



Domínios Estruturais Relacionados à Tectônica do Sal na Região Sul da Bacia do Espírito Santo Structural Domains Related to Salt Tectonics in the Southern Region of Espírito Santo Basin

Igor Nascimento; João Paulo Oliveira; Jorge de Jesus Picanço de Figueiredo & Leonardo Borghi

Universidade Federal do Rio de Janeiro, CCMN, IGEO, Departamento de Geologia,

Laboratório de Geologia Sedimentar (Lagesed).

Av. Athos da Silveira Ramos, 274, bloco J1, s/J1-011. 21.941-916, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ- Brasil.

E-mails: igornascimento@geologia.ufrj.br; joao.paulo@geologia.ufrj.br; j.figueiredo@geologia.ufrj.br; lborghi@geologia.ufrj.br

Recebido em: 03/06/2019 Aprovado em: 20/08/2019

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_4_359_374

Resumo

A porção *offshore* da seção drifte da bacia do Espírito Santo é conhecida pela sua complexidade estratigráfica e estrutural relacionada, à tectônica salífera pós-*breakup*. A movimentação do sal deformou o registro sedimentar da fase drifte na Província de Domos de Sal, região sul da bacia, área de estudo desse trabalho. Nesta pesquisa foram delimitados domínios estruturais relacionados à tectônica do sal de acordo com os padrões e o caráter das estruturas presentes na área de estudo. As análises foram executadas utilizando dados sísmicos de 39 seções sísmicas 2D e dados geofísicos e geológicos de poços perfurados pela indústria de óleo e gás. Os estilos estratigráficos-estruturais identificados foram: falhas lítricas nucleadas a partir das zonas de descolamento, *rafts* carbonáticos de idade albiana, estruturas tipo casco de tartaruga, domos, diápiros, línguas e lençóis de sal. A partir da interpretação das estruturas relacionadas à tectônica do sal, foi possível delimitar quatro domínios estruturais. O primeiro domínio, presente na região proximal, é marcado pela ausência ou pequena espessura de sal, estruturado com falhas lítricas e a zona de descolamento bem definida; o segundo domínio, na porção intermediária, apresenta a associação de pequenos domos salinos com a seção sedimentar albiana estruturada tipo casco de tartaruga; o terceiro domínio exibe diápiros e muralhas de sal bem desenvolvidos; enquanto que, o quarto domínio, localizado na porção mais distal da área de estudo, apresenta os diápiros com uma sutil vergência para leste e línguas de sal. Com a interpretação sísmica do topo do sal, foi gerado um mapa de contorno estrutural em tempo sísmico (TWT) que auxiliou a delimitação desses quatro domínios estruturais, bem como a observação do alinhamento das estruturas salinas, com direção NNW-SSE. A partir da análise das estruturas presentes nos três primeiros domínios, sugere-se que estejam sob um regime tectônico distensivo, enquanto que no quarto domínio infere-se que sejam resultantes de condições locais compressivas. O desenvolvimento dos regimes tectônicos locais relacionados à tectônica salina, que evoluem de distensivo para compressivo no sentido W-E, *downdip*, é explicado pelo deslocamento do sal para leste causado pelo declive geomorfológico do talude na bacia do Espírito Santo e pela sobrecarga das progradações posteriores, ocorridas na plataforma a partir do Paleógeno.

Palavras-chave: tectônica do sal; estruturas salinas; domínios estruturais; bacia do Espírito Santo

Abstract

The offshore portion of the drift section of the Espírito Santo basin is known for its stratigraphic and structural complexity related to the post-breakup salt tectonics. The movement of the salt deformed the sedimentary record of the drift phase in the Domos de Sal Province, southern region of the basin, area of study of this work. In this research, structural domains related to salt tectonics were delineated according to the patterns and character of the structures present in the study area. The analyzes were performed using seismic data from 39 2D seismic sections and geophysical and geological data from wells drilled by the oil and gas industry. The stratigraphic-structural styles identified were: nucleated faults nucleated from the zones of detachment, carbonate rafts of albian age, turtle hull structures, domes, diapirs, tongues and salt sheets. From the interpretation of structures related to salt tectonics, it was possible to delimit four structural domains. The first domain, present in the proximal region, is marked by the absence or small thickness of salt, structured with lithic faults and well defined zone of detachment; the second domain, in the intermediate portion, presents the association of small saline domes with the turbulent hull-like albian sedimentary section; the third domain displays well-developed salt walls and walls; while the fourth domain, located in the most distal portion of the study area, presents the diameters with a subtle vergence to the east and salt tongues. With the seismic interpretation of the top of the salt, a structural contour map was generated in seismic time (TWT) that aided the delimitation of these four structural domains, as well as the observation of the alignment of the salt structures, with direction NNW-SSE. From the analysis of the structures present in the first three domains, it is suggested that they are under a distensive tectonic regime, whereas in the fourth domain it is inferred that they are resulting from compressive local conditions. The development of local tectonic regimes related to saline tectonics, which evolve from distensive to compressive in the WE direction, *downdip*, is explained by the salt displacement to the east caused by the slope geomorphological slope in the Espírito Santo basin and by the overload of subsequent on the platform from the Paleogene.

Keywords: salt tectonics; salt structures; structures domains; Espírito Santo basin

1 Introdução

1.1 Área de Estudo

A bacia do Espírito Santo, situada na margem continental leste do Brasil, tem o seu limite sul com a bacia de Campos representado pelo lineamento (ou enxame de diques) Vitória– Colatina ou a Zona de Falha Vitória–Colatina (Zalan *et al.*, 2011). Ao norte, o limite da bacia é dado pelo Paleocânion de Mucuri, sendo este limite, apenas geográfico, enquanto que ao leste, o limite econômico da bacia é dado pela isóbata de 3000 metros. Ao todo a bacia ocupa uma área de aproximadamente 50.000 km², dos quais 3.000km² correspondem à parte emersa, e 41.000km² de área prospectável (Alvarenga, 2010).

A área de estudo localiza-se na região de talude e bacia profunda no extremo sul da bacia do

Espírito Santo (Figura 1), próximo à Plataforma de Abrolhos e ao Banco de Besnard. Nesta área encontram-se os campos produtores de petróleo de Golfinho, Camarupim e Canapu (Figura 1).

1.2 Sal na Bacia do Espírito Santo

A ocorrência dos depósitos de sal nas bacias de margem leste brasileiras é marcada por um diaconismo de norte a sul quando se leva em consideração a primeira evidência salina na bacia de Sergipe-Alagoas ocorrida na seção rifte e as demais formadas durante o pós-rifte ou fase transicional, no Aptiano superior (Davison, 2005). O registro mais antigo não é objeto de estudo desse trabalho, que irá se ater apenas à camada salina mais recente. Nesse contexto, descrevem-se espessas camadas de hali-

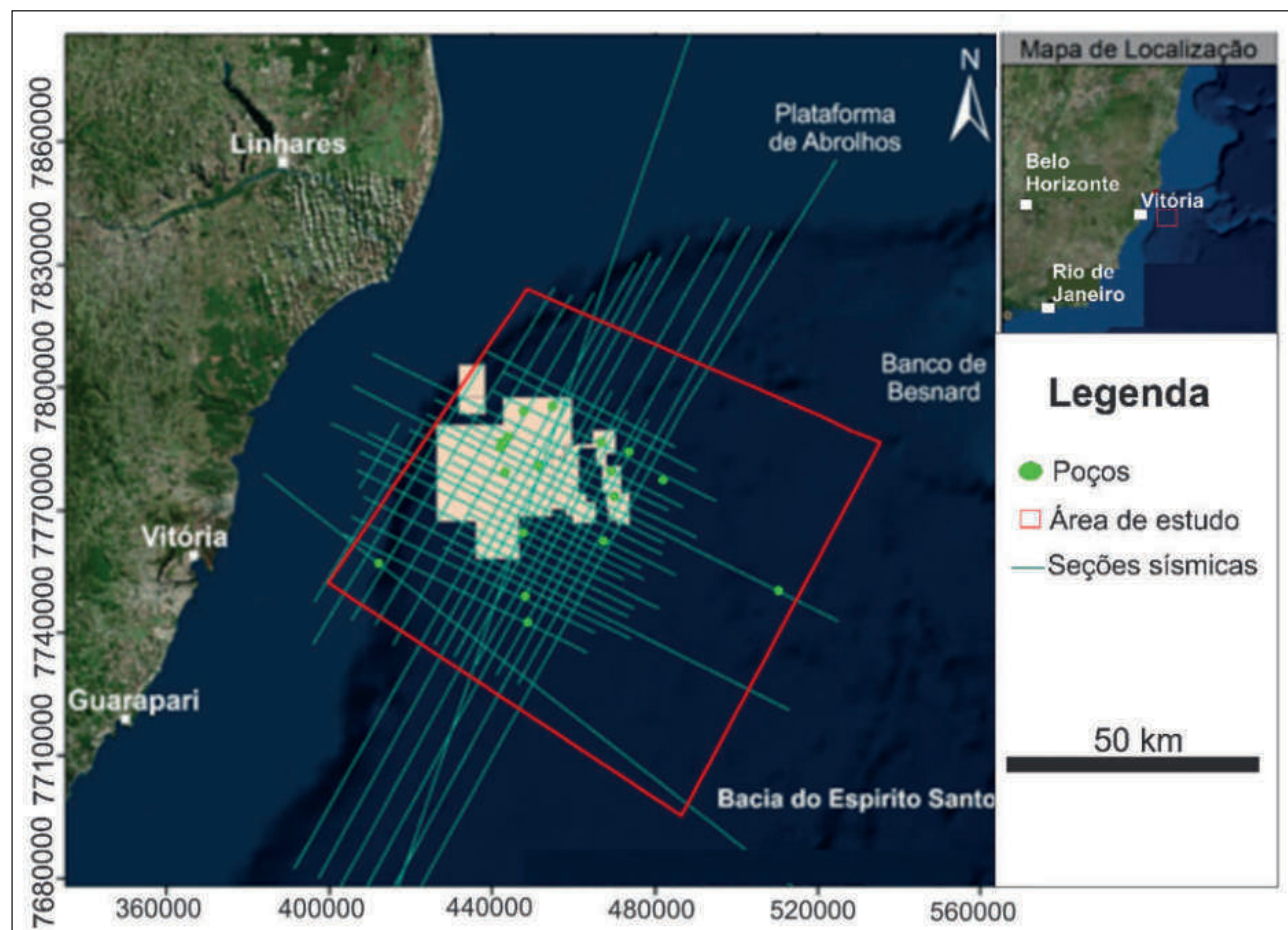


Figura 1 Mapa de localização da área de estudo, mostrando a geomorfologia submarina do talude e da bacia profunda, além da Plataforma de Abrolhos e do Banco de Besnard. O quadrado em vermelho delimita a área de estudo, que abrange as seções sísmicas 2D e os poços utilizados. Observa-se ainda, os campos produtores de petróleo em bege.

ta com intercalações de sais menos solúveis, como anidrita, e mais solúveis, ricos em K, como silvita, carnalita e taquidrita (Mohriak *et al.*, 2008).

Vieira *et al.* (1994) propuseram um diagrama cronoestratigráfico da bacia do Espírito Santo, que posteriormente foi atualizado por França *et al.* (2007). Segundo o trabalho mais atual, o preenchimento sedimentar da bacia do Espírito Santo passou por três fases tectono-sedimentares distintas: rifte, pós-rifte e drifte (Figura 2).

O sal na bacia do Espírito Santo, litoestratigraficamente é representado pelo o Membro Itaúnas pertencente à Formação Mariricu (Figura 2). Este foi depositado na fase final de estiramento crustal, antes à ruptura da litosfera (*breakup* continental) sob o domínio de crosta continental estendida influenciada pela subsidência térmica, há 112 milhões de anos. Estes depósitos representam as primeiras incursões marinhas, sob o domínio de crosta continental, em condições restritas e clima árido (Vieira *et al.*, 1994).

O Membro Itaúnas engloba os espessos depósitos, principalmente, de anidrita e halita originados em um ambiente hipersalino (França *et al.*, 2007). A acumulação de evaporitos ocorreu na bacia do Espírito Santo de maneira muito expressiva, o que proporcionou uma atividade halocinética que deu origem a diápiros, muralhas e outras estruturas salinas abundantes na região do depocentro da bacia. Segundo Biassusi *et al.* (1996), o sal nessa bacia foi estruturado pelas reativações das falhas da fase rifte e das zonas de fraquezas do embasamento ocorridas no final do Albiano. De acordo com Gomes *et al.* (1988), a atuação de um regime de cisalhamento simples após a deposição dos sedimentos no Aptiano superior, resultou em falhas transcorrentes com orientações NW/NE, causando dobramentos que podem ter sido os responsáveis pela maior parte da estruturação da Formação Mariricu.

A bacia do Espírito Santo, assim como todas as outras bacias sedimentares da margem leste brasileira que apresentam espessas camadas de sal ao longo do seu empilhamento estratigráfico, exibem diferenças estruturais e estratigráficas em relação àquelas que não apresentam (Fossen, 2010). Estas tendem a mostrar padrões estruturais locais, que afetam a pilha sedimentar, variando de extensional para compressional, impostos pela movimentação do sal

que ocorre devido às propriedades petrofísicas específicas dos evaporitos (Moriahk *et al.*, 2008). Em termos gerais, o sal apresenta baixa densidade em grandes profundidades e comportamento plástico, características fundamentais para o fluxo salino (Huddec & Jackson, 2007).

Asmus *et al.* (1971), Biassusi *et al.* (1996), França *et al.* (2007) reconheceram a complexidade estratigráfica da bacia do Espírito Santo, muitas vezes relacionada com as feições halocinéticas. A porção sul da bacia, definida por Gomes *et al.* (1988) como sendo a Plataforma de Domos Sul, área de estudo deste trabalho, destaca-se pela presença de corpos autóctones e alóctones. A movimentação do sal estruturou significativamente a seção sedimentar da fase drifte da bacia, o que dificulta a interpretação estratigráfica em áreas com muitos corpos salinos. Desta forma, ao delimitar e caracterizar os domínios estruturais relacionados à tectônica do sal, este trabalho oferece uma contribuição ao conhecimento da evolução tectono-sedimentar da fase drifte da bacia do Espírito Santo, a qual, na sua porção sul, desenvolveu-se sob forte influência da tectônica salina (Figura 2).

2 Materiais e Métodos

2.1 Dados Utilizados

Os dados utilizados para o desenvolvimento deste trabalho são provenientes do Banco de Dados de Exploração e Produção da Agência Nacional de Petróleo (BDEP/ANP), obtidos através do projeto intitulado “ Gearquitetura do Complexo Deltaico do Rio Doce e seu papel na transferência sedimentar para águas profundas: um análogo moderno à acumulação dos arenitos reservatórios de Parque das Conchas (Delta II)”, realizado no Laboratório de Geologia Sedimentar (LAGESED) na Universidade Federal do Rio de Janeiro. Foram obtidas trinta e nove seções sísmicas 2D empilhadas (*post-stacking*) e migradas em tempo, no formato SEG-Y, e dados de dezenove poços, incluindo: (1) perfis compostos contendo descrições litoestratigráficas e cronoestratigráficas; (2) tabelas de *checkshot*; e (3) perfis geofísicos de poços, que incluem as curvas de raios gama (GR), caliper (CAL), densidade (RHOB) e sônico (DT).

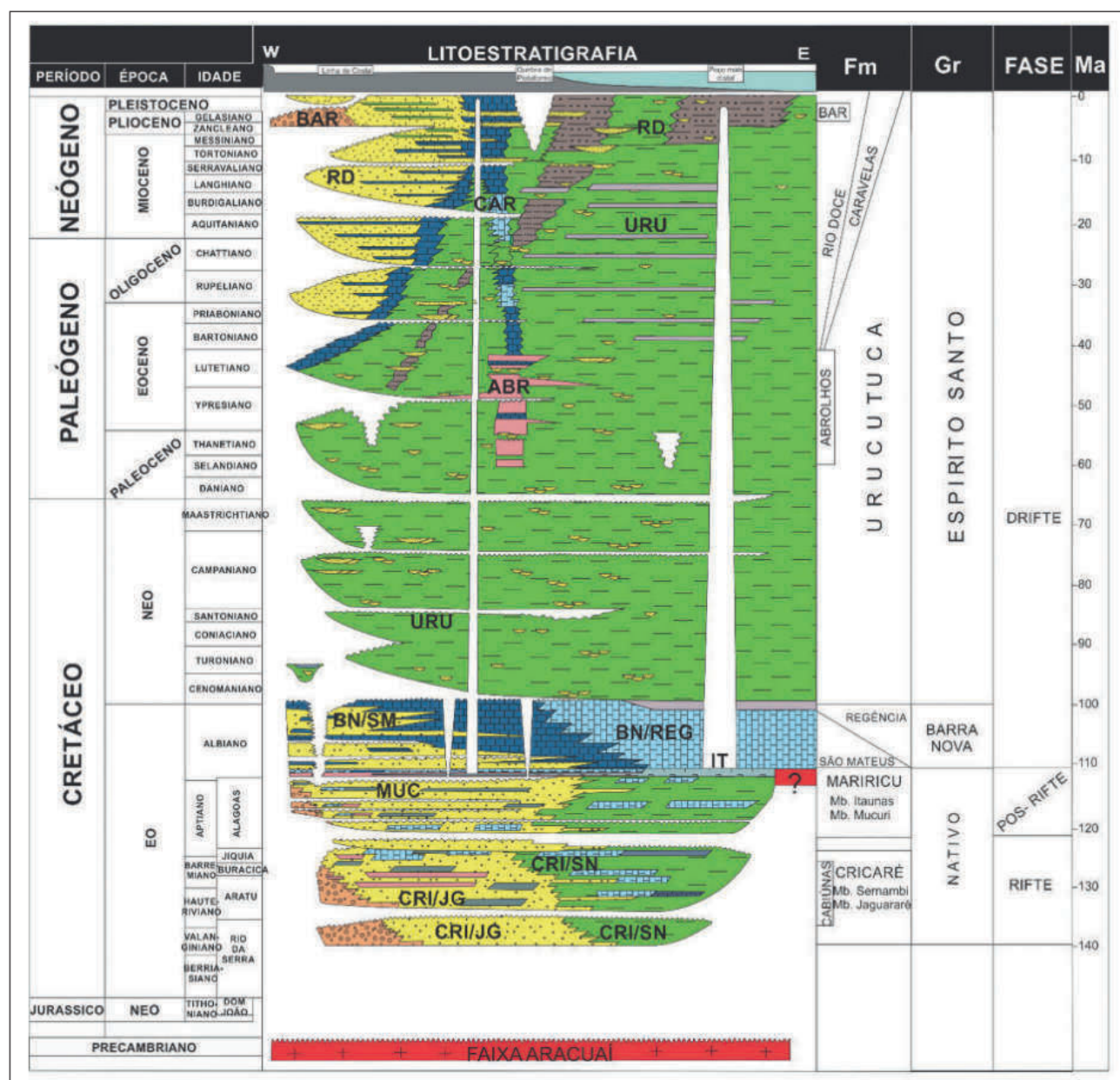


Figura 2 Diagrama cronoestratigráfico da bacia do Espírito Santo. Modificado de França et al. (2007).

Todos os dados foram interpretados para alcançar o objetivo do trabalho, no entanto, serão apresentadas duas seções para exemplificar as estruturas salinas e os domínios associados, e três poços com o intuito de identificar de superfícies estratigráficas e correlação com a sísmica (Figura 3).

Os dados sísmicos e de poços foram carregados, correlacionados e interpretados nas suítes PE-TREL (Schlumberger), versão 2017.2 (Figura 3).

2.2 Correlação Poço- Sísmica

Os dados sísmicos neste trabalho não estão em profundidade, mas em tempo sísmico duplo (*Two Way Time – TWT*), portanto, faz-se necessária a correlação do poço com a sísmica (*seismic well tie*) para que a unidade dos poços (metro) possa ser associada à unidade sísmica (TWT). A correlação é realizada através da relação profundidade-tempo obtida pelo *checkshot* e, posteriormente, ajustadas com a técnica do sismograma sintético.

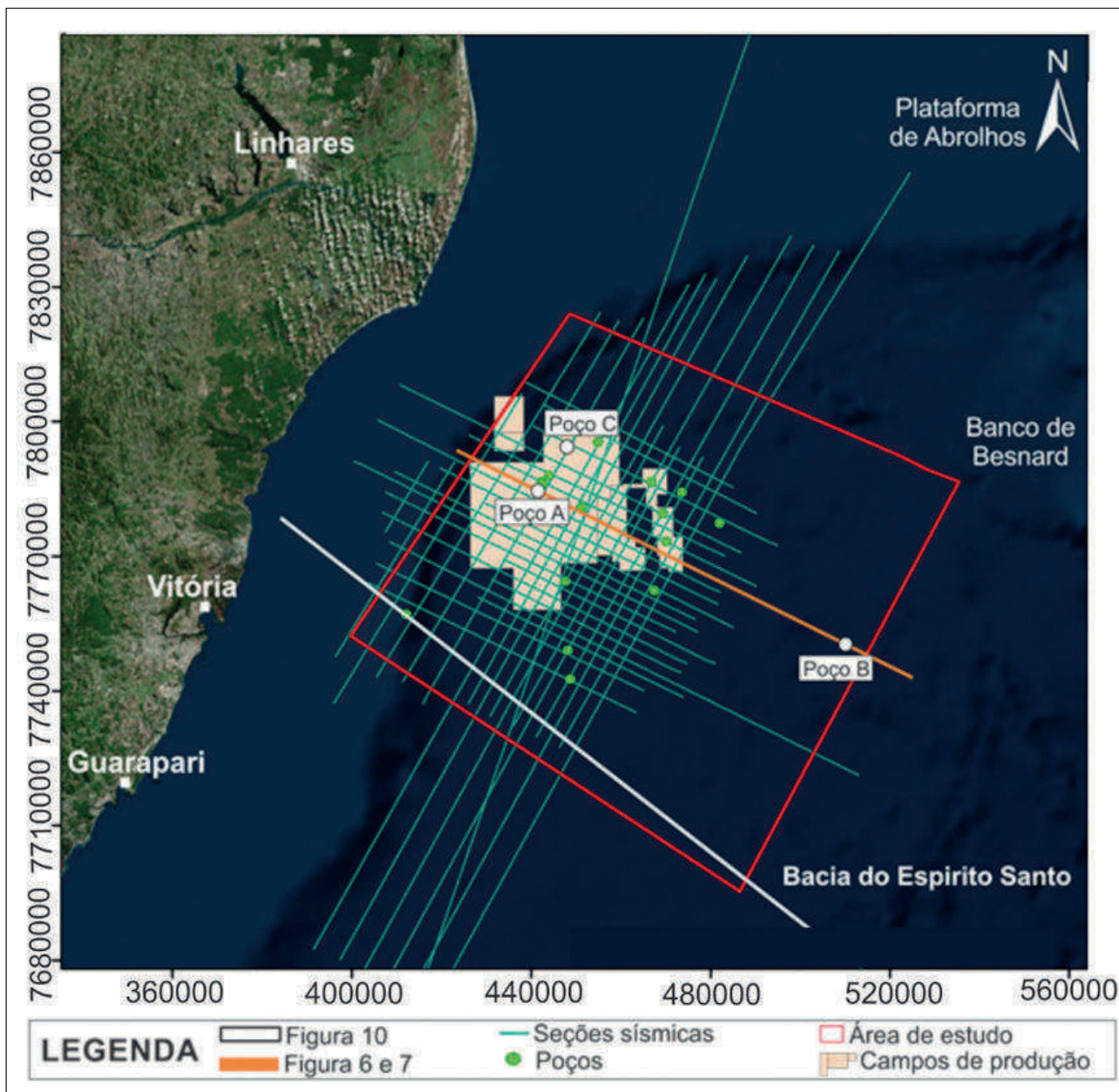


Figura 3 Mapa de localização dos dados sísmicos e de poços. Em destaque estão as duas seções sísmicas (em laranja e branco) e os poços que serão apresentados neste trabalho.

Em termos operacionais, os dados de poços utilizados para a técnica do sismograma sintético são as curvas dos perfis geofísicos de densidade (RHOB) e sônico (DT), obtendo como resultado o coeficiente de reflexão (RC). O sismograma é o resultado da convolução do coeficiente de reflexão das interfaces geológicas do poço com uma *wavelet*. Desta forma, com a resposta sísmica da sucessão estratigráfica do poço, pode-se melhorar a correlação do poço à sísmica já que a técnica possibilita a correlação das

variações de amplitude positivas e negativas do sismograma gerado pelo o dado de poço com o dado sísmico (Figura 4).

2.3 Identificação de Eletrofácies e Mapeamento Sísmico

Com a correlação poço- sísmica, a análise dos padrões de eletrofácies identificados para cada período geológico entre os marcadores cronoestratigráfi-

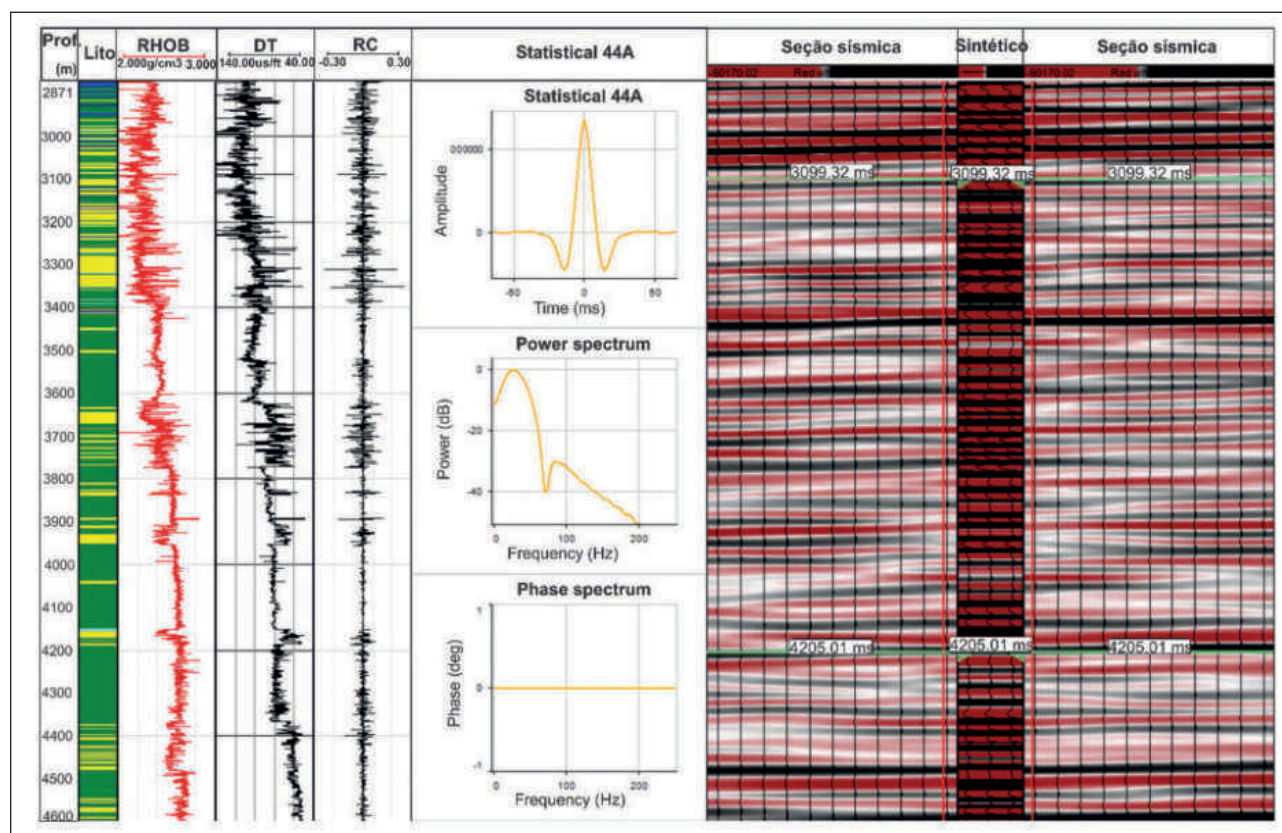


Figura 4 Janela da correlação do poço C à sísmica do software Petrel.. A partir dos perfis densidade (RHOB) e sônico (DT), é gerado um coeficiente de refletividade que quando convolvido com uma wavelet dá origem ao sismograma sintético do poço.

cos mais a observação das terminações, configuração e polaridade dos refletores, foi possível determinar os horizontes sísmicos relativos a cada marcador retirado dos poços. Além disso, ao se correlacionar os dados sísmicos com as informações obtidas dos dados de poços, foi possível confirmar quais as sismo-fácies são de fato relativas aos corpos salinos e com isso aplicar essa análise para outras seções.

A análise dos dados de poços permitiu identificar os padrões de respostas de perfis geofísicos entre os marcadores cronoestratigráficos reportados dos perfis compostos. Por vezes, nos dados de poços utilizados ocorreram significativas alterações nos padrões litológicos referentes a mudanças nos sistemas deposicionais, hiatos ou erosões. Estas alterações litológicas geram mudanças nos padrões de eletrofácies analisadas nos perfis, que foram utilizadas para caracterizar os horizontes sísmicos mapeados após a correlação poço- sísmica.

Para a interpretação dos dados sísmicos, seguiram-se os princípios da sismoestratigrafia apresentados por Mitchum *et al.* (1977). Foram analisadas, inicialmente, as geometrias dos refletores sísmicos associados às estruturas salinas, além dos prováveis sistemas deposicionais e do contexto estrutural, que apesar de não serem objetivos diretos do trabalho, auxiliam no reconhecimento geral da área de estudo. Posteriormente, foram identificadas as terminações estratigráficas como *onlap*, *downlap* e truncamento. Essa etapa foi fundamental para o entendimento da relação da movimentação do sal com a pilha sedimentar encaixante, já que a forma como os refletores sísmicos se encontra com os grandes corpos salinos e as estruturas associadas sugerem a história evolutiva do diápiro.

Por último, a partir da interpretação das trinta e nove seções sísmicas com o auxílio da correlação com os dados de poços, foi gerado um mapa de contorno estrutural do topo do sal, da área de estudo, no software Petrel.

3 Resultados

3.1 Horizontes Sísmicos Mapeados

Dentre os poços obtidos pelo BDEP/ANP que possuíam informações sobre as idades da seção perfurada, foi escolhido o poço C para demonstrar os critérios elétricos referentes a cada horizonte sísmico mapeado, após a correlação do poço à sísmica. O poço C perfurado na região de talude da bacia atravessou as formações Urucutuca e Regência, não atingindo o sal do Membro Itaunas (Figura 5). Este poço foi correlacionado a uma seção sísmica *dip* que passa próximo a ele, o que permitiu a transposição ao dado sísmico de informações litológicas e geocronológicas fornecidas por este.

A primeira superfície marcada no poço base para o topo foi mapeado como sendo a Discordância Pré Urucutuca (DPU) representa o topo da seção sedimentar de idade albiana (Grupo Barra Nova) na bacia do Espírito Santo. Essa superfície, na área de estudo, marca a transição entre as formações Regência (carbonatos) e Urucutuca (siliciclásticos) o que é registrado pelo aumento gradual do DT e discreta diminuição da densidade (Figura 5).

Após a formação da Discordância Pré Urucutuca (DPU), iniciou-se a deposição da Formação Urucutuca composta, nas regiões de talude e bacia profunda, por folhelhos e arenitos turbidíticos, que se estendem temporalmente até o Recente. Os outros três horizontes sísmicos mapeados na seção drifte da bacia são internos à Formação Urucutuca e são marcados por mudanças nos padrões petrofísicos e de sismofácies. Estes foram interpretados como seções de tempo que representam posições aproximadas de topos de unidades cronoestratigráficas e nominados de: topo do Campaniano, limite K-T e discordância do Eoceno.

O topo do Campaniano marca o início do período com grande concentração de corpos areníticos turbidíticos, na bacia do Espírito Santo, o Maastrichtiano. Com isso a esse limite é marcado por uma diminuição abrupta do DT, mudança no padrão da curva de densidade, que começou a registrar menores valores e sucessivos padrões em caixa registrados no GR (Figura 5).

O limite K-T, representa o topo do Maastrichtiano e a passagem do Cretáceo para o Terciário. Esse marcador cronoestratigráfico assinala o fim do período geológico com grande concentração de arenitos turbidíticos e é observado nos perfis geofísicos de poços com o início do aumento dos valores de DT, discreto aumento na densidade, coincidindo com o aumento geral dos valores de GR. Já a discordância do Eoceno corresponde à diminuição do DT e densidade, resultado da deposição de margas no sistema (Figura 5).

3.2 Caracterização do Sal com Base em Dados Geofísicos de Poços e Sísmicos

O poço A cedido pelo BDEP/ANP também foi correlacionado a uma seção sísmica *dip*. Na descrição litológica do poço, observa-se uma espessura significativa de sal, intercalada pelos folhelhos e arenitos turbidíticos relativos à Formação Urucutuca. Deste modo sugere-se que este poço perfurou uma estrutura salina alóctone do Membro Itaunas conhecida como sendo uma língua de sal evoluída a partir de uma estruturação diapírica, constituída por halita, anidrita e taquidrita (Figura 6).

Com a correlação poço- sísmica, pode-se identificar essa intercalação dos evaporitos do Membro Itaunas com a Formação Urucutuca no dado sísmico e, com isso, interpretar as sismofácies do sal associadas (Figura 6). As sismofácies representadas pelas estruturas de sal são variáveis, ora caóticas ora estratificadas. Essa variação pode estar ligada à composição mineralógica dos evaporitos na área de estudo.

Deste modo, foi feita uma interpretação dos perfis geofísicos do poço A. O perfil sônico apresenta uma diminuição considerável nos seus valores no corpo salino alóctone perfilado como um todo. Já o perfil de densidade mostrou uma diminuição nos valores referentes ao mineral halita e um aumento nos valores nos minerais anidrita e taquidrita, conforme apresentado na (Tabela 1).

Considerando as variações nas respostas dos perfis geofísicos e sismofácies em relação à mineralogia dos evaporitos, pode-se afirmar que as

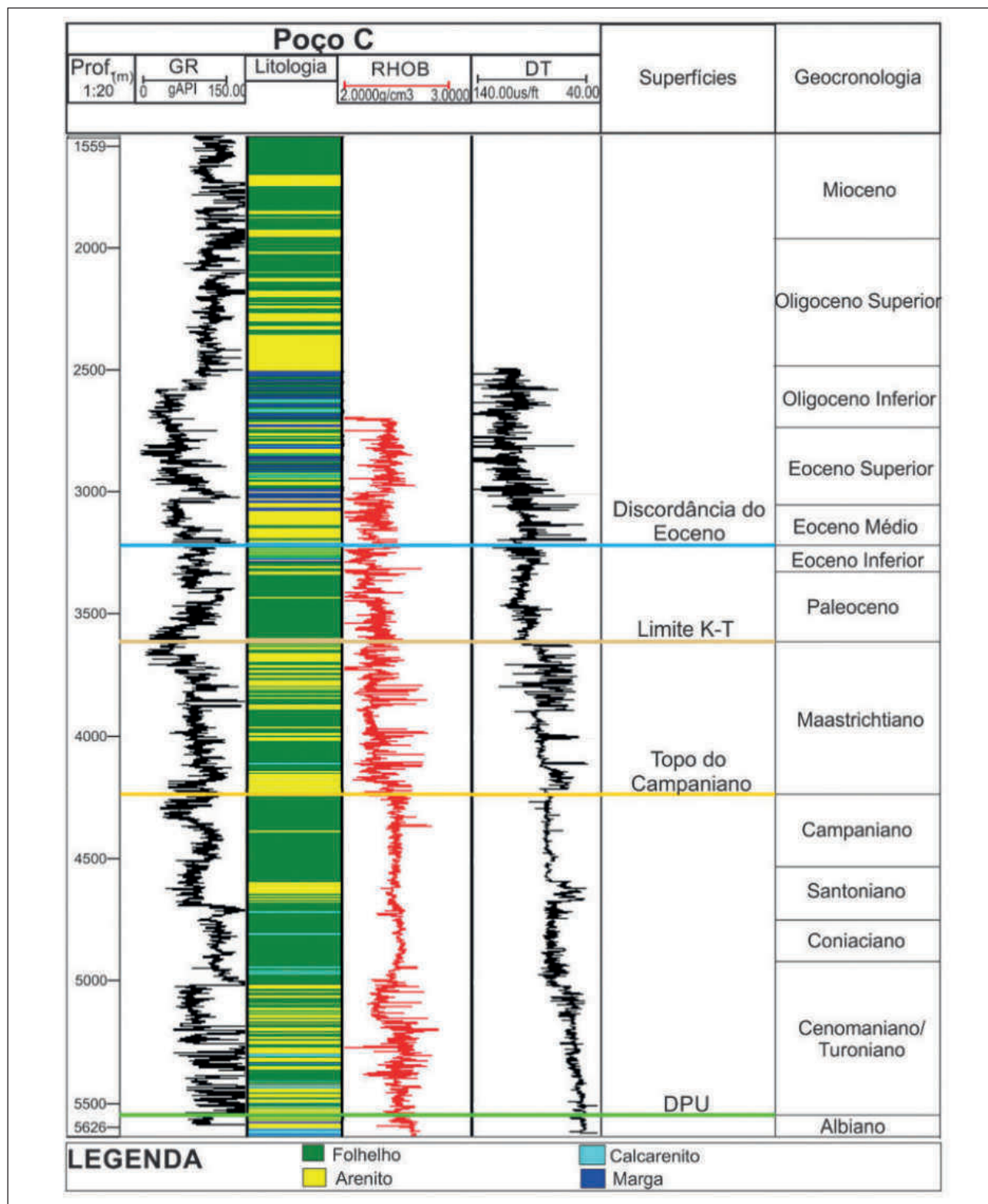


Figura 5 Poço C utilizado para a correlação das informações do poço à sísmica. Nesta figura estão sendo mostrados os critérios elétricos, com base nas informações de idade da seção perfurada, para a marcação das superfícies que no dado sísmico representam horizontes mapeados.

sismofácies caóticas foram relacionadas à presença do mineral halita, enquanto que a sismofácies estratificadas são relativas à ocorrência de anidrita e taquidrita.

O mesmo padrão de sismofácies, correspondendo à variação de minerais salinos, foi observado não somente em estruturas como línguas de sal, mas também em estruturas autóctones como almofadas, domos e diápiros (Figura 6).

A Tabela 1 abaixo mostra os valores registrados nos perfis petrofísicos do poço A relativos aos minerais salinos.

Mineral Salino	Sônico (DT)	Densidade (RHOB)
Halita	67,0	2,03
Anidrita	50,0	2,98
Taquidrita	74,0	1,86

Tabela 1

3.3 Estruturas Salinas Observadas

Nas seções sísmicas, observaram-se diversas estruturas salinas, e essas estruturas foram interpre-

tadas de acordo com os trabalhos de Hudec & Jackson (2007) e Jackson & Talbot (1986). Na área de estudo foram descritas estruturas salinas autóctones, quando não há o desprendimento de corpos de camada “mãe” de sal; e alóctones, quando ocorre a separação parcial ou integral dos corpos salinos da camada principal alimentadora.

Deste modo são descritas nas seções sísmicas estruturas salinas autóctones como domos e diápiros, estruturas em processo de desprendimento identificadas pelo estrangulamento característico e feições irregulares associadas a formação de línguas de sal alóctones (Figura 7).

Segundo Fossen (2012), o termo “tectônica do sal” é utilizado quando a participação salina na deformação afeta o tipo, a geometria, a localização e /ou grau de deformação das estruturas que ocorrem na bacia, mesmo quando estas não são compostas de sal. Nesse contexto, notam-se na área estudada as falhas lístricas, estruturas tipo casco de tartaruga, *rafts* carbonáticos e falhas planares formados acima dos grandes diápiros (Figura 7).

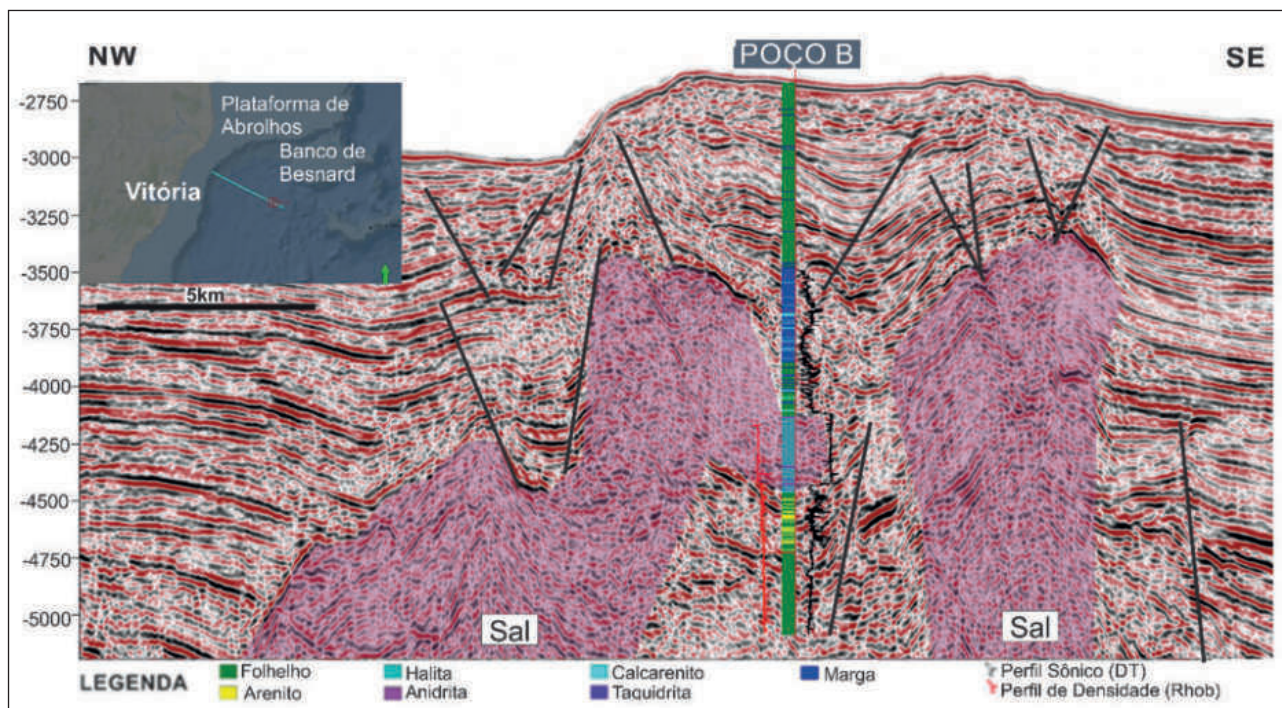


Figura 6 Seção sísmica *dip*, mostrando a sua correlação com o poço A e a intercalação do sal com a Formação Urucutuca. Nota-se a variação de sismofácies associadas à presença de halita, anidrita e taquidrita.

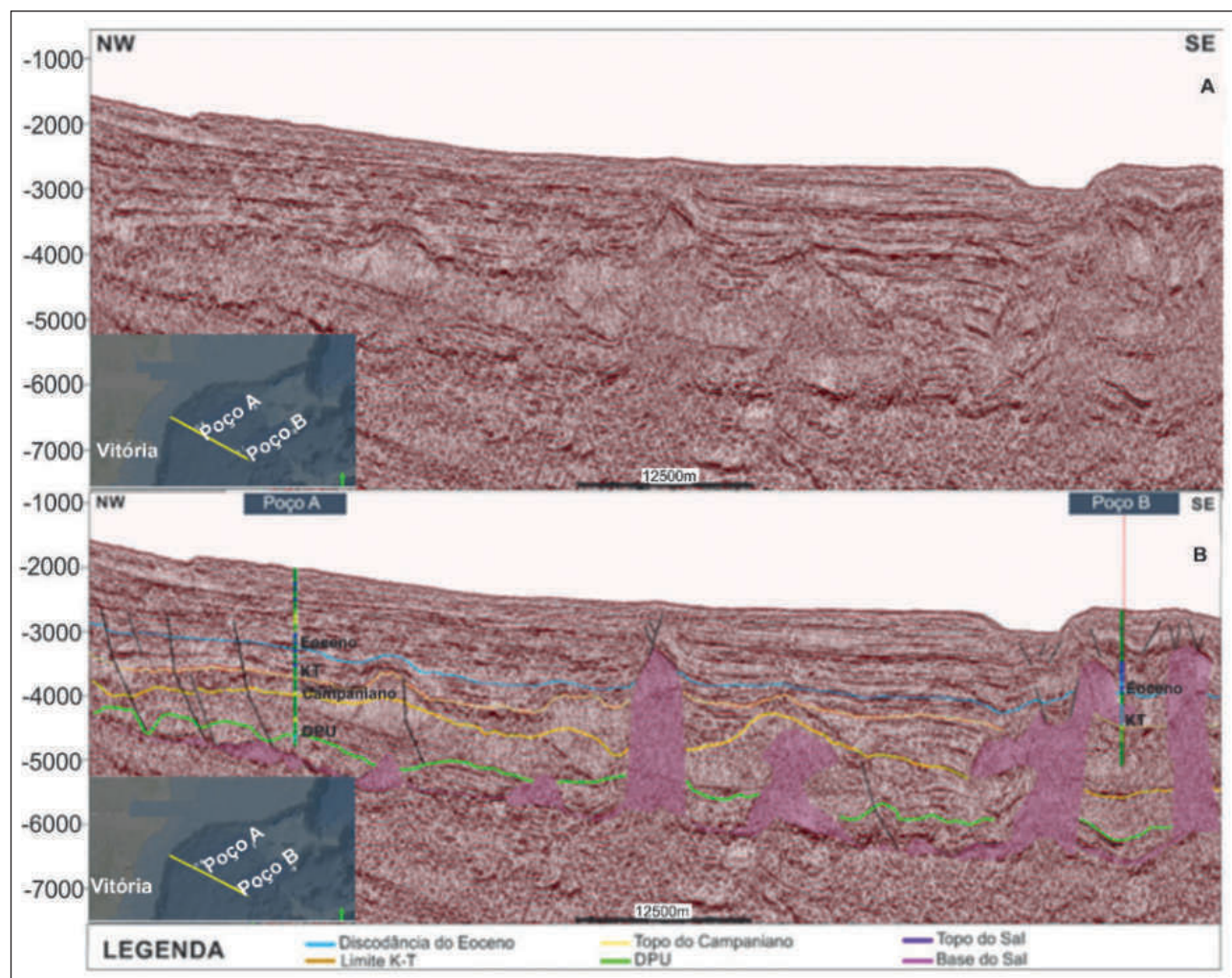


Figura 7 Seção sísmica dip sem interpretação (a) e com interpretação (b) exemplificando as estruturas salinas ocorrem na área de estudo. Observa-se a presença de domos e diápiros, estruturas em processo de desprendimento identificadas pelo seu estrangulamento e feições irregulares associadas a formação de línguas de sal alóctones. Há ainda estruturas que não são compostas de sal, mas sua gênese está relacionada com a movimentação salina lateral.

3.4 Mapa de Contorno Estrutural do Topo do Sal

Com a interpretação do horizonte relacionado ao topo do sal nas trinta e nove seções sísmicas, que compõem o banco de dados, foi gerado um mapa de contorno estrutural em tempo sísmico para esse horizonte (Figura 8). Esse mapa possibilita a visualização tridimensional do sal na área de estudo e, com isso, observam-se estruturas diapíricas significativas, que atingem aproximadamente 2500.00 ms. São visíveis também baixos estruturais, que atingem os valores de 7000.00 ms, que podem ser intitulados de mini bacias. As destacáveis estruturas positivas

e negativas estão orientadas segundo um trend N-S com discreta deflexão para NW-SE (Figura 8).

4 Discussão

4.1 Análise da Deformação Salina

Hudec & Jackson (2007) discutiram sobre a típica evolução das estruturas salinas que evoluem pelos estágios reativo, ativo e passivo. O termo reativo se aplica ao processo inicial da formação do diápiro, que apresenta um crescimento primeiramente sob a forma de almofada respondendo à extensão da sobrecarga e do fluxo de sal (Mohriak *et al.*, 2008).

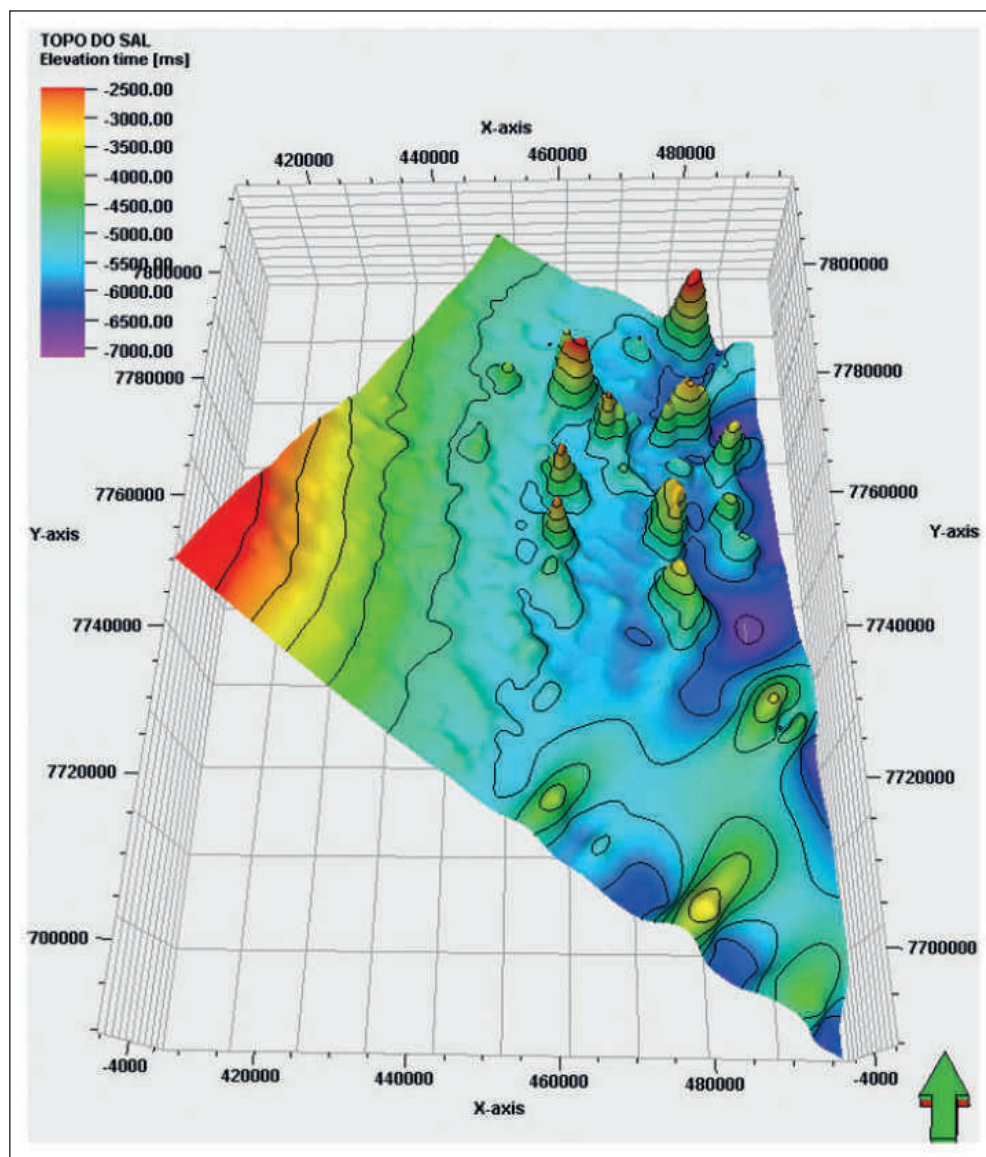


Figura 8
Mapa de contorno estrutural do topo do sal, em tempo sísmico. Observa-se as estruturas diapíricas de dimensões verticais significativas e mini bacias com orientação de direção preferencial NNW-SSE.

As estruturas começam a se formar no eixo dos *grabens*, nucleado por falhas lítricas, ocupando os espaços criados pelas falhas e fraturas na separação dos blocos. Após a movimentação inicial dos corpos salinos, as forças gravitacionais resultantes da menor densidade do sal frente à sobrecarga, começam a agir de forma ativa. O diápiro ascende levantando e rotacionando as camadas superiores originando uma estrutura de arqueamento, o que resulta no rompimento definitivo da sobrecarga. Se a estrutura salina romper completamente a sua sobrecarga e se expor à superfície é possível a ocorrência do diapirismo passivo ou *downbuilding*. Segundo Hudec & Jack-

son (2007), neste tipo de diapirismo, o corpo salino atinge o equilíbrio isostático, e continua a crescer à medida que os sedimentos se acumulam nas mini bacias periféricas, nos flancos do diápiro, por processo de agradiação.

O sal na área de estudo forma domos, diápiros e muralhas que exibem o típico padrão evolutivo de estruturas salinas que evoluíram dos estágios reativo, ativo e passivo. A partir da análise de seções sísmicas (Figura 7), observa-se que os pequenos domos salinos deformam os depósitos do Albiano de maneira ativa e, por vezes, atravessam o horizonte

sísmico relativo à DPU. Já as estruturas de desenvolvimento mais intenso como os diápiros apresentam um padrão de crescimento vertical que, via de regra, não ultrapassam o limite K-T, mas que quando acontecem não evoluem para além do limite do Eoceno. Isso sugere que nestes pontos a densidade do sal se equivale à densidade da sobrecarga e o crescimento na etapa final se deu pelo processo de *downbuilding*, sem deformação da sobrecarga. As feições salinas que evoluem verticalmente além do limite K-T e da discordância do Eoceno estão localizadas nas porções mais distais da área de estudo e se associam com as estruturas alóctones. Esse fato permite se inferir que a concentração salina neste ponto foi intensa o suficiente para o aumento do fluxo vertical salino, o que favorece o crescimento das estruturas.

Além das estruturas halocinéticas compostas por sal, ocorreram também na área de estudo aquelas geradas indiretamente pela movimentação do sal para as porções abissais da bacia. Foram observadas, portanto, falhas lítricas, *rafts* carbonáticos e falhas planares nucleadas acima dos grandes diápiros formando grabens de colapso crestal. Sobre essas estruturas observam-se que comumente ocorrem nas porções proximais e intermediárias da área de estudo, locais no qual a espessura salina é delgada, o que constitui evidências do fluxo lateral salino.

4.2 Delimitação de Domínios Estruturais Salinos

Com a análise das seções sísmicas interpretadas e o mapa de contorno estrutural do topo do sal, foram delimitados quatro domínios salinos a partir das estruturas halocinéticas presentes (Figura 9). A seção esquemática (Figura 10) retrata a distribuição dos domínios, delimitados em mapa, no sentido *downdip* da bacia (Figuras 9 e 10).

Domínio Estrutural I

O Domínio estrutural I ocorre nas porções mais proximais da área estudada, após quebra da plataforma, no talude superior. Nesta região da bacia, os horizontes sísmicos relativos ao topo e à base do sal se apresentam amalgamados em apenas um horizonte, devido à pequena espessura da camada de rocha evaporítica a qual não permite a individualiza-

ção do topo e base devido à baixa resolução sísmica. Dados litológicos dos poços perfurados nas proximidades do talude mostram que o mineral salino presente nessa porção da bacia é, predominantemente, a anidrita. Interpreta-se que isso seja reflexo da sua menor mobilidade quando comparada à halita, que foi deslocada preteritamente para as porções mais distais da bacia.

O padrão de falhamento lítrico também é um fator importante para a delimitação do Domínio I. Este tipo de falha ocorreu devido à presença de sal no empilhamento estratigráfico da bacia. Segundo Moriahk *et al.* (2008), o sal em grandes profundidades exibe um caráter reológico plástico, o que facilita a sua movimentação, isso possibilita a formação de uma zona de descolamento de diferente reologia quando comparada com o restante do empilhamento abaixo e acima do sal. Esta zona faz com as falhas inicialmente planares, tornem-se lítricas diante da mudança da sua atitude.

Domínio Estrutural II

O Domínio estrutural II ocorre nas porções proximais intermediárias da área de estudo. O sal neste domínio encontra-se estruturado em pequenos domos e almofadas associados às falhas lítricas. No Domínio II, nota-se também uma grande concentração dos espessos *rafts* carbonáticos, datados do Albiano, transferidos para este ponto através do processo conhecido como Tectônica de Jangada (Moriahk *et al.*, 2008). Esse processo também é consequência do fluxo salino para as porções distais da bacia aliado à gravidade. As falhas lítricas nucleadas a partir da zona de descolamento fragmentam a plataforma carbonática depositada sobre o sal, individualizando-a em bancos carbonáticos que podem sofrer deslocamento *downdip*. Estes bancos movimentados recebem o nome de *rafts* ou jangadas que quando ocorrem cessam o seu movimento e se concentram no Domínio II. Os *rafts* carbonáticos movimentados também podem se agrupar sob a forma de um arranjo morfológico estrutural que recebe o nome de casco de tartaruga. Essa estrutura recebe este nome devido a forma anticlinal, semelhante a um casco de tartaruga, adquirida pelos bancos carbonáticos do albiano, reflexo da deformação gerada pela ascensão de domos adjacentes.

Domínio Estrutural III

O Domínio estrutural III ocupa o trecho entre talude inferior e bacia profunda da área de estudo, onde as estruturas distensivas autóctones, tais como diápiros e muralhas de sal, dominam. Os diápiros neste domínio são bastante evoluídos o que possibilita a observação dos três estágios de diapirismo descritos por Hudec e Jackson (2007). No primeiro momento os diápiros são formados em resposta a pequenas falhas planares que aliviam a sobrecarga caracterizando o processo de diapirismo reativo. Após o rompimento da sobrecarga, os corpos salinos fluem verticalmente de forma ativa, falhando as camadas acima destes, o que pode ser constatado nas seções sísmicas. Este é considerado o processo de diapirismo ativo, sempre presente na formação das estruturas verticais, já que é necessário romper com a sobrecarga. Por último, a densidade do corpo salino em ascensão entra em equilíbrio com a sobrecarga, e o crescimento do diápiro se estabelece, a partir desse ponto, de forma passiva, não sendo mais identificado falhamentos na sobrecarga. No domínio III predominam estruturas salinas do estágio de diapirismo passivo.

Domínio Estrutural IV

Este domínio ocorre no extremo leste da área de estudo, em bacia profunda, e é marcada pela presença de estruturas salinas que se descolam da fonte alimentadora em formas de línguas, *canopys*, gotas, lençóis de sal entre outros. Estas estruturas são classificadas como alóctones.

Na área estudada, observa-se a presença de estruturas salinas com vergência para leste e uma língua de sal evoluindo em direção à bacia profunda, no qual o sal atinge níveis estratigráficos mais recentes.

Alguns autores (Macedo 1990; Dias 1993) sugerem que as massas salinas alóctones avançam em direção à crosta oceânica ultrapassando o seu limite com a crosta continental, enquanto que outros (Gladzenko *et al.*, 1997; Mohriak 2003 apud Mohriak *et al.*, 2008) defendem a existência de um alto do embasamento composto por rochas ígneas extrusivas e intrusivas.

A interpretação da linha acima (Figura 10) está de acordo com o primeiro grupo de pesquisadores, pois as sismofacies presentes formam um conjunto de refletores de baixa amplitude associados a alguns refletores de alta amplitude, interrompidos por falhas planares, típicas do regime tectônico de rift. Além disso, a ausência de poços perfurados nessa região que atinjam a profundidade discutida dificulta a confirmação da presença de rochas ígneas.

4.3 Movimentação do Sal para as Porções Distais da Bacia

A área de estudo apresenta um aumento na quantidade, dimensão e espessura das estruturas salinas à medida que se aproxima do depocentro da bacia (Figuras 9 e 10). Este fato sugere um deslocamento gravitacional do sal da porção proximal da bacia para as regiões distais, que provocou um aumento na espessura da camada original nesta área. Desta forma, a região de águas profundas é caracterizada por muralhas alongadas de sal, enquanto que em águas rasas a espessura é de poucos metros.

Com isso, além do fluxo vertical comumente considerado nas estruturas halocinéticas, deve-se levar em consideração também a movimentação lateral do sal para a nucleação e construção de estruturas diapíricas. A bacia do Espírito Santo apresenta grandes concentrações de corpos salinos na sua porção mais profunda (Mohriak *et al.*, 2007) o que pode ser observado na área de estudo através da análise dos mapas e seções apresentadas. O sal é dissolvido ou deslocado lateralmente das porções mais proximais da bacia para as partes mais distais, o que serviu de *input* salino para o crescimento das estruturas dômicas e diapíricas. As causas para esse fenômeno podem ser atribuídas à inclinação da margem continental em direção ao contato crosta continental-crosta oceânica devido à subsidência termal pós-breakup, além da sobrecarga sedimentar na região proximal da bacia, principalmente, a partir do Paleógeno gerada pela progradação da Formação Rio Doce (Mohriak *et al.*, 2008). Ambos os fatores são discutidos e testados por Hudec & Jackson (2007) a partir de modelos experimentais.

A halocinese para águas profundas implicou na geração de regimes tectônicos locais e conse-

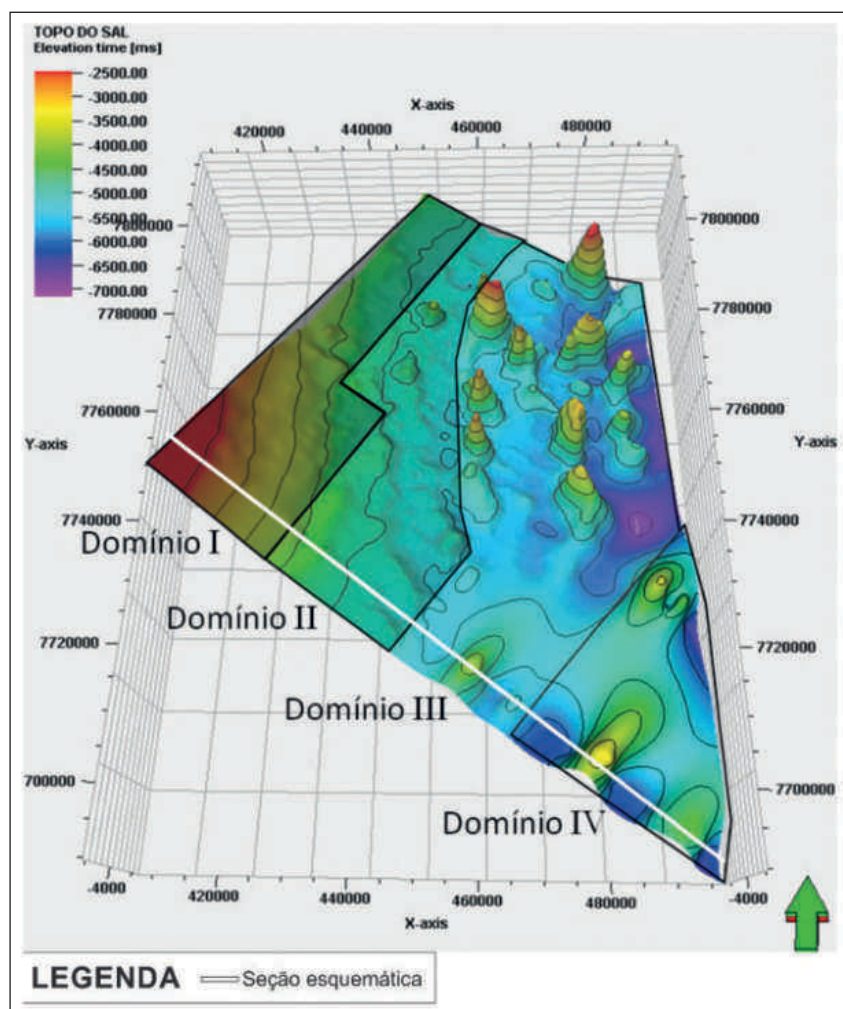


Figura 9
 Mapa de contorno estrutural do topo do sal, em tempo sísmico, com os domínios estruturais salinos delimitados de acordo com a forma e a distribuição das estruturas na área de estudo. Foram observados quatro domínios estruturais que podem ser visualizados na seção sísmica identificada no mapa com uma linha branca.

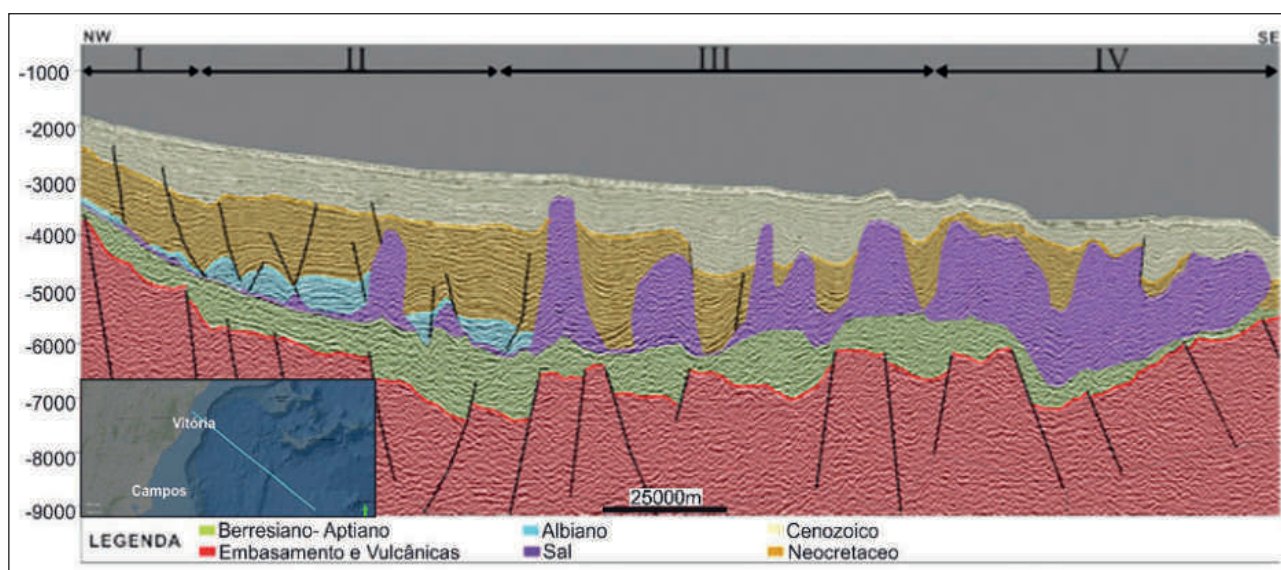


Figura 10 Seção esquemática gerada a partir da interpretação de uma seção dip. Nesta seção é possível analisar como estão dispostas as estruturas salinas nos quatro domínios estruturais no sentido downdip da bacia profunda.

quentemente, a nucleação de estruturas (Mohriak, 2001 apud Mohriak *et al.*, 2008). A análise da ocorrência destas em cada domínio permite a inferência de qual o regime tectônico local é atuante naquela porção da área de estudo.

No domínio I, a presença da zona de descolamento bem marcada agindo como base para a nucleação das falhas lítricas visíveis e a pequena espessura da camada de rocha salina sugere a movimentação lateral para os domínios mais à *donwdip*. Neste contexto, interpreta-se um regime tectônico local distensivo impulsionado pela halocinese.

No domínio estrutural II, deve-se destacar a presença da estrutura tipo casco de tartaruga que tem especificamente a sua forma anticlinal como reflexo da deformação dos estratos pós-sal gerada pelos domos e diápiros nucleados adjacentes a essa estrutura. Além disso, sugere-se que o fluxo lateral salino também é responsável pela retirada do sal de estruturas diapíricas nessa localidade, estabelecendo um colapso destas, o que faz com que as rochas siliciclásticas e/ou carbonáticas sobrejacentes ocupem o espaço dessas rochas salinas, gerando as estruturas tipo casco de tartaruga. A associação desta com os domos formados permite que seja inferido um regime distensivo nessa localidade.

O domínio estrutural III, como descrito na sessão anterior, apresenta diápiros desenvolvidos que possibilitam a análise dos indícios que retratam as etapas de evolução dessas feições. As estruturas autóctones não apresentam vergência para o depocentro da bacia, o que sugere que este domínio, assim como os domínios I e II, esteja sob o regime tectônico local distensivo, resultado do fluxo lateral salino.

Já o domínio estrutural IV exhibe estruturas alóctones como línguas, *canopys*, gotas e lençóis de sal, que permitem inferir que o fluxo lateral salino das porções mais proximais da bacia convergiu para esse domínio a extremo leste da área de estudo. Com isso, a partir da interface entre os domínios III e IV, o regime local gerado pela tectônica salina, deixa de ser distensiva e torna-se compressiva.

5 Conclusão

A análise dos dados sísmicos e dos dezenove poços da área de estudo localizada na porção *offsho-*

re da bacia do Espírito Santo revelou a ocorrência de estruturas de sal controlando fortemente a parte estrutural da seção drifte da bacia. A respeito da seção drifte foram mapeados quatro horizontes sísmicos regionais, entre o Albiano inicial e o Eoceno médio, cujo a conformação dos estratos sedimentares relacionados a esses horizontes, encontra-se influenciada pela halocinese.

Os domos e diápiros salinos ao se movimentarem deformam desde os estratos do Albiano, de forma ativa, até os registros do Terciário e Eoceno, quando as estruturas se apresentam no estágio passivo sem falhas e o seu crescimento se deu pelo processo de *downbuilding*.

Com a geração de um mapa de contorno estrutural a partir da interpretação do horizonte relativo ao topo do sal foi constatado que as estruturas de sal estão orientadas de acordo com um *trend* N-S com deflação para NW-SE. Além disso, este mapa possibilitou a delimitação de quatro domínios estruturais relacionados ao sal da região estudada. Para cada domínio foi inferido o regime tectônico local causado pela halocinese e responsável pela nucleação das feições salinas. Com isso, observou-se que os três primeiros domínios proximais, por apresentarem falhas lítricas, zona de descolamento, domo e diápiros autóctones são estruturados sob um regime distensivo. Enquanto que o quarto e mais distal domínio se apresenta com vergência para a bacia profunda e com estruturas alóctones, o que permite sugerir que a sua gênese está relacionada a um regime tectônico compressivo.

6 Agradecimentos

Agradeço o Laboratório de Geologia Sedimentar da Universidade Federal do Rio de Janeiro (LAGESED-UFRJ), pelo apoio e infraestrutura, em especial, o grupo do Projeto Delta II e o seu coordenador técnico, João Paulo Oliveira. O autor Igor Nascimento agradece aos Profs. Jorge Picanço Figueiredo e Leonardo Borghi pelas orientações durante o mestrado na UFRJ. Além disso, gostaria de agradecer as empresas ONGC e Schlumberger pelo apoio financeiro e disponibilidade do *software* utilizado para a realização deste trabalho, respectivamente.

7 Referências

- Asmus E.A.; Gomes, J.B. & Pereira, A.C.B. 1971. Integração geológica regional da Bacia do Espírito Santo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 25. São Paulo, SBG. Anais, 3: 235-252.
- Alvarenga, R.S. 2010. *Arquitetura estratigráfica e arcabouço estrutural dos depósitos fluviais albianos da base da Formação São Mateus no Norte da Bacia do Espírito Santo*. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul Dissertação de Mestrado, 85p.
- Biassusi A.S. 1996. *Análise Estratigráfica do Terciário Inferior da Bacia do Espírito Santo*. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dissertação de Mestrado, 84p.
- Davison, I. 2005. Tectonics of South Atlantic Brazilian Salt Basins and Petroleum systems of divergent continental margin basins. In: ANNUAL GCSSEPM FOUNDATION BOB F. PERKINS RESEARCH CONFERENCE, 25. Houston: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists.
- Dias, J.L. Evolução da fase rift e a transição rift/ drift nas bacias de margens leste e sudeste do Brasil. 1993. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 3., 1993, Rio de Janeiro. Sociedade Brasileira de Geofísica, 2, 1328-1332.
- Fossen, H. 2010. Tectônica do Sal. In: FOSSEN, H (ed.). *Structural Geology*. University Printing House, Cambridge, p. 467-494.
- França, R.J.; Rey, A.C.D.; Tagliari, C.V.; Brandão, J.R. & Fondanelli, P. 2007. Bacia do Espírito Santo In: Boletim de Geociências da Petrobrás. Rio de Janeiro, 15 (2): 501-509.
- Gladezenko, T.P.; Hinz, K.; Eldholm, O.; Meyer, H.; Nebem, S. & Skogseid, J. 1997. South Atlantic volcanic margins. *Journal of Geological Society of London*, 154: 465-470.
- Gomes, J.B.; Carvalho, R.S.; Lima, F.R.T. & Abdalla. 1988. Revisão geológica regional da Bacia do Espírito Santo. In: RELATÓRIO INTERNO PETROBRAS, 53p.
- Hudec, M.R. & Jackson, M.P.A. 2007. Terra infirma: Understanding salt tectonics. *Earth-Science Reviews*, 82p.
- Macedo, J.M. 1990. Evolução tectônica da Bacia de Santos e áreas continentais adjacentes. In: MILANI, E.J. & RAJA GABAGLIA, G.P. (ed.). *Origem e evolução das bacias sedimentares*. PETROBRAS, p. 361-376.
- Mitchum, R.M.; Vail. P.R. & Thompson III, S. 1977a. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 2: The depositional sequence as a basic unit for stratigraphy analysis. In: PAYTON, C.E. (ed.). *Seismic Stratigraphy- Applications to Hydrocarbon Exploration*. Tulsa, American Association of Petroleum Geologists, 26: 53-62.
- Mitchum, R.M.; Vail. P.R. & Sangree, J.B.; 1977b. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 6: Stratigraphy interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. In: PAYTON, C.E. (ed.). *Seismic Stratigraphy- Applications to Hydrocarbon Exploration*. Tulsa, American Association of Petroleum Geologists, 26: 117-133.
- Mohriak, W.U.; Szatmari, P. & Anjos, S.M.C. 2008. *Sal: Geologia e Tectônica. Exemplos nas Bacias Brasileiras*. Editora Beca, São Paulo, p. 287- 301.
- Jackson, M.P.A. & Talbot, C.J. 1986. External shapes, strain rates, and dynamics of salt structures. *Geological Society of America Bulletin*, 97: 305-323.
- Vieira, R.A.B.; Mendes, M.P.; Vieira, P.E.; Costa, L.A.R.; Tagliari, C. V.; Bacelar, A.P. & Feijo, F.J, 1994. Bacias do Espírito Santo e Mucuri. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 8 (1): 191-202.
- Zalan, P.V; Severino, M.C.G; Rigoti, C.A; Magnavita, L.P; Oliveira, J.A.B & Vianna, A.R. 2011. An entirely new 3D-view of crustal and mantle structure of a south atlantic passive margin- Santos, Campos and Espírito Santo basins, Brazil. In: AAPG ANNUAL CONVENTION AND EXHIBITION, Houston, Texas, USA, April 10-13.