

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
CURSO DE GEOLOGIA**

LEONARDO AUGUSTO BORCK LARROZA

Mapeamento sísmico de sequências evaporíticas estratificadas da Formação Ariri no norte da Bacia da Santos

Curitiba

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
CURSO DE GEOLOGIA

LEONARDO AUGUSTO BORCK LARROZA

Mapeamento sísmico de sequências evaporíticas estratificadas da Formação Ariri no
norte da Bacia da Santos

Projeto apresentado à disciplina
de Trabalho de Conclusão de
Curso I (GC-119), sob orientação
da Professora Dr^a Barbara
Trzaskos e coorientação da
Geóloga Giovana Rebelo Diório.

Curitiba
2023

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha família, por ser meu exemplo de honestidade, gentileza e dedicação.

Aos meus amigos, por serem, também, minha família.

À educação pública brasileira, que me deu as ferramentas para aproveitar as oportunidades a mim oferecidas e a habilidade de criar as minhas próprias.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha orientadora Prof. Barbara Trzaskos pelas oportunidades que eu tive nos últimos anos. Foi um prazer ter sido bolsista de iniciação científica sob sua orientação ao longo deste período de de IC/TCC - e ajudar com o projeto de Prospecção e Pesquisa Mineral foi uma das experiências mais enriquecedoras que tive na universidade.

Agradeço também à Geóloga (e quase mestre) Giovana Rebelo Diório pela orientação neste TCC e por transmitir com tanta paciência e empolgação um assunto tão complexo e fascinante como a tectônica do sal.

Agradeço ao *student chapter* da AAPG, e à Vanessa da Silva Reis Assis e Giovana, pela oferta do curso de introdução à interpretação sísmica, que foi essencial para o desenvolvimento deste projeto.

Reconheço aqui também meu amor e respeito pela UFPR, que me acolheu antes mesmo da geologia, quando cursava engenharia, e se tornou minha casa. Além da educação de qualidade, serviços gratuitos como o Restaurante Universitário e o Intercampi fizeram toda a diferença para a minha permanência na universidade e devem ser defendidos com unhas e dentes para as próximas gerações de estudantes.

Este Trabalho de Conclusão de Curso encerra o ciclo da graduação, que foi central na minha vida, e extrapolou os limites da universidade. Fizeram parte desse período meus amigos, família e colegas de trabalho. Agradeço a todos, pois, de forma ou de outra, todas tiveram um papel importante nele.

O curso de geologia foi, para mim, um equilíbrio contínuo entre celebrar minhas conquistas e reconhecer meus privilégios, abrir mão de certas coisas e reconhecer outras que vieram em troca. E no fim, valeu a pena.

RESUMO

A Bacia de Santos é uma bacia sedimentar de margem passiva localizada no litoral do Brasil. Possui área de aproximadamente 350.000 km² e espessuras sedimentares de até 15 km. Sua formação está relacionada à ruptura do Supercontinente Gondwana, que resultou na abertura do Oceano Atlântico Sul. Houve três fases evolutivas: rifte, pós-rifte e drifte (fase atual). Durante a fase pós rifte, houve a deposição da Formação Ariri, unidade evaporítica da bacia, com espessuras de até cerca de 2 km e intercalação de diferentes sais precipitados em sequências evaporíticas. A tectônica do sal nesta camada formou diferentes estruturas de sal que desempenham papel importante na formação e preservação de reservas de petróleo e gás no pré-sal, atuando como selo e trapa. Estudos recentes têm utilizado dados sísmicos de alta resolução para analisar as camadas de sal e sua deformação interna na Bacia de Santos. As chamadas LES (*layered evaporite sequences*) fornecem *insights* sobre o fluxo de sal e mecanismos de deformação. São também importantes para a predição de problemas geotécnicos relacionados à perfuração de camadas de sal com caráter mais dúctil. O objetivo deste trabalho foi realizar o mapeamento sísmico de horizontes de LES e entender seus padrões deformacionais. Foi selecionada área de estudo de aproximadamente 1.000 km² na porção sudoeste do bloco sísmico Franco Lara, no norte da Bacia de Santos, que coincide com importantes campos produtores de petróleo. Os dados foram disponibilizados ao LABAP/UFPR pela ANP por meio do pedido 10982 e o mapeamento foi feito com o *software* OpendTect Pro da dGB Earth Science. Foram selecionadas 51 seções sísmicas 2D a partir do Bloco 3D e interpretados cinco horizontes em cada uma: fundo do mar, topo e base do sal, e dois horizontes de evaporitos estratificados: LES-topo e LES-base. Foi utilizado um poço para compreender a litologia das camadas. A alta resolução e contraste de impedância acústica permitiram identificar os horizontes e gerar superfícies 3D e mapas de controle estrutural. A estrutura de sal da área foi classificada como muralha de sal, sem janelas de sal, delimitada por porções com menores espessuras de sal. O intervalo entre LES-base e base do sal é composto essencialmente por halita e ela é a fonte de sal dos diápiros ao longo da área. As duas LES mapeadas apresentam padrões deformacionais distintos. Enquanto a LES-base é mais intensamente deformada e frequentemente se perde em meio à halita, LES-topo está mais preservada. Dois fatores podem justificar esses padrões: diferença composicional e reológica e proximidade do intervalo com predominância de halita na base. LES-base é composta por intercalação de halita com anidrita (caráter competente) e está próxima ao intercalo com halita. LES-topo é composta por intercalação de halita com carnalita (caráter incompetente) e está mais distante da camada de halita.

Palavras-chave: Tectônica do sal; *Layered evaporite sequences* (LES); modelagem 3D.

ABSTRACT

The Santos Basin is a sedimentary basin located off the coast of Brazil, characterized by its passive margin. It spans an area of approximately 350,000 square kilometers with sedimentary layers reaching up to 15 kilometers in thickness. Its formation is linked to the breakup of the Gondwana Supercontinent, leading to the opening of the South Atlantic Ocean. The basin's evolution occurred in three phases: rift, post-rift, and the current drift phase. During the post-rift phase, the deposition of the Ariri Formation took place. This evaporitic unit within the basin has thicknesses of up to about 2 kilometers, featuring sequences of evaporite deposits comprising various precipitated salts. The salt tectonics within this layer formed different salt structures crucial in the formation and preservation of oil and gas reserves in the pre-salt layer, acting as seals and traps. Recent studies have utilized high-resolution seismic data to analyze the salt layers and their internal deformation in the Santos Basin. Layered Evaporite Sequences (LES) offer insights into salt flow and deformation mechanisms, crucial for predicting geotechnical issues related to drilling through more ductile salt layers. The objective of this study was to conduct seismic mapping of LES horizons and comprehend their deformation patterns. An approximately 1,000 square kilometer study area in the southwestern portion of the Franco lara seismic block, located in the northern region of the Santos Basin, was chosen. This area coincides with significant oil-producing fields. Data for the study were provided to LABAP/UFPR by ANP via request 10982, and mapping was carried out using the OpendTect Pro software from dGB Earth Science. Fifty-one 2D seismic sections were selected from the 3D Block, and five horizons were interpreted in each: seabed, top and base of the salt layer, and two horizons of stratified evaporites: LES-top and LES-base. Well data were used to understand the lithology of the layers. High resolution and acoustic impedance contrast enabled the identification of horizons, generating 3D surfaces and structural control and isopach maps. The salt structure in the area was classified as a salt wall without salt windows, bordered by regions with thinner salt deposits. The interval between LES-base and the base of the salt layer consists primarily of halite and serves as the salt source for diapirs across the area. The two mapped LES exhibit distinct deformation patterns. While LES-base displays more intense deformation and often gets lost within the halite, LES-top is better preserved. Two factors potentially explain these patterns: compositional and rheological differences and the proximity of the interval dominated by halite at the base. LES-base comprises intercalations of halite with anhydrite (competent character) and is close to the intercalation with halite. LES-top comprises intercalations of halite with carnallite (incompetent character) and is farther away from the halite layer.

Keywords: Salt tectonics; Layered evaporite sequences (LES); 3D modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de localização.....	3
Figura 2: Carta cronoestratigráfica e seção tipo da Bacia de Santos, modificado de Pereira e Feijó (1994).....	6
Figura 3: Modelo esquemático de ciclo ideal de deposição de uma sequência evaporítica.....	8
Figura 4: Diferentes tipos de estruturas de sal, seus nomes e formas.....	9
Figura 5: Modelo de evolução da deformação do pacote evaporítico da Fm. Ariri proposto por Gamboa et al. (2008).....	11
Figura 6: Fluxograma de etapas de trabalho com a utilização do software OpendTect... 13	
Figura 7: Exemplo de seção sísmica convencional e com aplicação do atributo Pseudo Relief.....	16
Figura 8: Seções sísmicas representativas com os cinco horizontes interpretados na área de estudo.....	18
Figura 9: Correlação de dados sísmicos com dados de poço 1-BRSA-618-RJS.....	20
Figura 10: Mapas de contorno estrutural gerados a partir dos horizontes mapeados..	22
Figura 11: Superfícies 3D geradas a partir da interpolação dos horizontes sismoestratigráficos topo do sal e base do sal.....	23
Figura 12: Seção sísmica (in-line 11866) com destaque para o horizonte LES-topo, que acompanha o topo do sal e desaparece ao ascender junto a um diápiro de sal...	24
Figura 13: Seção sísmica (cross-line 9946).....	25
Figura 14: Exemplo de deformação interna em que a ascensão de pacotes de halita deformam as LES subjacentes.....	27
Figura 15: Exemplo posição com camada de sal menos espessa, onde as LES se perdem.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características físicas dos principais minerais evaporíticos.....	8
Tabela 2: Profundidade máxima e mínima dos horizontes sismoestratigráficos interpretados.....	21

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
ANP	Agência Nacional do Petróleo
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
Fm.	Formação
LABAP	Laboratório de Análise de Bacias
LES	<i>Layered Evaporite Sequences</i>
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UTM	<i>Universal Transverse Mercator</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	3
2 CONTEXTO GEOLÓGICO.....	4
3 SEQUÊNCIAS EVAPORÍTICAS E TECTÔNICA DO SAL.....	7
3.1 Sequências evaporíticas.....	7
3.2 Tectônica do sal.....	8
3.3 Formação Ariri: o sal da Bacia de Santos.....	9
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	12
4.1 Materiais.....	12
4.2 Métodos.....	13
4.2.1 Definição da área de estudo.....	13
4.2.2 Fluxo de trabalho dentro do software OpendTect.....	14
4.2.2.1 Definição da malha das seções sísmicas.....	14
4.2.2.2 Mapeamento sísmico.....	14
4.2.2.3 Interpolação e geração de mapas de controle estrutural.....	16
5 RESULTADOS.....	17
5.1 Estruturas de sal e feições observadas.....	23
6 DISCUSSÕES.....	28
7 CONCLUSÕES.....	29

ANEXO I - Termo solicitação de dados à ANP

ANEXO II - Relação de linhas sísmicas com horizontes interpretados e suas coordenadas UTM (Datum SAD69, Zona 23S)

ANEXO III - Perfil Composto do poço 1-BRSA- 618-RJS

1 INTRODUÇÃO

O intervalo aptiano (Eocretáceo) da Bacia de Santos compreende rochas evaporíticas¹ (Fm. Ariri) que foram depositadas em ambiente de transição entre a fase riftee e a fase de margem passiva, iniciada com a abertura definitiva do Oceano Atlântico. O entendimento da dinâmica do sal é crucial para a exploração de petróleo em águas profundas nas bacias da margem continental do Atlântico Sul, já que a mobilização do sal controla diretamente principalmente dois componentes fundamentais para a formação de jazidas petrolíferas: a armadilha e o selo, que permitem a contenção e o armazenamento de petróleo (Pereira & Feijó, 1995; Gamboa et al., 2008).

A Fm. Ariri desempenha papel importante como selante no sistema petrolífero do pré-sal, na margem leste do Brasil. Estruturas de sal formadas pela deformação dessa camada evaporítica, aliada a seu comportamento plástico e caráter incompressível, funcionam como armadilhas para o acúmulo de hidrocarbonetos. O mapeamento destas estruturas são guias fundamentais para a exploração de óleo e gás no pré-sal (Gamboa et al., 2008; Fossen, 2016).

Dados sísmicos de alta resolução da Bacia de Santos obtidos nos últimos anos possibilitam interpretar sua estratigrafia de forma detalhada. Além de identificar o topo e a base da camada de sal, correspondente à Fm. Ariri, é possível visualizar sequências evaporíticas estratificadas (ou LES²) com alto contraste. A análise sísmica dessas sequências evidencia diversas estruturas de sal e estilos estruturais que podem ser mapeados e interpolados, gerando modelos 3D (Bose & Sullivan, 2022).

Sequências evaporíticas seguem uma ordem de precipitação de acordo com a salinidade da salmoura da qual se originam: anidrita, halita e *bittern salts*, e cada sal possui propriedades físicas distintas. A variação composicional e a consequente estratigrafia reológica controlam seus estilos estruturais internos, e as características físicas distintas destes sair garantem contrastes de impedância acústica que são nítidos nos refletores sísmicos (Rowan et al., 2019; Bose & Sullivan, 2022).

¹ Neste trabalho também são referidos como sal ou evaporitos.

² *Layered evaporite sequences*, traduzido como sequências evaporíticas estratificadas.

A interpretação sísmica de detalhe da porção interna da camada de sal é uma metodologia ainda pouco explorada. Com o mapeamento sistemático das LES é possível obter *insights* sobre como as camadas de diferentes sais estratificados da Fm. Ariri se comportaram durante a sua deformação. A maior competência de LES e alto contraste de impedância acústica são valiosos registros estratigráficos da história deformacional de bacias evaporíticas (Rowan et al., 2019; Bose & Sullivan, 2022).

A análise das LES pode ser útil também para investigar problemas geotécnicos relacionados ao sal, auxiliando na previsão de acumulações de hidrocarbonetos e até locais geotecnicamente instáveis com risco de perfuração (Ferreira, 2014; Bose & Sullivan, 2022).

No contexto de bacias evaporíticas de margem passiva no Brasil, a região norte da Bacia de Santos (domínio salífero transicional da bacia) destaca-se pelos proeminentes corpos de sal, expressivos em área e espessura, e pela importância econômica para exploração de hidrocarbonetos. Além disso, campanhas de pesquisa sísmica marítima foram conduzidas recentemente na região, com dados modernos e de alta resolução disponibilizados ao público, como o bloco sísmico Franco lara, alvo deste trabalho.

Foi selecionada a área de estudo da Figura 1, no norte da Bacia de Santos, a cerca de 200 km da capital do Rio de Janeiro. Ela tem aproximadamente 1.000 km² e localiza-se na porção sudoeste do bloco sísmico Franco lara, que por sua vez tem cerca de 3.700 km².

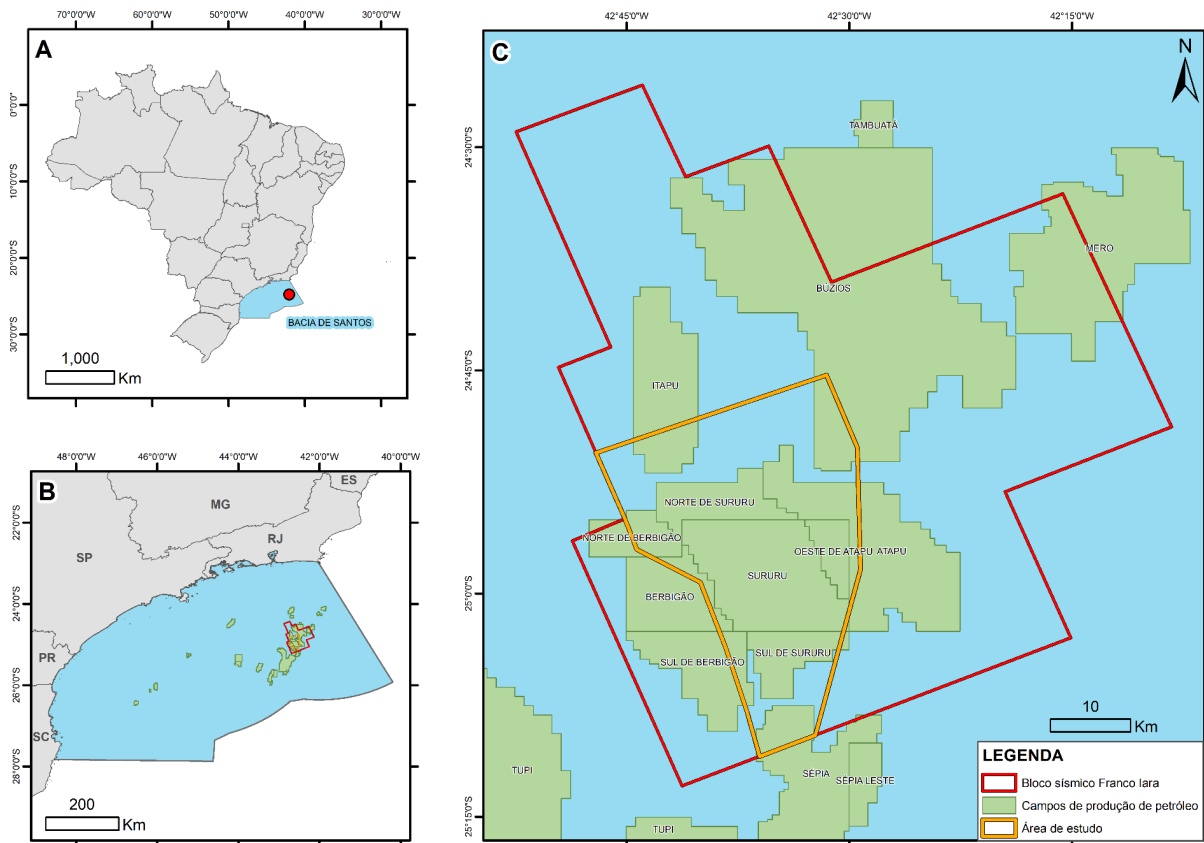


Figura 1: Mapa de localização. (A) Bacia de Santos e bloco sísmico Franco Lara; (B) Campos de produção de petróleo na Bacia de Santos; (C) Detalhe para a área de estudo e sua posição em relação ao bloco Franco Lara e os atuais campos de produção. Sistema de Coordenadas Geográficas (Datum Sirgas 2000). Fonte dos dados de campos de produção: ANP (2023).

1.1 Objetivos

Tendo em vista o exposto acima, o presente trabalho apresenta três objetivos principais: (1) Realizar o mapeamento sísmico sistemático de dois horizontes sismoestratigráficos de LES na área de estudo, além do fundo do mar e topo e base do sal. (2) Gerar mapas de contorno estrutural dos horizontes de LES; e (3) Descrever padrões deformacionais dos horizontes de LES, correlacionando-os entre si.

Dessa forma, o trabalho visa contribuir para o detalhamento das sequências evaporíticas estratificadas na porção norte da Bacia de Santos, auxiliando no entendimento da tectônica do sal na bacia e colaborando com estudos de prospecção de petróleo no pré-sal e no pós-sal.

2 CONTEXTO GEOLÓGICO

A Bacia de Santos está localizada na região sudeste da margem continental brasileira, ao longo da costa do Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná e Santa Catarina. Possui cerca de 350.000 km² de área e se prolonga até cotas batimétricas de 3.000 m, fazendo divisa com a Bacia de Campos a nordeste e com a Bacia de Pelotas a sul. Tem espessuras sedimentares da ordem de até 15 km nos depocentros da bacia (De Mio, 2005).

É uma ampla bacia sedimentar de margem passiva pertencente à Margem Sudeste Brasileira. O limite norte da Bacia de Santos é definido pelo Alto de Cabo Frio, um alto do embasamento proximal, que a separa da Bacia de Campos. Em sua direção afinam os estratos do Albiano ou mais jovens (Gamboa et al., 2008).

Ao sul, a bacia é delimitada pelo lineamento formado pela Dorsal de São Paulo, o Alto de Florianópolis e a Zona de Fratura de Florianópolis, que são grandes feições regionais que a separam da Bacia de Pelotas (Mohriak et al., 1995; Gamboa et al., 2008; Assine et al., 2008).

Sua geologia está sintetizada na carta estratigráfica da Figura 2 - elaborada por Pereira & Feijó (1994), adaptada por Assine et al. (2008) e utilizada como padrão pela ANP e Petrobrás - que apresenta informações lito e cronoestratigráficas, ilustra a arquitetura estratigráfica das diferentes unidades, e fornece informações sobre os ambientes sedimentares, as sequências deposicionais as fases da evolução tectônica da bacia.

A Bacia de Santos faz parte do conjunto de bacias da margem leste brasileira que se formaram no contexto da separação da placa Sul-Americana da Africana (Cretáceo, há cerca de 145 Ma), na evolução da ruptura do Gondwana Ocidental (Mohriak et al., 2008) que culminou com a abertura do Oceano Atlântico Sul e implantação das bacias marginais brasileiras no chamado Sistema de riftes do Leste Brasileiro (Pereira et al., 1986; Chang et al., 1992; De Mio, 2005).

A evolução tectonoestratigráfica da Bacia de Santos é dividida em sequências de sin-rifte, pós-rifte e drifte, baseadas na estratigrafia de sequências (Moreira, 2007).

A fase sin-rifte, cujos registros mais antigos datam do Hauteriviano, e que perdurou até o início do Aptiano, é composta por magmatismo basal recoberto por sequência depositada em ambiente flúvio-lacustre, composta por folhelhos, carbonatos e depósitos grossos associados a leques aluviais (Moreira et al., 2007).

A sequência pós-rifte na Bacia de Santos é composta pela Formação Barra Velha, que engloba carbonatos complexos de ambiente raso-marinho, e pela Fm. Ariri, unidade evaporítica alvo deste trabalho. Essa sequência representa a transição para um estágio proto-oceânico e uma fase de subsidência térmica (Moreira et al. 2007). A Fm. Ariri será detalhada no tópico 3.3.

Nesta fase de pós-rifte houve o afogamento contínuo da bacia, influenciado pelo soerguimento da Serra do Mar, e avanço da progradação Jureia. Alguns autores acreditam que a entrada dessa grande carga sedimentar foi a principal responsável pela movimentação do sal da Formação Ariri (Moreira et al., 2007; Gamboa, 2008), enquanto outros apresentam modelos em que o principal mecanismo de movimentação do sal é o deslizamento gravitacional, condicionado pela inclinação da fonte de sal em direção ao depocentro da bacia (Brun & Fort, 2011).

Por último, a fase drifte, que ainda está ativa, teve início no Albiano e é dividida em Grupos Camburi, Frade e Itamambuca, com deposição de sedimentos siliciclásticos e carbonatos (Moreira et al. 2007).

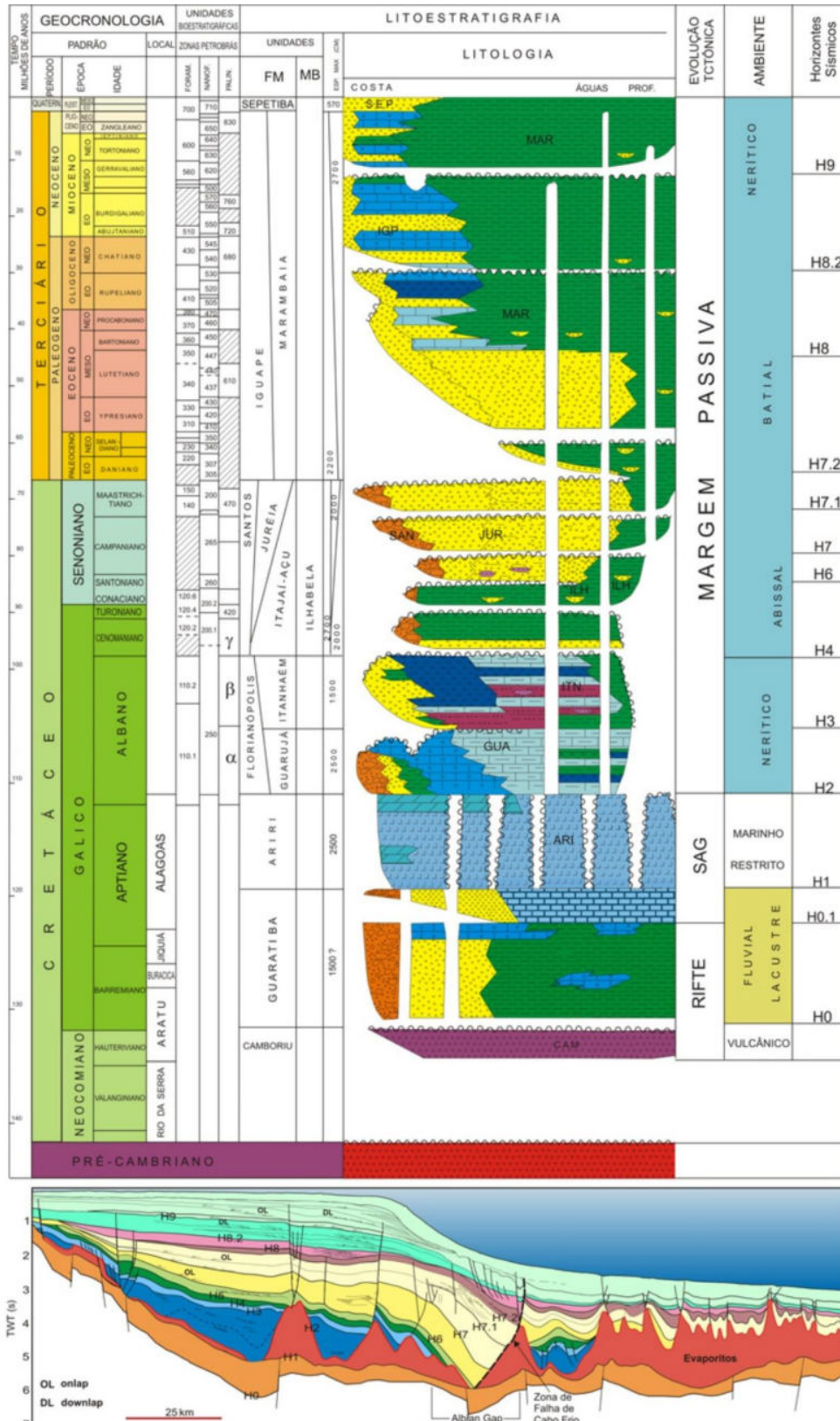


Figura 2: Carta cronoestratigráfica e seção tipo da Bacia de Santos, modificado de Pereira e Feijó (1994). Fonte: Assine et al. (2008).

3 SEQUÊNCIAS EVAPORÍTICAS E TECTÔNICA DO SAL

3.1 Sequências evaporíticas

Evaporitos se originam a partir da evaporação de água em ambientes restritos, como lagos, mares fechados e bacias salinas, em que a taxa de evaporação é superior à taxa de influxos de água. Durante o processo de evaporação, os minerais dissolvidos na água precipitam e se acumulam de forma estratificada, formando camadas de sais e minerais (Mohriak, 2008).

Em uma bacia evaporítica ocorrem sucessões litológicas que indicam a variação de salinidade da salmoura ao longo do tempo geológico. Essas variações acontecem em função da aridez climática e do aporte de água na bacia, dividindo a sucessão em intervalos ou ciclos evaporíticos correlacionáveis (Mohriak, 2008).

Os ciclos evaporíticos de primeira ordem podem ser definidos pelo aumento da salinidade, iniciando-se no nível mais baixo e evoluindo até o mais elevado, e retornando novamente ao nível inicial em função da variação do nível da salmoura na bacia evaporítica, como observado na Figura 3. Em um ciclo ideal, sequências evaporíticas depositam-se na seguinte ordem: anidrita, halita e *bitter salts* (sais de potássio e magnésio). Os ciclos também podem ser marcados pela sequência de precipitação de seus minerais, que ocorre em função de suas diferentes solubilidades e da quantidade dos elementos disponíveis na salmoura. (Freitas, 2006; Mohriak, 2008).

As características físicas distintas destes sais garantem contrastes de impedância acústica. (Rowan et al., 2019; Bose & Sullivan, 2022). A anidrita, por exemplo, tem grande contraste com halita na sísmica. Isso é reflexo de sua densidade, diretamente proporcional à sua impedância acústica calculada. As propriedades físicas dos principais minerais evaporíticos estão organizadas na Tabela 1.

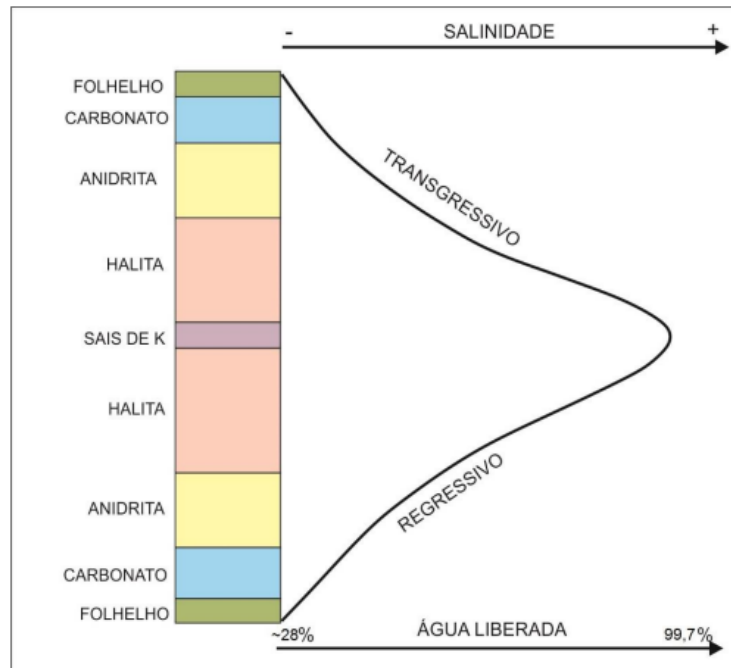


Figura 3: Modelo esquemático de ciclo ideal de deposição de uma sequência evaporítica. Fonte: Martins, 2016.

Tabela 1: Características físicas dos principais minerais evaporíticos. Fonte: Jackson & Hudec, 2017 *apud* Bose & Sullivan, 2022.

Mineral	Fórmula	Densidade (g/cm ³)	Velocidade sônica (m/s)	Impedância acústica calculada (g/cm ³ m/s)
Halita	NaCl	2,04	4.540	9.262
Anidrita	CaSO ₄	2,98	6.250	18.625
Gipsita	CaSO ₄ · H ₂ O	2,35	5.880	13.818
<i>Silvita</i> *	KCl	1,86	4.170	7.756
<i>Carnalita</i> *	KMgCl ₃ · 6(H ₂ O)	1,57	3.850	6.045
<i>Bischofita</i> *	MgCl ₂ · 6H ₂ O	1,56	3.030	4.726
<i>Tachihidrita</i> *	2Mg ₂ Cl ₂ · CaCl ₂ · 12H ₂ O	1,7	3.313	5.632

* *Bittern salts*

3.2 Tectônica do sal

A mobilidade do sal dentro de bacias evaporíticas é fortemente influenciada pelos contrastes reológicos das rochas ao seu redor. As camadas de sal, mais plásticas e menos densas do que as rochas circundantes, são incompressíveis e respondem à pressão e à temperatura de maneira distinta, permitindo sua mobilidade relativa ao longo do tempo geológico. Essas diferenças de viscosidade e densidade

entre o sal e as rochas adjuntas criam condições propícias para o fluxo do sal, levando à sua migração e acumulação em determinadas áreas dentro das bacias sedimentares (Hudec & Jackson, 2007; Fossen, 2016).

Esse processo é significativo no desenvolvimento de muitas bacias sedimentares em todo o mundo e pode ter papel crítico na formação e preservação de reservas de petróleo e gás, bem como na evolução estrutural das bacias sedimentares (Hudec & Jackson, 2007; Fossen, 2016).

Dois termos muito similares são utilizados no estudo geológico do sal: halocinese e tectônica do sal. Enquanto a tectônica do sal engloba qualquer tipo de deformação envolvendo sal ou outros evaporitos, o termo halocinese é mais restrito e define processos de deformação impulsionados principalmente gravidade, não pela tectônica regional (Jackson et al., 1994). A tectônica do sal gera as diferentes estruturas de sal da Figura 4.

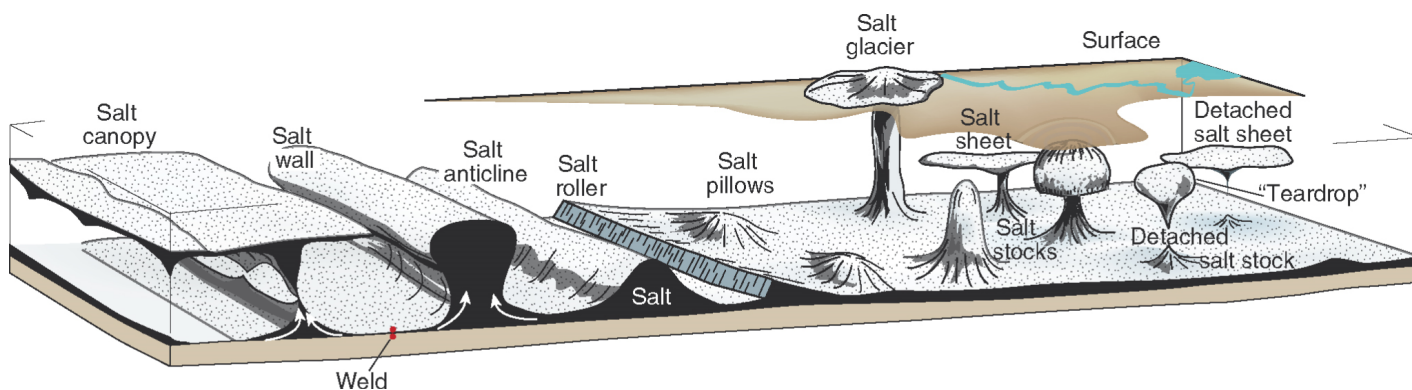


Figura 4: Diferentes tipos de estruturas de sal, seus nomes e formas. Fonte: Fossen, 2016.

3.3 Formação Ariri: o sal da Bacia de Santos

A Formação Ariri é a unidade evaporítica da Bacia de Santos e faz parte da Sequência Pós-rifte (Moreira et al., 2007). Ela é composta por halita e anidrita, juntamente com *bitter salts*. Apesar do período geológico relativamente curto de deposição (menos de 1 milhão de anos), ela atingiu grandes espessuras de até cerca de 2 km (Gamboa et al., 2008).

Essa deposição ocorreu em um ambiente restrito, limitado na borda sul da Bacia de Santos (Alto de Florianópolis), onde estruturas vulcânicas como o Dorsal de São Paulo e as cristas do Rio Grande e Walvis atuaram como barreiras, confinando a deposição evaporítica ao norte (Gamboa et al., 2008).

Apesar de a Bacia de Santos ser uma bacia de margem passiva, formada a partir de um processo de rifteamento, a Fm. Ariri apresenta características de domínios distensivos e compressivos. Isso é devido à movimentação do sal em direção ao *dip* da Bacia de Santos. Segundo Brunt e Fort (2011), o gatilho para essa movimentação do sal em bacias de margem passiva é a própria gravidade, que, aliada ao comportamento plástico do sal, faz com que ele se movimente, por meio de mecanismo de deslizamento gravitacional. Eles apontam que há dois modelos principais para a movimentação do sal em bacias de margem passiva: carga sedimentar diferencial sobre o sal e o deslizamento gravitacional. Porém concordam que apenas a distribuição irregular do peso dos sedimentos sobre o sal não é eficiente o suficiente.

Um modelo de evolução da deformação do pacote evaporítico da Fm. Ariri foi proposto por Gamboa et al. (2008) em que são identificados os principais eventos de deposição e deformação. O modelo está ilustrado na Figura 5, onde:

- (1) Deposição da camada inferior de halita sobre a discordância do topo da seção sag;
- (2) Início da deformação da camada inferior de halita e deposição da sucessão que contém sais complexos;
- (3) Deposição da camada superior de halita, mais delgada;
- (4) Deposição da sucessão de sais complexos superiores, seguida pela camada carbonática do Albiano, pelo início do avanço da "Progradação Juréia" e a nucleação de dobras sobre alto do embasamento;
- (5) Avanço da "Progradação Juréia" e reativação de falhas do embasamento, ocorre a configuração final da morfologia da sequência evaporítica no Domínio Compressivo da Bacia de Santos.

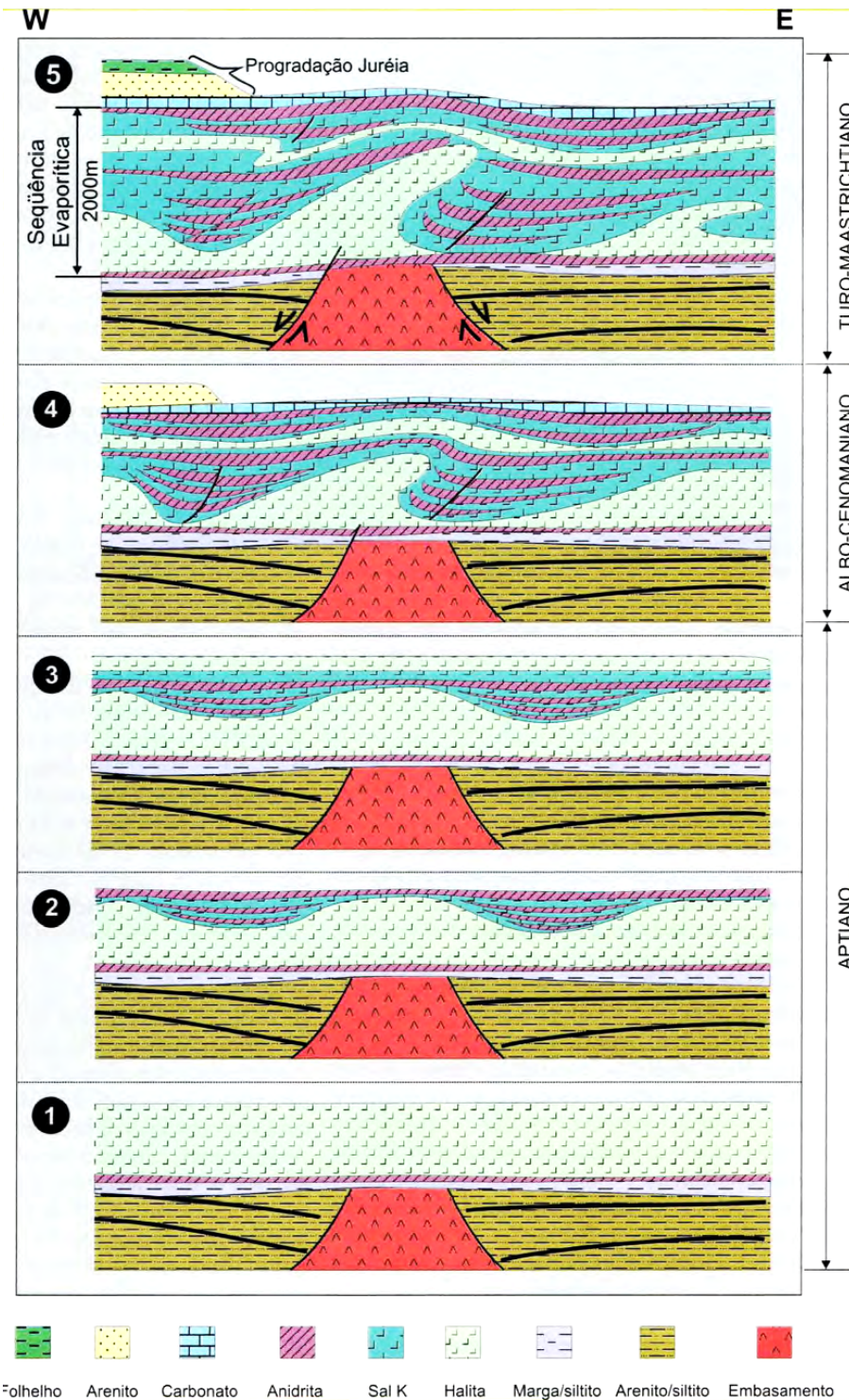


Figura 5: Modelo de evolução da deformação do pacote evaporítico da Fm. Ariri proposto por Gamboa et al. (2008).

Gamboa et al. (2008) ressaltam que a Bacia de Santos não tem afloramentos e seu entendimento depende de dados indiretos (sísmica) e diretos (poços). Dados

sísmicos são uma ferramenta crucial para a caracterização da geologia em subsuperfície. Envolvem a coleta, processamento e interpretação de ondas sonoras que se propagam através da subsuperfície terrestre. Análises sísmicas têm sido usadas para estudar a Bacia de Santos desde o pré-sal até minibacias (Guerra & Underhill, 2012).

As diferenças de densidade e velocidade entre os minerais evaporíticos (Tabela 1) resultam em fortes contrastes de impedância sísmica e, portanto, possibilitam excelente imagem estratigráfica da deformação interna das LES (Gamboa et al., 2008; Bose & Sullivan, 2022). A análise das LES fornece *insights* sobre os ciclos de deposição evaporítica, o fluxo de sal local e mecanismos de deformação.

Bose e Sullivan (2022), por exemplo, utilizaram seções regionais para caracterizar o fluxo de sal nas bacias de Santos e Campos, focando nas fácies de sal e seu controle nos estilos internos de dobras de sal para demonstrar a deformação localizada de sal. Esse tipo de análise também ajuda a prever locais de maior fraqueza para perfuração.

Durante a perfuração de poços através de espessas camadas de sal podem ocorrer problemas operacionais, como o aprisionamento da coluna de perfuração e o colapso do poço (Ferreira, 2014). Minerais de sal com maior ductilidade, como taquidrita, carnalita e outros sais amargos, tendem a fluir mais facilmente e têm propensão a fluir para poços durante a perfuração, representando riscos de perfuração (Bose & Sullivan, 2022).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Os dados utilizados neste trabalho são públicos e foram cedidos gratuitamente pela Agência Nacional do Petróleo (ANP), por meio do seu Banco de Dados de Exploração e Produção (BDEP) para que fossem utilizados neste projeto acadêmico.

Os dados sísmicos utilizados neste projeto consistem no bloco sísmico 3D Franco lara, com dados obtidos em 2012, profundidade convertida para metros e georreferenciada usando o sistema de coordenadas UTM 23S SAD69 e estão no

formato SGY. Os dados foram disponibilizados à UFPR pela ANP por meio do pedido 10982 (Anexo I), requisitado pelo LABAP.

Para a interpretação sísmica foi utilizado o *software* OpendTect 6.6 da empresa dGB Earth Science. Ele possibilita a interpretação e visualização sísmica, correlação de poços e diversos plugins e atributos que auxiliam o mapeamento sísmico. Além da interpretação dos horizontes sismoestratigráficos, o *software* foi utilizado para geração de mapas de controle estrutural e exportação de imagens em alta resolução das seções sísmicas 2D.

Foram utilizados dados do poço 1-BRSA- 618-RJS, cujo perfil composto (Anexo III) foi confrontado com dados sísmicos para indicação de litologia dos horizontes sismoestratigráficos.

Para a ilustração dos horizontes e estruturas em seções 2D utilizou-se o programa Inkscape. Para a confecção dos mapas foi utilizado o programa ArcGis 10.4.

4.2 Métodos

As etapas de trabalho estão sintetizadas no fluxograma da Figura 6. Os processos intrínsecos ao *software* OpendTect 6.6 serão detalhados mais adiante.



Figura 6: Fluxograma de etapas de trabalho com a utilização do *software* OpendTect.

4.2.1 Definição da área de estudo

A definição da área de estudo no norte da Bacia de Santos se deu pela disponibilidade de dados e relevância econômica e geotectônica da região. No contexto do norte da Bacia de Santos, o bloco sísmico Franco Iara, disponibilizado ao público desde 2022, foi escolhido devido à alta resolução dos dados e por já ser alvo de outros estudos por pesquisadores do LABAP/UFPR.

A partir do bloco Franco lara foi delimitada uma área menor, com cerca de 1.000 km², na porção sudoeste. A poligonal foi definida a partir de análise visual de seções sísmicas 2D, onde buscou-se horizontes sismoestratigráficos visíveis e contínuos na porção intra-sal, ou seja, entre o topo e a base do sal.

4.2.2 Fluxo de trabalho dentro do *software* OpendTect

As principais etapas realizadas com o uso do *software* serão descritas a seguir.

4.2.2.1 Definição da malha das seções sísmicas

A partir do bloco sísmico 3D foram gerados dois tipos de seções 2D: *in-lines*³ (paralelas ao sentido de obtenção dos dados) e *cross-lines* (linhas perpendiculares ao sentido da obtenção dos dados sísmicos). Criou-se uma malha com 19 *in-lines* e 32 *cross-lines*, totalizando 51 seções. Para ambas utilizou-se *steps*⁴ de 100. As coordenadas UTM (Datum SAD 69, Zona 23S) das seções estão organizadas no Anexo II.

4.2.2.2 Mapeamento sísmico

O mapeamento sísmico foi feito por meio de identificação de cinco horizontes sismoestratigráficos de interesse, da base para o topo: base do sal, dois horizontes de LES preservados (LES-base e LES-topo), topo do sal e fundo do mar (Figura 8). Foram utilizados *steps* de 100.

Dentro do ambiente OpendTect os seguintes passos foram seguidos:

- a) Delimitação do perímetro da área de estudo com o uso de *in-lines*, *cross-lines* e uma *random-line* (linha arbitrária que corta as *in-lines* e *cross-lines* de forma não ortogonal);

³ *In-lines* e *cross-lines* (seções *dip* e *strike*, respectivamente) são termos comuns na sísmica de reflexão para o estudo do subsolo. As primeiras referem-se às linhas paralelas ao sentido de aquisição dos dados, coincidente com o *dip* da Bacia de Santos, que mergulha para SE. Já as *cross-lines* são perpendiculares ao *dip* da bacia e, conseqüentemente, às *in-lines*.

⁴ *Step* (passo, em inglês) refere-se ao espaçamento entre uma linha e outra. Para o bloco sísmico Franco lara, um *step* de 100 equivale a aproximadamente 1.200 metros.

- b) Identificação dos horizontes de LES de interesse. Optou-se por escolher um horizonte próximo ao topo da camada de sal e outro próximo à base para que suas características pudessem ser comparadas. Nesta etapa foi feita uma análise visual entre as seções, testando atributos e paletas de cores que realçam camadas de LES. Aqui, destaca-se o uso do atributo *Pseudo Relief*⁵ e a paleta de cores *similarity* (escalas de cinza) (Figura 7) que ajudaram a destacar horizontes dentro da camada de sal em uma primeira identificação.
- c) Após definidos os horizontes de LES a serem traçados, iniciou-se a interpretação sísmica. Foi utilizado o modo de visualização em 2D (*2D viewer*), que permite a navegação entre as seções com o *step* escolhido. Primeiramente utilizou-se o modo *Section Auto-track*, que reconhece as linhas clicadas e extrapola o traçado até onde ele identifica sua continuidade. Ele foi satisfatoriamente aplicado aos horizontes fundo do mar e base do sal, mais contínuos e retilíneos que os outros três, que foram traçados manualmente com o modo *Manual Draw*.

⁵ Este atributo sísmico foi desenvolvido por pesquisadores da PETROBRAS S/A (Bulhões & Amorim, 2005) e tem como objetivo ressaltar altos contrastes de impedância, sendo muito útil para a visualização dos horizontes de topo e base do sal, assim como de LES.

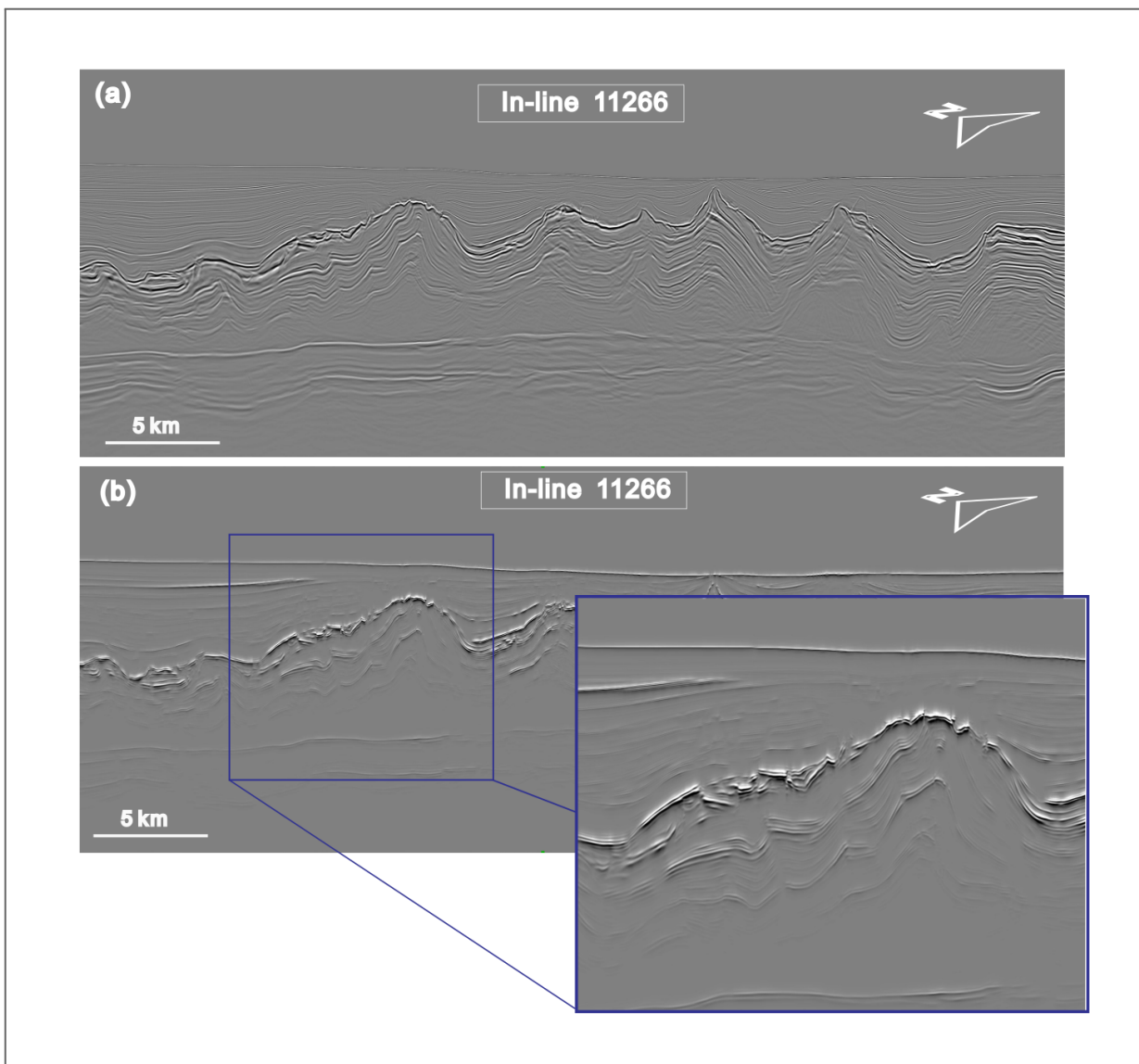


Figura 7: Exemplo de seção sísmica convencional (a) e com aplicação do atributo *Pseudo Relief* (b). Note que as camadas com maior contraste de impedância ficam destacadas, assemelhando-se a um alto relevo na imagem.

Após todos os horizontes terem sido traçados, seguiu-se para a etapa de interpolação e geração de superfícies.

4.2.2.3 Interpolação e geração de mapas de controle estrutural

A criação de superfícies a partir de linhas foi realizada por meio da função *gridding*, com o uso do algoritmo de interpolação do inverso da distância, com raio de busca de 1.300 metros. Para suavizar as curvas, foi utilizada ferramenta *filtering* do tipo *median*, com *steps* de 15.

5 RESULTADOS

Ao todo foram interpretadas 51 seções sísmicas 2D, e em cada uma foram traçados os cinco horizontes sismoestratigráficos da Tabela 2. A Figura 8 traz dois exemplos de seções representativas da área de estudo e os cinco horizontes interpretados.

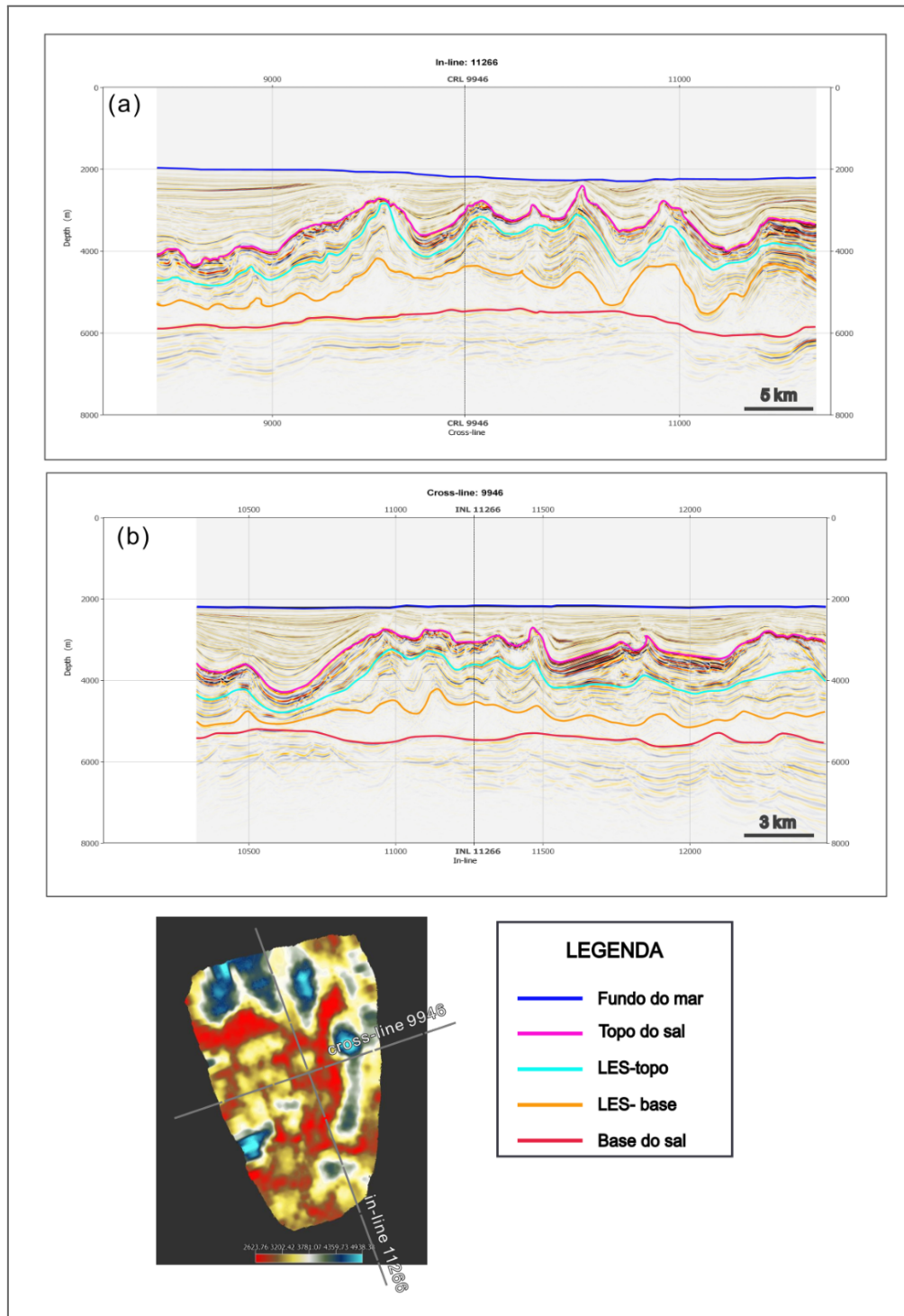


Figura 8: Seções sísmicas representativas com os cinco horizontes interpretados na área de estudo. (a) in-line 11266 (extremidade esquerda corresponde à ponta NW da seção no mapa ao lado⁶, e a direita corresponde à ponta SE) (b): in-line cross-line 9946 (esquerda corresponde à ponta SW da seção, enquanto o lado direito corresponde à ponta NE). Repare na intersecção das duas seções no centro de (a) e (b) (linha tracejada).

⁶ Ao longo deste trabalho todas as seções apresentadas seguirão este padrão: para *in-lines* o lado esquerdo da figura corresponde à ponta NW da seção no mapa ao lado, e o lado direito corresponde à ponta SE. Para as *cross-lines* o lado esquerdo corresponde à ponta SW da seção, enquanto o lado direito corresponde à ponta NE.

A Figura 9 mostra a correlação da sísmica com o poço 1-BRSA-618-RJS. É importante considerar que cada linha na seção sísmica 2D corresponde, em média, a 30 a 50 metros de espessura de rocha. Assim, as linhas interpretadas como um horizonte de LES dificilmente são compostas apenas por anidrita, mas há sim uma predominância deste sal em relação aos outros sais (i.e., halita, carnalita e outros *bitter salts*).

Fica evidente o contato do topo com sal com o pós sal (Figura 9b). O horizonte LES-topo (Figura 9c) foi identificado com uma intercalação de carnalita com halita e secundariamente níveis de anidrita. Já o horizonte LES-base (Figura 9d) é composto por intercalação de halita com anidrita. Abaixo desse intervalo, há predominância de halita.

Nota-se que as duas LES têm padrões deformacionais distintos. A LES-base tem um padrão fraturado, descontínuo e que frequentemente se perde em meio à halita. LES-topo é mais contínua, pouco fraturada e quase sempre acompanha o horizonte do topo do sal (Figura 8a e 8b). Exceções são quando o horizonte se perde, como em estruturas de dobras e falhas ou em regiões menos espessas.

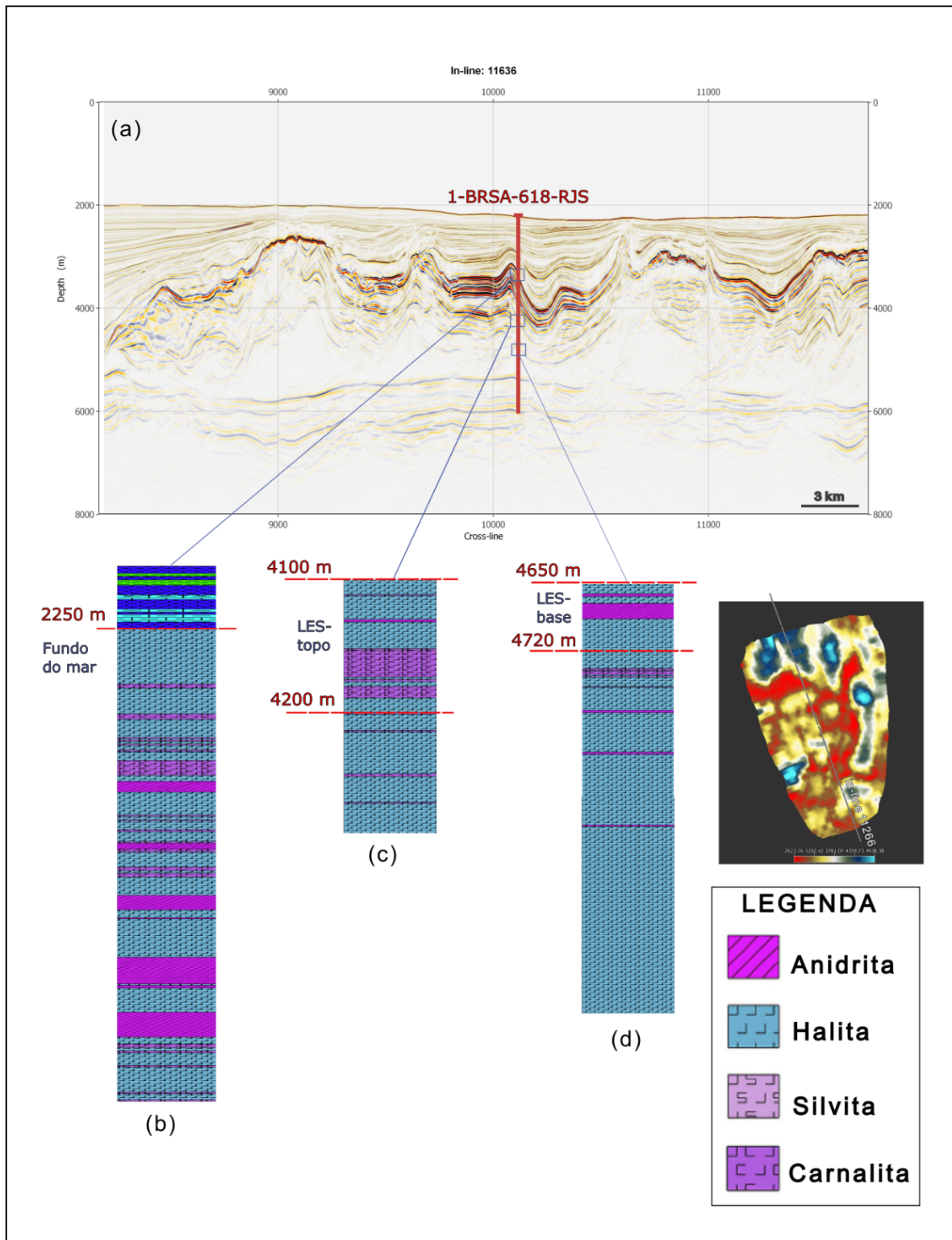


Figura 9: Correlação de dados sísmicos com dados de poço 1-BRSA-618-RJS. (a) In-line 11636 e localização do poço. (b) Contato do topo do sal, abaixo, com o pós-sal, acima, a 2250 m de profundidade. (c) Intervalo aproximado para o horizonte LES-topo entre 4100 e 4200 m. Ocorre intercalação de halita com carnalita, e secundariamente com anidrita. (d) Intervalo aproximado para o horizonte LES-base. Ocorre intercalação de halita com um nível de cerca de 30 metros de anidrita, entre 4650 e 4720 m. Abaixo dos 4720 m predomina a halita. O mapa de contorno estrutural representa o topo do sal.

Os cinco horizontes interpretados nas 51 seções sísmicas foram interpolados para a criação de superfícies. O contorno estrutural de cada horizonte está representado na Figura 10 e suas profundidades mínima e máxima estão organizadas na Tabela 2.

Tabela 2: Profundidade máxima e mínima dos horizontes sismoestratigráficos interpretados.

Horizonte	Profundidade mínima (m)	Profundidade máxima (m)
Fundo do mar	1960	2305
Topo do sal	2620	4940
LES-topo	2903	5220
LES-base	3590	5620
Base do sal	5260	6060

Ao comparar o mapa de contorno estrutural do topo do sal (Figura 10a) com os dos horizontes LES-topo e LES-base (Figuras 10b e 10c), nota-se que LES-topo se assemelha muito à do topo do sal,

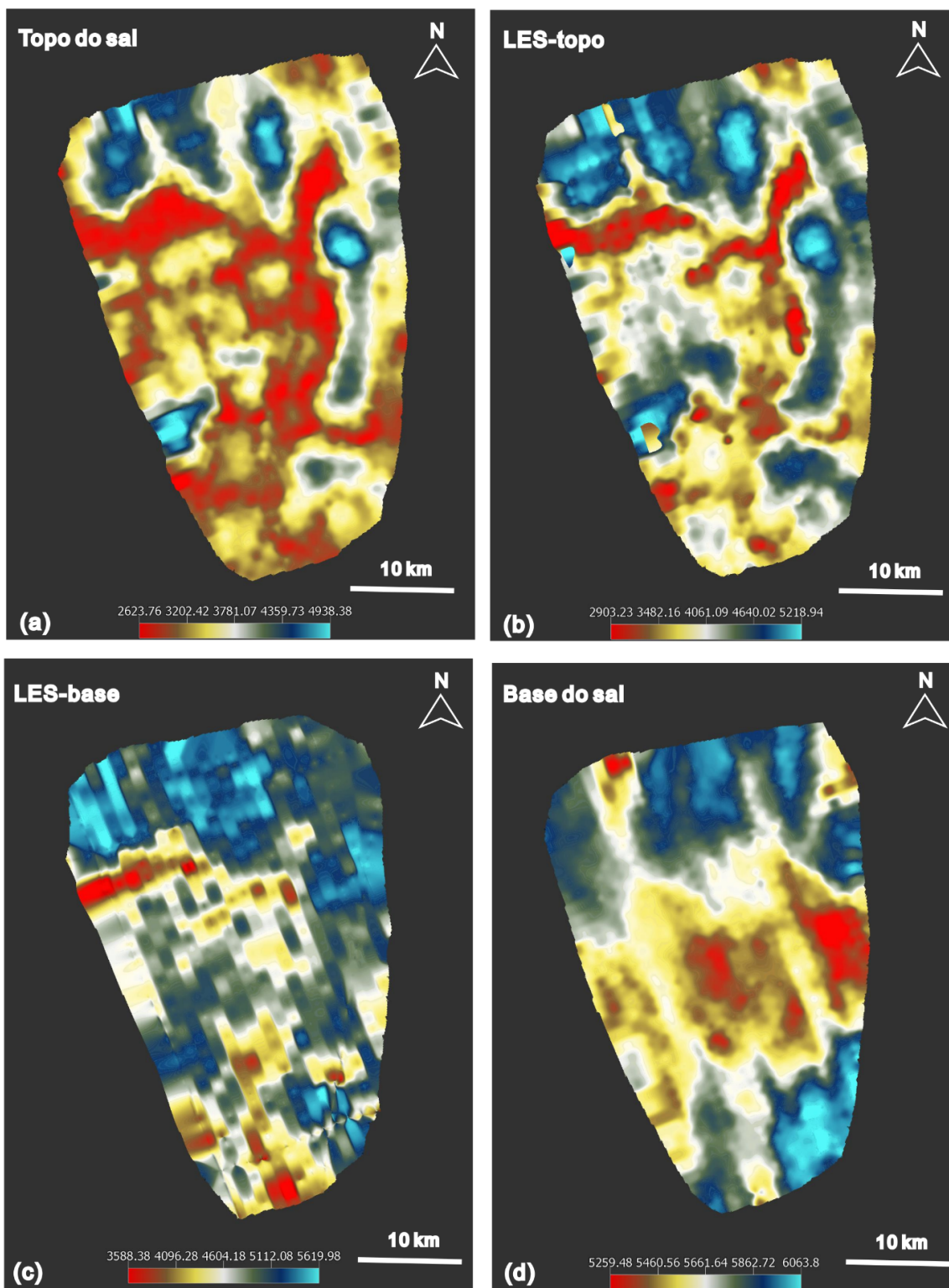


Figura 10: Mapas de contorno estrutural gerados a partir dos horizontes mapeados. (a) topo do sal; (b) LES-topo; (c) LES-base; e (d) base do sal. A legenda representa a profundidade em metros.

A Figura 11 é um exemplo de visualização tridimensional do topo e da base do sal.

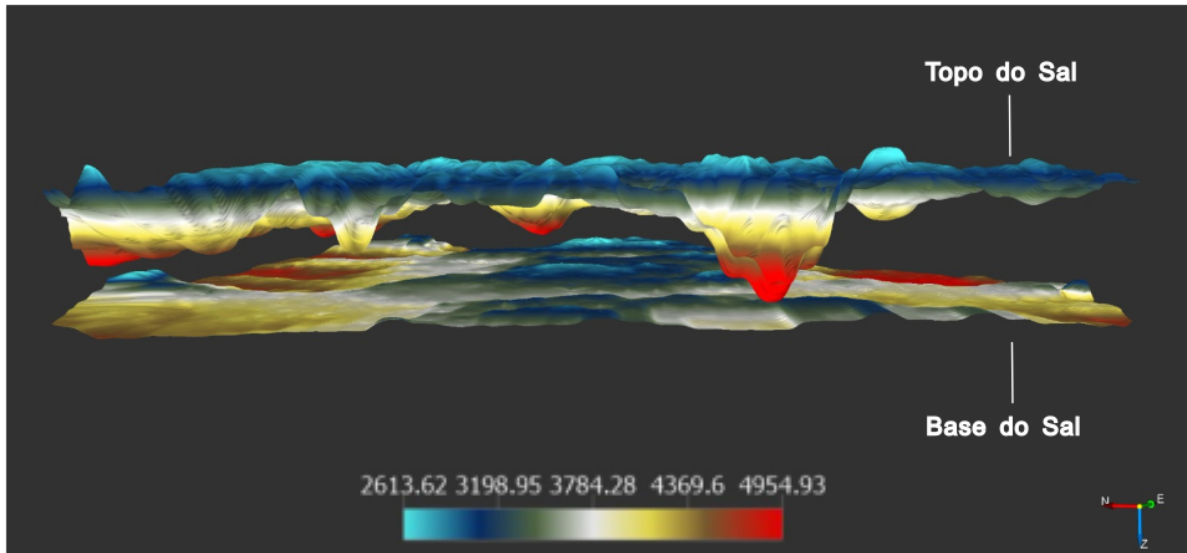


Figura 11: Superfícies 3D geradas a partir da interpolação dos horizontes sismoestratigráficos topo do sal e base do sal. A legenda indica a profundidade em metros para a superfície do topo do sal.

Ao longo do mapeamento foram identificados elementos importantes nas seções sísmicas. Eles serão discutidos no tópico a seguir.

5.1 Estruturas de sal e feições observadas

A área de estudo compreende uma muralha de sal, classificada devido à grande espessura contínua de sal. Essas estruturas são comuns no domínio transicional da Bacia de Santos, onde encontram-se as maiores espessuras de sal, que migrou a partir da porção mais marginal da bacia a oeste em direção ao centro da bacia (Bose & Sullivan). Ocorrem também porções com menores espessuras de sal, indicadas pelas porções azuis na Figura 10b, no extremo oeste, norte e leste da área. Essas porções menos espessas delimitam a muralha de sal.

Dentro da muralha de sal existem diversas estruturas nucleadas. Caracterizam-se por dobras anticlinais formados por halita, que ascenderam a partir da camada com predominância de halita entre os horizontes base do sal e LES-base (vide Figura 12). Algumas dessas estruturas, com feições indicativas de erosão, provavelmente estiveram em contato e foram dissolvidas após exposição à água do

mar (como descrevem Bose & Sullivan (2022) para feições semelhantes). Um exemplo está indicado na Figura 12, onde o horizonte LES-topo, não erodido, ajuda a entender a geometria interna do diápiro antes de sua erosão.

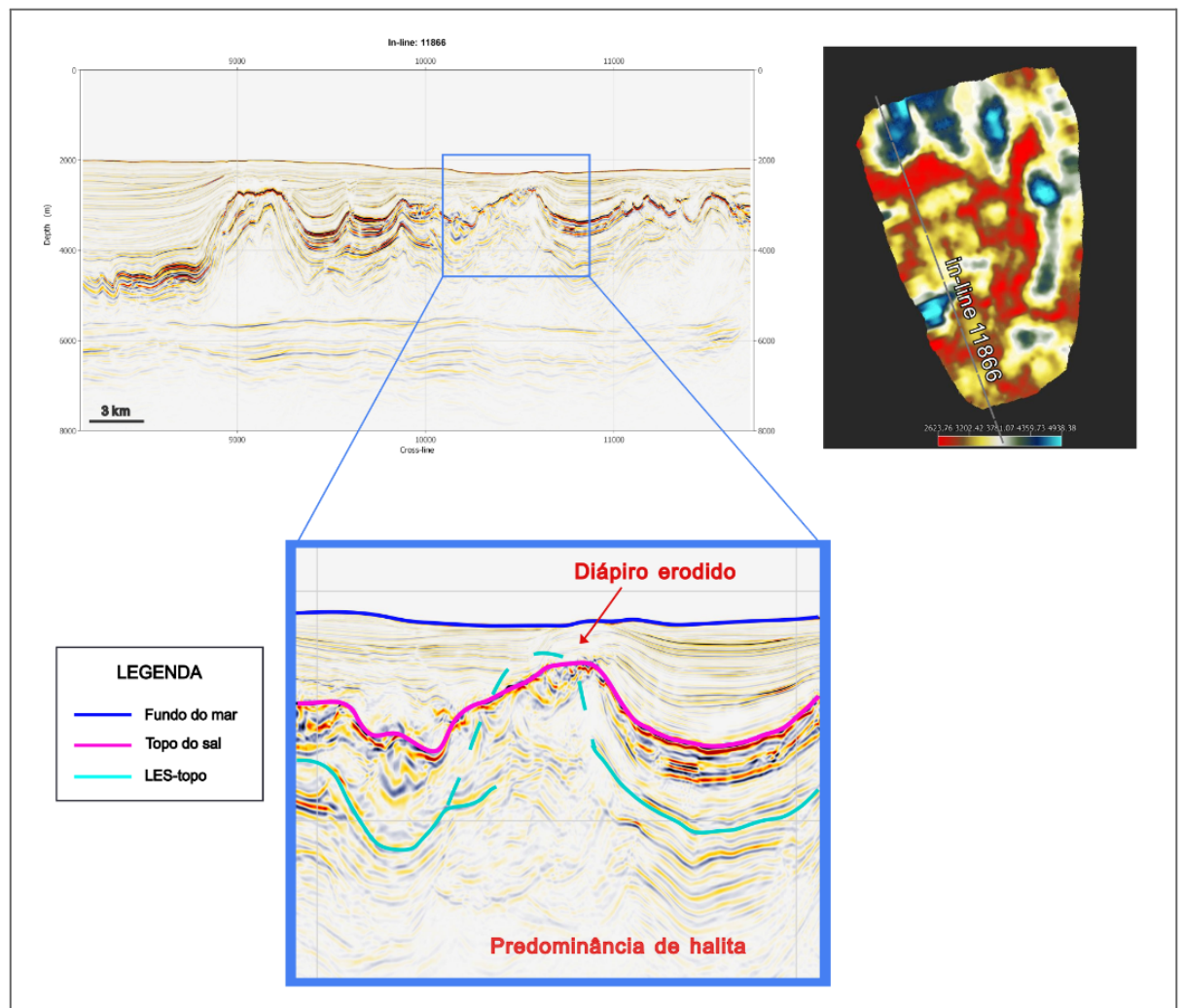


Figura 12: Seção sísmica (in-line 11866) com destaque para o horizonte LES-topo, que acompanha o topo do sal e desaparece ao ascender junto a um diápiro de sal. É possível extrapolar o horizonte e entender como era a geometria do diápiro.

Outros diápiros apresentam topo colapsado. A Figura 13 ilustra essa feição. Possíveis causas para esse colapso são a falta de halita para que o diapirismo

evoluisse e a grande espessura e rigidez do pós-sal (Hudec & Jackson, 2007). Percebe-se que a camada de halita logo abaixo deste diápiro colapsado está adelgada, indicando a mobilidade limitada da halita naquela porção, possivelmente ocasionando este colapso.

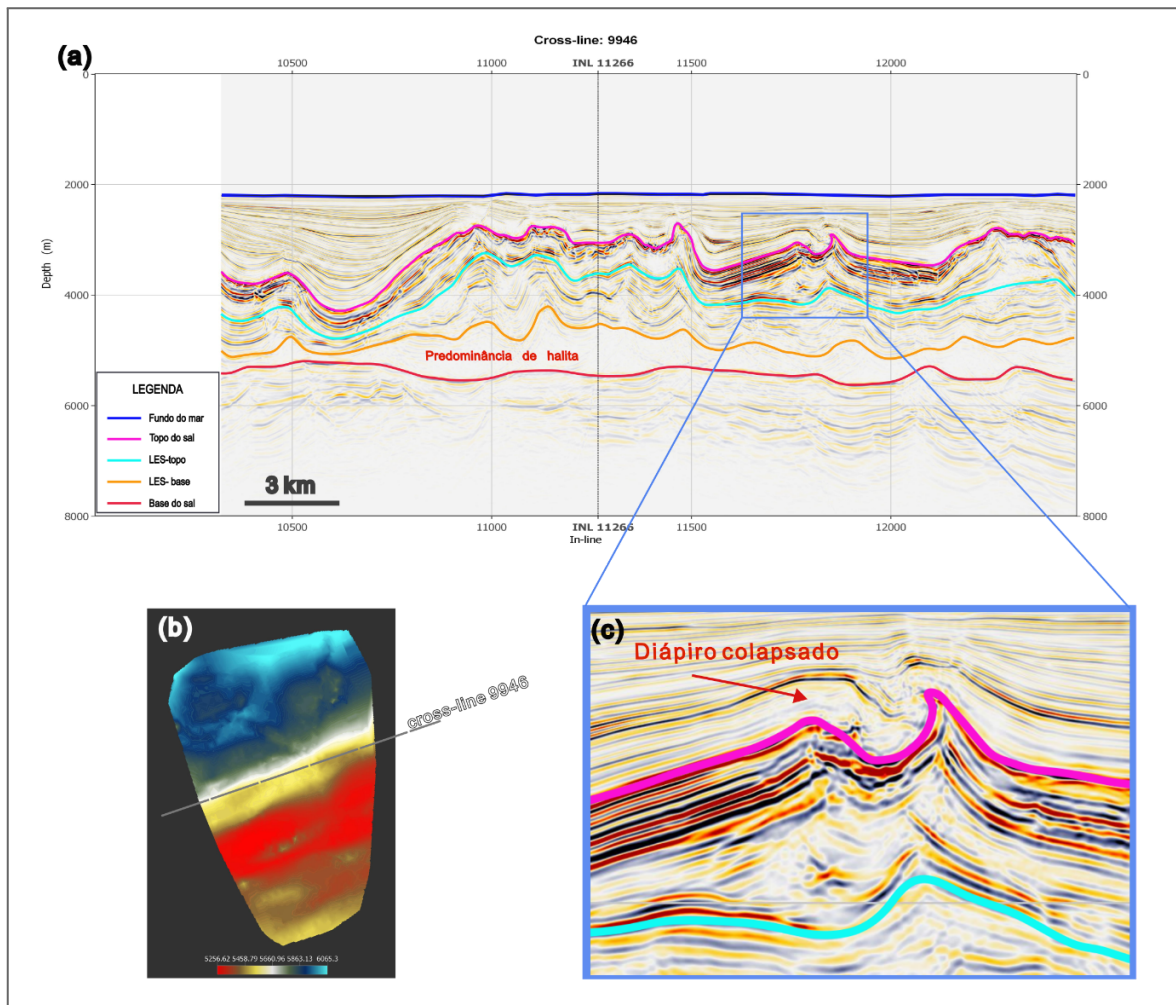


Figura 13: Seção sísmica (cross-line 9946). (a) detalhe para a camada transparente com predominância de halita entre o horizonte LES-topo, em laranja, e base do sal, em vermelho. (b) Localização da seção em relação ao mapa de contorno estrutural do fundo do mar. (c) Detalhe para um diápiro de sal colapsado. Note que as LES logo abaixo do topo do sal (em rosa) têm uma geometria que indica a formação de um diápiro, cujo topo colapsou.

Algumas feições interromperam a continuidade das LES e tornaram difícil o seu mapeamento. Dois exemplos são: falhamentos internos e posições com menor espessura de sal.

A Figura 14 traz um exemplo de interrupção do horizonte LES-base por falhamento interno. O horizonte ascende e se perde em meio ao caráter sísmico

transparente da halita. Nestes casos torna-se necessário verificar *in-lines* e *cross-lines* próximas que contenham esse horizonte mapeável para que possa ser interpretado.

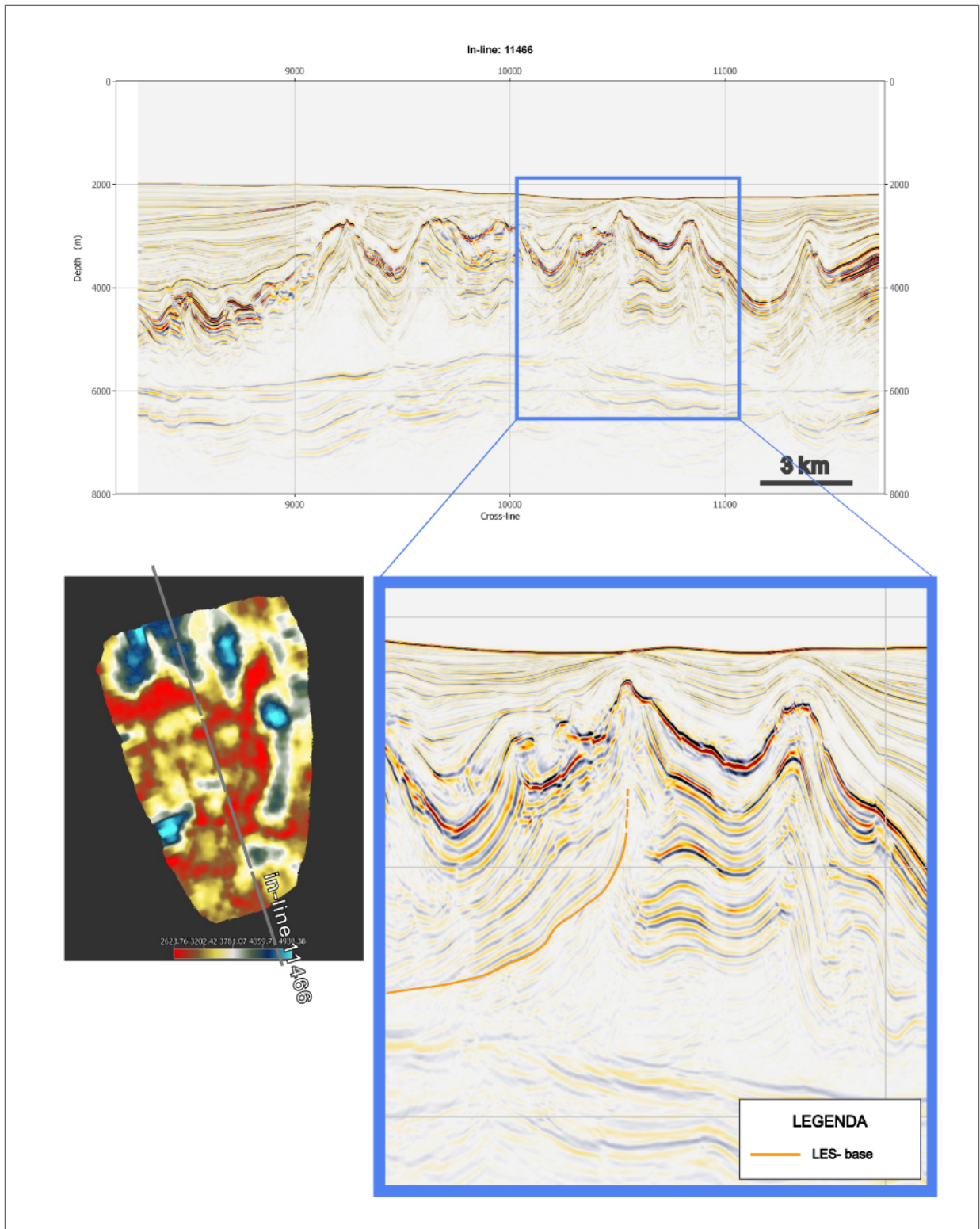


Figura 14: Exemplo de deformação interna em que a ascensão de pacotes de halita deformam as LES subjacentes. Aqui, o horizonte LES-base some em meio à halita transparente. O mapa de contorno estrutural refere-se ao topo do sal.

Já a Figura 15 ilustra um exemplo de posição com menos espessura de sal. Ela corresponde a um local de onde o sal migrou durante a halocinese e que ficou com

um espaço vazio em relação às estruturas salíferas adjacentes, condicionando a deposição de sedimentos e formando uma minibacia. Nessas porção os horizontes sismoestratigráficos se perdem.

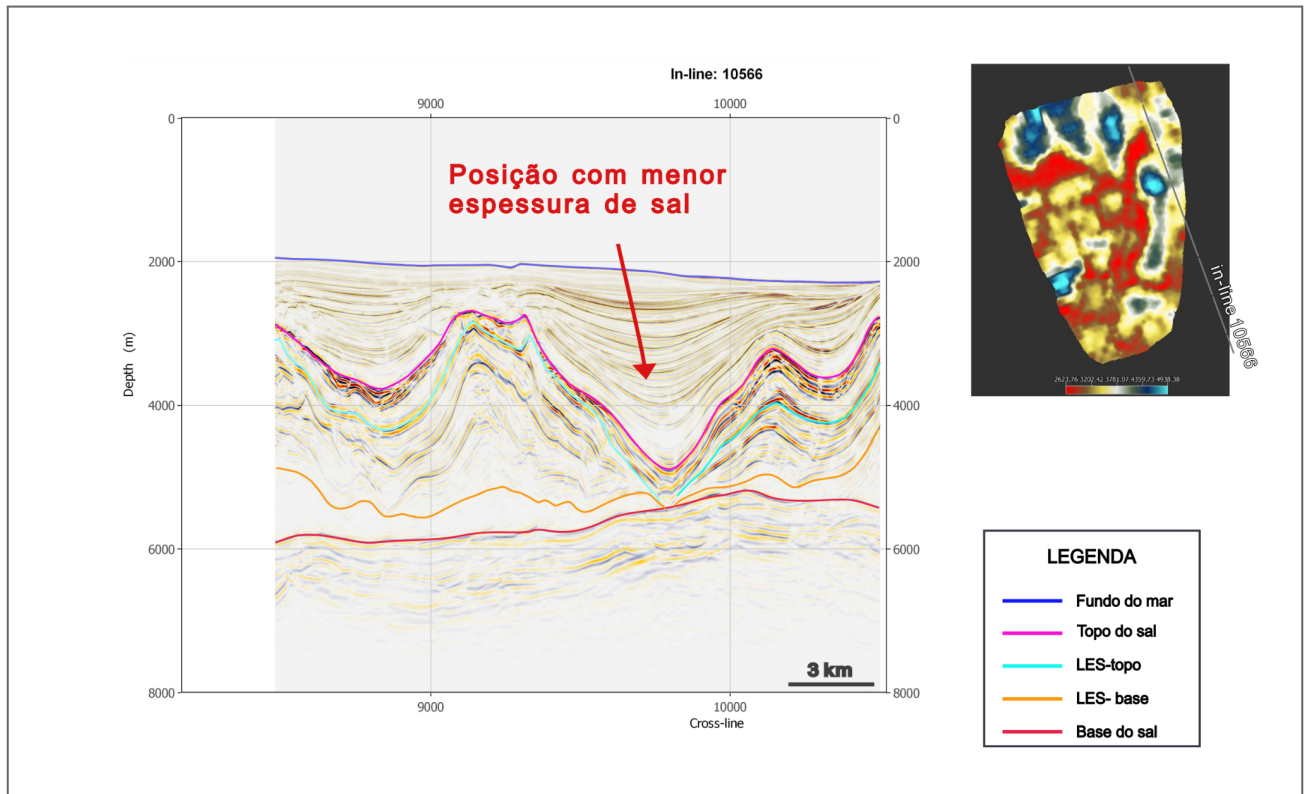


Figura 15: Exemplo posição com camada de sal menos espessa, onde as LES se perdem. O mapa de contorno estrutural refere-se ao topo do sal.

6 DISCUSSÕES

Os dois horizontes de LES foram satisfatoriamente mapeados e apresentaram padrões de deformação distintos. Enquanto LES-base tem um padrão fraturado, descontínuo e que frequentemente se perde em meio à halita, LES-topo é mais contínua, pouco fraturada e quase sempre acompanha o horizonte do topo do sal. Exceções são quando o horizonte se perde, como em estruturas de dobras e falhas ou em regiões menos espessas.

Duas hipóteses foram levantadas para explicar essa diferença de padrões de deformação. A primeira é a diferença composicional e reológica. O horizonte LES-topo equivale litologicamente a uma intercalação de halita com carnalita, enquanto

LES-base constitui-se de halita intercalado com anidrita. A densidade da anidrita é $2,98 \text{ g/cm}^3$ e da carnalita é $1,57 \text{ g/cm}^3$. A anidrita da LES-base tem caráter mais competente e não ascende tão facilmente com o diápiro, fraturando-se e frequentemente se perdendo em meio à halita. A carnalita da LES-topo, por outro lado, tem comportamento mais dúctil e acompanha a deformação do diápiro.

A segunda hipótese leva em conta a proximidade com a camada de halita na base do sal. A LES-base sofreu mais influência da movimentação da halita durante sua ascensão, deformando-se mais do que LES-topo, que foi “empurrada” para cima até que o diapirismo diminuísse de força, mantendo-a preservada.

Apesar de bens preservados, os evaporitos estratificados têm continuidade limitada, já que os intensos processos deformacionais halocinéticos frequentemente rompem com horizontes de LES. Exemplos são falhamentos internos e posições com menor espessura de sal.

Por outro lado, quando bem preservados, os horizontes de LES podem ajudar a reconstruir a geometria de diápiros de sal cujos topos foram erodidos, auxiliando na interpretação de sua evolução. Frequentemente o horizonte do topo do sal não representa a geometria original da camadas, já que são comuns diápiros erodidos, provavelmente por dissolução em um período em que esteve em contato com a água do mar (Bose & Sullivan, 2022).

Os horizontes mapeados vão de encontro com o modelo de Gamboa et al. (2008). Primeiro ocorreu a deposição da camada inferior onde predomina halita sobre a discordância do topo da seção sag. Essa camada é representada na área de estudo pelo intervalo entre os horizontes base do sal e LES-base. Sobre essas camadas, precipitaram os evaporitos estratificados, como os dois horizontes de LES interpretados.

7 CONCLUSÕES

A seguir, estão apresentadas as conclusões alcançadas neste trabalho:

- O mapeamento sísmico da Fm. Ariri na porção sudoeste do Bloco Sísmico Franco Iara, norte da Bacia de Santos, compreendeu a interpretação de cinco horizontes sismoestratigráficos, da base para o topo: base do sal, LES-base, LES-topo, topo do sal e fundo do mar. Os mapas de contorno estrutural gerados a partir destas superfícies permitiram classificar a estrutura de sal principal da área de estudo como uma muralha de sal, além de migrar e que delimitam a muralha.
- O intervalo entre os horizontes LES-base e base do sal é constituído predominantemente por halita, verificado pelo carácter sísmico transparente e comprovado por meio de correlação com o poço 1-BRSA-618-RJS.
- Os dois horizontes de evaporitos estratificados, LES-base e LES-topo, têm padrões deformacionais distintos. Enquanto o primeiro encontra-se bastante deformado e frequentemente se perde em meio à camada de halita na base, LES-topo encontra-se preservada. Isso pode ser explicado pela diferença composicional e reológica e pela proximidade da camada de halita de onde surgem os diápiros. LES-base é composta por intercalação de halita com anidrita (carácter competente) e está exatamente acima da camada de halita. LES-topo é composta por intercalação de halita com carnalita (carácter incompetente) e está mais distante da camada de halita.
- A variabilidade composicional e consequente estratificação reológica das LES controla os modos de deformação observados nas sequências evaporíticas da área analisada na Bacia de Santos. Os horizontes mapeáveis de LES oferecem *insights* sobre os mecanismos de deformação e podem ser aplicados para prever litologias de sal.
- Desafios para o mapeamento sísmico das LES incluem: continuidade limitada dos horizontes, devido a feições como estruturas internas dos diápiros e posições com menor espessura de sal, onde perde-se o horizonte sismoestratigráfico; grande variação lateral de estruturas locais podem requerer um detalhamento ainda maior, já que a tectónica do sal pode condicionar a formação de estruturas caóticas e imprevisíveis.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Shapefile de Dados (Campos de Produção). Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/dados-tecnicos/shapefile-de-dados>. Acesso em: 12 de maio de 2023
- Bose, S., Sullivan, M. 2022. Structural analysis of layered evaporites using internal deformation patterns: Examples from Santos and Campos basins, Brazil. *Journal of Structural Geology*, 161, 104661. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2022.104661>
- Bulhões, E. M., Amorim, W. N. 2005. Princípio da SismoCamada Elementar e sua aplicação à Técnica Volume de Amplitudes (tecVA). In: 9yh International Congress of the Brazilian Geophysical Society.
- Brun J. P., Fort X. 2011. Salt tectonics at passive margins: Geology versus models. *Marine and Petroleum Geology*, 28(6):1123-1145. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2011.03.004>
- Chang, H. K.; Kowsmann, R. O.; Figueredo, A. M. F.; Bender, A. A. Tectonics and stratigraphy of the East Brazil rift system: an overview. *Tectonophysics*, v. 213, p. 97-138, 1992.
- de Mio, E. D., Chang, H. K., Corrêa, F. S. 2005. Integração de métodos geofísicos na modelagem crustal da Bacia de Santos. *Revista brasileira de Geofísica*, 23, 275-284. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2005000300006>
- Ferreira, Y. A. 2014. Análise numérica da perfuração e cimentação de poços de petróleo em evaporitos. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- Fossen, H. 2016. *Geologia Estrutural*. São Paulo: Editora Oficina de Textos.
- Gamboa, L.A., Machado, M.P., Silveira, D.P., Freitas, J.T., Silva, S.P., Mohriak, W., Szatmari, P., Anjos, S. 2008. Evaporitos estratificados no Atlântico Sul: interpretação sísmica e controle tectono-estratigráfico na Bacia de Santos. In: Mohriak, W. U., Szatmari, P., Anjos, S. C. (eds) *Sal: Geologia e Tectônica, Exemplos nas Bacias Brasileiras*. Editora Beca, São Paulo, 340-359p.
- Guerra, M. C., Underhill, J. R. 2012. Role of halokinesis in controlling structural styles and sediment dispersal in the Santos Basin, offshore Brazil. *Geological Society, London, Special Publications*, 363(1), 175-206. <https://doi.org/10.1144/SP363.9>
- Hudec, M. R., Jackson, M. P. 2007. Terra infirma: Understanding salt tectonics. *Earth-Science Reviews*, 82(1-2), 1-28. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.01.001>

- Jackson, M. P., Vendeville, B. C., Schultz-Ela, D. D. 1994. Structural dynamics of salt systems. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 22(1), 93-117. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.22.050194.000521>
- 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 65, 273-304p.
- Mohriak, W. U. 2008. Introdução às propriedades físicas e químicas dos evaporitos. In: Mohriak, W. U., Szatamari, P., anjos, S. C. dos (eds.) *Sal: Geologia e Tectônica, Exemplos nas Bacias Brasileiras*. Ed. Beca, São Paulo, p. 231-249.
- Moreira, J. L. P., Madeira, C. V., Gil, J. A., Machado, M. A. P. 2007. Bacia de Santos. *Boletim de Geociências da PETROBRAS*, 15(2), 531-549.
- Pereira, M. J., Barbosa, C. M., Agra, J., Gomes, J. B., Aranha, L. G. F., Saito, M., Ramos, M. A., Carvalho, M. D., Stamato, M. Bagni, O. 1986. Estratigrafia da Bacia de Santos: análise das sequências, sistemas deposicionais e revisão litoestratigráfica. In: *Anais do Congresso Brasileiro de Geologia*, 34(1), 65-79p.
- Pereira, M. J., Feijó, F. J. 1994. Santos Basin; Bacia de Santos. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 8.
- Rowan, M. G., Urai, J. L., Fiduk, J. C., & Kukla, P. A. 2019. Deformation of intrasalt competent layers in different modes of salt tectonics. *Solid Earth*, 10(3), 987-1013.