus refletores truncando este horizonte.

Algumas características da unidade Sag são que os refletores sísmicos apresentam grande continuidade lateral, com moderadas a baixas amplitudes, alta refletividade, além de um padrão geométrico ondulado a plano-paralelo. A tectônica segue o padrão observado no item 4.2, porém com apenas as falhas sintéticas em estilo dominó se propagando até o topo da unidade, com os blocos rotacionados em seção. Para a unidade Sag, nota-se a diminuição da espessura dos depocentros na porção Sul, de NW para SE, (Figura 14

##### 4.3.2.1 Mapa de isópacas da unidade Sag

O mapa de isópacas da unidade Sag (Figura 16) apresenta a espessura sedimentar com valores da ordem de até 1200 m. É possível observar que as menores espessuras estão localizadas na porção SE, e, localmente, no Centro-Norte do mapa, onde o embasamento apresenta as cotas mais elevadas. As maiores espessuras estão localizadas nas porções NE e nas margens Oeste e Sudoeste. Nota-se uma segmentação dos depocentros na margem NE do mapa, com orientação de acordo com os domínios descritos em 4.2.1.2 deste trabalho.

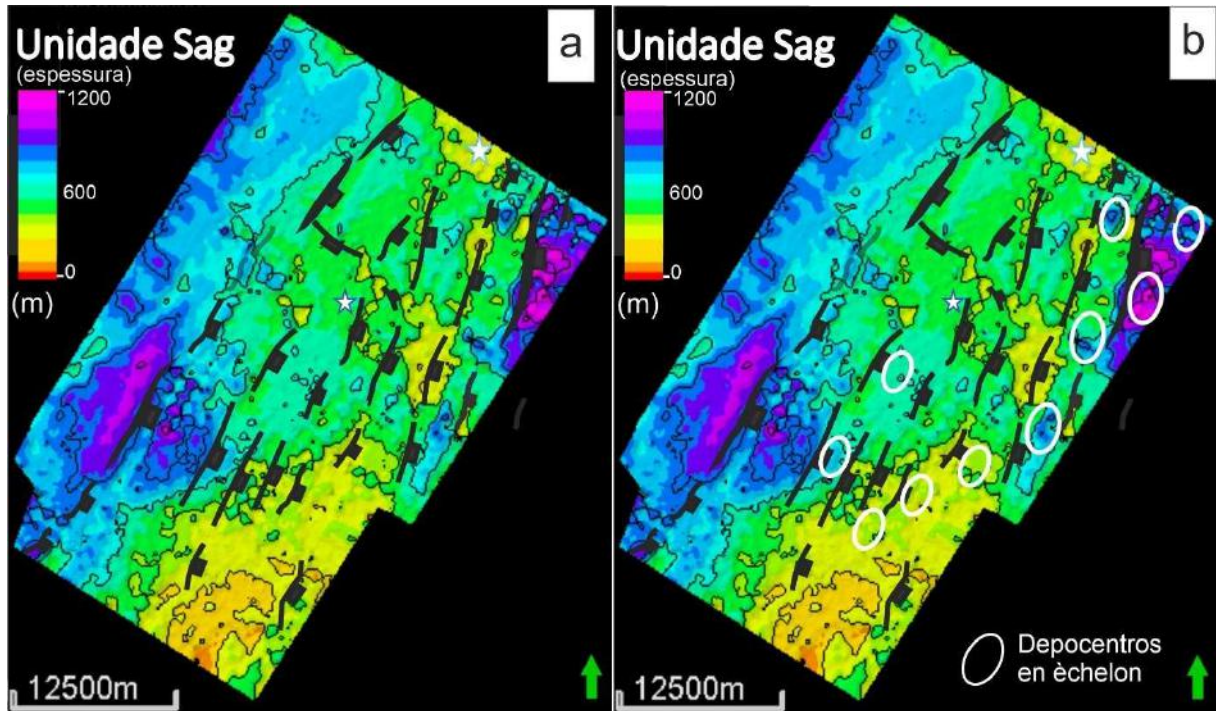


Figura 16: Mapa de isópacas da unidade Sag, com as menores espessuras na margem SE e as maiores nas margens NE e SW. a) Mapa com as falhas que se propagam até a discordância U1 (transparentes) e as falhas com direções de mergulho que se propagam na unidade Sag (preto). b) Mapa das falhas e a disposição *en échelon* dos depocentros.

## 5 DISCUSSÕES

As discussões foram divididas em 4 tópicos:

- (1) Comparação de estruturas locais e regionais;
- (2) Influência das estruturas do embasamento na discordância U1 e base do sal;
- (3) Influência do arcabouço estrutural do embasamento nas unidades do pré-sal;
- (4) Análise do timing da atividade das falhas e seus efeitos tectônicos nas unidades do pré-sal.

### 5.1 Comparação de estruturas locais e regionais

Neste trabalho, a utilização do dado sísmico 3D, com melhor resolução, em conjunto com uma escala com maior nível de detalhamento, gerou uma melhor identificação das falhas que controlam o arcabouço estrutural do embasamento. Essas, que possuem características individuais, como a propagação e rejeitos associados, por exemplo, estão relacionadas às importantes estruturas da área de estudo, como o alto central do embasamento. Este alto, que é controlado por falhas com trend NE, mergulho para SE, grandes rejeitos associados, que se propagam até a base do sal e segmentadas em *right-stepping*, destaca-se como a porção mais elevada do embasamento e possui baixos estruturais em suas margens. Estes são controlados por falhas com grande rejeito associado, com destaque para as porções NE e SE da área de estudo.

A partir do georreferenciamento do mapa estrutural de Guardado et al. (2000), foram avaliadas as similaridades e divergências das estruturas regionais da Bacia de Campos que se relacionam com a área de estudo, como por exemplo, o segmento da porção Sul do Alto Externo e a margem Oeste do Gráben Leste (Figura 17a). Para o segmento do Alto Externo, destaca-se a similaridade das falhas na margem NW do alto central do embasamento com a falha

interpretada por Guardado et al. (2000). Essa, coincide geograficamente com a falha da estrutura regional e possui *strike* semelhante, com trend para NE e mergulho para SE, se comparada às falhas interpretadas neste trabalho, que podem ser um segmento da falha do Alto Externo. Entretanto, neste trabalho, com melhor detalhamento, observou-se que essas falhas divergem em relação à segmentação e escala, com a falha da porção NW, abrangendo dois segmentos distintos de falhas para esta porção deste estudo (Figura 17b). Para o Gráben Leste, há uma similaridade entre os baixos estruturais presentes na região SE da área de estudo com o Gráben Leste (Figura 17b) proposto por Guardado et al. (2000). Observa-se que o limite interno desta estrutura coincide com a delimitação dos baixos estruturais em uma porção mais baixa do embasamento no alto central, a Sudeste, e a Leste desta estrutura, onde se pode associar, considerando a qualidade do dado, que os baixos interpretados nestas porções, estão relacionados ao Gráben Leste proposto por Guardado et al. (2000). Uma divergência desta estrutura regional para a interpretação da área de estudo é a demarcação do Gráben Leste não incluir o expressivo baixo estrutural na porção NE do embasamento (Figura 17b), que é controlado por uma falha de grande rejeito associado e que também controla o alto central deste estudo. Além disso, na porção SW, observou-se que as falhas de Guardado et al. (2000) divergem em relação a segmentação e escala, se comparadas com as interpretadas neste trabalho (Figura 17b), assim como sobrepõem dois segmentos distintos de falhas, com apenas direção para NE e mergulho para SE semelhantes. Essas similaridades e divergências podem estar relacionadas ao uso de dados de menor resolução, como as linhas sísmicas 2D, associados ao levantamento de anomalias gravimétricas, em escala regional, utilizado por Guardado et al. (2000) para interpretar as principais falhas, altos e baixos estruturais que controlam a Bacia de Campos.



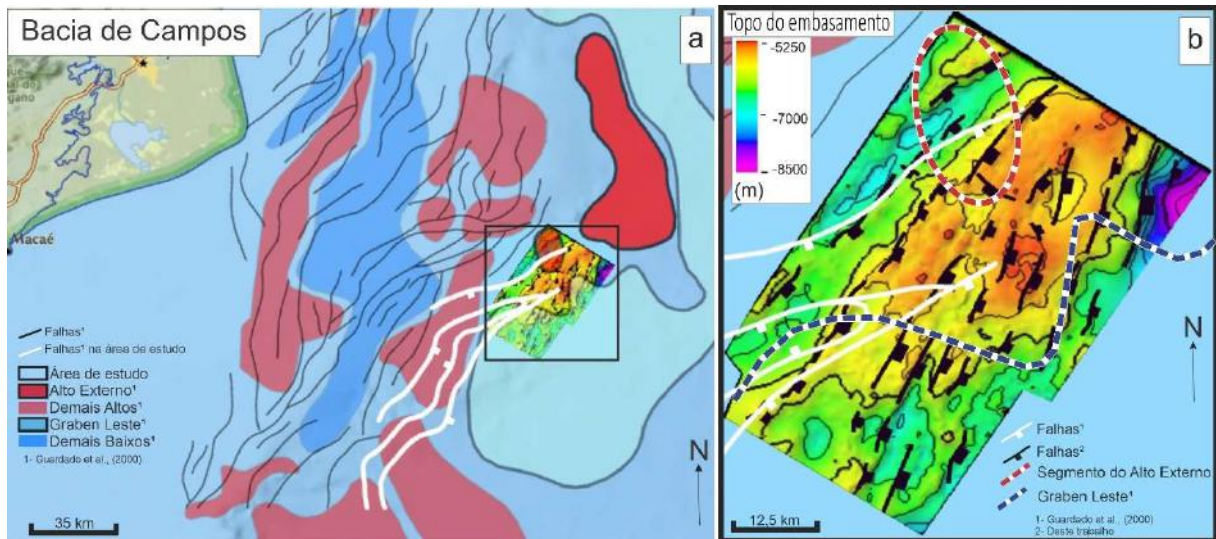


Figura 17: Sobreposição dos principais altos e baixos estruturais da Bacia de Campos sobre a área de estudo. a) Alto externo e Gráben Leste (Guardado et al., 2000) com a área de estudo em destaque. b) Alto Externo (vermelho) e Gráben Leste (azul) projetados sobre a área de estudo. Note que algumas falhas deste trabalho coincidem geograficamente e em *strike* aproximado com as falhas de Guardado et al. (2000).

## 5.2 Influência das estruturas do embasamento na discordância U1 e base do sal

A influência do arcabouço estrutural do embasamento nos horizontes da discordância U1 e base do sal pode ser observada a partir da propagação das falhas e através do paleo relevo do embasamento nestes horizontes. Ao comparar os mapas de contorno estrutural do embasamento, discordância U1 e base do Sal (Figuras 18), observam-se semelhanças e diferenças da influência do arcabouço estrutural neles.

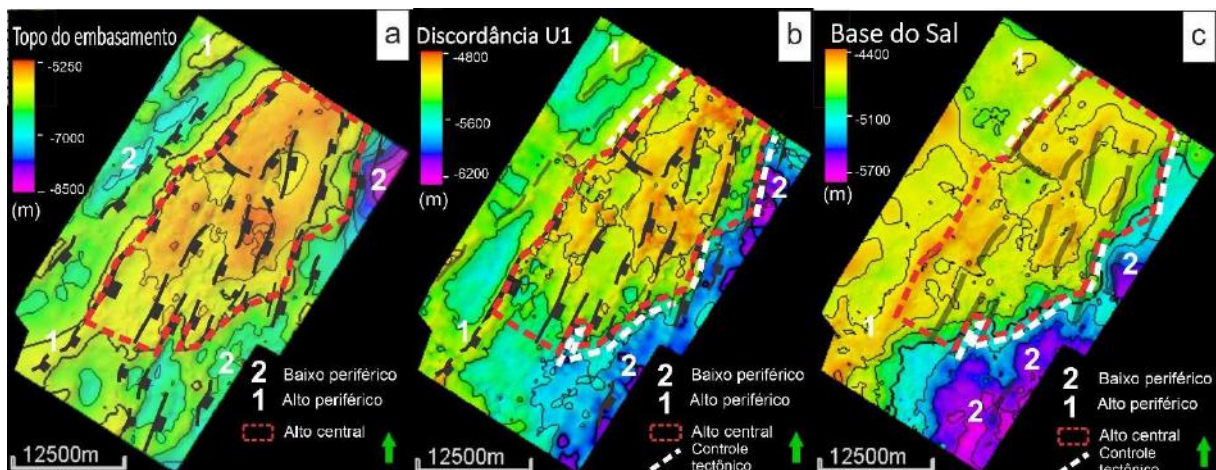


Figura 18: Comparação entre os mapas de contorno estrutural com falhas, altos (1) e baixos (2) estruturais do embasamento. a) Mapa do Topo do embasamento; b) Mapa da discordância

U1; c) Mapa da Base do Sal, com as falhas que se propagam até este horizonte, transparentes. O controle estrutural das falhas nas porções NW, NE e SE do alto central é indicado pela linha branca tracejada em b e c.

As semelhanças que se destacam incluem a localização dos altos e baixos periféricos (Figura 18), que sugerem que o arcabouço estrutural do embasamento influenciou a sedimentação dos pacotes sobrepostos, refletida nos mapas da discordância e da base do sal (Figura 19). Em seção, observou-se que esse controle estrutural do embasamento nos altos e baixos pode estar associado ao tempo de atividade das falhas, que, no domínio Oeste, são controlados pelas falhas que se propagaram até a discordância U1 e no domínio Leste, se propagam até a base do sal (Figura 19).

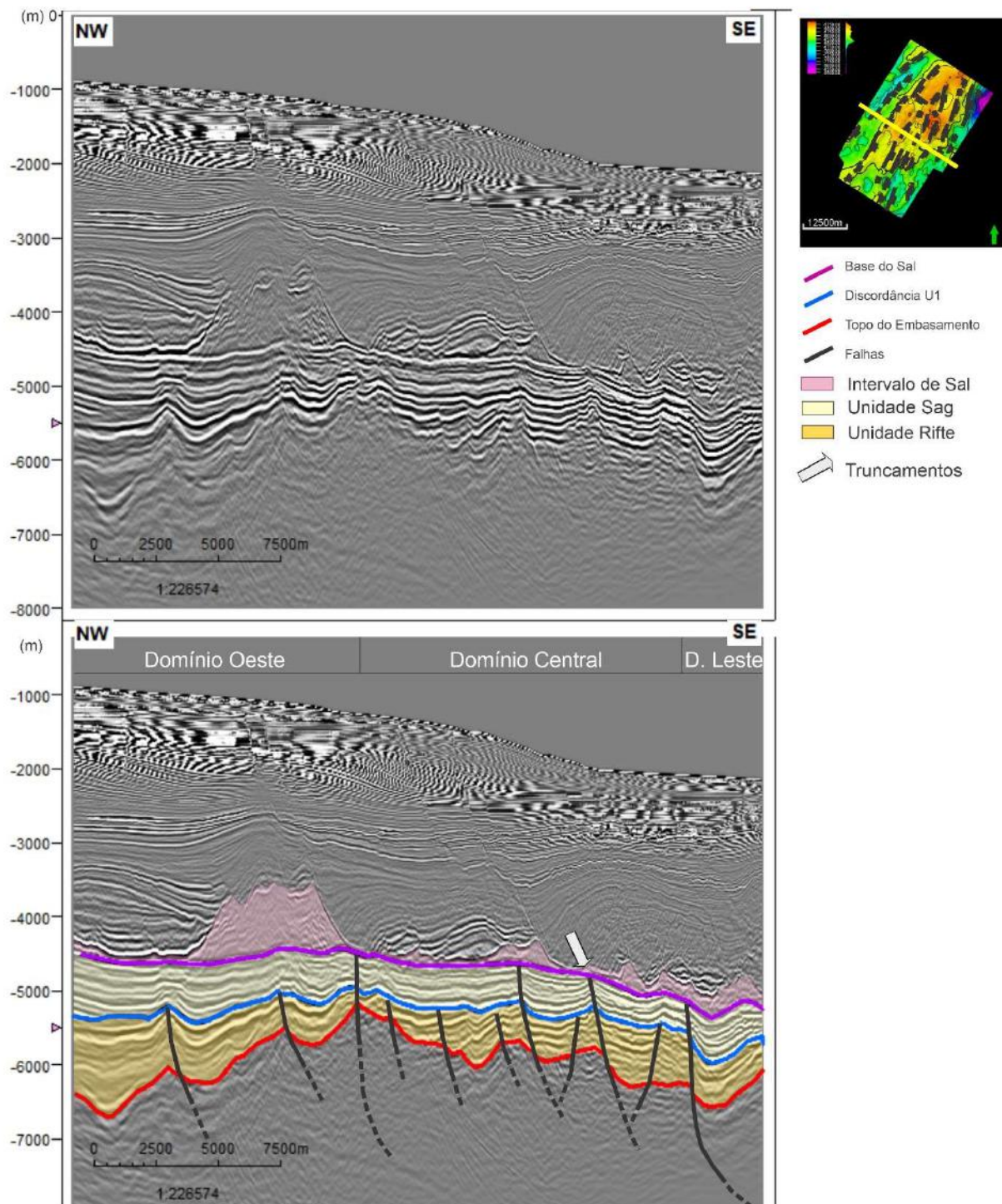


Figura 19: Seção *Dip* (Inline 2842), NW-SE, do centro da área de estudo, abrangendo todos os domínios estruturais. Note o controle estrutural das falhas sintéticas, com os tempos de atividade divididos em falhas que se propagam até a discordância U1 e falhas que se propagam até a base do sal, delimitando o domínio central. Note também que as falhas antitéticas se propagam até a discordância U1 e que o baixo periférico do embasamento no domínio Oeste, com grande preenchimento sedimentar. Exagero vertical = 3

Outra semelhança observada é o relevante controle tectônico do alto central do embasamento sobre os mapas da discordância U1 e da base do sal. As falhas do embasamento que se propagam até a base do sal, e controlam o alto central nas margens NE, SE e NW, também influenciam o arcabouço estrutural dos mapas dos horizontes sobrepostos (Figura 18). Esse controle tectônico é exercido pelas falhas sintéticas e antitéticas que deformam as unidades do pré-sal nessas porções. A influência da configuração das falhas sintéticas pode ser observada tanto no mapa da discordância, como no mapa da base do sal, pois este padrão de falhas apresentou dois tempos atividade, com o primeiro com as falhas se propagando até a discordância U1, observados em toda área de estudo, e o segundo com a propagação até a base do sal, observado no controle estrutural do alto central do embasamento (Figura 19). Já para as falhas antitéticas interpretadas, foi observado que elas influenciam apenas a unidade Rife e se propagam apenas até a discordância U1, com este padrão de falhas apenas observado sobre o alto central do embasamento (Figura 19).

As diferenças observadas na comparação entre os mapas de contorno estrutural mostram um baixo periférico do embasamento na margem Oeste do mapa, representado pelo número 2, na Figura 18a, que não é observada nos outros dois mapas (Figuras 18b e 18c). Esse espaço de acomodação gerado pela atividade das falhas do embasamento encontra-se preenchido por sedimentos da unidade Rife (Figura 19). Outra divergência entre os mapas está relacionada ao baixo periférico observado na porção NE da área de estudo, que é um expressivo baixo estrutural notado tanto no embasamento quanto na discordância U1, mas não é expressivo no mapa da base do sal (Figura 18c), apresentando uma influência significativamente menor do embasamento neste mapa.

Outra diferença observada está relacionada ao expressivo baixo vista no mapa da base do sal, na porção SE (Figura 18c), que, quando comparada com os mapas do embasamento e da discordância U1, indica uma subsidência relativamente maior (Figuras 18a e 18b). É possível associar essa subsidência com o controle estrutural da borda do alto central, através da atividade das falhas que se propagam até a base do sal.

A partir das informações dos poços 6-BRSA-318-RJS e 1-BRSA-182-RJS, o topo da unidade Rife é delimitado pela discordância U1, com truncamentos erosivos e plano-paralelos com os refletores da unidade Sag. O topo da unidade Sag também apresenta discordância com a base do sal, pois observa-se que o sal está depositado sobre o relevo herdado de uma possível erosão do sag, cujos truncamentos dos refletores podem ser observados em contato discordante entre o topo da unidade Sag com a base do sal (Figura 19). De acordo com o Winter et al. (2007), a discordância que marca o todo do rifte é denominada de discordância pré-neo-alagoas e é representada pelo topo da Formação Coqueiros, com idade relacionada ao topo do Aptiano Inferior, podendo estar relacionada à discordância U1, marca a mudança sismoestratigráfica para a unidade Sag neste trabalho. Para o topo da unidade Sag, o mesmo autor a relaciona ao topo da Formação Macabú, que possui idade relativa ao Aptiano Superior. A base dos evaporitos está relacionada à porção basal da Formação Retiro, que possui idade de deposição no Albiano Inferior, sendo relacionada ao horizonte da base do sal, que marca a mudança sismoestratigráfica do topo da unidade Sag, neste trabalho.

### **5.3 Influência do arcabouço estrutural do embasamento nas unidades do pré-sal**

Quando comparamos o mapa de contorno estrutural do embasamento aos mapas de isópacas da unidade Rife e Sag (Figura 20), as diferenças que se destacam são: (1) o timing das

falhas, que concentram maior e menor atividade relativa na unidade Rifte e Sag, respectivamente; (2) a menor influência do alto periférico NW do embasamento na unidade Sag; e (3) a pouca espessura da unidade Sag na porção SE do mapa, discordante com o arcabouço estrutural do embasamento. Para (1) e (2), é possível interpretar a baixa correlação nos mapas com a atividade das falhas do domínio Oeste (Figura 8), que se concentram na unidade Rifte, com poucas falhas se propagando até o Sag. Para (3), embora a influência do arcabouço do embasamento seja perceptível na unidade Rifte, ela apresenta sutil atuação na unidade Sag desta porção do domínio central, devido à baixa concentração de estruturas que se propagam até o Sag. Além disso, é possível observar que a diminuição de espessura do Sag nesta região pode estar relacionada com a exposição desta sessão a eventos erosivos, sob possível influência tectônica, evidenciada pela observação da discordância angular das unidades do Sag com a base do sal, através dos truncamentos dos respectivos refletores (Figuras 19).

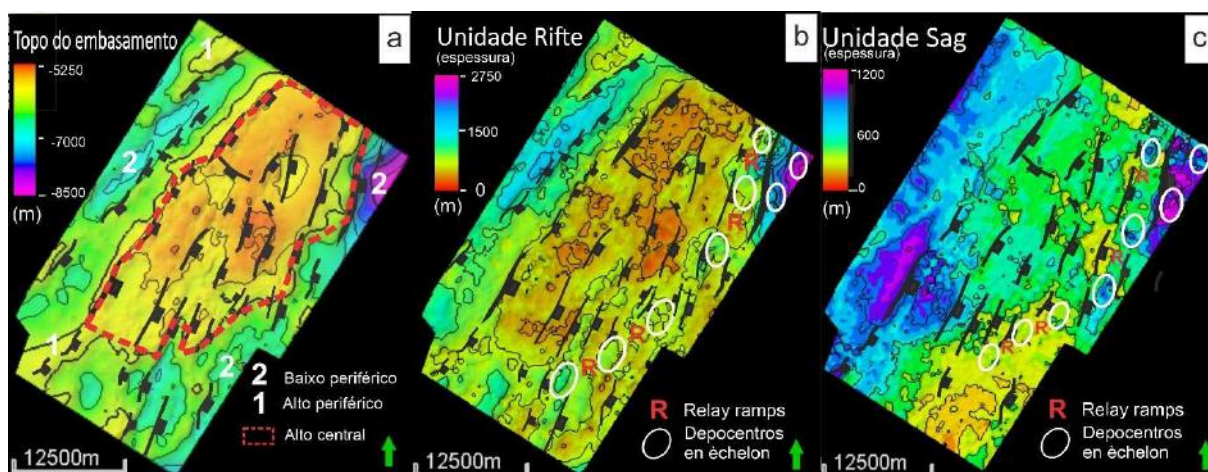


Figura 20: Comparação entre os mapas de contorno estrutural do topo do embasamento com os mapas de isópacas. a) Mapa do topo do embasamento, com falhas e identificação dos altos e baixos estruturais; b) Mapa de isópacas da unidade Rifte, com as falhas e a disposição *en échelon* dos depocentros; c) Mapa de isópacas da unidade Sag, com as falhas e a disposição *en échelon* dos depocentros. Notar também o padrão das falhas sintéticas segmentadas por *relay ramps*, e o controle estrutural do alto central e baixos e altos periféricos do embasamento nas unidades do pré-sal.

Para as semelhanças entre os mapas, destaca-se o controle tectônico exercido pelas falhas que configuram o embasamento, nas bordas NW, NE, SE e E do alto central e dos altos e baixos periféricos, nos mapas de isópacas das unidades Rifte e Sag (Figura 20). Isto é evidenciado pela repetição do padrão retilíneo provocado pelas falhas que se propagam, deformam e replicam o arcabouço do embasamento nas unidades do pré-sal de Campos, principalmente do alto central e do baixo periférico na margem NE da área de estudo (Figura 20).

Outra semelhança na comparação entre o mapa de contorno estrutural do embasamento com os mapas de isópacas das unidades Rifte e Sag (Figura 20), é a distribuição de depocentros segmentados *en échelon* e dispostos em *right-stepping*, com trend NE e mergulho para E/ESE nos três mapas, sugerindo uma componente oblíqua sinistral em resposta à direção de abertura WNW-ESE do rifte do Cretáceo Inferior (Savastano et al. 2017). Além disso, as segmentações mais significativas estão localizadas majoritariamente nas bordas SE, E e NE do alto central (Figura 20) e estão orientadas no mesmo trend estrutural dos domínios central e Leste (Figura 8). Strugale & Cartwright (2022) também observaram depocentros controlados por falhas orientadas para NE, formando hemigrábens com mergulho para Leste, em resposta a extensão WNW do rifte no Norte da Bacia de Campos. A concentração de depocentros *en échelon* nestes domínios pode estar relacionada à atividade das falhas, as quais demonstram possível atividade tardia, pois se propagam até a base do sal, (Figuras 19 e 20). A atividade tardia de falhas do rifte com trend NE/NNE relacionadas à formação de relay ramps também foi observada no extremo Sul da Bacia de Campos, onde foram descritas falhas formadas sob tectônica com componente sinistral do rifteamento oblíquo (Savastano et al. 2017).

Outras considerações podem ser feitas a partir da comparação dos mapas, como a evolução das falhas normais planares, que formam rampas de revezamento (relay ramps) e foram

relacionadas aos modelos sintéticos propostos por Faults & Varga (1998) (Fig. 21). Na área de estudo, o padrão mais comum observado que controla a distribuição dos depocentros e rampas de revezamento destacados nos mapas da unidade Rifte, Sag e topo do embasamento (Figura 20) é o sistema sintético (Figura 21a). Esse padrão é evidenciado pelas falhas sintéticas em estilo dominó, acomodadas em rampas de revezamento (Fig. 21b), por vezes conectadas por falhas de orientação NW (Fig. 21c). Porém, também são observadas falhas locais antitéticas (Figuras 21c e 21d), configurando pequenos horsts na margem SE do alto central, se propagando apenas na unidade Rifte. O padrão sintético continuou atuante na unidade Sag, onde falhas antitéticas não foram observadas. A atividade tardia de falhas do rifte com trend NE/NNE relacionadas à formação de relay ramps também foi observada no extremo Sul da Bacia de Campos, onde foram descritas falhas formadas sob tectônica com componente sinistral do rifteamento oblíquo (Savastano et al. 2017).



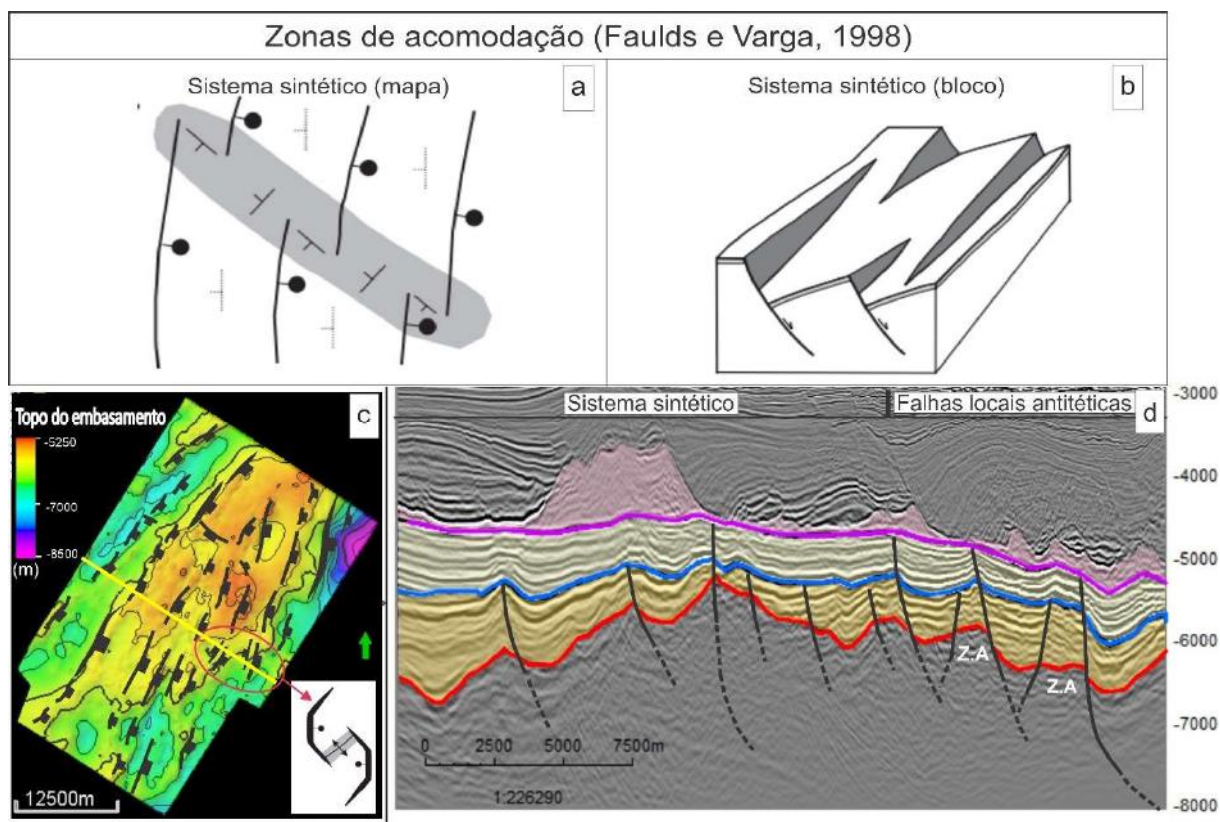


Figura 21: Comparação dos modelos de zonas de acomodação (Faulds & Varga 1998) com a disposição das falhas observadas na área de estudo. Note o mesmo padrão tectônico no modelo proposto para sistemas sintéticos e antitéticos em mapa e seção. a) Modelo em mapa para zona de acomodação sintética oblíqua. b) Bloco diagrama mostrando o sistema sintético em seção da zona de acomodação c) Mapa de contorno estrutural do embasamento com destaque a zona de acomodação antitética oblíqua na margem SE do alto central. d) Seção *Dip* (*Inline 2842*), NW-SE, interpretada, do centro da área de estudo, indicando as zonas de acomodação (Z.A) sintéticas e falhas antitéticas que configuram pequenos *horsts* observados.

Ainda em seção, a partir da discordância U1, é possível interpretar e diferenciar as falhas que cessaram atividade na unidade Rifte, no Aptiano Inferior, das falhas que continuaram em atividade na unidade Sag, no Aptiano Superior, onde observa-se que a influência estrutural do arcabouço do embasamento configura todo o intervalo da unidade Rifte, quando comparado com a unidade Sag, que apresenta menor influência. Vale ressaltar que grande parte das falhas que se propagam na unidade Sag são as mesmas que delimitam o alto central e os baixos periféricos do embasamento, sendo perceptível a influência estrutural do embasamento na unidade Sag da área de estudo (Figuras 20 e 21d). Na unidade Rifte, o espesso preenchimento sedimentar observado nos grábens e hemigrábens dos domínios Leste e Oeste coincide diretamente com os baixos do embasamento, enquanto as menores espessuras, localizadas no

domínio central, coincidem com a notável influência do alto central (Figura 21d). Para a unidade Sag, com a cessão da atividade de algumas falhas no Aptiano Inferior, em conjunto com a subsidência térmica observada na bacia, a acomodação sin-sedimentar desta unidade também foi cessada. Isso é marcado pela não observação de seções de crescimento nesta unidade, quando comparadas com às locais seções de crescimento da unidade Rifte (Figura 21d), resultando, conseqüentemente, em uma menor influência do arcabouço do embasamento nesta unidade.

#### **5.4 Análise do timing da atividade das falhas e seus efeitos tectônicos nas unidades do pré-sal.**

Foi possível correlacionar as falhas, os altos e os baixos estruturais do embasamento à configuração estrutural de toda sequência do pré-sal, analisando a influência dessas estruturas nas unidades sedimentares até a base do sal.

Quando correlacionado o período da atividade das falhas da área de estudo com as idades das unidades tectonossedimentares da Bacia de Campos propostas por Winter et al. (2007). Elas foram classificadas em relação ao timing de deformação dos horizontes estudados e foram subdivididas em falhas do embasamento que: (1) se propagam na unidade Rifte; (2) se propagam na unidade Sag; e (3) se propagam até a base do sal.

Para (1), observa-se que as falhas da unidade Rifte ocorrem em toda a área de estudo. A grande maioria delas propaga-se até a discordância U1 (Aptiano Inferior) e geram os grábens, hemigrábens e horsts em seção (Figura 19). À estas falhas, estão associados blocos rotacionados em estilo dominó (Figura 15), e, além disso, identificou-se que a concentração dos blocos rotacionados localiza-se nas porções NE, SE e NW do domínio central e em todo domínio Leste, onde é possível observar as maiores espessuras observadas na unidade Rifte (Figura 19).

Para (2), é possível observar que as falhas do arcabouço estrutural do embasamento que se propagam na unidade Sag e não atingem a base do sal, estão concentradas no domínio central, sobre o alto central. Essas falhas formam hemigrábens com pouco rejeito associado. Elas podem estar relacionadas a eventos de acomodação associados à atividade das falhas que controlam as bordas do alto central, ativas até o Albiano Inferior. Das falhas que não estão sobre o alto central, pode-se interpretar que estão conectadas aos altos periféricos do embasamento e ainda demonstram atividade até o Aptiano Superior, pois deformam o horizonte da discordância U1.

Para (3), foram identificadas falhas que se propagam até a base do sal (Aptiano Superior e Albiano Inferior) nos domínios central e Leste e controlam o alto central da área de estudo. Nestas foram delimitados os domínios estruturais deste trabalho (Figura 8). Observaram-se grandes rejeitos associados nas margens NW e NE do alto central, que formam hemigrábens com grande acúmulo de sedimentos, ocasionando as maiores espessuras das unidades Rife e Sag. Nota-se, localmente, seções de crescimento associadas a estas falhas na unidade Rife, na porção centro-Norte dos domínios central e Leste (Figura 10). Essas características podem ser observadas com maior clareza no domínio Leste, geralmente associadas às falhas que se propagam e deformam a base do sal, demonstrando atividade possivelmente até o Albiano Inferior (Figura 21d).

A partir disso, podemos sugerir que o período de atividade dessas falhas apresentou momentos distintos em relação à sedimentação do pré-sal da área de estudo.

No primeiro momento, observaram-se hemigrábens rotacionados na unidade Rife, com evidências de deposição sin-sedimentar, se propagando até a discordância U1. As falhas

associadas a estas estruturas são as que possuem o trend N60-45E, concentradas no domínio Oeste.

No segundo momento, a diferença na configuração angular dos refletores das unidades do Rifte e Sag (Figuras 10, 15 e 19), separados pela discordância U1, nos domínios estruturais, demonstram diferenças no padrão erosivo desta discordância na área de estudo. Este fator pode estar associado à atividade das falhas que tocam a base do sal, no Aptiano Superior e Albiano Inferior. Estas possuem trend N45-20E, se propagam e deformam a base do sal e localizam-se nos domínios central e Leste. Além disso, constatou-se que a maior deformação da base do sal está concentrada na margem NE do alto central e está relacionada às falhas com trend N20E do domínio Leste. Fetter (2009) também observou essa influência do arcabouço estrutural do embasamento, onde os principais depocentros e altos estruturais da Bacia de Campos são controlados pela atividade das falhas do embasamento. Estas também possuem trend NE e associou-se à atividade das falhas que se propagam até a base do sal, ativas no Aptiano Superior e Albiano Inferior, à herança estrutural que pode ter influenciado a halocinese observada na Bacia de Campos. Também se observou que a atividade das falhas do arcabouço estrutural do embasamento influenciou a sedimentação na porção basal da unidade Sag, com algumas falhas deformando esses refletores, quando comparado ao topo desta unidade. Essa configuração é vista como similar à tectônica branda, observada para a Supersequência pós-Rifte proposta por Winter et al. (2007), quando comparada à atividade da unidade Rifte. As falhas do arcabouço estrutural com blocos rotacionados em estilo dominó associados, também foram observados por Guardado et al. (1989; 2000), para a Bacia de Campos, com as similaridades e diferenças na escala e segmentação já apresentadas no tópico 5.1.

Portanto, quando se relaciona os trends dos domínios estruturais aos seus respectivos períodos de atividade, é possível sugerir uma relação temporal relativa entre as falhas que

controlam o arcabouço do embasamento. No domínio Oeste, as falhas apresentam atividade até o Aptiano Inferior, no domínio central a atividade está relacionada ao Aptiano Superior e, localmente, no Albiano Inferior, e, no domínio Leste, todas as falhas permanecem ativas até o Albiano Inferior.

## 6 CONCLUSÕES

Os resultados permitiram compreender as principais estruturas que compõem o arcabouço estrutural do embasamento acústico e analisar sua influência na evolução tectônica das unidades do pré-sal da área de estudo.

As falhas interpretadas possuem *trend* preferencial NE, mergulho para SE, são sintéticas e estão segmentadas *en échelon*, formando grábens, hemigrábens e altos estruturais em padrão *right-stepping*. Os diferentes rejeitos associados às falhas do arcabouço do embasamento influenciam a espessura das unidades do pré-sal e, pontualmente, influenciam a base do sal. Localmente, falhas antitéticas de mesma orientação, assim como falhas sintéticas de *trend* NW e mergulhos para NE e SW foram observadas.

A partir da influência da propagação das falhas e da geometria do topo do embasamento nas unidades sismoestratigráficas do rifte e do sag, observaram-se diferentes tempos de atividades de falhas e também foram definidos 3 domínios estruturais, Central, Leste e Oeste. As falhas do domínio Oeste, de orientação N60-45E, foram interpretadas como ativas até o Aptiano Inferior. As do domínio Central e Leste, de orientação N45-20E e N20E, respectivamente, foram interpretadas com atividade até o Albiano Inferior, constatada pela influência na espessura sedimentar e estruturas sedimentares da unidade Sag, além da deformação local da base do sal.

A integração dos mapas de contorno estrutural e isópacas sugerem que as falhas geradas pelo rifte são as que controlam o arcabouço do embasamento, com a maior parte delas localizadas nos domínios Central e Leste, se propagando e controlando as unidades Rifte e Sag, até a base

do sal. O reflexo disto é observado principalmente nas bordas NE, NW e SE do alto central do embasamento, que são controlados por essas falhas, onde é perceptível a influência do arcabouço estrutural nos mapas de contorno estrutural e nos mapas de isópacas da unidade Rifte e Sag, que possuem influência menor destas estruturas quando comparada com o mapa da unidade Rifte, com uma menor quantidade de falhas se propagando até essa unidade.

Os depocentros segmentados *en échelon*, observados nos mapas de isópacas, configuram rampas de revezamento sintéticas por toda área de estudo, causada pela deformação oblíqua do arcabouço do embasamento, em resposta à extensão WNW-ESE do rifteamento nessas estruturas. Também são observadas falhas antitéticas, localmente formando pequenos *horsts*. A segmentação dos depocentros em padrão *right-stepping* sugere uma componente oblíqua sinistral ativa durante a atividade das falhas da unidade Rifte, com os depocentros separados por rampas de revezamento sintéticas. Na unidade sag, os depocentros estão separados apenas por rampas de revezamento sintéticas.

Para as estruturas regionais propostas por Guardado et. al (1989; 2000) que coincidem com a área de estudo, este trabalho trouxe um refinamento da geologia estrutural para as falhas que configura a porção Sul do Alto Externo e para o Gráben Leste da Bacia de Campos.

Com base nessas observações, foi constatado que as falhas do arcabouço estrutural do embasamento, relacionadas às margens NE, NW e SE do alto central, geraram espaço de acomodação para as sequências sedimentares e influenciaram diretamente a configuração e evolução das unidades do pré-sal da porção central da Bacia de Campos, com maior influência na unidade Rifte, quando comparada à unidade Sag.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F.F.M.; BRITO NEVES, B.B.; FUCK, R. 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews* 17: 1-29

ANP (Agência Nacional De Petróleo). Boletim Mensal da Produção de Petróleo e Gás Natural. Fevereiro de 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins-anp/boletins/arquivos-bmppgn/2023/boletim-novembro.pdf> Acessado em: 16.01.2024.

ANP (Agência Nacional De Petróleo). Sumário Geológico e setores em oferta/Bacia de Campos, 2017. Disponível em: [https://www.gov.br/anp/pt-br/rodadas-anp/rodadas-concluidas/concessao-de-blocos-exploratorios/15a-rodada-licitacoes-blocos/arquivos/areas-oferecidas/sumario\\_geologico\\_r15\\_campos.pdf](https://www.gov.br/anp/pt-br/rodadas-anp/rodadas-concluidas/concessao-de-blocos-exploratorios/15a-rodada-licitacoes-blocos/arquivos/areas-oferecidas/sumario_geologico_r15_campos.pdf) Acessado em: 08/05/2024

BENNETT, S. E. K., AND M. E. OSKIN, 2014, Oblique rifting ruptures continents: Example from the Gulf of California shear zone: *Geology*, 42, 215–218, doi: 10.1130/G34904.1

CHANG, H.K., KOWSMANN, R.O., FIGUEIREDO, A.M.F., BENDER, A.A. 1992. Tectonics and stratigraphy of the east Brazil rift system - an overview *Tectonophysics*, 213, pp. 97-138

CORTI, G., 2012, Evolution and characteristics of continental rifting: Analog modeling-inspired view and comparison with examples from the East African Rift System: *Tectonophysics*, 522–523, 1–33, doi: 10.1016/j.tecto.2011.06.010.

DOMINGUES, D. L. P. Caracterização geológica e geomecânica de travertinos. 2011. 122 p. Monografia (Dissertação para Engenharia Civil) - PUC - RJ, Rio de Janeiro, 2011.

FAULDS, J. E., VARGA, R.J., 1998. The role of accommodation zones and transfer zones in the regional segmentation of extended terranes. *Geol. Soc. Am. Spec. Paper* 323, 45p.

FETTER, M., 2009. The role of basement tectonic reactivation on the structural evolution of Campos Basin, offshore Brazil: evidence from 3D seismic analysis and section restoration. *Marine Petroleum Geology*. 26, 873-886.

GUARDADO, L.R.; GAMBOA, L.A.P.; LUCCHESI, C.F. 1989. Petroleum geology of the Campos basin, Brazil: a model for producing Atlantic type basins. In: EDWARDS, J.D., SANTOGROSSI, P.A. *Divergent/Passive Margin Basins*. Tesla: AAPG Memoir, 1989. v.48, p. 3-79.

GUARDADO, L.R.; SPADINI, A.R.; BRANDÃO, J.S.L.; MELLO, M.R. 2000. Petroleum system of the Campos Basin. In: Mello M.R. & Katz B.J. (eds.) *Petroleum systems of South Atlantic margins: American Association Petroleum Geologists Memoir*, 73: 317-324



HEILBRON M., VALERIANO C.M., TASSINARI C.C.G., ALMEIDA J.C.H., TUPINAMBÁ M., SIGA Jr. O., TROUW R.A.J. 2008. Correlation of Neoproterozoic terranes between the Ribeira Belt, SE Brazil and its African counterpart: comparative tectonic evolution and open questions. In: Pankhurst R.J., Trow R.A.J., Brito Neves B.B, De Witt. (eds.) West Gondwana: Pre-Cenozoic Correlations across the South Atlantic Region. London, Geological Society, Special Publication, 294 p., p. 211-232.

KUKLA, P. A.; STROZYK, F.; MOHRIAK, W. U. South Atlantic salt basins – Witnesses of complex passive margin evolution. *Gondwana Research*, v. 53, p. 41–57, 1 jan. 2018.

MAIA, Marcia; CORRE, Sandrine; GENTE, Pascal. Time evolution of the interaction between the tristan hotspot and the south atlantic ridge. In: 8th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. European Association of Geoscientists & Engineers, 2003. p. cp-168-00352.

MANTESSO-NETO, V. et al. Geologia do continente sul-americano:: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Beca, p. 383-405, 2004.

MILANI, E. J. et al. Petróleo na margem continental brasileira: geologia, exploração, resultados e perspectivas. *Brazilian Journal of Geophysics, SciELO Brasil*, v. 18, n. 3, p. 351-396, 2000.

MITCHUM JR, R.M., VAIL, P.R. and SANGREE, J.B., 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level: Part 6. Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences: Section 2. Application of seismic reflection configuration to stratigraphic interpretation

MOHRIAK, W.U.; MACEDO, J.M.; CASTELLANI, R.T.; RANGEL, H.D.; BARROS, A.Z.N.;LATGÉ, M.A.L., RICCI, J.A., MIZUSAKI, A.M.P.; SZATMARI, P., DEMERCIAN, L.S., RIZZO, J.G. & AIRES, J.R., 1995. Salt tectonics and structural styles in the deep-water province of the Cabo Frio region, Rio de Janeiro, Brazil. In: Jackson, M.P.A., Roberts, D.G., Snelson, S. (Eds.), *Salt Tectonics, A Global Perspective*. American Association of Petroleum Geologists Memoir, vol. 65, pp. 273-304.

MOHRIAK, W.U.; MACEDO, J.M.; CASTELLANI, R.T.; RANGEL, H.D.; BARROS, A.Z.N.;LATGÉ, M.A.L.; ROZZI, J.A.; MIZUSAKI, A.M.P.; SZATMARI, P.; RIZZO, J.G. & AIRES, J.R. – 1995. Salt tectonics and structural styles in the deep-water province o the Cabo Frio region, Rio de Janeiro, Brazil. In *Salt tectonics: a global perspective*, eds. Jackson, M.P.A.; Roberts, D.G., and Nelson, S., p. (273-304). American Association of Petroleum Geologists, Memoir 65, Tulsa , USA, 1985.

MOHRIAK, W. U. 2003. Bacias Sedimentares da Margem Continental Brasileira. *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*. C. S. L. A. Bizzi, R. M. Vidotti e J. H. Gonçalves. Brasília, DF, Brasil, CPRM. 1: 82.

MOHRIAK, W. U. Recursos energéticos associados à ativação mesozóica-cenozóica da América do Sul. in: MANTESSO-NETO, V et al., 2004. *Geologia do continente Sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. 2004.

MOHRIAK, W. U.; PALAGI, P. R.; MELLO, M. R. Tectonic evolution of South Atlantic salt basins. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. Abstract, n. 10, p. 424–425, 1998.

MORLEY, C. K., C. HARANYA, W. PHOOSONGSEE, S. PONGWAPEE, A. KORNSAWAN, AND N. WONGANAN, 2004, Activation of rift oblique and rift parallel pre-existing fabrics during extension and their effect on deformation style: Examples from the rifts of Thailand: *Journal of Structural Geology*, 26, 1803–1829, doi: 10.1016/j.jsg.2004.02.014.

RANGEL, H. D., and C. C. MARTINS, 1998, Main exploratory compartments, Campos Basin, in *Searching for oil and gas in the land of giants: Search*, Rio de Janeiro, Schlumberger, p. 32–40.

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

SAVASTANO, V.L.M., SCHMITT, R.S., ARAÚJO, M.N.C., INOCÊNCIO, L.C., 2017. Rift brittle deformation of SE-Brazilian continental margin: kinematic analysis of onshore structures relative to the transfer and accommodation zones of southern Campos Basin. *J. Struct. Geol.* 94, 136–153

SCHINELLI, M. C. 2013. Material didático para o curso de interpretação sísmica para geólogos. ABGP, Rio de Janeiro-RJ, Brasil (Apostila).

SHERIFF, R. E. *Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics*, 3. ed., Society of Exploration Geophysicists – SEG, Tulsa, OK, 1991.

STANTON, N. Caracterização Crustal da Margem Sudeste Brasileira através de magnetometria e suas implicações tectônicas. 2009. 165 p. Tese (Doutorado em Geologia) - UERJ, Rio de Janeiro, 2009.

STRUGALE & CARTWRIGHT. Tectono-stratigraphic evolution of the rift and post-rift systems in the Northern Campos Basin, offshore Brazil. *Basin Research*, Volume 34, Issue 5, Sep 2022, p. 1655 – 1687

SVENSEN, H. H. et al. Gondwana Large Igneous Provinces: plate reconstructions, volcanic basins and sill volumes. *Geological Society, London, Special Publications*, v. 463, n. 1, p. 17–40, 2018.

WHITE, R.; MCKENZIE, D. Magmatism at rift zones: the generation of volcanic continental margins and flood basalts. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Wiley Online Library, v. 94, n. B6, p. 7685-7729, 1989.

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.

ZWAAN, F., & SCHREURS, G. (2017). How oblique extension and structural inheritance influence rift segment interaction: Insights from 4D analog models. *Interpretation*, 5(1), SD119-SD138. <https://doi.org/10.1190/INT-2016-0063.1>