

Juliana Ferreira Gomes Sampol

**ANÁLISE DE SISMOSSEQUÊNCIAS NA SEÇÃO DRIFTE DA
PORÇÃO OFFSHORE DA BACIA DE BARREIRINHAS, MARGEM
EQUATORIAL BRASILEIRA**

Dissertação de Mestrado (Geologia)

UFRJ
Rio de Janeiro
2015



UFRJ

Juliana Ferreira Gomes Sampol

**ANÁLISE DE SISMOSSEQUÊNCIAS NA SEÇÃO DRIFTE DA PORÇÃO
OFFSHORE DA BACIA DE BARREIRINHAS, MARGEM EQUATORIAL
BRASILEIRA**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências (Geologia).

Área de concentração:

Paleontologia e Estratigrafia

Orientador:

Leonardo Fonseca Borghi de Almeida –
UFRJ

Juliana Ferreira Gomes Sampol

Análise de Sismossequências na Seção Drifte da porção offshore da bacia de Barreirinhas, Margem Equatorial Brasileira / Juliana Ferreira Gomes Sampol - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2015.

xiii, 101 f. : il.; 30cm

Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geologia, 2015.

Orientador: Leonardo Fonseca Borghi de Almeida,

1. Geologia. 2. Setor do Programa – Dissertação de Mestrado. I. Leonardo Fonseca Borghi de Almeida. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geologia. III. Análise de Sismossequências na Seção Drifte da porção offshore da bacia de Barreirinhas, Margem Equatorial Brasileira.

Juliana Ferreira Gomes Sampol

ANÁLISE DE SISMOSSEQUÊNCIAS NA SEÇÃO DRIFTE DA PORÇÃO OFFSHORE DA
BACIA DE BARREIRINHAS, MARGEM EQUATORIAL BRASILEIRA

Dissertação de Mestrado submetida ao
Programa de Pós-graduação em Geologia,
Instituto de Geociências, da Universidade
Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como
requisito necessário à obtenção do grau de
Mestre em Ciências (Geologia).

Área de concentração:

Paleontologia e Estratigrafia

Orientador:

Leonardo Fonseca Borghi de Almeida –
UFRJ

Aprovada em: 21 / 10 / 2015

Por:

Presidente: Dr. Renato Rodriguez Cabral Ramos, UFRJ

Dr. Osvaldo Braga da Silva, Consultor

Dra. Frances Abbots-Guardiola, BG Brasil

UFRJ
Rio de Janeiro
2015

Dedico essa dissertação à minha amada família, que sempre me apoiou em todos os momentos da minha vida e em especial ao meu marido e amigo Leonardo Caixeta por todo carinho, amor e paciência durante todo esse período.

Agradecimentos

Ao Departamento de Geologia da UFRJ, todos seus funcionários e professores;

À Ouro Preto Óleo & Gás, pela autorização e pelo incentivo na minha pesquisa. Em especial ao meu chefe Edmundo Marques, que sempre me incentivou e me apoiou, durante todo o projeto e no meu dia a dia;

Aos amigos que fiz na Ouro Preto Óleo e Gás, Roberto Brasil, Andrea Bressani, Gustavo Torres, Roberto Rocha, Aline Bianchini, Juliana Teixeira, Shanini Moura, Michele lemma, Glória Marins, Sara Miranda, Débora Pereira e Adriana Vieira (e os demais) por todo o incentivo, pela ajuda direta e indireta, enfim por todos os bons momentos que ajudaram muito no decorrer desse processo;

À WesternGeco, por apoiar a pesquisa e a divulgação dos dados;

Aos colegas que conheci durante essa fase na UFRJ, Bruno Rafael Santos, Raphael Nobrega, João Paulo Barros, João Paulo Miranda, Patrick Dal Bó, Marcelo Mendes e Amanda Goulart Rodrigues, que tornaram todo o processo mais divertido e que ajudaram indireta ou diretamente com conselhos e ensinamentos.

E finalmente ao professor e orientador Leonardo Borghi, que me apoiou e me incentivou em mais essa jornada. Sempre com novas idéias, olhar crítico e excelentes pontos de vista. Fica aqui registrada toda a minha gratidão por toda a sua paciência e todos os ensinamentos.

“ Um pouco de conhecimento que age vale infinitamente mais do que conhecimento que é ocioso. ”

Khalil Gibran

Resumo

SAMPOL, Juliana Ferreira Gomes. **Análise de Sismossequências na Seção Drifte da porção offshore da bacia de Barreirinhas, Margem Equatorial Brasileira.** Rio de Janeiro, 2015. xiii, 101f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

Recentes grandes descobertas de petróleo nas margens equatoriais Sul-americana (descoberta de Zaedyus) e Africana (campo de Jubilee), abriram novas perspectivas de exploração na margem equatorial brasileira, principalmente para a Bacia de Barreirinhas. O objetivo do presente estudo é a primeira abordagem de uma análise sísmica em águas profundas na seção Drifte da Bacia de Barreirinhas, baseada na identificação, correlação e mapeamento de sismofácies, sismo-horizontes e sismossequências. A pouca disponibilidade de dados estratigráficos junto com a escassez de interpretações estratigráficas na área de estudo fez com que o presente trabalho se tornasse bastante desafiador. Cinco linhas sísmicas 2D em profundidade (*Pre-Stack Depth Migration*) orientadas no sentido *dip* e uma linha sísmica 2D orientada no sentido *strike* da bacia, que cobrem uma área de aproximadamente 1.100 km² na porção marítima da Bacia de Barreirinhas, foram interpretadas através suíte Petrel © (Schlumberger) e seus aplicativos. A análise de caráter sísmico, contraste de impedância, terminações de refletores e geometria sísmica identificaram nove sismofácies e dez sismo-horizontes, os quais sete deles limitaram seis sismossequências. As geometrias identificadas através dos mapas de isópacas das sequências mostraram um padrão estratigráfico agradacional (sismossequência 1) para retrogradacional (sismossequências 2 e 3) para progradacional (sismossequências 4 e 5) e finalmente para um retrogradacional (sismossequência 6) que pode ser associado a ciclos transgressivos-regressivos, e permitiu uma tentativa de correlação com as sequências deposicionais previamente propostas pela literatura para a porção terrestre e marítima de água rasa.

Palavras-chave: Margem Equatorial Brasileira. Bacia de Barreirinhas. Estratigrafia Sísmica. Sismossequência. Drifte

Abstract

SAMPOL, Juliana Ferreira Gomes. **Seismic Sequences Analysis in the Offshore Drift Section of Barreirinhas Basin, Brazilian Equatorial Margin**. Rio de Janeiro, 2015. xiii, 101f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

Important discoveries made over recent years in the South American (Zaedyus discovery) and African (Jubilee Field) equatorial margins opened new perspectives in the exploration of the Brazilian equatorial margin, particularly for the Barreirinhas Basin. The objective of this study is a first seismic analysis approach for the Drift section of Barreirinhas Basin, in deep water areas, based on the identification, correlation and mapping of the seismic facies, horizons and sequences. The few stratigraphic data available together with the lack of stratigraphic interpretations in the studied area make this study challenging. Five 2D depth seismic lines (Pre-Stack Depth Migration) dip oriented and one strike oriented are located in an approximately 1100km² area, in the offshore Barreirinhas Basin, were interpreted using Petrel (Schlumberger), and its applications. The analysis of seismic characters, impedance contrast, reflectors' patterns, and sequence geometries showed nine seismic facies, and ten seismic horizons, which seven of them limit six seismic sequences. Geometries identified by isopach maps of the sequences reveals a stratigraphic pattern of aggradational (seismic sequence 1) to retrogradational (seismic sequences 2, and 3) to progradational (seismic sequences 4 and 5) and finally to retrogradational (seismic sequence 6) which can be associated to transgressive-regressive cycles which allowed attemptive correlation to depositional sequences in the onshore previously proposed by literature.

Key-Words: Brazilian Equatorial Margin. Barreirinhas basin. Seismic Stratigraphy. Seismic Sequence. Drift.

Lista de Figuras

- Figura 1.** Mapa de Localização da Bacia de Barreirinhas. Dentro do círculo vermelho no lado direito da imagem pode-se observar em destaque a localização dos campos terrestres de São João, Espigão e, respectivamente de oeste para leste. 1
- Figura 2.** Mapa de localização dos dados sísmicos 2D em profundidade (*Pre-Stack Depth Migration*), que serão apresentados no decorrer da dissertação. As linhas vermelhas destacadas representam as linhas sísmicas estudadas..... 3
- Figura 3.** Mapa base e seção sísmica utilizados para a interpretação das superfícies (sismo-horizontes) na dissertação através do programa Petrel© (Schlumberger). 5
- Figura 4.** Método utilizado para distinguir as sismossequências. Identificação de intervalos com menor e maior contraste entre as amplitudes..... 7
- Figura 5.** Localização e arcabouço estrutural da bacia de Barreirinhas, destacada em vermelho. (MOHRIAK *in* BIZZI *et al.* 2007)). 9
- Figura 6.** Reconstrução Pré-drifte do arcabouço tectônico das bacias sedimentares do N-NE do Brasil e da costa oeste Africana durante o Aptiano. Em vermelho está localizada a bacia estudada no presente trabalho (DARROS MATOS, 2000). 11
- Figura 7.** Mapa de gravidade *free-air*, de satélite, do oceano Atlântico Equatorial. As linhas pretas finas ressaltam as zonas de fraturas oceânicas. A Zona B é a Romanche que está inserida no contexto do presente trabalho e marcado com um círculo vermelho a bacia estudada. (ZALÁN, 2012). 13
- Figura 8.** Mapa do Arcabouço tectônico da bacia de Barreirinhas. Observar os domínios tectônicos e os altos estruturais intra baciais (AZEVEDO, 1986). Em vermelho encontra-se a localização da área de estudo. 14
- Figura 9.** Seção sísmica em tempo representando a porção oeste da bacia, mostrando o comportamento compressional dessa parte da bacia, que não é possível observar na área estudada (ZALÁN, 2005). 15

Figura 10. Seção na Bacia de Barreirinhas, mostrando falhas extensionais e compressionais na borda da plataforma, formando cinturão de dobramento em águas profundas (MOHRIAK <i>in</i> BIZZI <i>et al.</i> 2007).	17
Figura 11. Bloco diagrama exemplificando a tectônica pull-apart (formada num regime de deslizamento devido ao movimento relativo das falhas que resulta em distensão da crosta que leva à formação de uma depressão romboédrica) e a esquerda uma imagem do Google Earth que mostra claramente as cicatrizes das transcorrências e a correlação da bacia de Barreirinhas com a bacia de Tano em Ghana (Google Earth).....	18
Figura 12. Representação esquemática de margens rifteadas pobre em magma. a) Representação clássica da arquitetura rifte. b) Representação moderna mostrando uma complexa arquitetura na transição da crosta continental para a oceânica, resultante de exumações do manto (MANATCHAL, 2009).....	19
Figura 13. Diagrama estratigráfico da bacia de Barreirinhas (TROSITORF JUNIOR <i>et al.</i> 2007).	23
Figura 14. Reflexão do sinal sísmico conforme as diferentes impedâncias acústicas das camadas sedimentares (AYRES NETO, 2000).	24
Figura 15. Padrões de terminações de refletores em uma sequência sísmica (MITCHUM JR. <i>et al.</i> , 1977).....	25
Figura 16. Terminações estratigráficas definindo a relação geométrica entre os estratos e a superfície estratigráfica (CATUNEANU 2006).....	26
Figura 17. Configurações de fácies sísmicas (MITCHUM <i>et al.</i> 1977).....	27
Figura 18. Relação dos eventos que controlam as superfícies com o nível de base (CATUNEANU 2006).	29
Figura 19. A. Linha sísmica 1 2D em profundidade no sentido do mergulho da bacia (<i>dip</i>) mostrando os dez sismo-horizontes interpretados e as seis sismossequências mapeadas. 33	
Figura 19. B. Linha sísmica 2 2D em profundidade no sentido do mergulho da bacia (<i>dip</i>) mostrando os dez sismo-horizontes interpretados e as seis sismossequências mapeadas. 34	
Figura 19. C. Linha sísmica 3 2D em profundidade no sentido do mergulho da bacia (<i>dip</i>) mostrando os dez sismo-horizontes interpretados e as seis sismossequências mapeadas. 35	

Figura 19. D. Linha sísmica 4 2D em profundidade no sentido do mergulho da bacia (*dip*) mostrando os dez sismo-horizontes interpretados e as seis sismossequências mapeadas. 36

Figura 19. E. Linha sísmica 2D em profundidade no sentido do mergulho da bacia (*dip*) mostrando os dez sismo-horizontes interpretados e as seis sismossequências mapeadas. 37

Figura 20. Linha sísmica 2D em profundidade no sentido do mergulho da bacia (*strike*) mostrando os dez sismo-horizontes interpretados e as seis sismossequências mapeadas. 38

Figura 21. Sismossequência 1, limitada pelos sismo-horizontes 1 (azul escuro) e 2 (azul claro), em um maior detalhe onde pode se observar melhor o baixo contraste entre as amplitudes. 41

Figura 22. Sismossequência 2, limitada pelos sismo-horizontes 2 (azul claro) e 3 (branco), em um maior detalhe onde pode se observar melhor o alto contraste entre as amplitudes. 41

Figura 23. Sismossequência 3, limitada pelos sismo-horizontes 3 (branco) e 4 (amarelo), em um maior detalhe onde pode se observar melhor o baixo contraste entre as amplitudes, uma superfície com maior contraste e contínua que foi interpretada como a superfície de inundação máxima (SIM) e um contraste maior pontual que pode ser um corpo ígneo. 42

Figura 24. Sismossequência 4, limitada pelos sismo-horizontes 4 (amarelo) e 6 (verde), em um maior detalhe onde pode se observar melhor o médio contraste entre as amplitudes e sismofácies com maior contraste no topo e menor contraste na base. 43

Figura 25. Sismossequência 5, limitada pelos sismo-horizontes 6 (verde) e 9 (laranja), em um maior detalhe onde pode se observar melhor o baixo contraste entre as amplitudes e os canais de maior porte em um corte strike, na imagem menor. 43

Figura 26. Sismossequência 6, limitada pelos sismo-horizontes 9 e 10, em um maior detalhe onde pode se observar melhor o alto contraste entre as amplitudes e os canais de menor porte e de fundo..... 44

Figura 27. Diagrama estratigráfico esquemático que mostra a correlação das sequências deposicionais de 2ª ordem de Figueiredo *et al.* (1983) e as de 3ª ordem de Trosdtorf *et al.* (2007) e por último a correlação de ambas com as sismossequências interpretadas no presente estudo. 72

Figura 28. Seção esquemática evidenciando as sismossequências (SS1-SS6) interpretadas e seus ciclos regressivo-transgressivos. 74

Figura 29. Mapas de Isópacas das sismossequências (SS1-SS6), mostrando as geometrias das mesmas e indicando os ciclos retrogradacionais e progradacionais. Observar que as cores quentes (vermelho) representam as seções menos espessas e as cores frias (azul) representam as seções mais espessas. 75

Figura 30. Ciclo Transgressivo inicial representado pelas sismossequência 1, 2 e 3, limitado pelos sismo-horizontes 1 e 4, na sessão estudada. Observar a superfície de inundação máxima (SIM) na SS3. B. Mapa de Isópaca da sismossequências 1, 2 e 3 corroborando a geometria agradacional da SS1 e retrogradacional da SS2 e SS3. 77

Figura 31. A. Ciclo Regressivo representado pelas sismossequência 4 e 5, limitado pelos sismo-horizontes 4 e 9, na sessão estudada. B. Mapa de Isópaca da sismossequências 4 e 5 corroborando a geometria progradacional. 78

Figura 32. A. Ciclo Transgressivo final representado pela sismossequência 6, limitado pelos sismo-horizontes 9 e 10, na sessão estudada. B. Mapa de Isópaca da sismossequência 6 corroborando a geometria retrogradacional. 79

Lista de Tabelas

Tabela 1. Quadro que vincula os parâmetros das sismofácies com a possível interpretação geológica (SEVERIANO RIBEIRO, 2001). Destacado em vermelho os parâmetros utilizados neste estudo.....	6
Tabela 2. Tabela de sismofácies mostrando os padrões identificados nas linhas sísmicas 2D em profundidade, os padrões conhecidos na literatura (MITCHUM, 1977) e uma interpretação sucinta.....	31
Tabela 3. Tabela que sintetiza as sismossequências (SS1-SS6) identificadas nas linhas sísmicas 2D em profundidade, mostrando o caráter sísmico, geometria e a interpretação das mesmas.....	40

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	VI
RESUMO.....	VIII
ABSTRACT	IX
LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABELAS.....	X
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos e Finalidade	2
1.2. Materias e Métodos	2
1.3. Estrutura e Organização	8
2. CONTEXTO GEOLÓGICO.....	9
2.1 Generalidades	9
2.2 Panorama geotectônico	10
2.3 Estratigrafia	20
3. FUNDAMENTOS CONCEITUAIS.....	24
3.1. Sísmica.....	24
3.1.1 Terminações dos refletores sísmicos (terminações estratais)	25
3.1.2 Fácies sísmicas	26
3.1.3 Superfícies Estratigráficas.....	28
3.2 Estratigrafia de Sequências	29
4. RESULTADOS	31
5. ARTIGO SUBMETIDO.....	45
6. DISCUSSÕES.....	72
7. CONCLUSÕES	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81

1. INTRODUÇÃO

A bacia de Barreirinhas teve sua exploração concentrada entre os anos de 1960 e 1980. Até o momento, foram perfurados 123 poços na bacia (70% terrestre), onde 35 apresentaram indícios de óleo e gás, incluindo a descoberta de três acumulações em terra (Figura 1).

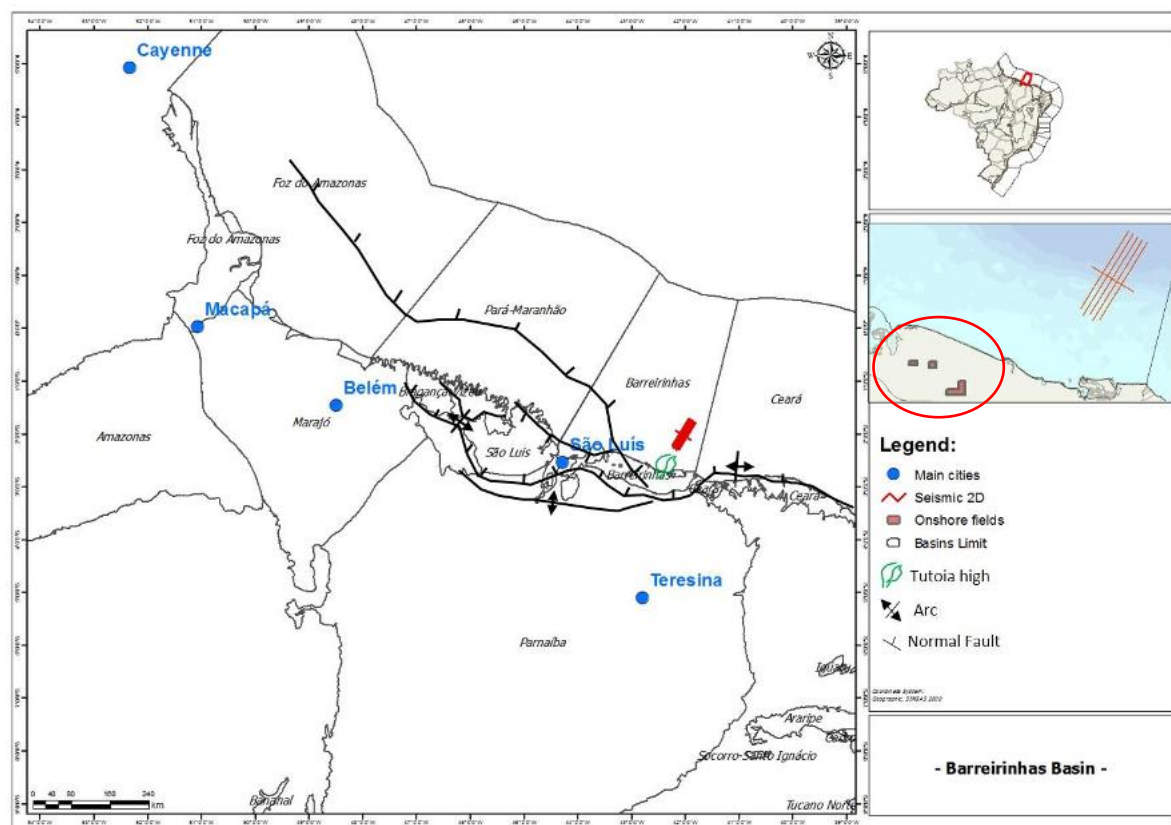


Figura 1. Mapa de Localização da Bacia de Barreirinhas. Dentro do círculo vermelho no lado direito da imagem pode-se observar em destaque a localização dos campos terrestres de São João, Espigão e, respectivamente de oeste para leste.

Nenhum dado estratigráfico novo foi incorporado ao conhecimento geológico dessa bacia da margem equatorial desde a publicação pioneira de Feijó (1994), que estabeleceu o mais preciso diagrama estratigráfico da bacia até então (cf. TROSDTORF JUNIOR *et al.*, 2007). Os últimos poços perfurados na parte marítima em 2009 e 2012, apresentaram indícios de gás ou óleo em sua maioria; porém não foi publicado nenhum trabalho que acrescentasse informações relevantes sobre a bacia após a perfuração destes poços, especialmente na seção Pós-rifte.

O conhecimento estratigráfico atual da bacia limita-se pelas descobertas em terra, que possuem mais de 30 anos e tem como objetivo o estudo das seções albiana e aptiana (seção Rifte e Pré-rifte).

A escolha da área para o estudo deu-se em função do destaque que a bacia teve no Leilão realizado pela ANP em 2013, tendo sido arrematados 19 dos 26 blocos de exploração ofertados em sua porção marítima. Todo este destaque foi devido à grande expectativa de se encontrar uma acumulação correlata às últimas importantes descobertas que ocorreram na margem equatorial africana (campo de Jubilee, na bacia de Tano, Gana) e sulamericana (descoberta de Zaedyus, Guiana Francesa).

A bacia de Barreirinhas apresenta uma grande similaridade com as bacias que contêm as descobertas mencionadas acima, particularmente quanto ao seu arcabouço sismoestratigráfico, fazendo com que a bacia possua um potencial exploratório em plays análogos (turbiditos cretáceos).

1.1. Objetivos e Finalidade

Na análise do arcabouço sismoestratigráfico utilizaram-se conceitos e técnicas de Sismoestratigrafia e Estratigrafia de Sequências na seção sedimentar analisada, através da identificação, correlação e mapeamento de sismofácies, sismo-horizontes e sismossequências em seções sísmicas 2D em profundidade, com a finalidade de mostrar uma primeira abordagem da análise de sismoestratigráfica na porção marítima profunda da Bacia de Barreirinhas para futuros estudos sobre o sistema e as sequências deposicionais na seção Drifte.

1.2. Materias e Métodos

O material utilizado constituiu-se de seis linhas sísmicas 2D em profundidade, localizados na porção marítima profunda do sudeste da bacia, que cobrem uma área de aproximadamente 1.100 km² (**Figura 2**).

Tratam-se de linhas sísmicas PSDM (*Pre Stack Depth Migration*) disponibilizadas pela WesternGeco, sendo cinco linhas no sentido do mergulho da bacia (linhas *dip*) e uma linha perpendicular ao mergulho (linha *strike*).

Neste estudo serão apresentadas somente uma linha sísmica no sentido do mergulho da bacia (Linha sísmica 1) e uma perpendicular ao mesmo (Linha sísmica 6), devido ao

caráter muito similar das linhas que estão no mesmo sentido do mergulho da bacia. Este critério foi estabelecido no intuito de não tornar o trabalho repetitivo.

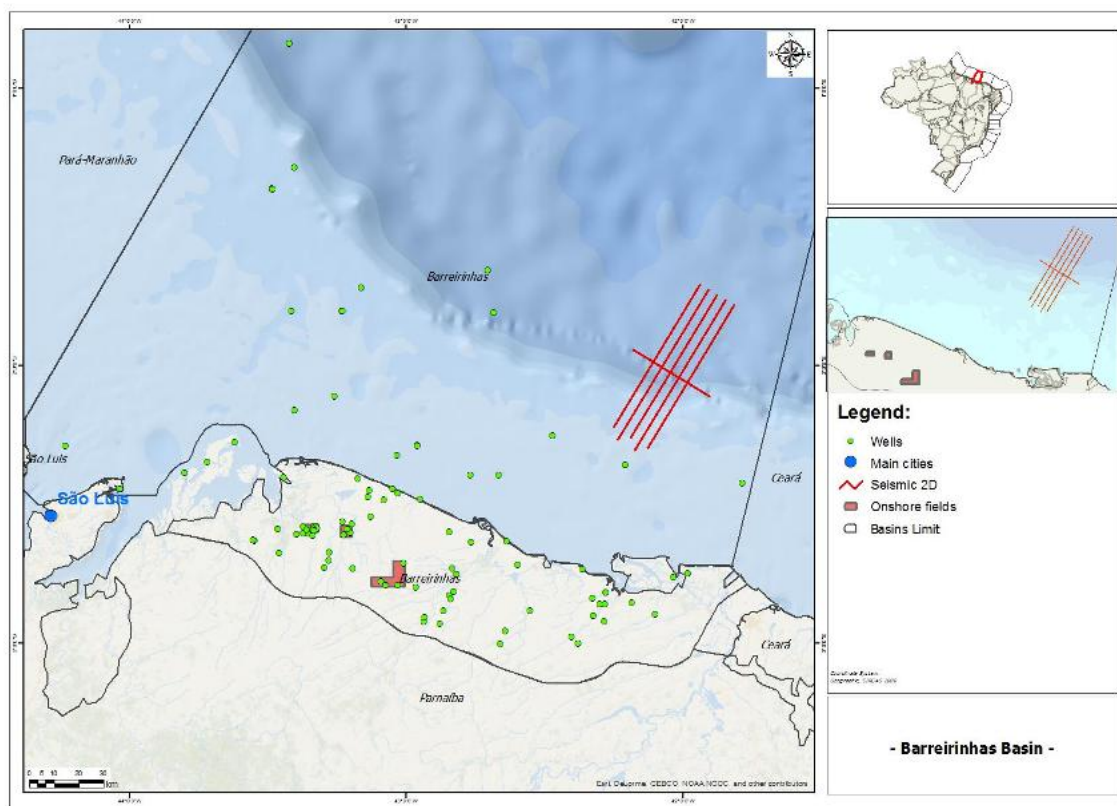


Figura 2. Mapa de localização dos dados sísmicos 2D em profundidade (*Pre-Stack Depth Migration*), que serão apresentados no decorrer da dissertação. As linhas vermelhas destacadas representam as linhas sísmicas estudadas.

O método para alcançar os objetivos da dissertação foi ajustado segundo as limitações e a disponibilidade de recursos técnicos e dos dados.

O estudo proposto foi desenvolvido em três etapas: (1) levantamento bibliográfico disponível sobre a bacia e os conceitos sobre o tema, que ocorreu durante todas as etapas de realização do trabalho; (2) a interpretação sismoestratigráfica de linhas sísmica 2D (PSDM) e (3) a identificação de sismossequências.

No levantamento bibliográfico, os trabalhos mais utilizados foram Mitchum Jr. *et al.* (1977), através dos padrões de terminações dos refletores sísmicos e configurações de sismofácies. Já os conceitos de Veeken (2007) foram fundamentais na abordagem das sismossequências.

A etapa de interpretação sísmica foi realizada computacionalmente através da suíte Petrel© (Schlumberger) (**Figura 3**), e seus aplicativos, onde ocorreu o mapeamento dos sismo-horizontes, através da mudança do padrão das sismofácies, que limitaram as sismossequências.

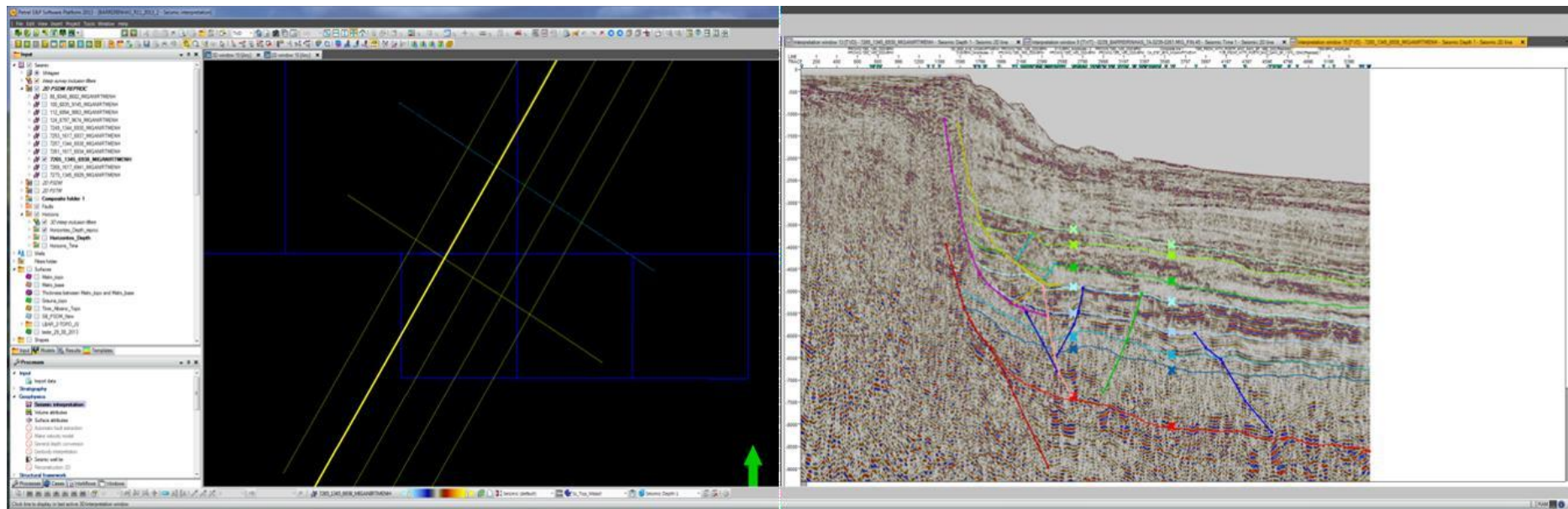


Figura 3. Mapa base e seção sísmica utilizados para a interpretação das superfícies (sismo-horizontes) na dissertação através do programa Petrel© (Schlumberger).

Os parâmetros utilizados para a definição das sismofácies foram as amplitudes das reflexões, continuidade das reflexões e frequência das reflexões através da individualização de padrões de configurações internas (texturas sísmicas) (Tabela 1).

Tabela 1. Quadro que vincula os parâmetros das sismofácies com a possível interpretação geológica (SEVERIANO RIBEIRO, 2001). Destacado em vermelho os parâmetros utilizados neste estudo.

Parâmetros de fácies Sísmicas	Interpretação Geológica
Configuração de reflexões	• Padrão de estratificação • Processo deposicional • Erosão e paleotopografia • Contato de fluidos
Continuidade das reflexões	• Continuidade dos estratos • Processo deposicional
Amplitude das reflexões	• Contraste velocidade / densidade • Espaçamento dos estratos • Conteúdo fluido
Frequência das reflexões	• Espessura dos estratos • Conteúdo fluido
Velocidade intervalar	• Estimativa de litologia • Estimativa de porosidade • Conteúdo fluido
Forma externa e associação areal das fácies sísmicas	• Ambiente deposicional • Fonte sedimentar • Sítio geológico

O objetivo da análise de sismofácies é a interpretação da litologia, do paleoambiente deposicional e da história geológica (MITCHUM et al., 1977). No entanto, devido à ausência de informações dos poços como litologia, bioestratigrafia e paleoecologia, não foi possível elaborar uma discussão precisa sobre sistemas deposicionais e tratos de sistemas.

Tradicionalmente, cada sismossequência é distinguida das unidades adjacentes baseada principalmente nas terminações de refletos. No entanto, no presente trabalho devido à qualidade da sísmica, principalmente na área estudada, e à natureza como um todo plana e “concordante” das fácies sísmica, as sismossequências foram somente identificadas através da mudança do padrão das sismofácies (texturas) (**Figura 4**).

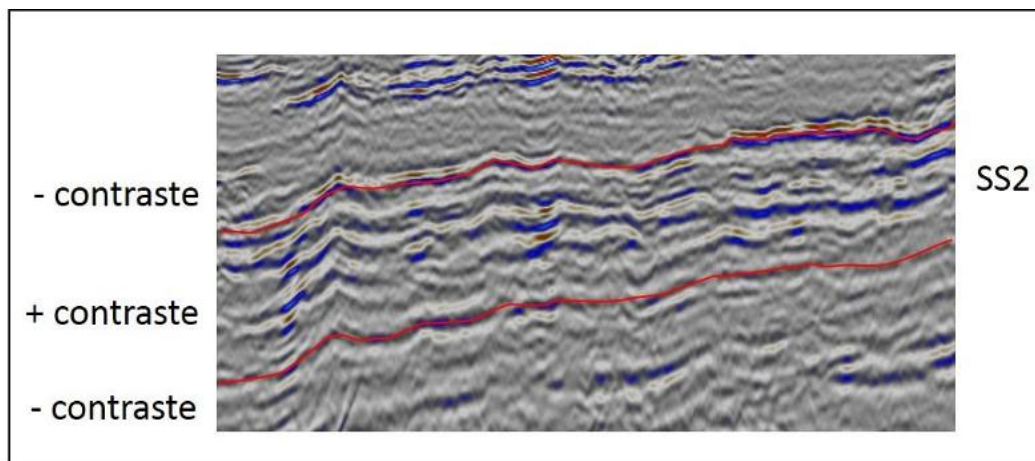


Figura 4. Método utilizado para distinguir as sismossequências. Identificação de intervalos com menor e maior contraste entre as amplitudes.

Como não foi factível interpretar os sistemas deposicionais através da análise de sismofácies e nem identificar a natureza genética dos limites das sismossequências (discordâncias), não foi possível debater sobre a estratigrafia de sequências.

A análise das sismossequências (unidades sísmicas) envolveu marcar as superfícies estratigráficas através das mudanças no padrão sismoestratigráfico e estender esse mapeamento sobre todas as linhas sísmicas.

Após o mapeamento dos sismo-horizontes, foram elaborados e interpretados mapas de contorno estrutural e de isópacas. O mapa de contorno estrutural em si não agregou nenhuma informação estratigráfica para as discussões, porém originou os mapas de isópacas, os quais possibilitaram o reconhecimento da geometria das sismossequências que, por sua vez, permitiu a discussão dos sistemas deposicionais aliado as sismofácies.

O arcabouço estratigráfico de Figueiredo et al. (1983) e Trosdtorf Jr. et al. (2007) não foram correlacionados precisamente com as sismossequências aqui propostas, uma vez que nenhum critério sísmico mostrado foi amarrado a dados de poços e nenhum dado bioestratigráficos dos poços de águas profundas estava disponível.

1.3. Estrutura e Organização

O estudo das sismossequências da porção marítima da bacia de Barreirinhas é organizado nesta dissertação em cinco capítulos, a partir do capítulo 1, que trata da introdução de forma bem abrangente falando brevemente sobre a relevância e finalidade da dissertação, os objetivos e os materiais e método do estudo.

No capítulo 2 é descrito o contexto geológico da bacia, como a evolução tectônica, o arcabouço estrutural e estratigrafia da mesma. O capítulo 3 aborda os conceitos fundamentais para a análise sismoestratigráfica na presente dissertação.

No capítulo 4 é apresentado como resultado um artigo sob o título *Seismic Sequence Analysis in the Offshore Drift Section of Barreirinhas Basin, Brazilian Equatorial Margin*, submetido à revista Marine and Petroleum Geology, juntamente com a carta de aceite do mesmo. As discussões e conclusões do trabalho estão compreendidas nos capítulos 5 e 6, respectivamente.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO

2.1 Generalidades

A bacia de Barreirinhas está situada na margem equatorial brasileira, aproximadamente entre os meridianos 44° e 42° oeste e os paralelos de 0° e 3° sul, no litoral do Estado do Maranhão entre as cidades de São Luís (MA) e Parnaíba (PI) (FEIJÓ,1994). Limita-se ao sul com a bacia do Parnaíba através de falhas de borda que a separam da Plataforma de Sobradinho, mediante o Arco Ferrer-Urbano Santos; a oeste, com a Plataforma de Ilha de Santana; e a leste o Alto de Tutóia representa o seu limite com a Sub-bacia de Piauí-Camocim (Bacia do Ceará). Seu limite noroeste é, no momento, arbitrário e tem sido classicamente referido ao meridiano de 44° oeste; na realidade, não existe nenhuma feição geológica que justifique a separação das bacias de Barreirinhas e Pará-Maranhão nesta região (**Figura 5**).

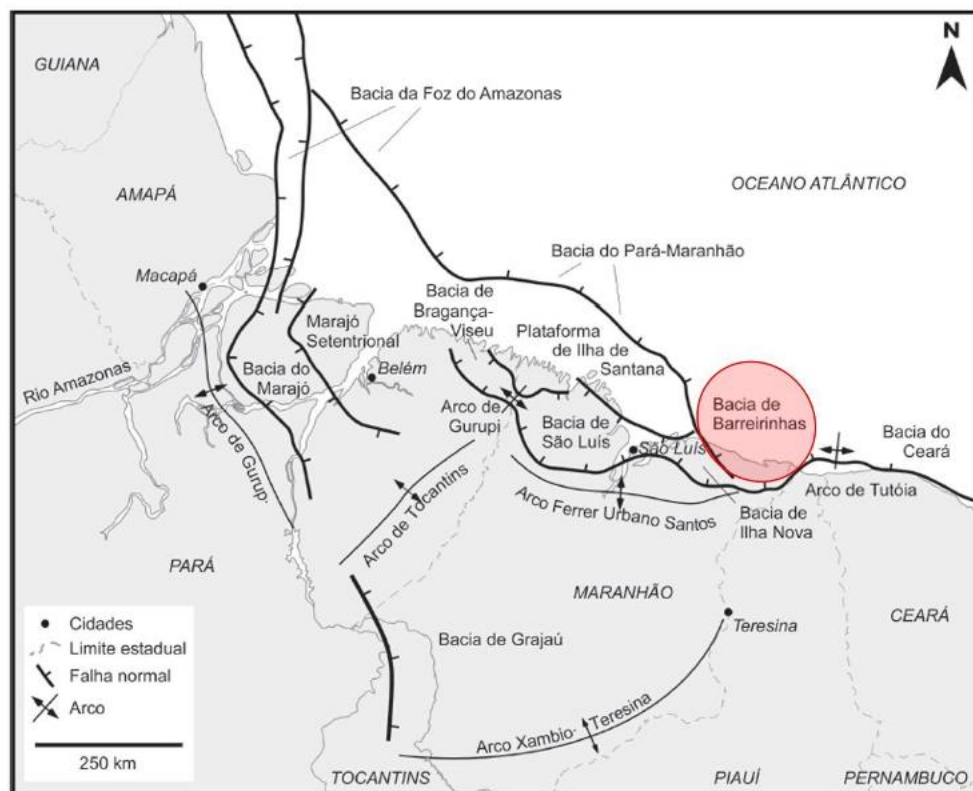


Figura 5. Localização e arcabouço estrutural da bacia de Barreirinhas, destacada em vermelho. (MOHRIAK *in* BIZZI *et al.* 2007)).

Sua área total é de aproximadamente 46.000 km², dos quais 8.500 km² são emersos, com a porção marítima estendendo-se até à cota batimétrica de 3.000 metros (TROSDTORF JR. *et al.*, 2007). Este limite marítimo refere-se tão somente ao que é considerado limite de economicidade para a exploração de hidrocarbonetos; de fato, a seção sedimentar marinha distribui-se muito além, até às porções abissais do Atlântico Equatorial.

Margens atlânticas do tipo cisalhante ou transcorrente já são razoavelmente bem entendidas hoje em dia do ponto de vista da distribuição de esforços e estruturação resultante. Após grandes descobertas na margem equatorial, como a descoberta do campo de Jubilee na bacia de Tano na costa de Gana, estudos mais recentes vêm sendo desenvolvidos para melhorar o entendimento da evolução tectonossedimentar e do sistema petrolífero, a fim de controlar a localização de acumulações de hidrocarbonetos como, por exemplo, arenitos turbidíticos do Cretáceo Superior que, na bacia de Barreirinhas, correspondem à Formação Travosas.

Admite-se a bacia como do tipo gráben rômboico associada à tectônica transcorrente, resultante das primeiras manifestações de abertura Atlântico Equatorial, durante a fragmentação do Continente Gondwana. O seu desenvolvimento tectonoestratigráfico posterior resultou numa bacia de margem passiva.

A zona transcorrente teve grande relevância no estabelecimento de um regime deformativo na bacia de Barreirinhas durante a abertura do Atlântico Equatorial.

2.2 Panorama geotectônico

A evolução tectonossedimentar da bacia de Barreirinhas está diretamente associada à ruptura dos continentes Sulamericano e Africano. A margem equatorial possui uma longa história de movimentos transformantes culminando em um complexo desenvolvimento sedimentar das bacias em ambos os lados do oceano (DARROS MATOS, 2000) (**Figura 6**).

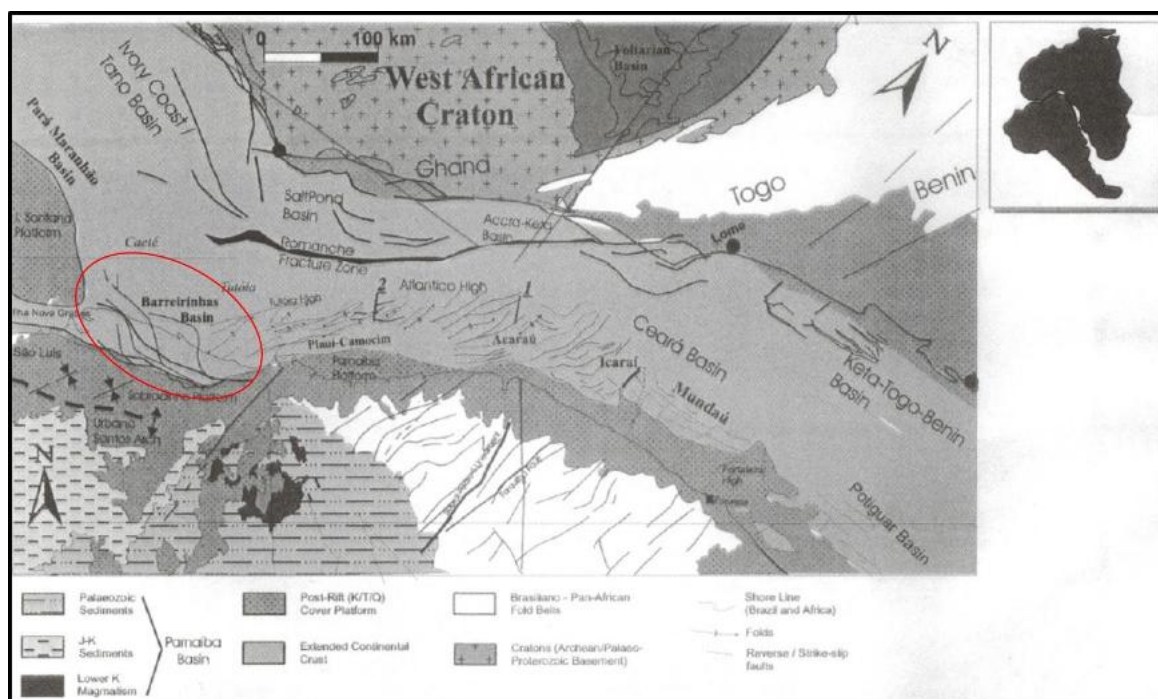


Figura 6. Reconstrução Pré-drifte do arcabouço tectônico das bacias sedimentares do N-NE do Brasil e da costa oeste Africana durante o Aptiano. Em vermelho está localizada a bacia estudada no presente trabalho (DARROS MATOS, 2000).

As bacias são caracterizadas por fases múltiplas de subsidência e associadas a diferentes estilos estruturais. Durante a fragmentação dos continentes o período de deformações ocorreu de forma distinta, o movimento de distensão da margem equatorial foi mais curto comparado a margem leste brasileira.

É importante ressaltar que o modelo conhecido de margem divergente tipo rifte, definido por meio grábens basculados com depocentro controlado por falhas lítricas e planares, não é reconhecido na margem equatorial. Segundo Darros Matos (2000), em muitos casos é muito difícil reconhecer sismicamente o padrão típico divergente em sequências rifte; outra diferença é a ausência significativa da seção Pré-rifte e a seção Transicional evaporítica, entre a seção Rifte e Pós-rifte. Tectonismo e magmatismo localizados têm papel importante na seção de subsidência termal após a fragmentação continental, assim como a taxa de deformação da área.

Sendo assim, a margem equatorial brasileira desenvolveu-se como uma margem continental transformante, tendo sua evolução geológica dominada por tensão oblíqua (transtensão) (ZALÁN, 2012), fazendo com que a bacia de Barreirinhas tivesse uma feição rômica *en echelón*.

A bacia de Barreirinhas está situada entre as falhas transformantes Romanche e Saint Paul (**Figura 7**). A mesma possui um setor com deformação transpressional (E-W) e outro com deformação transtensional a distensional (NW-SE).

Essas estruturas observadas em todas as porções da bacia, geradas e desenvolvidas em diversas idades e coexistindo com episódios erosivos, criaram um complexo mosaico estrutural/estratigráfico ao longo do tempo e no espaço, gerando diversas possibilidades para acumulações de hidrocarbonetos.

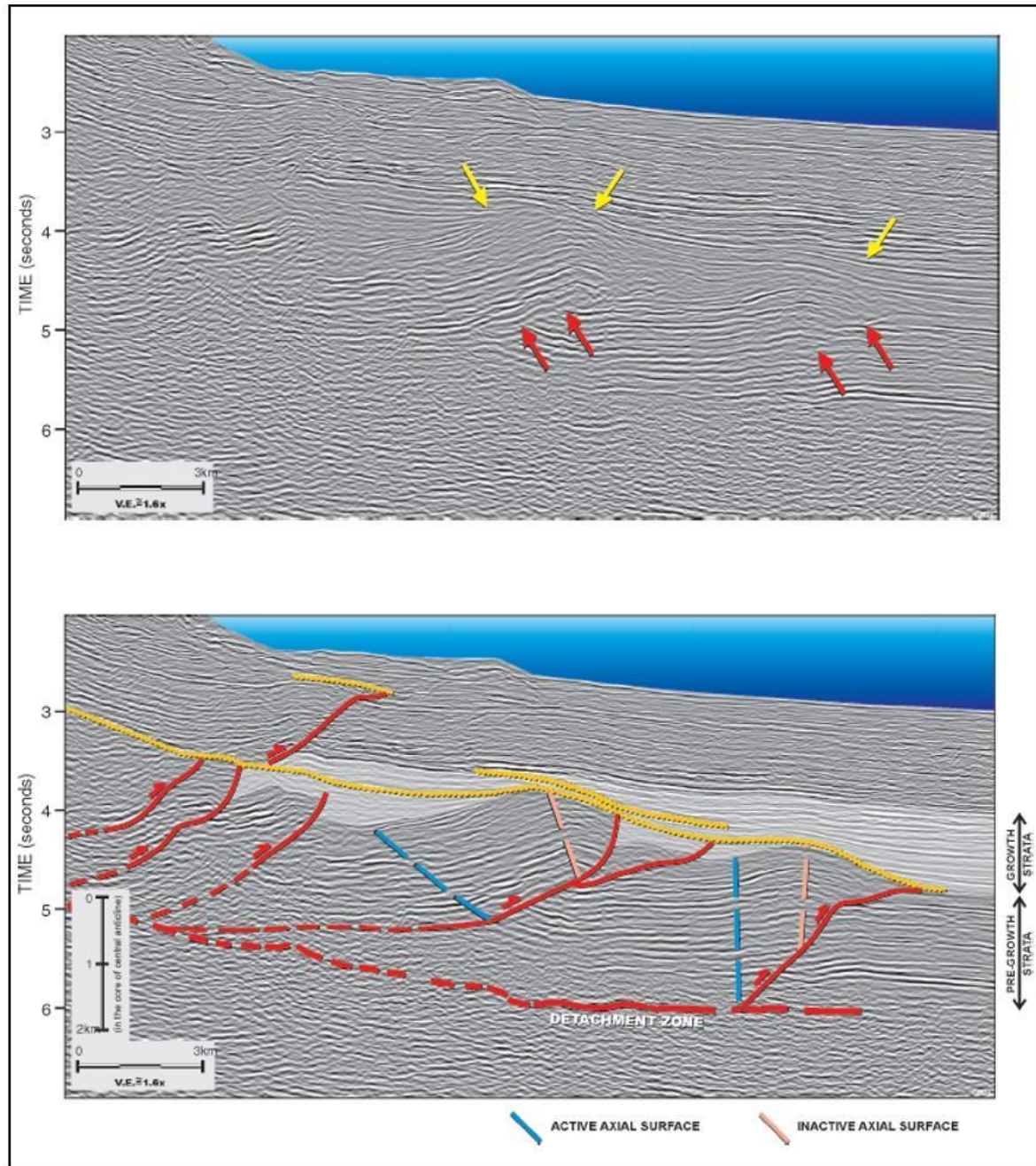


Figura 9. Seção sísmica em tempo representando a porção oeste da bacia, mostrando o comportamento compressional dessa parte da bacia, que não é possível observar na área estudada (ZALÁN, 2005).

Azevedo *et al.* (1985) apresentaram, numa primeira abordagem sobre a bacia de Barreirinhas, um modelo tectonoestratigráfico onde foram documentadas três principais fases ou estágios evolutivos, descritas abaixo.

(1) - Fase "pré-shear" de idade anterior ao Aptiano (Neocomiano e Barremiano), quando limitada compressão teve lugar na região, impossibilitando sedimentação expressiva.

(2) - Fase "pull-apart" de idade Aptiano, onde um regime de cisalhamento simples, imposto pela tectônica transcorrente que governou a fragmentação do atlântico equatorial, gerou a bacia rômbrica.

(3) - Fase "*drift*" desenvolvida a partir de Neocretáceo quando cessou o movimento ao longo das falhas transformantes, ocorrendo o basculamento da bacia para norte, com o desenvolvimento de condições francamente marinhas.

Durante a pesquisa bibliográfica, pôde-se observar que diversas linhas de evidências sugerem uma evolução tectônica diferenciada entre as partes leste e oeste da bacia de Barreirinhas. Elas são de ordem estrutural, sedimentar, cronoestratigráfica e térmica.

Estilo estrutural - falhas normais com blocos baixos para a bacia na porção leste e dobramentos de grande amplitude resultantes de compressão na porção oeste;

Sedimentar - controle na distribuição horizontal dos depósitos de frente deltáica (Formação Barro Duro), restritos ao bloco oeste. Controle este imposto por um *trend* alto na porção central;

Cronoestratigráfica - anomalias como observadas, por exemplo, no poço I-PIS-I, onde uma parte da seção cretácea pós-aptiana acha-se presente com espessuras reduzidas a profundidades também reduzidas, no máximo, com 700 metros. Isto caracteriza uma zona de condensação que refletiria, pois, uma relativa estabilidade da região, enquanto que na maior parte da porção centro-oeste de Barreirinhas, nesse mesmo período, ocorreu subsidência pronunciada com a deposição de espesso pacote de sedimentos.

Térmica - na porção leste da bacia as temperaturas atuais de subsuperfície são incompatíveis com os níveis de maturação orgânica observados no poço I-MAS-23 nos folhelhos senilizados devido à refletância de vitrinita próxima de 2%, do intervalo de 500 a 1000 metros de profundidade (RODRIGUES e TAKAKI, 1984). Isto significa que na parte

leste da bacia houve soerguimento pronunciado da seção estratigráfica que antes estivera soterrada há milhares de metros.

A bacia iniciou sua abertura no início do Cretáceo, no contexto da ruptura continental que separou a América do Sul da África, e que, como todas as outras bacias de margens continentais, permanece ativa até o tempo presente. A fase Rife da bacia (pré-ruptura continental) ocorreu entre o início do Aptiano (estimado, pois não se conhecem as porções mais profundas da bacia) e o fim do Albiano. A fase drifte (pós-ruptura continental) começou no fim do Albiano e continua ativa até o tempo presente.

A **Figura 10** mostra uma seção geológica esquemática na bacia de Barreirinhas, caracterizando notável cinturão de dobramentos na região além do talude, associado à tectônica gravitacional (MOHRIAK *in* BIZZI *et al.* 2007). A porção Pós-Rifte da bacia, além da quebra de plataforma, a qual é melhor visualizada em dado sísmico, é caracterizada por grande espessura sedimentar o que a torna singular dentre as bacias vizinhas.

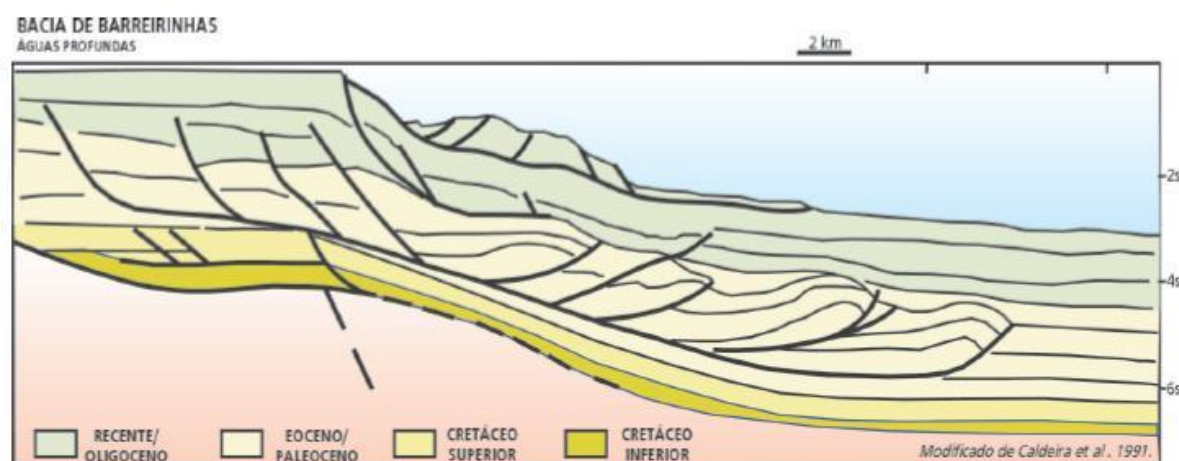


Figura 10. Seção na Bacia de Barreirinhas, mostrando falhas extensionais e compressionais na borda da plataforma, formando cinturão de dobramento em águas profundas (MOHRIAK *in* BIZZI *et al.* 2007).

A Margem Equatorial brasileira é reconhecida como uma típica margem transformante, fato observado pelos grandes lineamentos tectônicos que constituem as Zonas de Fraturas Chain, Romanche e Saint Paul. A Bacia de Barreirinhas está inserida neste contexto, tendo estado sob influência direta da Zona de Fraturas Romanche: trata-se de uma bacia do tipo pull-apart* (**Figura 11**).

Este contexto tectônico, de uma forma geral, imprimiu à bacia uma compartimentação complexa, com domínios tanto compressionais quanto extensionais.

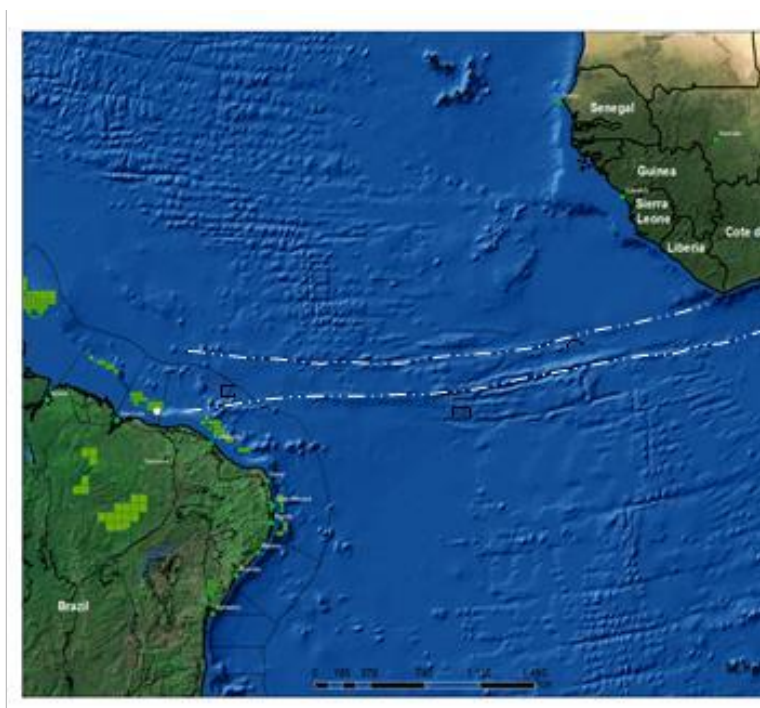
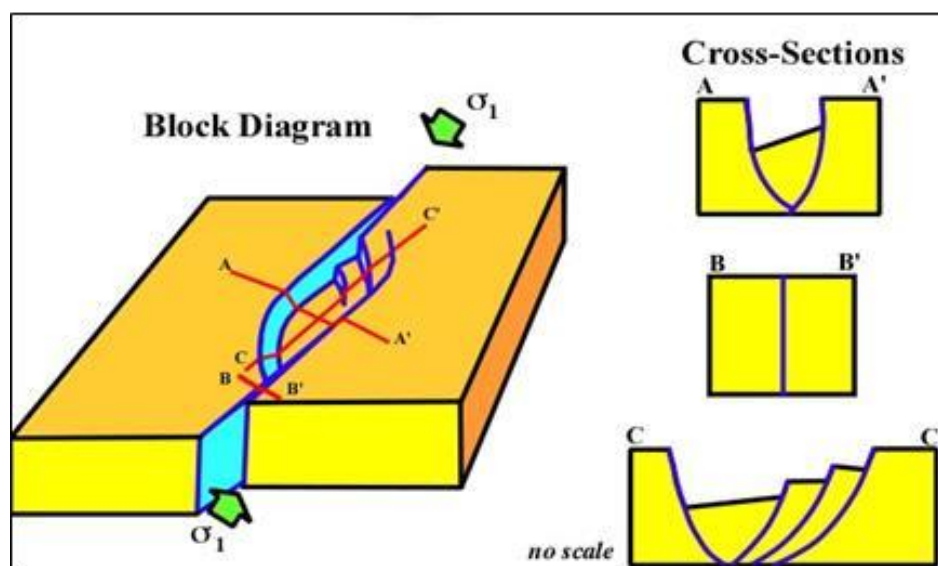


Figura 11. Bloco diagrama exemplificando a tectônica pull-apart (formada num regime de deslizamento devido ao movimento relativo das falhas que resulta em distensão da crosta que leva à formação de uma depressão romboédrica) e a esquerda uma imagem do Google Earth que mostra claramente as cicatrizes das transcorrências e a correlação da bacia de Barreirinhas com a bacia de Tano em Ghana (Google Earth).

Estudos mais recentes como de Manatchal (2009) sugerem novas idéias no que se trata de margens vulcânicas e não vulcânicas, observando a história da bacia e a sísmica disponível é possível afirmar que a área de estudo está inserida no contexto de margem passiva pobre em magma. A visão atual desse estudo menciona uma arquitetura bem mais complexa. (**Figura 12**).

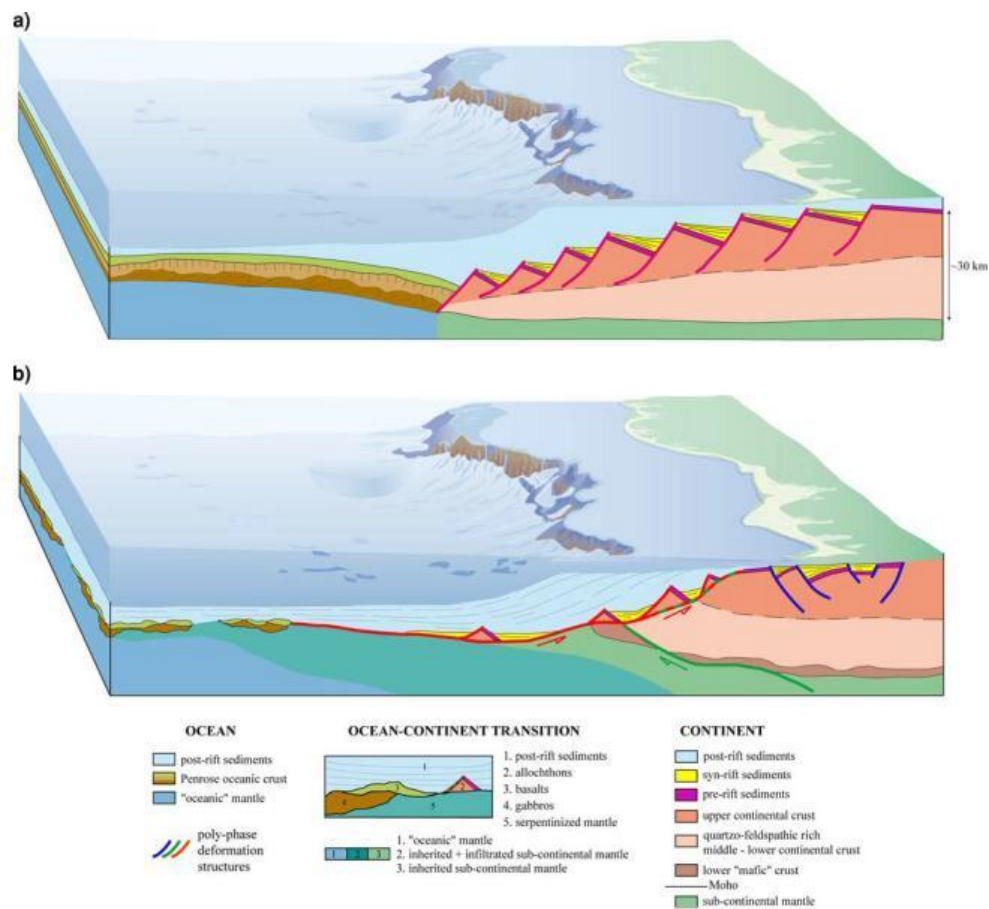


Figura 12. Representação esquemática de margens rifteadas pobre em magma. a) Representação clássica da arquitetura rifte. b) Representação moderna mostrando uma complexa arquitetura na transição da crosta continental para a oceânica, resultante de exumações do manto (MANATCHAL, 2009).

A partir desses trabalhos mais recentes pode-se entender o quanto a tectônica influencia na bacia, principalmente na porção offshore após a quebra da plataforma, que trata exatamente da área de estudo proposto.

2.3 Estratigrafia

A espessa sequência sedimentar acumulada nesta bacia inclui rochas terrígenas e carbonáticas, englobadas em três grandes grupos: Canárias, Caju e Humberto de Campos (PAMPLONA, 1969; OJEDA e MOTTA, 1976; FIGUEIREDO *et al.* 1982 *apud* ROSSETI e TRUCKENBRODT, 1992). O diagrama estratigráfico da bacia de Barreirinhas é apresentado na **Figura 13**.

O preenchimento sedimentar da bacia é complexo. Inicia-se com depósitos basais atribuíveis ao Paleozóico, parte de sequências intracratônicas pretéritas que se estendiam sobre as plataformas pré-cambrianas do Gondwana e que foram capturadas dentro dos grábens iniciais da bacia. Seguem-se depósitos Pré-rifte (transtensionais) e Rifte de idades aptiano e albiano, cobertos por sequências Pós-rifte (fim do Albiano ao Recente) típicas de subsidência termal de margem passiva (TROSDTORF JUNIOR *et al.*, 2007).

Segundo Trosdtorf Junior *et al.* (2007), três supersequências estratigráficas marcam o desenvolvimento tectono-sedimentar da Bacia de Barreirinhas (Figura 4), descritas a seguir.

A primeira supersequência é denominada Supersequência Intracratônica e corresponde a uma espessa sequência de refletores plano-paralelos observável na porção inferior das seções sísmicas que cortam a Bacia de Barreirinhas em terra e em mar. Esta sequência foi datada (bioestratigrafia) como devoniana através de dados de poços e por correlação com a margem continental conjugada africana (Gana), onde arenitos devonianos são produtores no campo de Takorandi.

A Supersequência Rifte é subdividida em três sequências sedimentares:

Sequência K40 (Rifte II), Sequência K50 (Pré-rifte III) e Sequência K60 (Rifte III Transtensional).

A Sequência K40 compreende arenitos e folhelhos aptianos que ocorrem somente na porção marítima da bacia. A Sequência K50 corresponde à associação de calcilutitos e folhelhos lagunares da Formação Codó. Trosdtorf Junior *et al.* (2007) considera esta sequência como depósitos relacionados a uma bacia sag pré-rifte.

Em outras palavras, houve uma interrupção do rifteamento que propiciou a deposição desta unidade, seguida de novo rifteamento condicionando a deposição do pacote seguinte.

A sequência K60 desenvolveu-se no Albiano, com o progressivo fraturamento do Gondwana e a formação de meio-grabens orientados preferencialmente na direção E-W. Compreende sedimentos siliciclásticos continentais a parálicos na porção sul da bacia, passando a carbonatos, folhelhos e arenitos marinhos nas porções centrais e distais.

Vale ressaltar que o trabalho de Trosdtorf Junior *et al.* (2007) introduz a ocorrência dos carbonatos do Grupo Caju tanto na seção Sinrifte III quanto na seção Drifte, uma vez que nas cartas estratigráficas anteriores da Bacia de Barreirinhas o carbonato ocorria apenas na seção Drifte.

A Supersequência Drifte desenvolveu-se do Neo-Albiano ao recente, ao longo de falhamentos transcorrentes de direção E-W. Esta maior abertura propiciou a implantação definitiva de condições marinhas de sedimentação, com o desenvolvimento de um sistema transgressivo de plataforma/talude, representado pelo Grupo Caju, já em condições de subsidência térmica. A partir daí, em contato discordante, desenvolveu-se um espesso sistema transgressivo/regressivo de plataforma/talude, representado pelo Grupo Humberto de Campos, constituído por arenitos e carbonatos plataformais das Formações Areinhas e Ilha de Santana e folhelhos de talude da Formação Travosas. Seguiu-se uma transgressão generalizada, onde ocorreu a deposição dos sedimentos de plataforma/talude da Formação Pirabas.

Essa supersequência é preenchida por duas sequências estratigráficas: a rifte, do Eoalbiano, formada pelo Grupo Canárias, e a de margem passiva, representada pelos grupos Caju, Humberto de Campos, Formação Pirabas e Formação Barreiras (**Figura 13**).

O Grupo Canárias é caracterizado por folhelhos escuros, arenitos grossos cinzentos e arenitos médios cinzentos, caracterizando depósitos de leques deltáicos em ambiente marinho.

O Grupo Caju é composto por calcarenitos biocásticos e oncolíticos e calcilutitos, respectivamente, caracterizando depósitos de ambiente nerítico de alta e baixa energia. Este ainda possui folhelhos com calcarenitos subordinados depositados em ambiente marinho raso.

O Grupo Humberto de Campos é formado por um único sistema em ambientes marinho nerítico, batial e abissal. Tem em sua composição clastos grossos depositado em ambiente marinho raso, carbonatos de alta energia depositados em ambiente marinho nerítico e folhelhos escuros e arenitos finos depositados em ambiente marinho profundo de batial a abissal.



3. FUNDAMENTOS CONCEITUAIS

A sismoestratigrafia ou estratigrafia de seqüências (EXXON) surgiu em 1960 com o desenvolvimento da sísmica multicanal. Essa técnica trata da análise de seções sísmicas que auxiliam nos fatores determinantes para a configuração da arquitetura deposicional. Porém, vale ressaltar que o entendimento da dinâmica da bacia como a tectônica, sedimentação, eustasia e subsidência são fundamentais para o estudo.

A sismoestratigrafia nada mais é do que a aplicação da estratigrafia de seqüência na sísmica, permitindo entender o preenchimento de uma bacia dividindo-a em pacotes geneticamente relacionados e delimitados pelas suas discordâncias e concordâncias correlativas (HOLZ, 2010). Essa ferramenta é utilizada na interpretação das seqüências estratigráficas através da análise dos dados sísmicos (interpretação dos padrões e das configurações dos refletores). Um dos principais fundamentos sismoestratigráficos é a análise das terminações e das configurações das reflexões sísmicas (MITCHUM JR. *et al.*, 1977).

3.1. Sísmica

O método sísmico é uma ferramenta indireta baseada nas diferentes velocidades de ondas sísmicas em diferentes meios. O sinal acústico é refletido quando encontra uma interface de diferente impedância acústica (**Figura 14**), essas interfaces são registradas e designadas como refletores sísmicos (AYRES NETO, 2000).

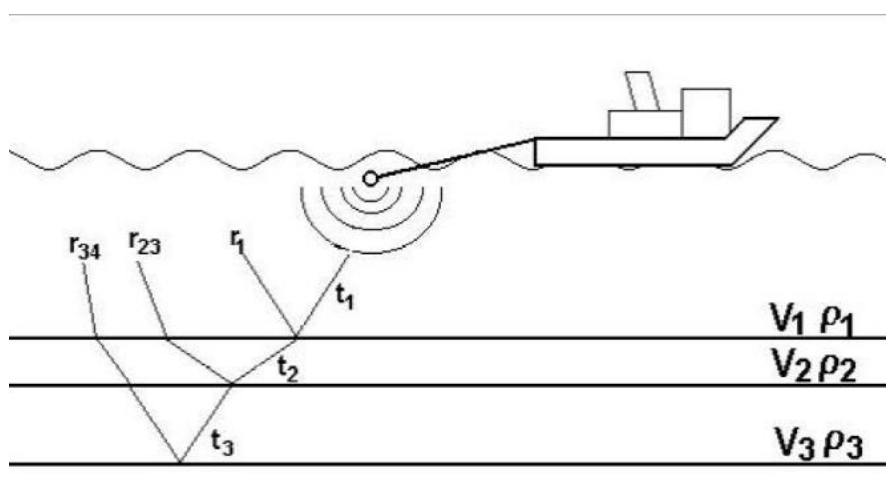


Figura 14. Reflexão do sinal sísmico conforme as diferentes impedâncias acústicas das camadas sedimentares (AYRES NETO, 2000).

A representação acima mostra uma interface que separa pacotes de rocha com contraste de impedância acústica, ou seja, diferentes constantes elásticas e densidades, fator determinante para o espalhamento da energia sísmica na forma de reflexão e refração das ondas elásticas.

3.1.1 Terminações dos refletores sísmicos (terminações estratais)

As terminações estratais são definidas pela relação geométrica entre os estratos e a superfície estratigráfica no qual eles terminam. Os principais tipos de terminações estratais são: truncamento, *toplap*, *onlap*, *downlap* e *offlap* (CATUNEANU, 2006) (**Figura 15 e Figura 16**).

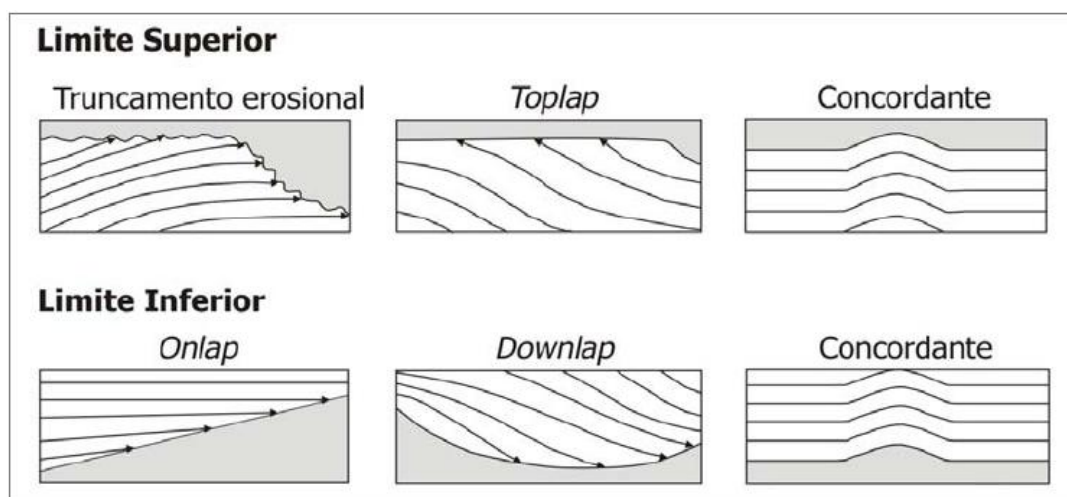


Figura 15. Padrões de terminações de refletores em uma sequência sísmica (MITCHUM JR. *et. al.*, 1977).

Truncamento – reflexão com terminação lateral seccionada de seu limite deposicional original, isso ocorre visivelmente contra uma superfície de erosão sobrejacente ou contra feições estruturais (deslizamento gravitacional, fluxo de sal, ruptura estrutural, intrusão ígnea).

Toplap - reflexões/estratos com terminações inclinadas contra a superfície sobrejacente de ângulo mais baixo que evidencia um hiato não deposicional e ocorre quando o nível de base é muito baixo. É uma superfície que representa o limite proximal da unidade deposicional sedimentar.

No limite inferior (baselap) aparecem dois tipos de terminações:

Onlap - reflexão, inicialmente horizontal, de baixo ângulo com uma superfície estratigráfica mais íngreme que termina deposicionalmente mergulho acima contra uma superfície de maior inclinação. Pode ser também chamado de um *lapout*, marcando uma terminação lateral de uma unidade sedimentar no seu limite deposicional. Os *onlaps* podem se desenvolver em ambientes marinhos, costeiros e não marinhos.

Downlap - reflexão inclinada que termina, mergulho abaixo, contra uma superfície horizontal ou inclinada. Pode ser também chamado de *baselap*, por marcar a base de uma camada em seu limite deposicional.

Offlap – reflexão que representa a mudança progressiva das terminações superiores (mergulho acima) das unidades sedimentares dentro de uma sequência de rochas. Este padrão é produto da queda do nível de base, sendo diagnóstico de regressão forçada.

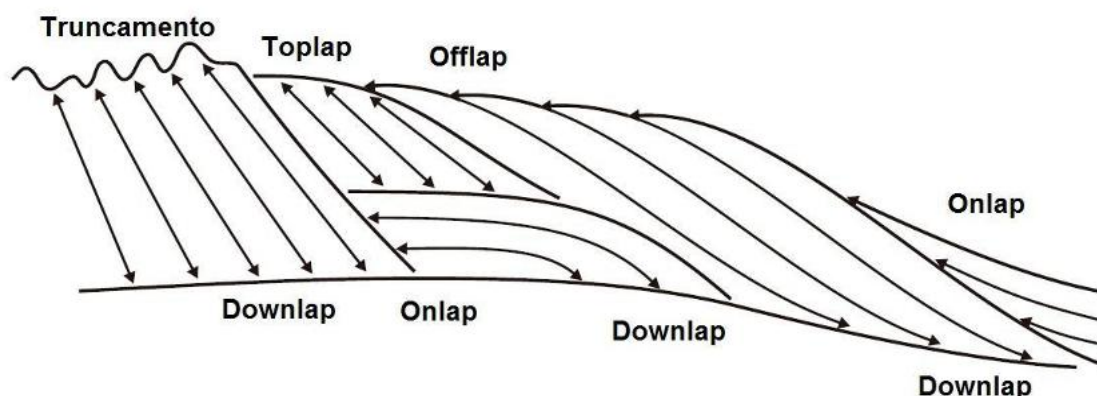


Figura 16. Terminações estratigráficas definindo a relação geométrica entre os estratos e a superfície estratigráfica (CATUNEANU 2006).

3.1.2 Fácies sísmicas

A identificação dos padrões de terminação de refletores auxilia na interpretação das fácies sísmicas. Mitchum et al (1977) definiu fácies sísmicas como um conjunto de reflexões que apresentam determinado padrão, ou características, que o diferencia dos demais dentro de uma sequência sísmica.

Na interpretação das fácies sísmicas são descritos os parâmetros dos padrões de reflexão observados numa unidade sísmica ou numa sequência, como a configuração, continuidade, amplitude e frequência. Os principais padrões de configuração das reflexões para análise de fácies sísmica estão ilustrados na **Figura 17**.

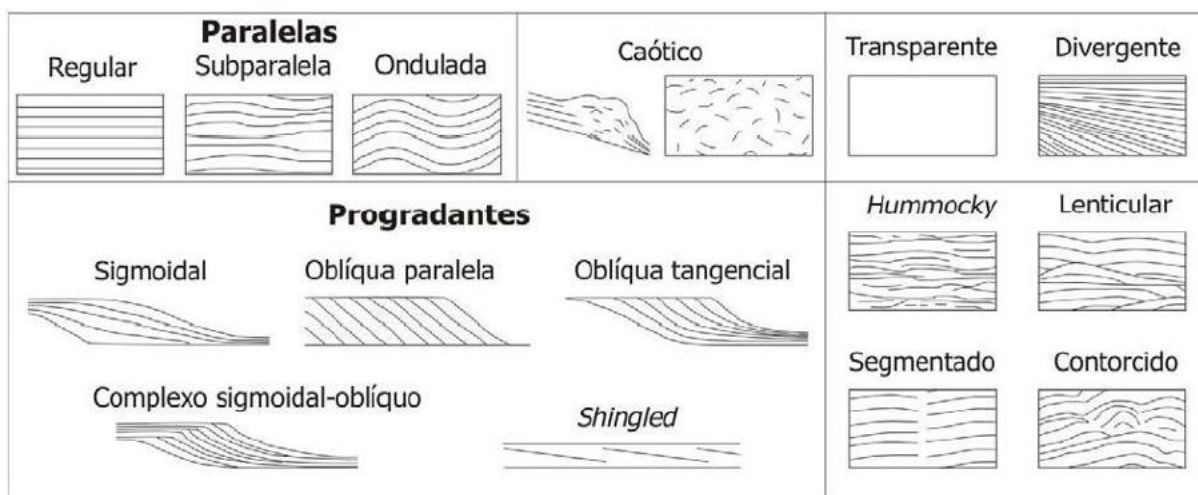


Figura 17. Configurações de fácies sísmicas (MITCHUM *et al.* 1977).

O padrão paralelo/subparalelo indica uma uniformidade da taxa de deposição dos estratos sobre uma superfície estável ou uniformemente subsidente. São feições presentes em sistemas fluviais, evaporíticos, planícies abissais e em plataforma. Refletores ondulados sugerem processos de decantação, flocculação e precipitação, podendo ocorrer em sistemas evaporíticos e em planícies abissais (OJEDA, 1991, apud PONTES, 2005).

As configurações progradantes ocorrem em áreas onde os estratos superpõem-se lateralmente, formando superfícies inclinadas denominadas clinoformas. São produtos de processos sedimentares de tração, fluxo gravitacional e decantação, presentes em sistemas deltaicos, na plataforma, nas bordas de plataforma e em leques costeiros (PONTES, 2005). Os diferentes tipos de clinoformas são resultados das variações de aporte sedimentar e espaço de acomodação.

A configuração caótica é representada por reflexões descontínuas num arranjo desorganizado. Esse tipo de configuração é interpretado como camadas depositadas num ambiente variável de energia relativamente alta ou como a deformação de estratos posteriormente à deposição. Cânions submarinos, talude, estruturas de deslizamento, complexos de corte e preenchimento de canais e zonas altamente falhadas, dobradas ou contorcidas podem ter expressão sísmica caótica (ALVES, 1999).

O padrão de fácies sísmica transparente mostra, geralmente, poucos refletores e de baixa amplitude, indicando pouco contraste de impedância acústica, podendo ser a expressão sísmica de unidades litológicas homogêneas e/ou não estratificadas.

A configuração divergente é caracterizada por uma unidade em formato de cunha em que a maior parte do espessamento lateral é acompanhada pelo espessamento das camadas dentro da unidade. Podem ocorrer em deltas, leques costeiros, taludes, planícies abissais, e sugerem variação espacial da taxa de deposição ou inclinação progressiva, ou combinação de ambos (ALVES, 1999).

Refletores *hummocky* consistem de reflexões irregulares e descontínuas, com padrão ondulado não-sistemático. Em águas rasas são observados em prodeltas ou ambientes interdeltáicos (RIBEIRO, 2000).

A geometria das fácies sísmicas também é uma característica importante, que pode fornecer informações sobre o tipo de deposição que ocorreu, e assim permite inferências sobre o tipo de ambiente.

3.1.3 Superfícies Estratigráficas

As superfícies estratigráficas são de grande importância dentro da estratigrafia de sequência, pois são elas que delimitam os tratos de sistemas e as sequências deposicionais. As superfícies estratigráficas são representadas por duas curvas, uma descreve as mudanças do nível de base no litoral e a outra descreve as mudanças associadas na costa (transgressão e regressão) (CATUNEANU, 2006) (**Figura 18**).



Figura 18. Relação dos eventos que controlam as superfícies com o nível de base (CATUNEANU 2006).

Existem quatro variáveis que controlam a sedimentação e variação dos padrões de empilhamento dos estratos, além da distribuição de litofácies nas bacias sedimentares, são eles: subsidência tectônica, eustasia, clima e aporte sedimentar.

No presente trabalho a formação de espaço de acomodação associado à tectônica de abertura da bacia representam os principais fatores para a constituição da atual configuração desta, que possui um empilhamento sedimentar espesso comparado proporcionalmente ao tempo de deposição e a bacias vizinhas.

3.2 Estratigrafia de Sequências

Mitchum Jr. *et al.* (1977a) afirma que uma unidade estratigráfica é composta por uma sucessão de estratos geneticamente relacionados, relativamente concordantes, limitados no topo e base por discordâncias e seus equivalentes concordantes.

As discordâncias segundo Vail *et al.* (1997) são superfícies que possuem contraste de velocidade e densidade entre dois pacotes de estratos.

As sismo-seqüências foram limitadas através da determinação dos padrões de terminação das reflexões. Estas terminações foram caracterizadas nas linhas sísmicas pelas relações geométricas entre a reflexão e a superfície sísmica. (MITCHUM JR. *et al.*, 1977a).

Sangree & Windmier (1977) definiram sismo-fácies como sendo a interpretação de fácies deposicionais a partir de dados de reflexão sísmica.

Isto envolve o delineamento e a interpretação da geometria da reflexão, continuidade, amplitude, frequência, velocidade intervalar, além da forma externa e associações tridimensionais de grupos de reflexões.

A interpretação de fácies sísmica é fundamental para obter informações sobre os processos deposicionais, erosão, paleotopografia, fonte de sedimentos, ambiente geológico. A configuração dos estratos é interpretada a partir da configuração da reflexão sísmica e se refere aos padrões geométricos e às relações dos estratos dentro de uma unidade estratigráfica (MITCHUM JR. *et al.*, 1977a).

A continuidade dos refletores, por exemplo, pode estar associada à continuidade dos estratos, ou seja, refletores contínuos podem estar relacionados a um depósito uniformemente estratificado. A amplitude dos refletores revela informações a respeito dos contrastes de densidade e velocidade de interfaces individuais, bem como do seu espaçamento.

O parâmetro mais utilizado para caracterizar uma sismofácies segundo Ribeiro (2001) é a configuração interna. Mitchum Jr. *et al.* (1977b) descrevem vários tipos de padrões de configurações internas: paralela, subparalela, divergente, progradantes, caótico, transparente, hummocky, lenticular, segmentado e contorcido (**Figura 17**).

Os lençóis, cunhas e bancos são as mais comuns em plataformas, os padrões paralelos, divergentes e progradantes compõem as configurações internas destas unidades. As lentes são as formas externas características de clinoformas progradantes. As montiformas e os tipos de preenchimento são grupos de formas sísmicas derivados de estratos de diferentes origens, formando saliências ou depressões preenchidas nas superfícies deposicionais.

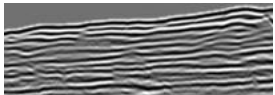
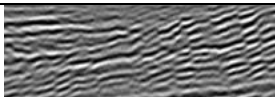
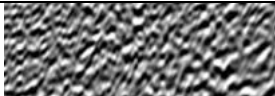
As geometrias de preenchimento segundo Mitchum Jr. *et al.* (1977a) são interpretadas como deposição de sedimento em feições negativas no relevo da superfície deposicional, sendo erosivas ou não, e são preenchidas por padrões de configuração interna. As feições negativas podem ser canais, canyons, calhas estruturais, bacias, depressões, sopé de talude, entre outras.

Na estratigrafia moderna, os padrões de terminação de reflexão não representam somente limites de sequência, na verdade tais padrões indicam superfícies que delimitam unidades sísmicas que serão interpretados como tratos de sistemas deposicionais.

4. RESULTADOS

Foram identificadas e correlacionadas nove sismofácies (**Tabela 2**) e dez sismo-horizontes na área estudada. Os sismo-horizontes foram interpretados na máxima amplitude positiva (pico preto).

Tabela 2. Tabela de sismofácies mostrando os padrões identificados nas linhas sísmicas 2D em profundidade, os padrões conhecidos na literatura (MITCHUM, 1977) e uma interpretação sucinta.

Sismofácies			Mitchum 1977 Sismofácies	Interpretação
SF1		Subparalela		Depósitos plataformais uniformes
SF2		Hummocky		Complexo de Canais
SF3		Contorcida		Depósitos gravitacionais
SF4		Acavalgada		Depósitos gravitacionais
SF5		Lenticular		<i>Mound</i> carbonático (?)
SF6		Interrompida		Depósitos plataformais não uniformes
SF7		Progradacional		Sistemas parálicos regressivos
SF8		Sem reflexão		Depósitos pelágicos e hemipelágicos
SF9		Caótica		Depósitos gravitacionais

As sismofácies identificadas estão presentes em todas as linhas sísmicas interpretadas, ocorrendo igualmente da porção proximal (SW) até a porção distal (NE). A sismofacies caótica (SF9) é a única que ocorre preferencialmente na porção proximal, próxima à quebra do talude.

A sismofacies 1 (subparalela) ocorre em todas as sismossequências, sendo que nas sismossequências 5 e 6 é caracterizada pela ocorrência localizada de canais de médio e pequeno porte, respectivamente.

A sismofacies 8 (sem reflexão) ocorre nas sismossequências 1, 3, 4 e 5, sempre próximo aos seus limites superior, enquanto que a sismofacies 9 (caótica) ocorre sempre na porção proximal de todas as linhas sísmicas, com exceção à sismossequência 5 onde a SF9 não pode ser observada.

Todos os dez sismo-horizontes puderam ser facilmente identificados e correlacionados em todas as linhas sísmicas, devido à clara variação de sismofácies (texturas sísmicas) (**Figura 19 e Figura 20**).

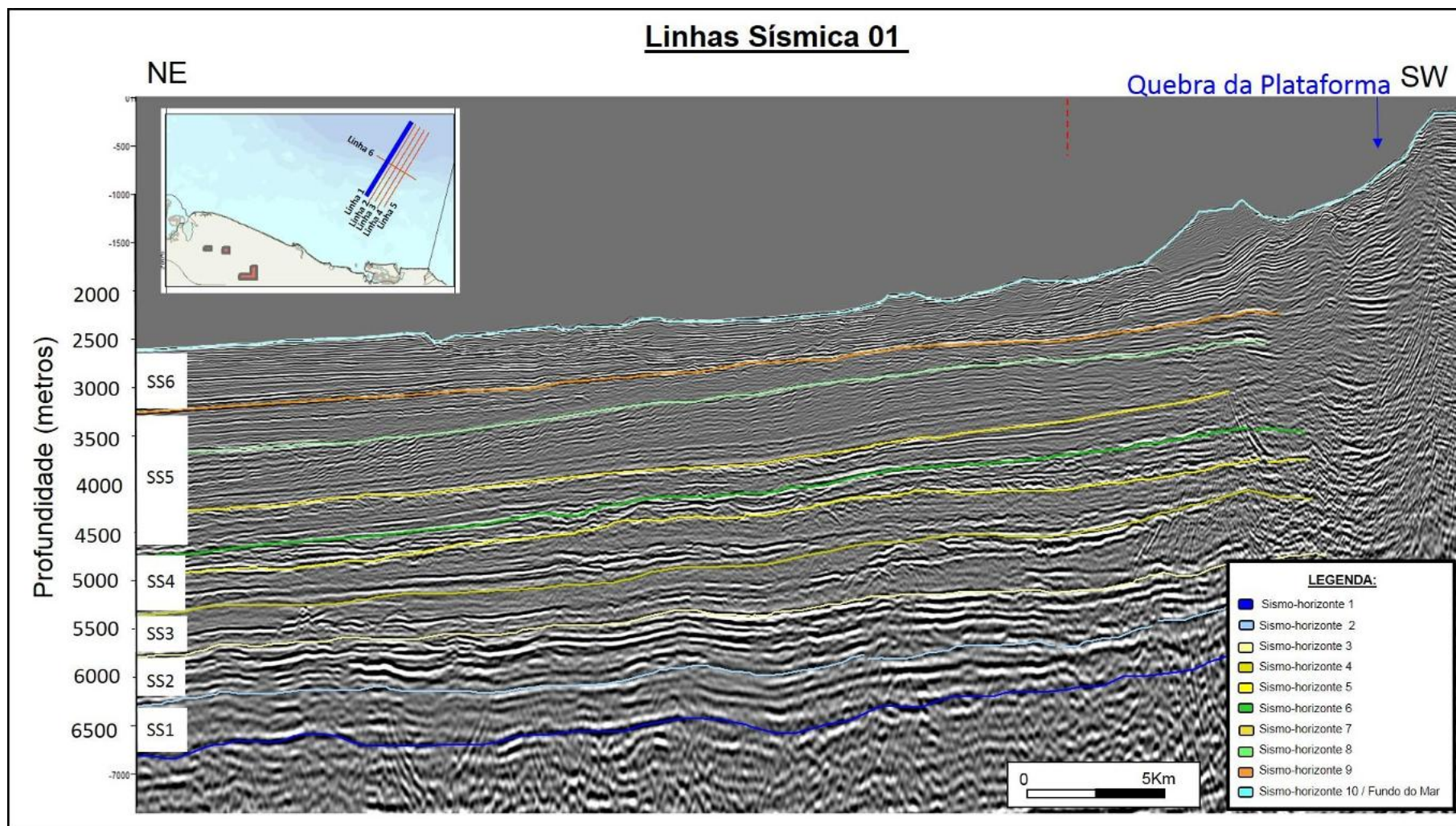


Figura 19. A. Linha sísmica 1 2D em profundidade no sentido do mergulho da bacia (*dip*) mostrando os dez sismo-horizontes interpretados e as seis sismossequências mapeadas.

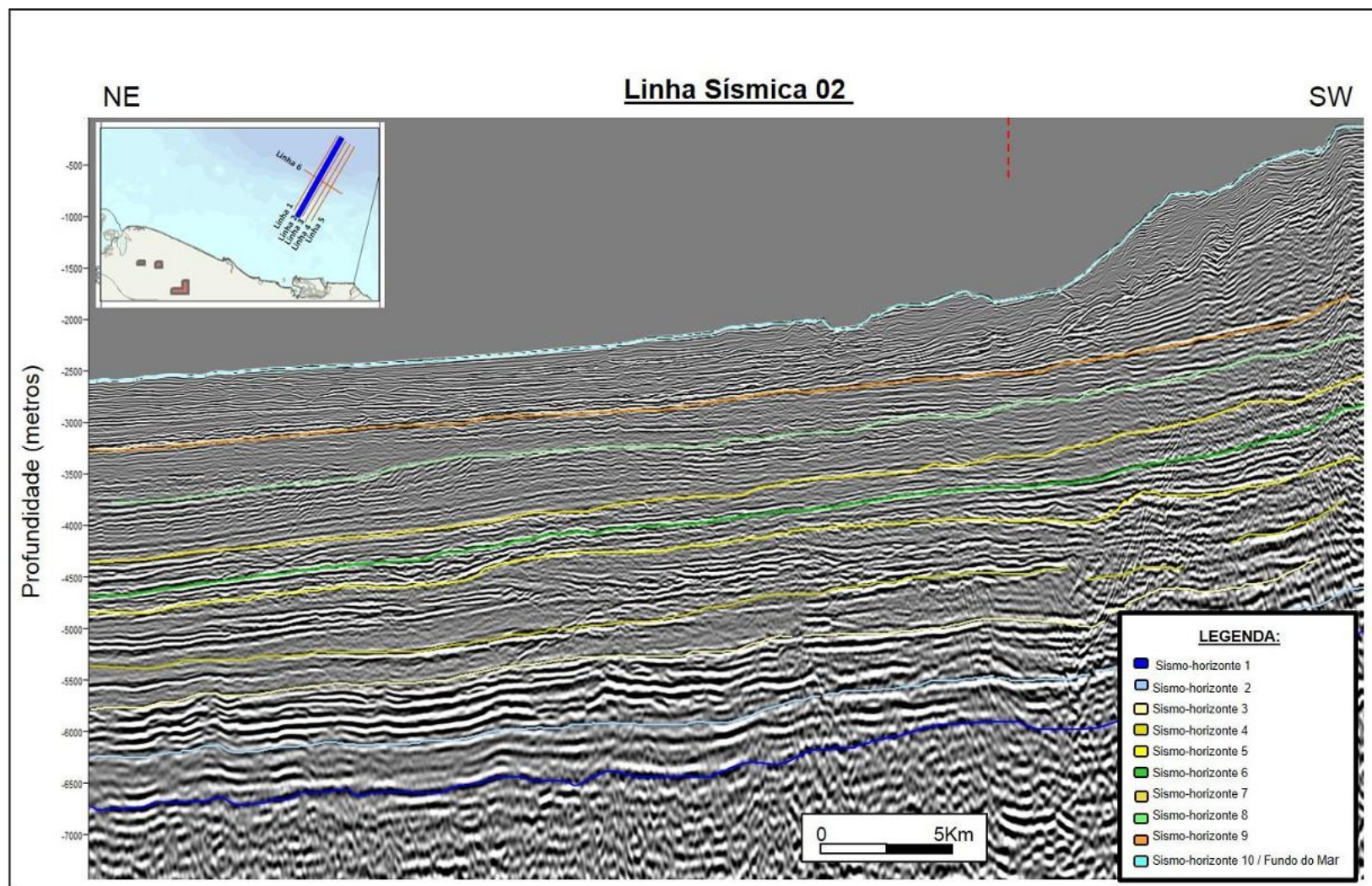


Figura 19. B. Linha sísmica 2 2D em profundidade no sentido do mergulho da bacia (*dip*) mostrando os dez sismo-horizontes interpretados e as seis sismossequências mapeadas.

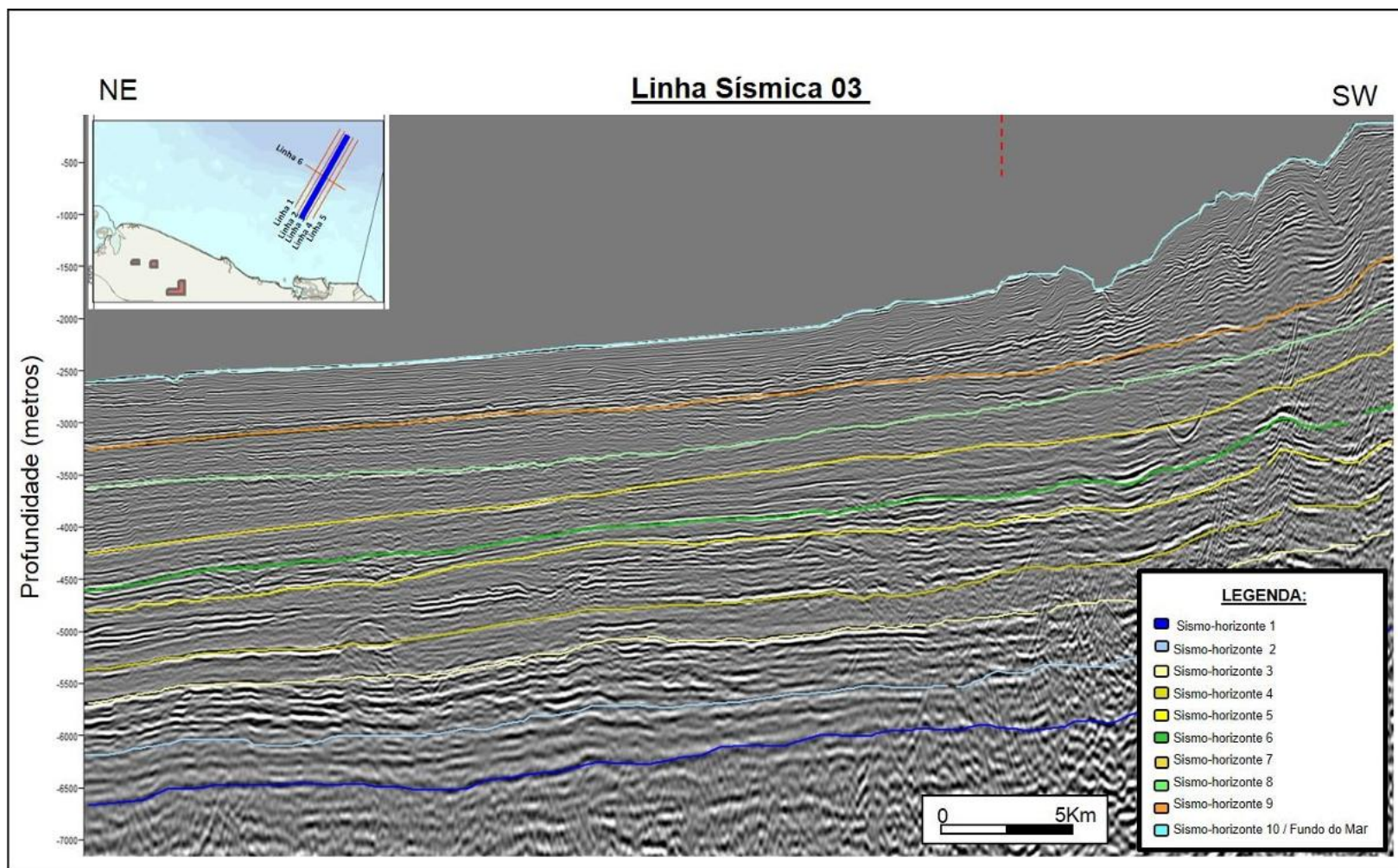


Figura 19. C. Linha sísmica 3 2D em profundidade no sentido do mergulho da bacia (*dip*) mostrando os dez sismo-horizontes interpretados e as seis sismossequências mapeadas.

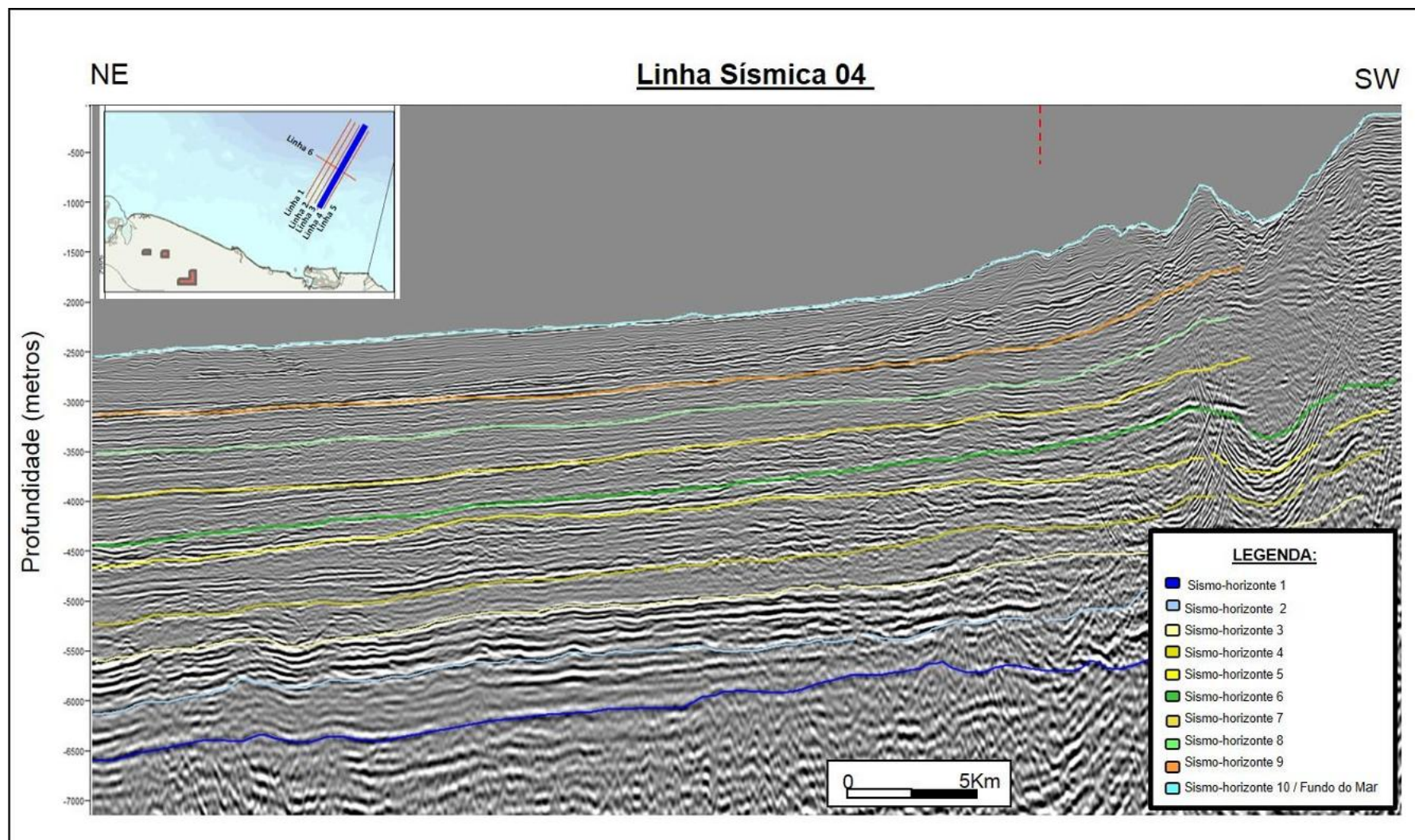


Figura 19. D. Linha sísmica 4 2D em profundidade no sentido do mergulho da bacia (*dip*) mostrando os dez sismo-horizontes interpretados e as seis sismossequências mapeadas.

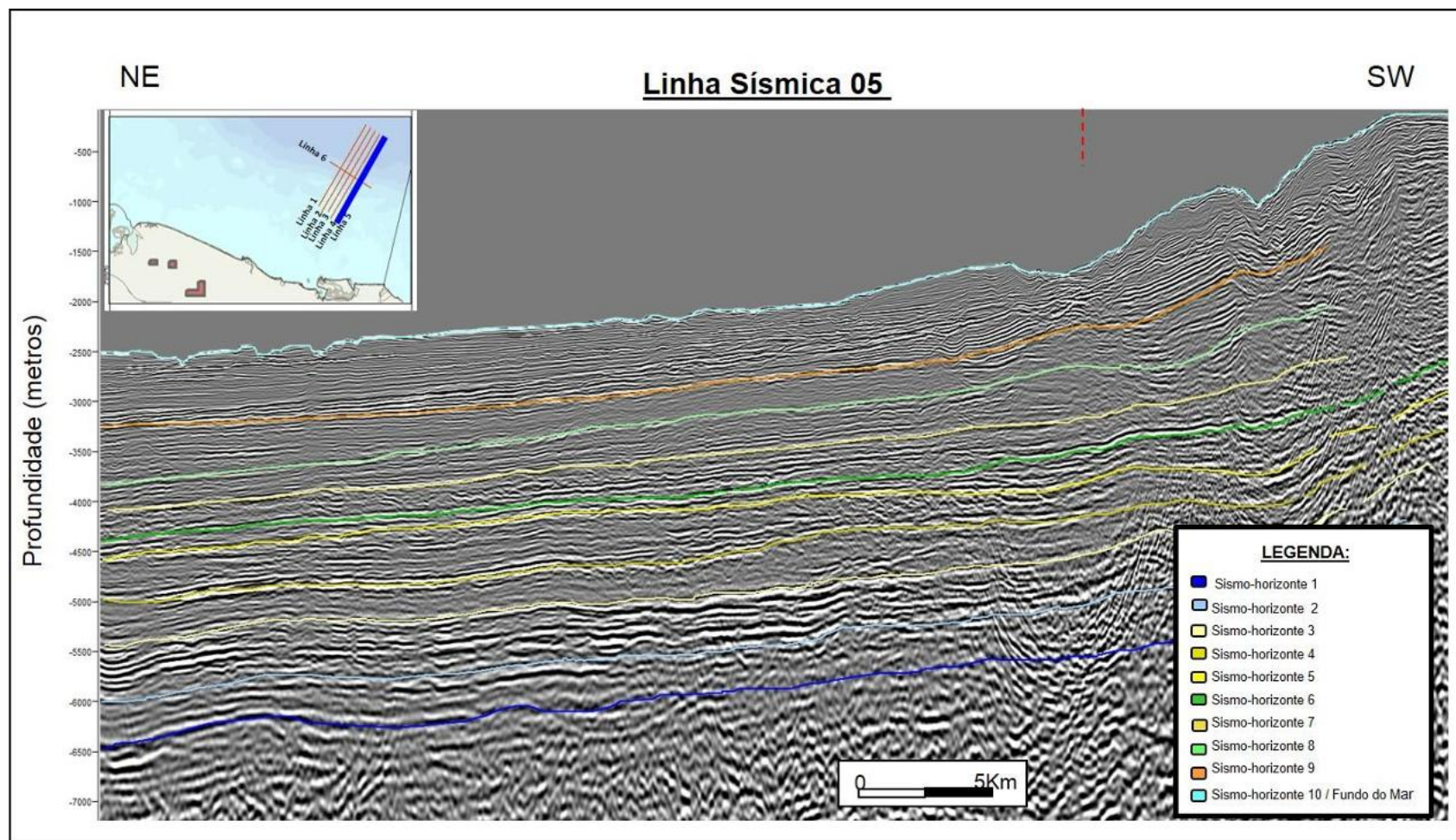


Figura 19. E. Linha sísmica 2D em profundidade no sentido do mergulho da bacia (*dip*) mostrando os dez sismo-horizontes interpretados e as seis sismossequências mapeadas.

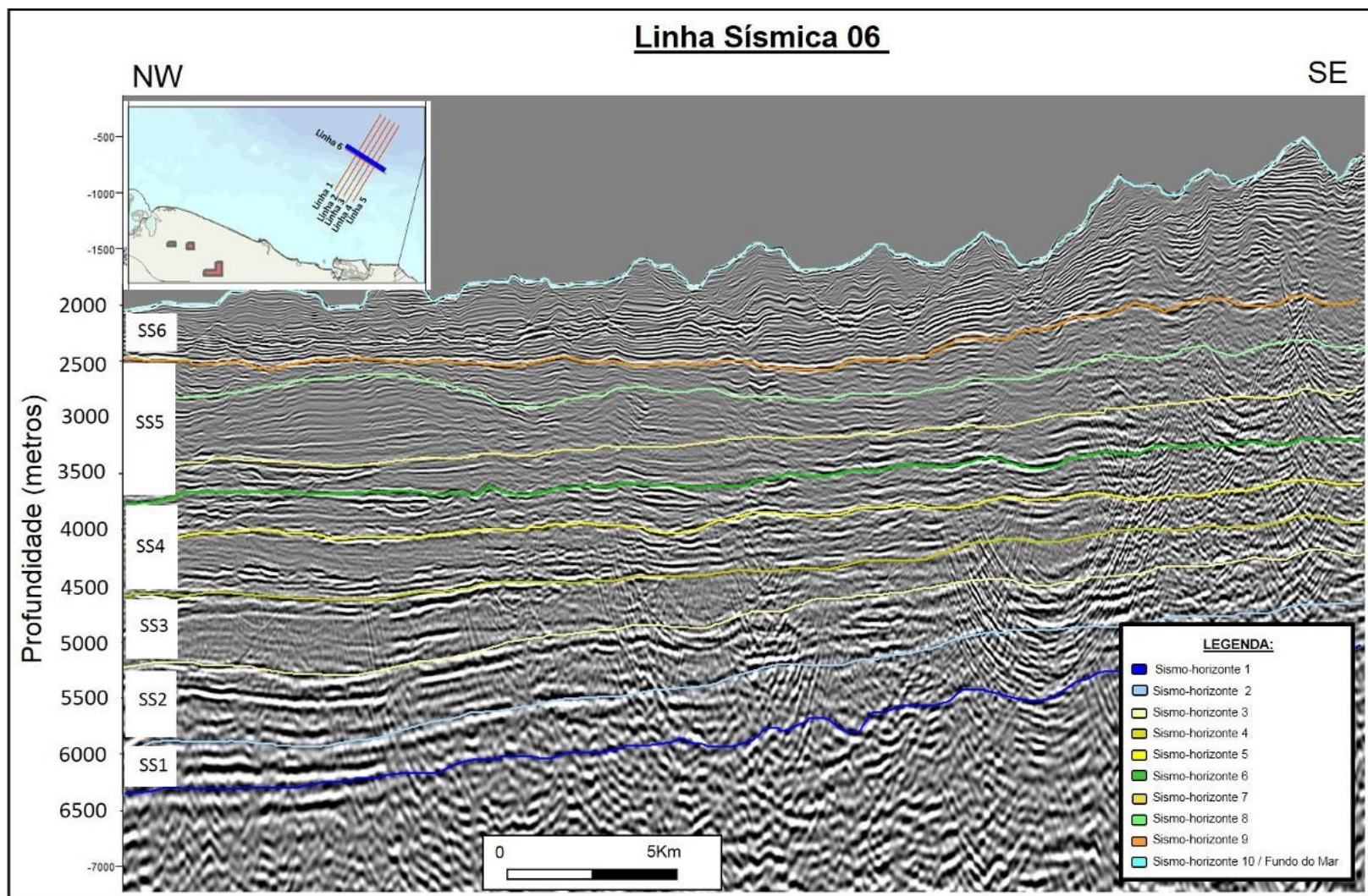


Figura 20. Linha sísmica 2D em profundidade no sentido do mergulho da bacia (*strike*) mostrando os dez sismo-horizontes interpretados e as seis sismossequências mapeadas.

O sismo-horizonte 1 é interpretado como o limite superior da seção rifte e marca o limite inferior da seção estudada (drifte), enquanto que o sismo-horizonte 10 representa o fundo do mar e o limite superior da seção estudada.

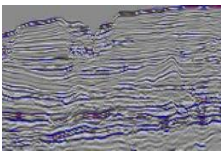
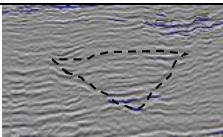
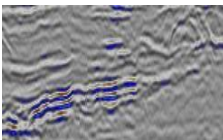
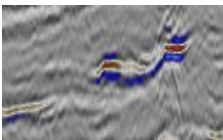
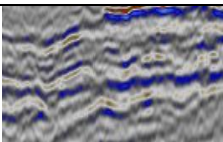
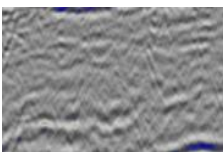
Os sismo-horizontes 1, 2, 3 e 6 são os mais claros e mais contínuos para o mapeamento, uma vez que estes marcam as maiores mudanças em termos de sismofácies e os maiores contrastes de amplitudes observados nas linhas sísmicas.

Os sismo-horizontes 4 e 9 são claros, contínuos e marcam claramente a mudança no padrão de sismofácies (texturas), como a transição da sismofácies sem reflexão (SF8) para uma sismofácies com alta amplitude.

A maioria dos sismo-horizontes acima são considerados como limites de sequências sísmicas, com exceção dos sismo-horizontes 5, 7 e 8 que limitam mudanças menores.

Seis sismossequências foram identificadas nas linhas sísmicas (**Tabela 3**), e nomeadas estratigraficamente de SS1 a SS6. Foram gerados mapas de isópacas para cada uma das sequências, que permitiram a caracterização de suas geometrias.

Tabela 3. Tabela que sintetiza as sismossequências (SS1-SS6) identificadas nas linhas sísmicas 2D em profundidade, mostrando o caráter sísmico, geometria e a interpretação das mesmas.

Sismossequências		Sismofácies	Cáráter Sísmico	Geometria	Interpretação
SS6		SF1 SF2 SF3 SF9	Alta amplitude e contraste de impedância	Tabular	Agradacional para Retrogradacional
SS5		SF1 SF7 SF8	Baixa amplitude e contraste de impedância	Cunha para SW	Progradacional
SS4		SF1 SF3 SF5 SF6 SF8 SF9	Média amplitude e contraste de impedância	Cunha para SW	Progradacional
SS3		SF1 SF8	Baixa amplitude e contraste de impedância	Cunha para NE	Retrogradacional
SS2		SF1 SF6	Alta amplitude e contraste de impedância	Cunha para NE	Retrogradacional
SS1		SF1 SF6 SF8	Baixa amplitude e contraste de impedância	Tabular	Agradacional

Sismossequência 1 (SS1). (**Figura 21**) – Esta sismossequência é limitada pelos sismo-horizontes 1 e 2. Internamente a SS1 apresenta um baixo contraste de amplitude, sendo caracterizada por sismofácies subparalelas (SF1), interrompida (SF6) e sem reflexão (SF8).

A geometria observada na SS1 é tabular, agradacional e é corroborada em termos gerais pelo mapa de isópaca (**Figura 29**) que sugere uma plataforma lamosa como paleoambiente.

Os baixos contrastes de amplitude e a continuidade dos refletores podem indicar uma sedimentação pelágica e semi-pelágica com densidades similares.

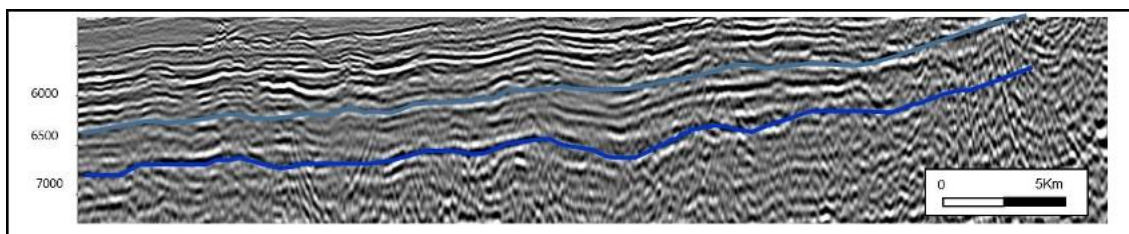


Figura 21. Sismossequência 1, limitada pelos sismo-horizontes 1 (azul escuro) e 2 (azul claro), em um maior detalhe onde pode se observar melhor o baixo contraste entre as amplitudes.

Sismossequência 2 (SS2). (**Figura 22**) - Esta sismossequência é limitada pelos sismo-horizontes 2 e 3. Internamente a SS2 apresenta um alto contraste de amplitude, sendo caracterizada por sismofácies subparalelas (SF1) e interrompida (SF6).

A geometria observada na SS2 é de cunha aparente com um suave espessamento para SW, agradacional-retrogradacional, que é corroborada em termos gerais pelo mapa de isópaca (**Figura 29**) que sugere uma plataforma mista transgressiva como paleoambiente.

Os altos contrastes de amplitude e a boa continuidade dos refletores podem resultar da entrada de sedimentos clásticos com diferentes densidades, acumuladas como micro e macro-clastos intercalados.

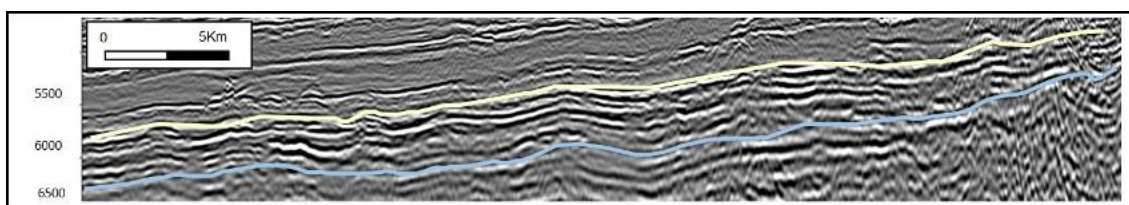


Figura 22. Sismossequência 2, limitada pelos sismo-horizontes 2 (azul claro) e 3 (branco), em um maior detalhe onde pode se observar melhor o alto contraste entre as amplitudes.

Sismossequência 3 (SS3). (**Figura 23**) - Esta sismossequência é limitada pelos sismo-horizontes 3 e 4. Internamente a SS3 apresenta um baixo contraste de amplitude, sendo caracterizada preferencialmente por sismofácies sem reflexão e

subordinadamente por sismofácies subparalelas (SF1). A SF8 localmente apresenta um alto contraste de amplitude dos refletores, que pode ser interpretado como corpos ígneos.

A geometria observada na SS3 é de cunha aparente, retrogradacional, com um sutil afinamento para área distais (NE), que é corroborada em termos gerais pelo mapa de isópaca (**Figura 29**) que sugere uma plataforma externa como paleoambiente, caracterizada por depósitos lamosos pelágicos e semi-pelágicos.

A superfície máxima de inundação provavelmente ocorre próximo a metade dessa sismossequência, entre os sismo-horizontes 3 e 4.

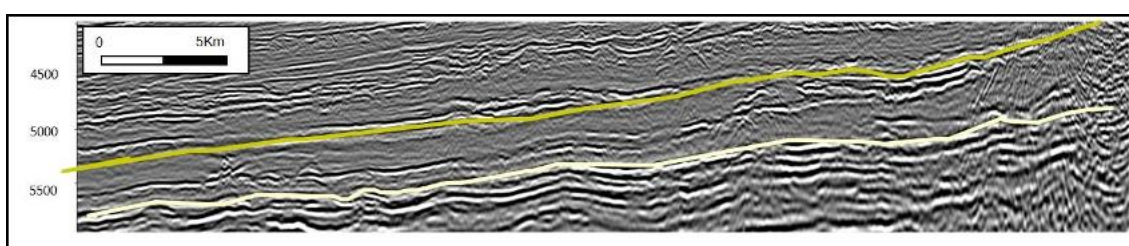


Figura 23. Sismossequência 3, limitada pelos sismo-horizontes 3 (branco) e 4 (amarelo), em um maior detalhe onde pode se observar melhor o baixo contraste entre as amplitudes, uma superfície com maior contraste e contínua que foi interpretada como a superfície de inundação máxima (SIM) e um contraste maior pontual que pode ser um corpo ígneo.

Sismossequência 4 (SS4). (**Figura 24**) - Esta sismossequência é limitada pelos sismo-horizontes 4 e 6, e contém o sismo-horizonte 5 que não limita nenhuma mudança significativa de fácies. Internamente a SS4 apresenta um médio contraste de amplitude, sendo caracterizada por sismofácies subparalelas (SF1), contorcida (SF3), lenticular (SF5), interrompida (SF6), sem reflexão (SF8) e caótica (SF9), com nenhuma tendência estratigráfica ou paleogeográfica.

A geometria observada na SS4 é de cunha aparente, progradacional, com uma sutil tendência de espessamento para área distais (NE), que é corroborada em termos gerais pelo mapa de isópaca (**Figura 29**) que sugere um talude inferior para superior como paleoambiente.

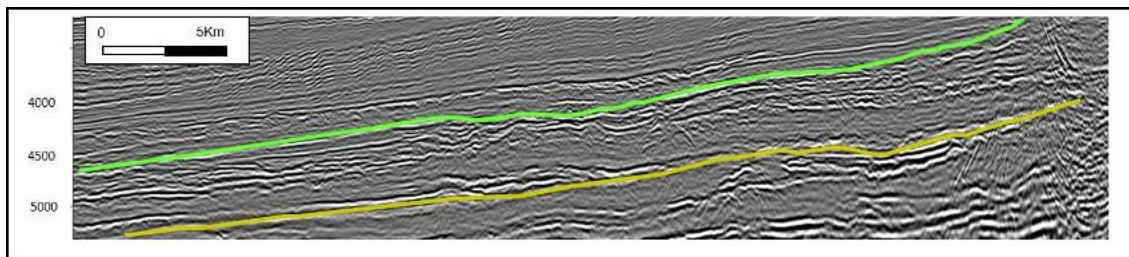


Figura 24. Sismossequência 4, limitada pelos sismo-horizontes 4 (amarelo) e 6 (verde), em um maior detalhe onde pode se observar melhor o médio contraste entre as amplitudes e sismofácies com maior contraste no topo e menor contraste na base.

Sismossequência 5 (SS5). (**Figura 25**) - Esta sismossequência é limitada pelos sismo-horizontes 6 e 9, e contém o sismo-horizonte 7 e 8 que não limitam nenhuma mudança significativa de fácies. Internamente a SS5 apresenta um baixo contraste de amplitude, sendo caracterizada preferencialmente por sismofácies subparalelas (SF1), acavalgada (SF4), progradacional (SF7) e sem reflexão (SF8). A SF4 ocorre próximo a base da sequência.

A geometria observada na SS5 é de cunha aparente, progradacional (sigmoidal?), com uma sutil tendência de espessamento para área distais (NE), que é corroborada em termos gerais pelo mapa de isópaca (**Figura 29**) que sugere um talude inferior para superior como paleoambiente.

Canais observados na SF1 podem sugerir uma entrada de sedimentos clásticos ao redor de rochas com densidade menor, como observado pelo baixo contraste de amplitude, e um talude regressivo como paleoambiente.

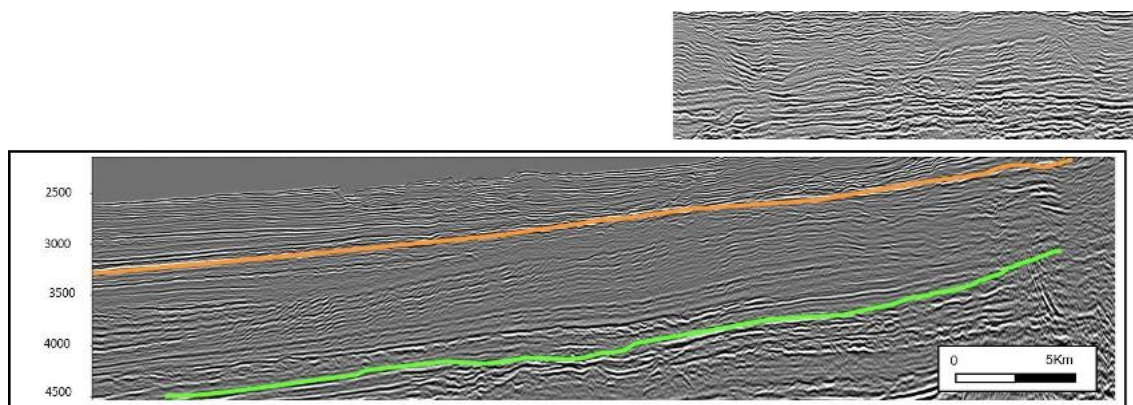


Figura 25. Sismossequência 5, limitada pelos sismo-horizontes 6 (verde) e 9 (laranja), em um maior detalhe onde pode se observar melhor o baixo contraste entre as amplitudes e os canais de maior porte em um corte strike, na imagem menor.

Sismossequência 6 (SS6). (**Figura 26**) - Esta sismossequência é limitada pelos sismo-horizontes 9 e 10. Internamente a SS6 apresenta um alto contraste de amplitude, sendo caracterizada por sismofácies subparalelas (SF1), hummocky (SF2), contorcida (SF3), e caótica (SF9).

A geometria observada na SS6 é tabular, agradacional, com uma sutil tendência de afinamento para área distais (NE), que é corroborada em termos gerais pelo mapa de isópaca (**Figura 29**) que sugere uma plataforma transgressiva mista como paleoambiente.

Pequenos canais observados na SF1 podem sugerir uma entrada de sedimentos clásticos ao redor de rochas com densidade diferente, como observado pelo alto contraste de amplitude. Portanto é esperada uma intercalação entre sedimentos macroclásticos e carbonáticos em uma plataforma externa.

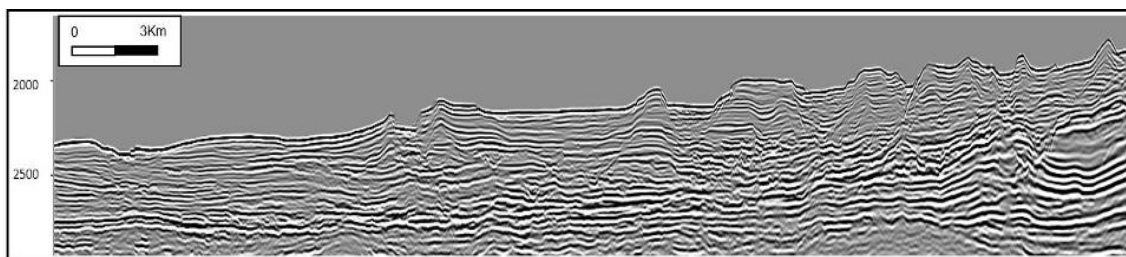


Figura 26. Sismossequência 6, limitada pelos sismo-horizontes 9 e 10, em um maior detalhe onde pode se observar melhor o alto contraste entre as amplitudes e os canais de menor porte e de fundo.

5. ARTIGO SUBMETIDO

Submission Confirmation

Marine and Petroleum Geology <jmpg@elsevier.com>
Para: jfgsampol@gmail.com

8 de outubro de 2015 16:33

Article Type: Full Length Article.

Dear Mrs. Juliana Sampol,

We have received your article "Seismic sequences analysis in the offshore drift section of Barreirinhas Basin, Brazilian Equatorial Margin" for consideration for publication in Marine and Petroleum Geology.

Your manuscript will be given a reference number once an editor has been assigned.

To track the status of your paper, please do the following:

1. Go to this URL: <http://ees.elsevier.com/jmpg/>

2. Enter these login details:

Your username is: jfgsampol@gmail.com

Your password is: *****

3. Click [Author Login]

This takes you to the Author Main Menu.

4. Click [Submissions Being Processed]

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,

Elsevier Editorial System
Marine and Petroleum Geology

Please note that the editorial process varies considerably from journal to journal. To view a sample editorial process, please click here:

http://ees.elsevier.com/eeshelp/sample_editorial_process.pdf

For further assistance, please visit our customer support site at <http://help.elsevier.com/app/answers/list/p/7923>. Here you can search for solutions on a range of topics, find answers to frequently asked questions and learn more about EES via interactive tutorials. You will also find our 24/7 support contact details should you need any further assistance from one of our customer support representatives.

Seismic sequences analysis in the offshore drift section of Barreirinhas Basin, Brazilian Equatorial Margin

Juliana Sampol & Leonardo Borghi

October, 2015

ABSTRACT

Important discoveries made over recent years in the South American (Zaedyus discovery) and African (Jubilee Field) equatorial margins opened new perspectives in the exploration of the Brazilian equatorial margin, particularly for the Barreirinhas Basin. The objective of this study is a first seismic analysis approach for the Drift section of Barreirinhas Basin, in deep water areas, based on the identification, correlation and mapping of the seismic facies, horizons and sequences. The few stratigraphic data available together with the lack of stratigraphic interpretations in the studied area make this study challenging. Five 2D depth seismic lines (Pre-Stack Depth Migration) dip oriented and one strike oriented are located in an approximately 1100km² area, in the offshore Barreirinhas Basin, were interpreted using Petrel (Schlumberger), and its applications. The analysis of seismic characters, impedance contrast, reflectors' patterns, and sequence geometries showed nine seismic facies, and ten seismic horizons, which seven of them limit six seismic sequences. Geometries identified by isopach maps of the sequences reveals a stratigraphic pattern of aggradational (seismic sequence 1) to retrogradational (seismic sequences 2 and 3) to progradational (seismic sequences 4 and 5) and finally to retrogradational (seismic sequence 6) which can be associated to transgressive-regressive cycles which allowed tentative correlation to depositional sequences in the onshore previously proposed by literature.

Keywords: Brazilian Equatorial Margin. Barreirinhas basin. Seismic Stratigraphy. Seismic Sequence. Drift.

1. Introduction

The petroleum exploration of Barreirinhas Basin was concentrated between the 1960's and 1980's. According to the BDEP¹ data base, 123 wells have been drilled in the basin, 70% of them onshore, including the discovery of three Albian fields (São João, Espigão and Oeste Canoas) (Figura 1).

Since Feijó's (1994) publication, no stratigraphic information has been incorporated into the geological knowledge of the basin, which remained limited by the onshore discoveries. The last two wildcat wells drilled offshore, in 2009 and 2012, hydrocarbon bearing did not add further stratigraphic information to the basin.

The prominence of the exploratory value given to this basin in the 2013 ANP Bid Round², here proposed, resulted in expectations of finding co-related accumulations similar to the recent discoveries made in the Equatorial Margin basins from South America (Zaedyus discovery, Guyana basin, French Guiana) and Africa (Jubilee filed, Tano basin, Ghana), which reinforces the necessity of stratigraphic (seismic sequence analysis) review. In particular the Cretaceous turbidities of the Travosas Formation can be considered an analogue play.

This study aims to analyze, in terms of seismic stratigraphy, the Drift section of Barreirinhas basin in its offshore deepwater portion. Correlation to the onshore or even to the offshore shallow water portions was not targeted due to the lack of available biostratigraphic well data, and the fact that the whole stratigraphic section is thinner toward onshore, which makes it a challenge.

The purpose of the study is to produce a first approach to seismic stratigraphic analysis in the offshore deepwater of Barreirinhas Basin, for subsequent depositional system and sequence studies of its Drift section.

¹ Brazilian exploration and production national database

² Brazilian national regulatory agency for petroleum, natural gas and biofuels

2. Materials and methods

The material used consisted of six 2D PSDM (Pre-Stack Depth Migration) seismic lines, located in the southeast offshore portion of the Barreirinhas Basin. Five of them are dip sections and one strike, covering an area of approximately 1,100 km² (Figure 1). The dip seismic lines are very similar between them, such as textures, horizons, facies and sequences interpreted and mapped, so only one line (seismic line 1) is presented, in order to not get repetitive.

As seismic stratal terminations could hardly be identified during the seismic interpretation stage, the identification and mapping of seismic horizons were based on seismic facies boundary changes, using the Petrel© suite (Schlumberger) and its applications.

The parameters used to define the seismic facies were reflection amplitudes, continuity, and frequency; by the visual individualization of configuration patterns (seismic textures).

The objective of the seismic facies analysis is the interpretation of the lithology, the depositional paleoenvironment, and the geological history (MITCHUM *et al.*, 1977). However, due to a lack of well data information, like lithology, biostratigraphy and paleoecology, it was not possible to elaborate an accurate discussion on depositional systems and system tracts.

Traditionally, each seismic sequence is distinguished from the adjacent ones based mainly on the terminations of seismic reflectors. Due to the poor quality of the seismic data, especially in the studied portion, and the overall flat lying concordant nature of the seismic facies, the seismic sequences could only be identified by the changes of the seismic facies patterns.

As it was not feasible to properly interpret the depositional systems in the seismic facies analysis nor to identify the genetic nature of the seismic sequence boundaries (unconformities), a sequence stratigraphic discussion could not be achieved.

Mapping the identified seismic horizons allowed elaboration of structural contour and isopach maps. Structural contour maps did not solely provide useful stratigraphic information for discussions but supported elaboration of the isopach maps, which

allowed the recognition of seismic sequence geometry that permitted the discussions on depositional systems, allied with seismic facies analysis.

The stratigraphic framework of Figueiredo et al (1983) and Trosdorf Junior et al. (2007) were not suitable for precise correlation to the identified seismic sequences here proposed, since no seismic criteria were shown as being tied to well data, and no biostratigraphic data were available.

3. Geological settings

The Barreirinhas Basin is located in the Brazilian Equatorial Margin, limited to the south by the Parnaíba Basin; to the west by the Ilha de Santana Platform; to east by the Tutóia High, and to the northwest, by the Pará-Maranhão Basin where no clear geological feature is mentioned in the literature.

The total basin area is approximately 46,000 km², of which 8,500 km² are onshore, and with the offshore portion extending to the bathymetric limit of 3,000 meters (TROSDTORF JUNIOR *et al.*, 2007). This offshore boundary refers only to what is considered an economic limit for hydrocarbon exploration; in fact, the sediments are distributed far beyond to the abyssal portions of the Equatorial Atlantic. The studied area is located just after the shelf break.

The Brazilian Equatorial Margin is recognized as a typical transform margin, observed by major tectonic lineaments (Chain, Romanche, and Saint Paul Fracture Zones). The Barreirinhas Basin is inserted in this geotectonic context, influenced by the Romanche Fracture Zone (ZALÁN, 2012) (Figure 2).

The basin is known as a rhombic graben associated with strike-slip tectonics (pull-apart basin) as a result of the first manifestations of the Equatorial Atlantic opening, during the Gondwana continent fragmentation (Figure 3). Its later stratigraphic evolution resulted in a passive margin basin from late Albian until the present (AZEVEDO, 1991).

The strike-slip tectonic had great relevance in establishing a deformative regime in the Barreirinhas basin during the Barremian – early Albian and, generally speaking, imposed on a complex compartmentalization, with both compressional and extensional domains (DARROS MATOS, 2000). The studied area is located in the extensional domain, where gravitational faults can be observed.

The final marine sedimentation conditions, implemented by the Atlantic opening, is characterized by an initial transgressive platform/slope system, represented by the Caju Group, under thermal subsidence. Thereafter, a thick transgressive/regressive system of platform/slope, represented by the Humberto de Campos Group overlays the Caju Group on unconformity. Overlying the Humberto de Campos Group, platform/slope sediments from the Pirabas Formation is deposited in a renewed expressive transgression.

Feijó (1994) identifies three depositional sequences, of transgressive-regressive 3rd order cycles. The first sequences range from the Albian until the Cenomanian (Caju Group), the second from Turonian to Oligocene (Humberto de Campos Group); and third from Miocene to the present (Pirabas Formation). These sequences are also observed in Figueiredo et al. (1983) stratigraphic chart.

According to Trosdorf Junior et al. (2007), three stratigraphic supersequences mark the tectonic-sedimentary development of the Barreirinhas Basin (Pre rift, Rift and Drift supersequences). The study section involves Drift supersequence, developed from late Albian to the present, bounded by E-W strike-slip faults (Romanche Fracture Zone) and it is represented by the Caju and Humberto de Campos Groups, and by the Pirabas Formation.

The Drift supersequence was identified through biostratigraphy and seismic analyses and is characterized by twelve 2nd order sequences. The two sequences are “post break-up” and represent the Caju Group; the seven subsequent ones represent the Humberto de Campos Group; and the last three sequences represent the Pirabas Formation (TROSDTORF JR. et al 2007).

The Caju Group is composed of limestones (bioclastic calcarenites, oncolites, and calcilutites) and shales with calcarenites, characterizing high and shallow marine environment in a platform (FEIJÓ, 1994).

The Humberto de Campos is composed of coarse clastics and high energy carbonates deposited in shallow marine environment, and low energy dark shales and fine sandstones deposited in deep marine environment in a slope to abyssal plain.

The Pirabas Formation is composed of Miocene high energy carbonates and clastics from Plio-Pleistocene.

4. Results

4.1 Seismic facies and horizons

Nine seismic facies (Table 1) and ten seismic horizons were identified and correlated in the studied area (Figure 4).

The seismic facies identified are present in all interpreted seismic lines and occurred equally from proximal (SW) to distal (NE) portions. The only facies that occurs preferably in the proximal portion is the chaotic one (SF9), close to the present shelf break.

The seismic facies 1 (subparallel) occurs in all seismic sequences, in seismic sequences 5 and 6 it is internally characterized by localized channels.

The seismic facies 8 (reflection-free) occurs in seismic sequences 1, 3, 4 and 5, always close to the top of them; whereas the seismic facies 9 (chaotic) occurs always in the proximal portion of all the seismic lines, except the seismic sequence 5 where it is absent.

All the ten seismic horizons could be easily identified and correlated in all seismic lines due to the clear changes of seismic facies (seismic textures), and by the maximum positive amplitude between them.

The seismic horizon 1 is interpreted as the upper limit of the Rift section and delineates the lower limit of the studied section, whereas the seismic horizon 10 represents the sea bottom.

Seismic horizons 1, 2, 3 and 6 are the clearest and most continuous to map since they mark the major changes in the seismic facies and the highest contrast of the amplitudes observed in the seismic lines.

Seismic horizons 4 and 9 are clear, continuous and mark apparent seismic facies patterns (textures) changes, like the transition of the reflection-free (SF8) to facies patterns with high amplitude.

All the seismic horizons above are employed as seismic sequence boundaries, whereas the seismic horizons 5, 7 and 8 limit minor facies changes.

4.2 Seismic sequences

Six seismic sequences were identified in the seismic lines (Table 2), and named stratigraphically from SS1 to SS6. They were mapped by isopach maps (Figure), which allowed the characterization of their overall geometries.

Seismic Sequence 1 (SS1). – This seismic sequence is limited by seismic horizons 1 and 2. Internally, SS1 presented low amplitude contrasts, being characterized by subparallel (SF1), disrupted (SF6) and reflection-free (SF8) seismic facies.

The geometry observed in the SS1 is tabular, “aggradational”, and is corroborated in general terms by the isopach map (Figure 5a) which suggests muddy platform paleoenvironments.

The low amplitude contrasts and the continuity of the reflectors may also indicate pelagic and hemipelagic sedimentation with similar densities.

Seismic Sequence 2 (SS2). – This seismic sequence is limited by seismic horizons 2 and 3. Internally, SS2 presented high amplitude contrasts, being characterized by subparallel (SF1), and disrupted (SF6) seismic facies.

The geometry observed in the SS2 is an apparent wedge that thickens slightly to SW, aggradational-retrogradational, which is corroborated in general terms by the isopach map (Figure 5b) that suggests transgressive mixed platform paleoenvironments.

The highest amplitude contrasts and the good continuity of the reflectors may result from the input of clastic sediments with different densities, accumulated as interbedded micro- and macroclastics.

Seismic Sequence 3 (SS3). – This seismic sequence is limited by seismic horizons 3 and 4. Internally, SS3 presented low amplitude contrasts, being characterized mostly by the reflection-free (SF8) seismic facies, and subordinately by the subparallel (SF1) seismic facies. SF8 locally show anomalously short high amplitude reflectors, which can be interpreted as intrusive igneous bodies.

The geometry observed in the SS3 is an apparent wedge, retrogradational, with a slight tendency to thin to distal areas (NE), which is corroborated in general terms by

the isopach map (Figure 5c) suggesting mainly outer platform paleoenvironments, characterized by pelagic and hemipelagic muddy deposits.

The maximum flooding surface likely occurs close to the middle of this seismic sequence, between seismic horizons 3 and 4.

Seismic Sequence 4 (SS4). – This seismic sequence is limited by seismic horizons 4 and 6, and contains the seismic horizon 5 that do not limit major facies changes. Internally, SS4 presented medium amplitude contrasts, being characterized by the association of the subparallel (SF1), contorted (SF3), lenticular (SF5), disrupted (SF6), reflection-free (SF8) and chaotic (SF9) seismic facies, with no apparent stratigraphic or paleogeographic tendency.

The geometry observed in the SS4 is an apparent wedge, progradational, with a slight tendency to thicken toward distal areas (NE), which is corroborated in general terms by the isopach map (Figure 5d) that suggests regressive upper slope paleoenvironments.

Seismic Sequence 5 (SS5). – This seismic sequence is limited by seismic horizons 6 and 9, and contains the seismic horizons 7 and 8 that do not limit major facies changes. Internally, SS5 presents low amplitude contrasts, being characterized by the association of the subparallel (SF1), horse (SF4) progradational (SF7), and reflection-free (SF8) seismic facies. The SF4 occurs close to the base of the sequence.

The geometry observed in the SS5 is an apparent wedge, progradational (sigmoidal?), with a slight tendency to thicken toward distal areas (NE), which is corroborated in general terms by the isopach map (Figure 5e) that suggests lower to upper slope paleoenvironments.

Channels observed in the SF1, may suggest the input of clastic sediments cross-cutting surrounding rocks of lower densities, revealed by low amplitude contrast, in regressive slope paleoenvironments.

Seismic Sequence 6 (SS6). – This seismic sequence is limited by seismic horizons 9 and 10. Internally, SS6 presents high amplitude contrasts, being characterized by the subparallel (SF1), hummocky (SF2), contorted (SF3), and chaotic (SF9) seismic facies.

The geometry observed in the SS6 is tabular, aggradational, with a slight tendency to thin toward distal areas (NE), which is corroborated in general terms by the isopach map (Figure 5f) that suggests transgressive mixed platform paleoenvironments.

Small channels observed in the SF1, are smaller than those in SS5, but also suggest the input of clastic sediments cross-cutting the surrounding rocks of different densities, as suggested by high amplitude contrasts. Therefore, an interbedding of macroclastics and carbonates in an outer platform may be deduced.

5. Discussions

The depositional sequences from Figueiredo *et al.* (1983) and Trosdorf Jr. *et al.* (2007) can be tentatively correlated via ages and biostratigraphy. The works aforementioned can also be tentatively correlated to the six interpreted seismic sequences here interpreted (SS1-SS6) by their transgressive-regressive behavior indicated by geometries and master seismic horizons (Figure 6).

The upper boundary of the depositional sequence K90-T40 of Figueiredo *et al.* (1983) can be correlated to the seismic horizon 9, which limits the top of the seismic sequence 5 (SS5). The expected seismic response of the lithologies which occurs in the Pirabas Formation (Figueiredo *et al.*, 1983) were ascertained in the seismic facies and amplitude contrasts found in SS6 above.

The upper limit of the depositional sequences K70, K82, and K84-86 of Trosdorf Jr. *et al.* (2007) can be correlated to the seismic horizons 2, 3, and 4, respectively, which limits the top of seismic sequences SS1 to SS3. The expected seismic response of the lithologies, which occurs in the Caju and lower Humberto de Campos groups (Trosdorf Jr. *et al.*, 2007) are ascertained in the seismic facies and amplitude contrasts found associated to this seismic sequence interval. Although the SS1 and SS2 intervals can be correlated to the sequence K70 and K82 of Trosdorf Jr. *et al.* (2007), they can be understood as part of the transpression/transtension tectonic evolution; neither geological structures nor seismic stratigraphic features could be in fact identified in the seismic lines.

Observing the seismic sequence geometries (Figure 7) and their isopach maps (Figure 5), progradational and retrogradational stratal patterns were interpreted by sequence thickening to the NE (basinward) and to SW, respectively.

The seismic sequence 1 (SS1) is tentatively correlated to the lower part of the Caju Group, equivalent to sequence K70-K80 from Figueiredo *et al.* (1983), and to the sequence K70 from Trosdorf Jr. *et al.* (2007). The sequence K70 is interpreted as shallow marine mixed platform (inner), then the SS1 can be understood as an extension of this paleo-environment, like an outer muddy platform with their respective deposits.

The seismic sequence 2 (SS2) is suggested to be correlative to the middle part of the Caju Group, equivalent to the sequence K70-K80 from Figueiredo *et al.* (1983), and to the sequence K82 from Trosdorf Jr. *et al.* (2007). The sequence K82 is interpreted as shallow marine mixed platform (inner), then the SS2 can be understood as an extension of this paleo-environment, like an outer platform with their respective deposits.

The upper part of the seismic sequence 3 (SS3) is suggested to be correlative to the lowest part of the Humberto de Campos Group, equivalent to the sequence K90-T40 from Figueiredo *et al.* (1983), and to the sequence K84-K86 from Trosdorf Jr. *et al.* (2007). The sequence K84-K86 is interpreted as the drowning of the carbonatic platform and the installation of the siliciclastic platform, then the SS3 can be understood as an extension of this paleo-environment, like an outer platform with their muddy respective deposits (pelagic and hemipelagic).

The seismic sequence successions SS1 to SS3 start with tabular aggradational geometry (SS1), then change to wedge retrogradational sequences (SS2-SS3), and represent a transgressive cycle (Figure 7) indicating outer platform deposits superimposed by lower to upper slope deposits. The maximum flooding surface of this interval (Cenomanian-Turonian) is probably inserted in SS3, of which the upper part represents the starting point of the subsequent regressive cycle.

The seismic sequence 4 (SS4) is suggested to be correlative to the lower part of the Humberto de Campos Group, equivalent to the sequence K90-T40 from Figueiredo *et al.* (1983), and to the sequences K88-K90 and K100-K120, from Trosdorf Jr. *et al.* (2007). The sequences K88-K90 and K100-K120 are interpreted as marine outer platform, then the SS4 can be understood as an extension of this paleo-environment, like an upper slope with their respective deposits.

The seismic sequence 5 (SS5) is suggested to be correlative to the middle to upper part of the Humberto de Campos Group, equivalent to the sequence K90-T40 from Figueiredo *et al.* (1983), and the sequences K130-E20, E30-E50 E60-E70 and the lower part of E80-N10 from Trosdtorf Jr. *et al.* (2007). The Trosdtorf sequences are interpreted as marine outer platform to upper slope, then the SS5 can be understood as an extension of this paleo-environment, like an upper to lower slope to with their respective deposits.

The seismic sequences SS4 and SS5 are characterized by wedge geometries that thicken toward the NE (basinward) and represent a regressive cycle (Figure 7) indicating lower to upper slope deposits.

The seismic sequence 6 (SS6) is suggested to be correlative to the Pirabas Formation, equivalent to the sequence T50-T60 from Figueiredo *et al.* (1983) and to the sequences N20-N30, N40-N50 and N60 and the upper part of the E80-N10 from Trosdtorf Jr. *et al.* (2007). The Trosdtorf sequences are interpreted as shallow marine inner carbonatic platform, then the SS6 can be understood as an extension of this paleo-environment, like outer mixed platform with their respective deposits.

Seismic sequence 6 (SS6) is represented by a wedge retrogradational geometry that thickens to SW in a transgressive cycle (Figure 7), indicating mixed outer platform deposits.

Summarizing the present work is represented by transgressive (SS1-SS3) to regressive (SS4-SS5) and finally to transgressive (SS6) cycles which apparently corroborate with Trosdtorf Jr. *et al.* (2007).

6. Conclusions

Despite the absence of biostratigraphic and lithological data, the identification and mapping of the seismic sequences through its seismic facies, geometries and transgressive-regressive behavior allowed the elaboration of a seismic stratigraphic model, in which the limiting seismic horizons could be correlated with the depositional sequences present in the literature. Thus, it seems possible to extend the seismic correlations of the studied area (deep water) to those existing onshore and in shallow water in Barreirinhas basin.

Through the good correlation between the seismic sequences, showed as a result of the present work, and the sequences from the literature, it might be concluded that the studied interval have a high exploratory potential analogous to the African equatorial margin in similar plays, where recent discoveries were made. Thus, the Barreirinhas basin keeps extensive similarities, mainly with Tano basin in Ghana, where the Jubilee field (Cretaceous turbidites) was discovered.

This present work contributes directly with the understanding of the sedimentary tectonic evolution and petroleum system in the Barreirinhas basin, leading to the possible location of hydrocarbon accumulations, for example, turbidite sandstones of the Upper Cretaceous that corresponding to Travosas formation, similar to the oil interval in the Jubilee Field.

The seismic sequence 3 (SS3) ends up becoming the most representative seismic sequence towards to correlate with the African margin, since the maximum flooding surface (SIM) is placed on it. In this work the MFS dates to Cenomanian/Turonian, as the well-known global event. This seismic sequence contains probably at its base the main source rocks and at the top the possible main reservoirs that remain into SS4.

7. Acknowledgements

The authors thank the WesternGeco Company for providing the seismic data used in the present study; extend thanks also to Ouro Preto Oil & Gas for supporting this work and the anonymous reviewers for their insight.

8. References

- Azevedo, R.P. 1986. Interpretação Geodinâmica da Evolução Mesozóica da Bacia de Barreirinhas. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 34, Goiânia, 1986. Anais SBG, São Paulo, p.1115 - 1130.
- Basile, C.; Mascle, J. & Guiraud, R. 2005 *Phanerozoic geological evolution of the Equatorial Atlantic domain. Journal of African Earth Sciences* 43: 275 – 282.
- Catuneanu, O., 2006. *Principles of Sequence Stratigraphy*, 375 p.
- Catuneanu, O.; ET AL. 2009. *Towards the standardization of sequence stratigraphy. Earth-Science Reviews*, 92: 1-33.
- Catuneanu, O.; Galloway, W.E.; et al. 2011. *Sequence Stratigraphy: Methodology and Nomenclature. Newsletters on Stratigraphy*, Stuttgart. 44 (3): 173–245.
- Christie-Blick, N.; Driscoll, N.W. 1995 *Sequence Stratigraphy. Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 1995. 23: 451-478.
- Chevallier, J. ET AL. 2006 *Seismic Sequence Stratigraphy and Tectonic Evolution of Southern Hydrate Ridge. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results Volume 204. Web publication: 2 November 2006 Ms 204SR-121.*
- Feijó, F.J. 1994 Bacia de Barreirinhas. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, Rio de Janeiro, 8 (1): 103-109.
- Galloway, W.E. 1998. *Siliciclastic Slope and Base-of-Slope Depositional Systems: Component Facies, Stratigraphic Architecture, and Classification. AAPG Bulletin*, 82 (4): 569–595.
- Gasperini, L.; et al. 2001 Lower Cretaceous to Eocene sedimentary transverse ridge at the Romanche Fracture Zone and the opening of the equatorial Atlantic. *Marine Geology* 176: 101-119.
- Jewell G., 2011, *Exploration of the Transform Margin of West Africa: Discovery Thinking – Jubilee and Beyond & Exploration of the Tano Basin and Discovery of the Jubilee Field, Ghana: A New Deepwater Game -Changing Hydrocarbon Play in the Transform Margin of WestAfrica In: AAPG Annual Convention and Exhibition, Houston, Texas, USA, June 27.*

Lima, H.P.; Rossetti, E.L.; Penna Filho, W. Modelo das acumulações de Petróleo no campo de São João – Bacia de Barreirinhas. *In: Simpósio de Geologia da Amazônia*, 2, Belém, 1985. Anais SBG, São Paulo, p. 239-253.

Martinsen, O.J. & Helland-Hansen, W. 1994 *Sequence Stratigraphy and Facies Model of an incised Valley Fill: The Gironde Estuary, France – Discussion*. *Journal of Sedimentary Research*, B64 (1): 78-80.

Matos, R. M. D. 2000 *Tectonic evolution of the Equatorial South Atlantic*. *In: Mohriak W., Taiwani M. (eds) Atlantic rifts and continental margins*. *Geophys Monography* 115, American Geophysical Union, pp. 331-354.

Mitchum, R. M. Jr., Vail, P. R. and Thompson, S. III. 1977. *The depositional sequence as a basic unit for stratigraphic analysis*. *In Payton, C. E. ed., Seismic Stratigraphy – Applications to hydrocarbon exploration: American Association of Petroleum Geologists Memoir* 26, p. 53-62.

Mohriak, W. U. 2003 Bacias Sedimentares da Margem Continental Brasileira. *In: Bizzi, L.A.; Schobbenhaus, C.; Vidotti, R.M.; & Gonçalves, J.H. (eds.) Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*. CPRM, Brasília, p.87-94 and p.132-134.

Neal, J.; Risch, D. & Vail, P. 1993. *Sequence Stratigraphy – A Global Theory for Local Success*. *Schlumberger Oilfield Rev.* 5 (1): 51-62.

Oliveira, M.J.R., Zalán, P.V., Caldeira, J.L., Tanaka, A., Santarém, P., Trosdorf Jr., I., and Moraes, A., 2012. *Linked extensional-compressional tectonics in gravitational systems in the Equatorial Margin of Brazil*, in D. Gao, ed., *Tectonics and Sedimentation: Implications for Petroleum Systems: AAPG Memoir* 100, p.159-178.

Pamplona, H.R.P. Litoestratigrafia da bacia Cretácea de Barreirinhas, 1969. *Boletim Técnico da Petrobrás*, Rio de Janeiro, 12 (3): 261-290.

Péron-Pinvidic, G.; Manatschal, G. 2009. *The final rifting evolution at deep magma-poor passive margins from Iberia-Newfoundland: a new point of view*. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)* 98: 1581–1597.

Trosdorf Junior, I.; Zalán, P. V.; Figueiredo, J. J. P. & Soares, E. F. 2007. Bacia de Barreirinhas. *Boletim de Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro, 15 (2): 331-339.

Rossetti, D.F. & Truckenbrodt, W. 1992. Sedimentologia e Diagênese dos Arenitos da Formação Barro Duro (Albiano), Área oeste da Bacia de Barreirinhas. *B. Geoci. Petrobrás*, Rio de Janeiro, v. 6 (3/4): 201-221.

Sangree, J.B., and J.M. Windmier, *Seismic stratigraphy and global changes in sea level, 9, Seismic interpretation of depositional facies, in Seismic Stratigraphy: Applications to Hydrocarbon Exploration, edited by C.E. Payton, pp. 165-184, Am. Assoc. Pet. Geol., Tulsa, Okla., 1977.*

Severiano Ribeiro, Hélio Jorge P. (Org.). 2001. Estratigrafia de Sequências: Fundamentos e Aplicações. Rio Grande do Sul. Unisinos. 428p

Soares Júnior, A.V.; Costa, J.B.S. & Hasui, Y. 2008 Evolução da Margem Atlântica Equatorial do Brasil: Três Fases Distensivas. *São Paulo, UNESP, Geociências*, 27 (4): 427-437.

Vail, P. R., 1987. *Seismic Stratigraphy Interpretation Procedure, in Bally, A.W. (ed.), Atlas of seismic stratigraphy: AAPG Studies in Geology*, 27 (1): 1-10.

Veeken, P.C.H., 2007. *Seismic Stratigraphy, Basin Analysis and Reservoir Characterization*. (1.ed.), Volume 37, 509p.

Walker, R.G. 1978. *Deep-Water Sandstone Facies and Ancient Submarine Fans: Models for Exploration for Stratigraphic Traps. The American Association of Petroleum Geologists* V. 6, No. 6, p. 932-966.

Williams, G.D. 1993. *Tectonics and seismic sequence stratigraphy: an introduction, in G.D. Williams & A. Dobb (Eds), Tectonics and Seismic Sequence Stratigraphy. Geological Society Special Publication No. 71, London, pp.1-13.*

Zalán, P.V., Palagi, P.R., Severino, M.C.G., Martins, F.A.L., Ferreira, E.P., 2004. Bacias Sedimentares Brasileiras – Bacia de Barreirinhas, Phoenix, Fundação Paleontológica Phoenix, Ano 6, Número 64, Abril, Aracaju, p.1-6.

Zalán, P.V., 2012. Bacias sedimentares da margem equatorial, in Hasui, Y., Dal Ré Carneiro, C., Almeida, F.F.M., Bartorelli, A., eds., *Geologia do Brasil*. Beca, São Paulo, p.497-501.

Figures

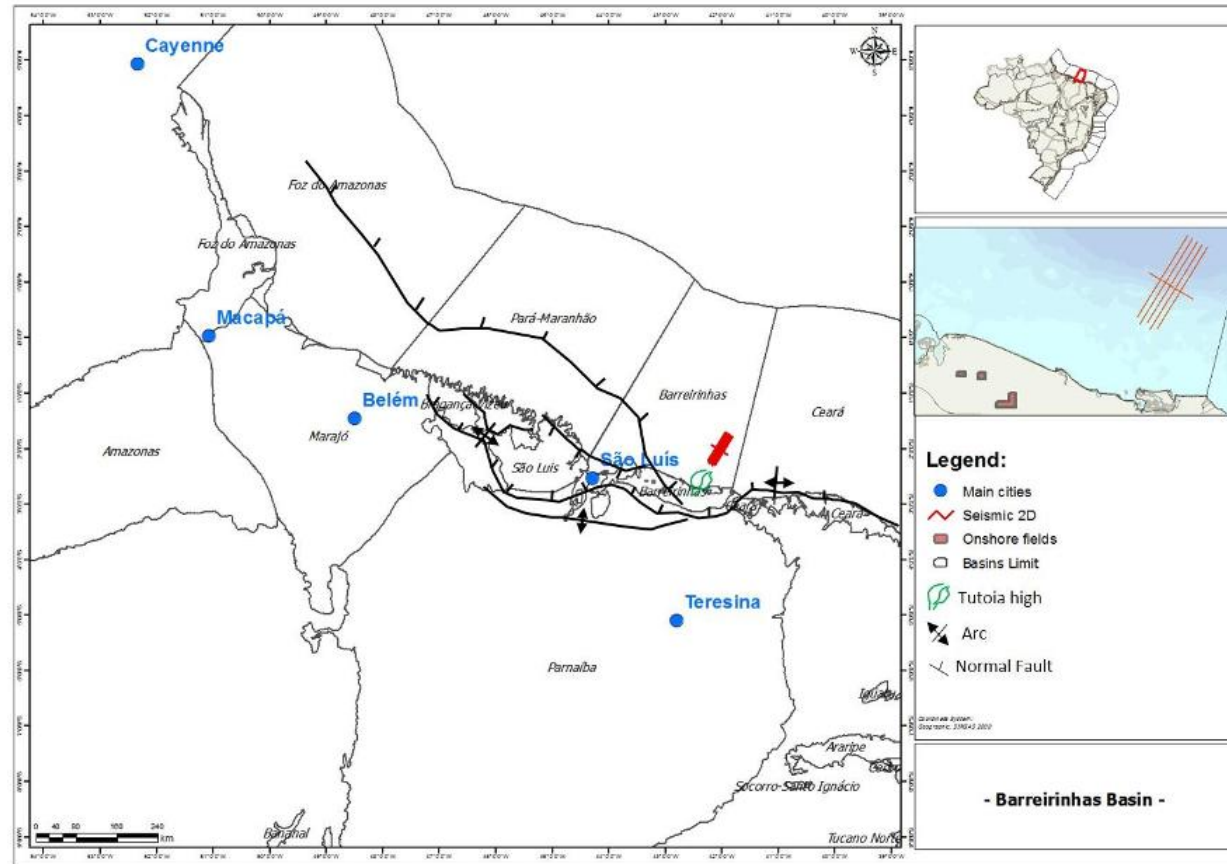


Figure 1. Barreirinhas Basin location map. This map shows the main structures that limits the basin and also the six 2D seismic lines used in the present work. In the left it is possible to observe a zoom of the studied area (red lines).

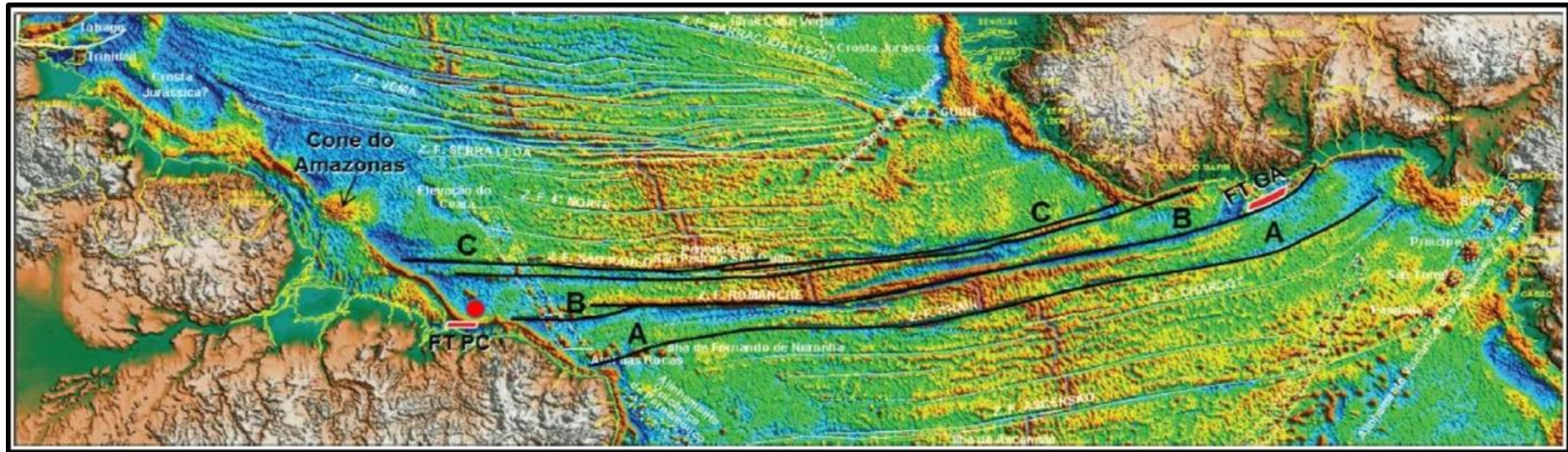


Figure 2. Free-air satellite map in the Equatorial Atlantic Ocean. The black lines highlight the oceanic fractures zones (A – Chain, B - Romanche and C – Saint Paul). The zone B is the Romanche Zone that is contained in the context of the present study and the red spot represents the Barreirinhas Basin.

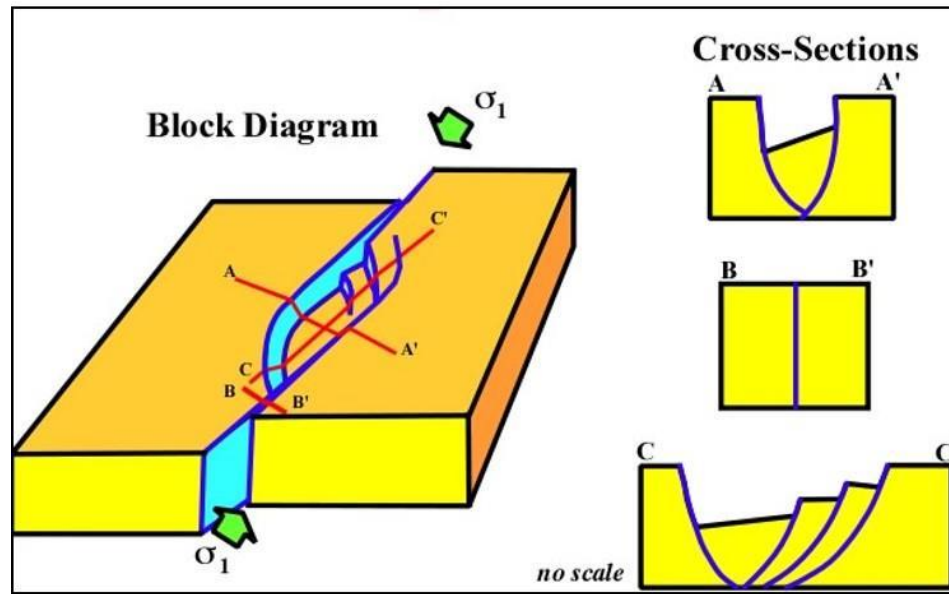


Figure 3. Barreirinhas Basin location correlated to the West Africa main discoveries on the right map and in the left the block diagram explaining the strike-slip basin opening (rhombic basin).

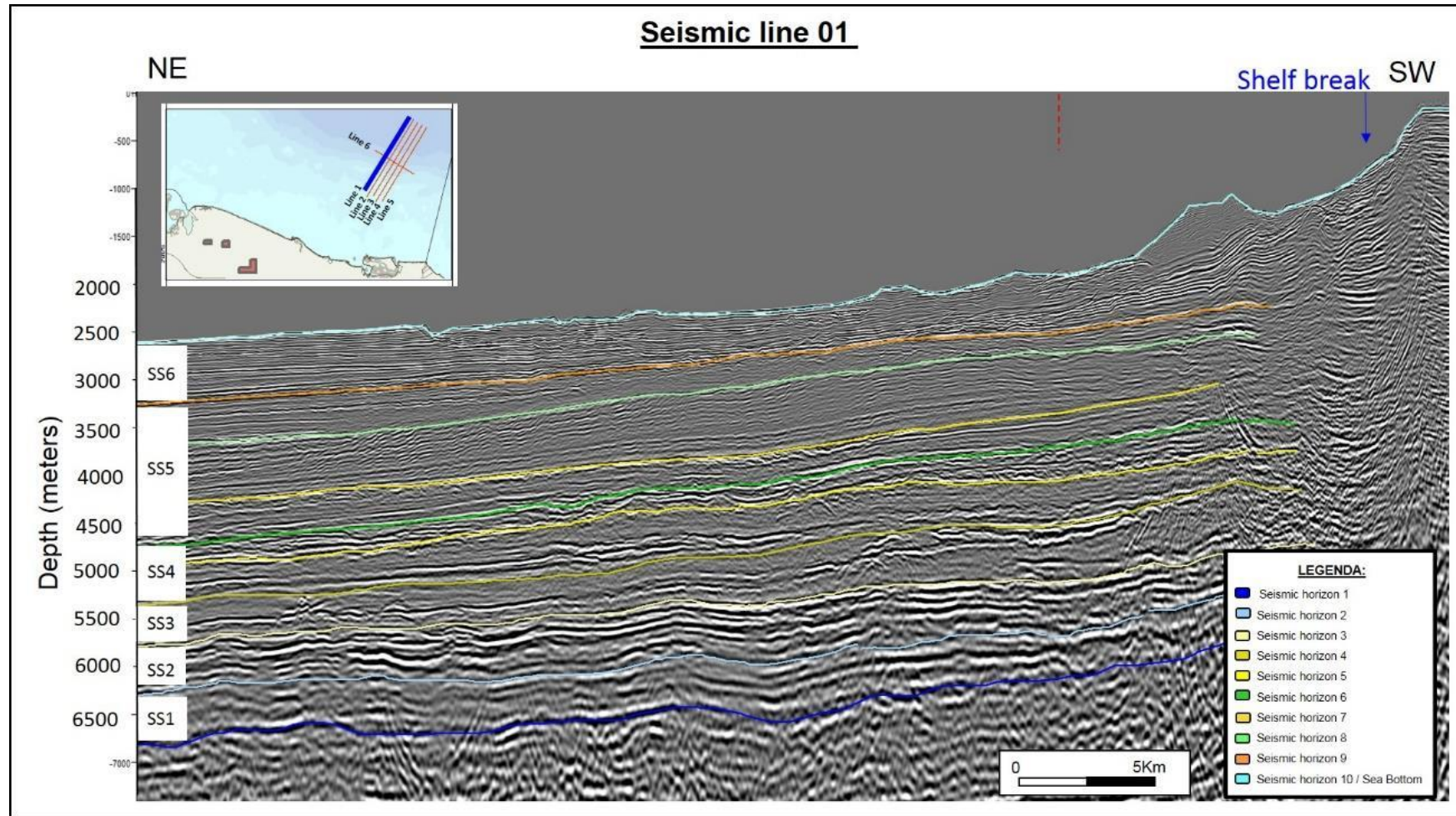


Figure 4a. Offshore dip seismic line (seismic line 1), NE-SW direction, showing the ten seismic horizons mapped and the six seismic sequences.

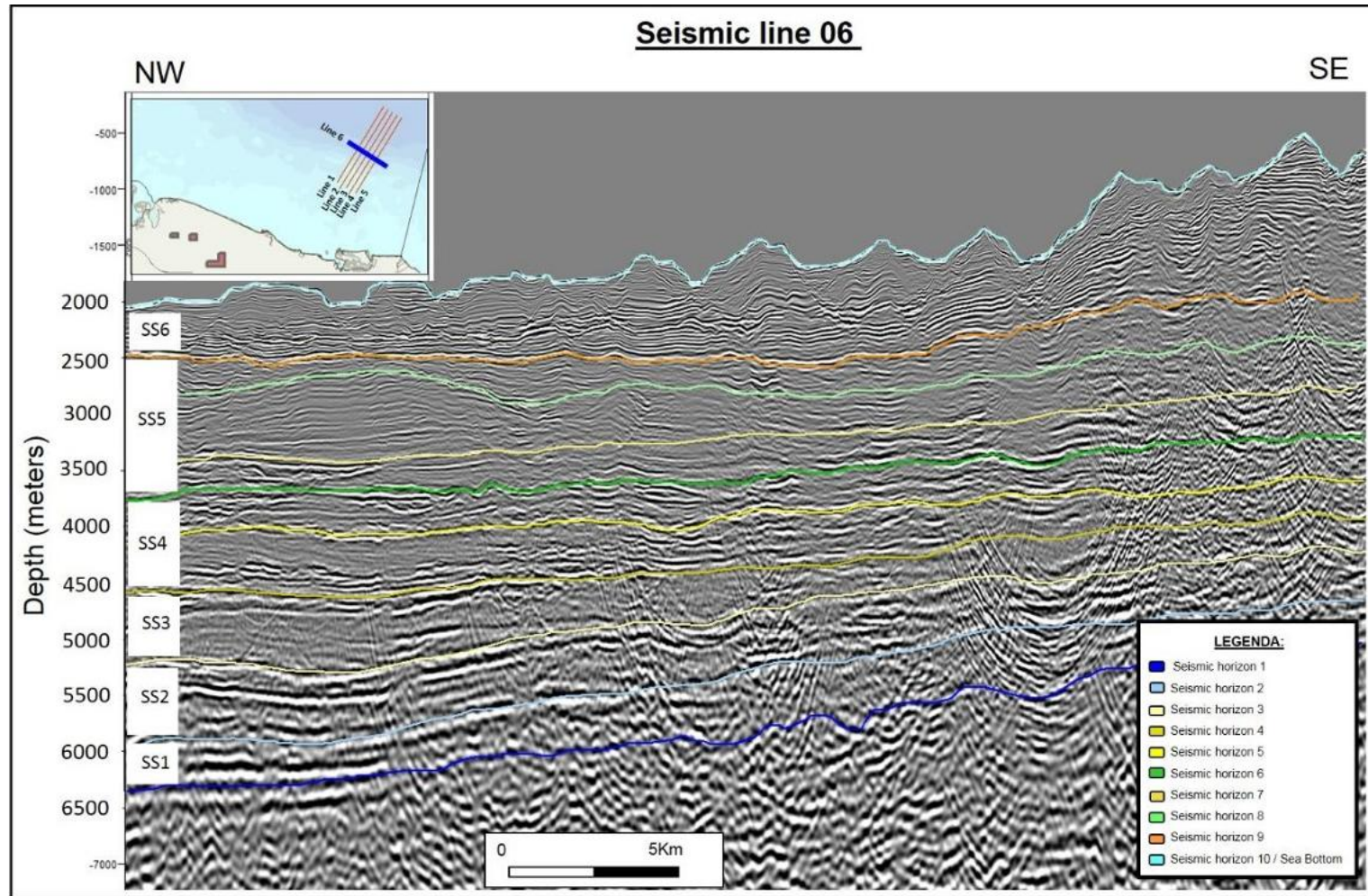


Figure 4b. Offshore strike seismic line (seismic line 6), NW-SE direction, showing the ten seismic horizons mapped and the six seismic sequences..

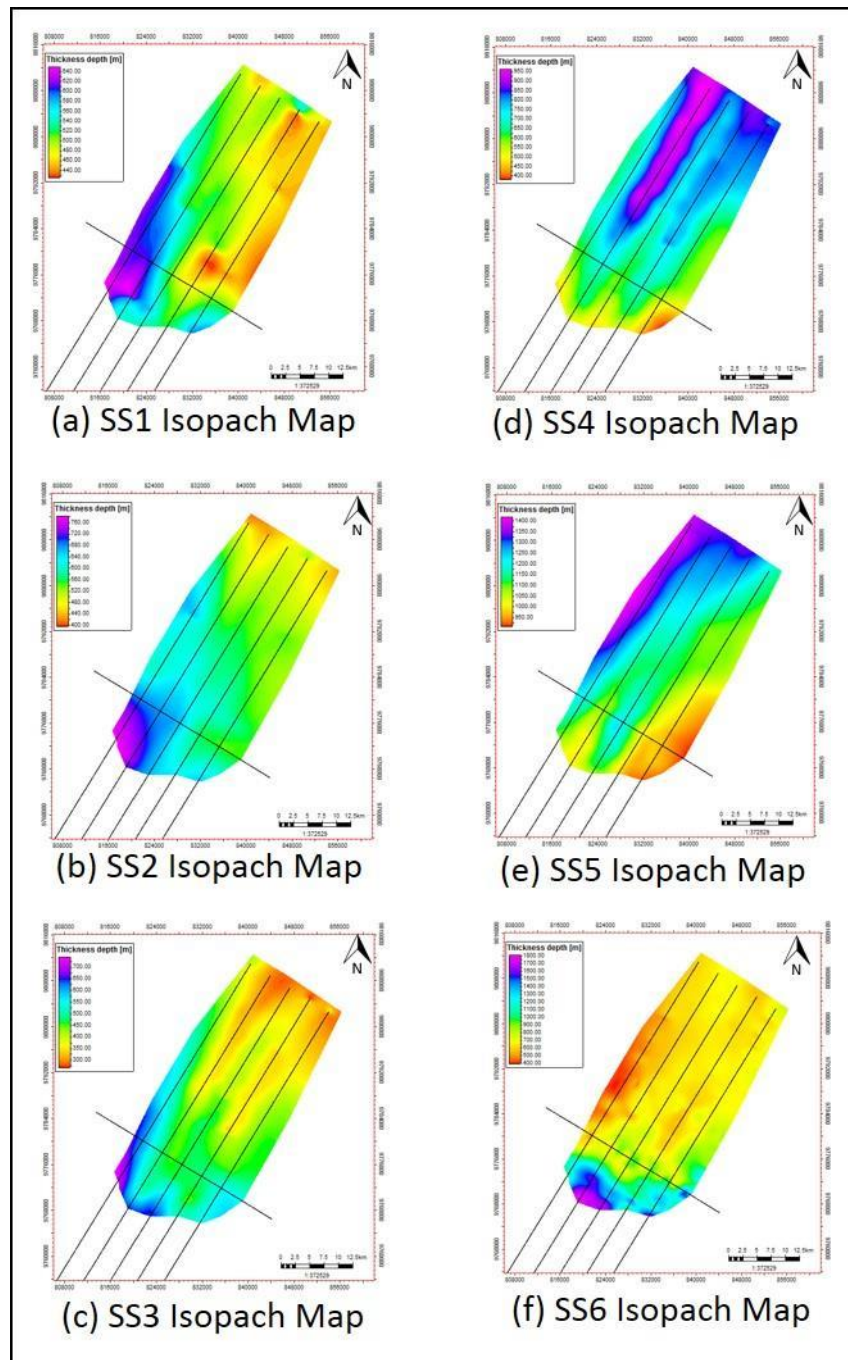


Figure 5. Isopach maps of the seismic sequences (SS1-SS6), indicating the retrogradational and progradational cycles. Observe that the hot colors (red) represent the thin thickness and the cold colors (blue) represent the thick thickness.

Geochronology	Lithostratigraphy	Figueiredo et al. (1983)		Trosdorf Jr. et al. (2007)		This Study
		Depositional Sequences (2 nd order) SW NE	Tectonic Evolution	Depositional Sequences (3 rd order) SW NE	Tectonic Evolution	
PLEISTOCENE						
NEOGENE	PLIOCENE			N60		
	MIOCENE			N40-N50		SS6
		T50 – T60		N20-N30		
PALEOGENE	OLIGOCENE			E80-N10		
	EOCENE			E60-E70		
				E30-E50		SS5
	PALEOCENE			K130-E20		
CRETACEOUS	MAASTRICHTIAN			K100-K120		SS4
	CAMPANIAN			K88-K90		
	SANTONIAN			K84-K86		SS3
	CONIACIAN			K82		SS2
	TURONIAN			K70		SS1
	CENOMANIAN					
	ALBIAN					
	Humberto de Campos Group	K90 – T40	PASSIVE MARGIN		DRIFT	
	Caju Group	K70 – K80			TRANSPRESSION/ TRENSTENSION	

Figure 6. Schematic stratigraphic chart correlating the depositional sequences (2nd order) of Figueiredo et al. (1983) to Trosdorf et al. (2007) (3rd order) and then with the seismic sequences of the present study.

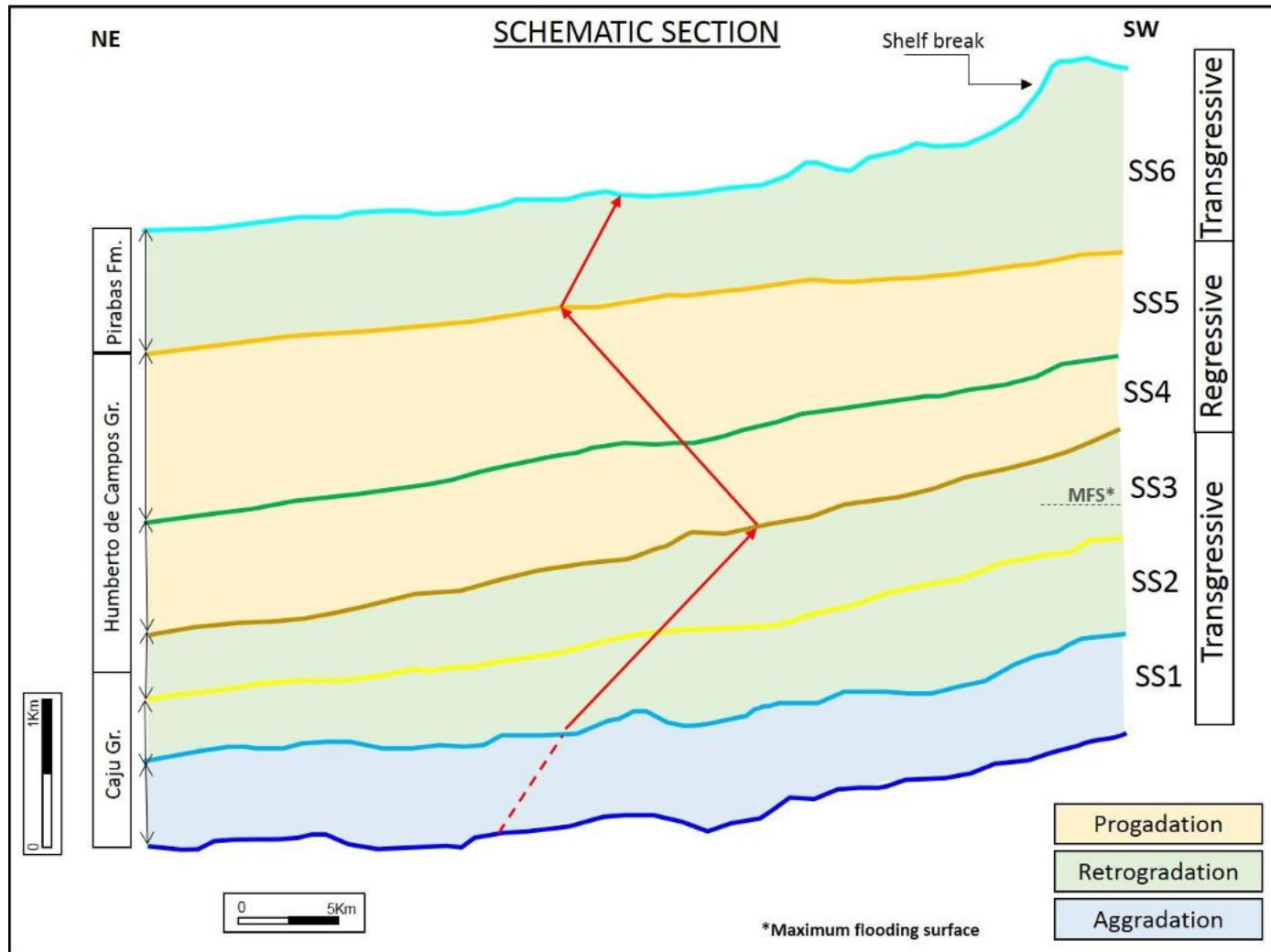


Figure 7. Schematic section that shows the seismic sequences (SS1-SS6) and their respective regressive-transgressive cycle.

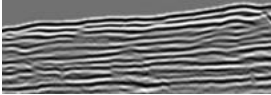
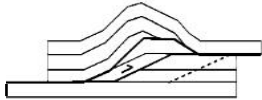
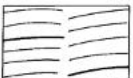
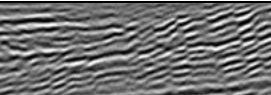
Seismic Facies			Mitchum 1977 Seismic facies	Depositional Significance
SF1		Subparallel		Uniform depositional rates on a platform
SF2		Hummocky		Nested channels
SF3		Contorted		Slump deposits
SF4		Horse		Slump / thrust deposits
SF5		Lenticular		Carbonatic mounds (?)
SF6		Disrupted		Non-uniform depositional rates on a platform
SF7		Progradational		Regressive Paralic systems
SF8		Reflection - free		Pelagic and Hemipelagic deposits
SF9		Chaotic		Slump/disruption deposits

Table 1. Seismic facies table showing the patterns found in the seismic lines with their identification codes, the known pattern of Mitchum (1977) and the succinct depositional interpretation.

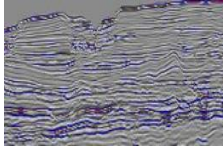
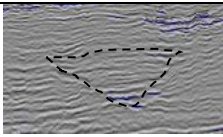
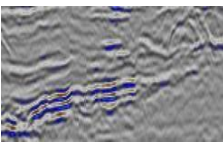
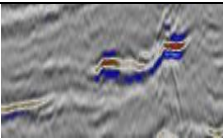
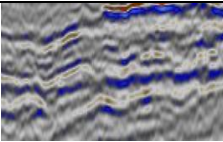
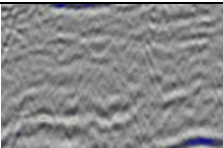
Sesmic Sequence		Seismic facies	Seismic characterists	Geometry	Interpretation
SS6		SF1 SF2 SF3 SF9	High amplitude and impedance contrast	Tabular	Aggradational to Retrogradational
SS5		SF1 SF7 SF8	Low amplitude and impedance contrast	Wedge to SW	Progradational
SS4		SF1 SF3 SF5 SF6 SF8 SF9	Medium amplitude and impedance contrast	Wedge to SW	Progradational
SS3		SF1 SF8	Low amplitude and impedance contrast	Wedge to NE	Retrogradational
SS2		SF1 SF6	High amplitude and impedance contrast	Wedge to NE	Retrogradational
SS1		SF1 SF6 SF8	Low amplitude and impedance contrast	Tabular	Aggradational

Table 2. Seismic sequence table showing the patterns found in their intervals of the seismic lines with their identification.

6. DISCUSSÕES

As sequências deposicionais caracterizadas por Figueiredo *et al.* (1983) e Trosdorf Jr *et al.* (2007) podem ser correlacionadas através das idades e bioestratigrafia. Os trabalhos mencionados podem ser também correlacionados com as sismossequências (SS1-SS6) interpretadas neste trabalho, através de seus comportamentos transgressivos-regressivos, indicado pelas geometrias dos sismo-horizontes (**Figura 27**).

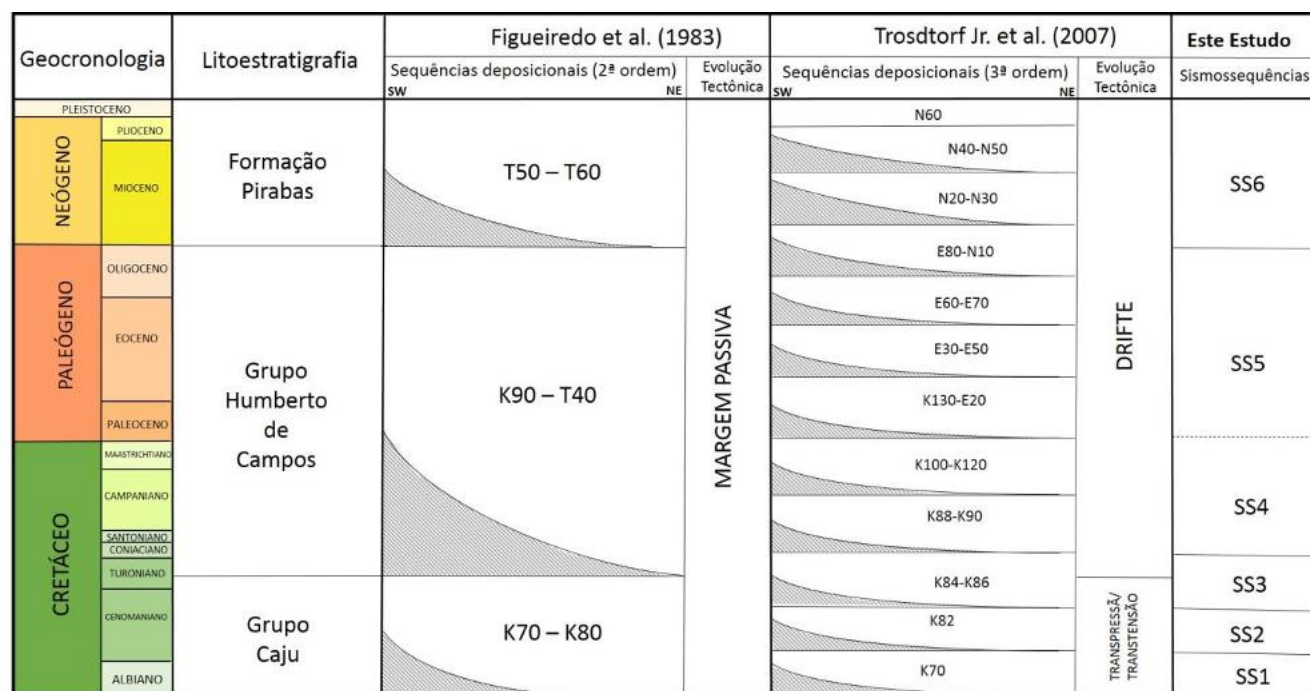


Figura 27. Diagrama estratigráfico esquemático que mostra a correlação das sequências deposicionais de 2ª ordem de Figueiredo *et al.* (1983) e as de 3ª ordem de Trosdorf *et al.* (2007) e por último a correlação de ambas com as sismossequências interpretadas no presente estudo.

O limite superior da sequência deposicional K90-T40 de Figueiredo *et al.* (1983) pode ser correlacionado com o sismo-horizonte 9, que limita superiormente a sismossequência 5 (SS5). A resposta sísmica esperada das litologias que ocorrem na Formação Pirabas (Figueiredo *et al.*, 1983) são comparadas com as sismofácies e com os contrastes de amplitude observados na SS6.

O limite superior das sequências deposicionais K70, K82 e K84-86 de Trosdtorf Jr *et al.* (2007) pode ser correlacionada com os sismo-horizontes 2, 3 e 4, respectivamente, que limitam as sismossequências SS1 a SS3. A resposta sísmica esperada das litologias que ocorrem na Formação Caju e na porção inferior do Grupo Humberto de Campos (Trosdtorf Jr *et al.* 2007) é comparada com as sismofácies e com as respostas de amplitudes observadas nestas sismossequências. Embora os intervalos referentes à SS1 e SS2 possam ser correlacionados as sequências deposicionais K70 e K82 de Trosdtorf Jr *et al.* (2007) que, por sua vez, é entendido como parte de uma evolução tectônica transpressional/transtensional, estes não puderam ser identificadas nas linhas sísmicas nem nas estruturas geológicas ou nas características sismoestratigráficas dessa tectônica.

Observando a geometria das sismossequências (**Figura 28**) e seus mapas de isópacas (**Figura 29**), padrões estratais pro- e retrogradacional são interpretados em função do espessamento da sequência para NE (em direção ao depocentro da bacia) ou para SW, respectivamente.

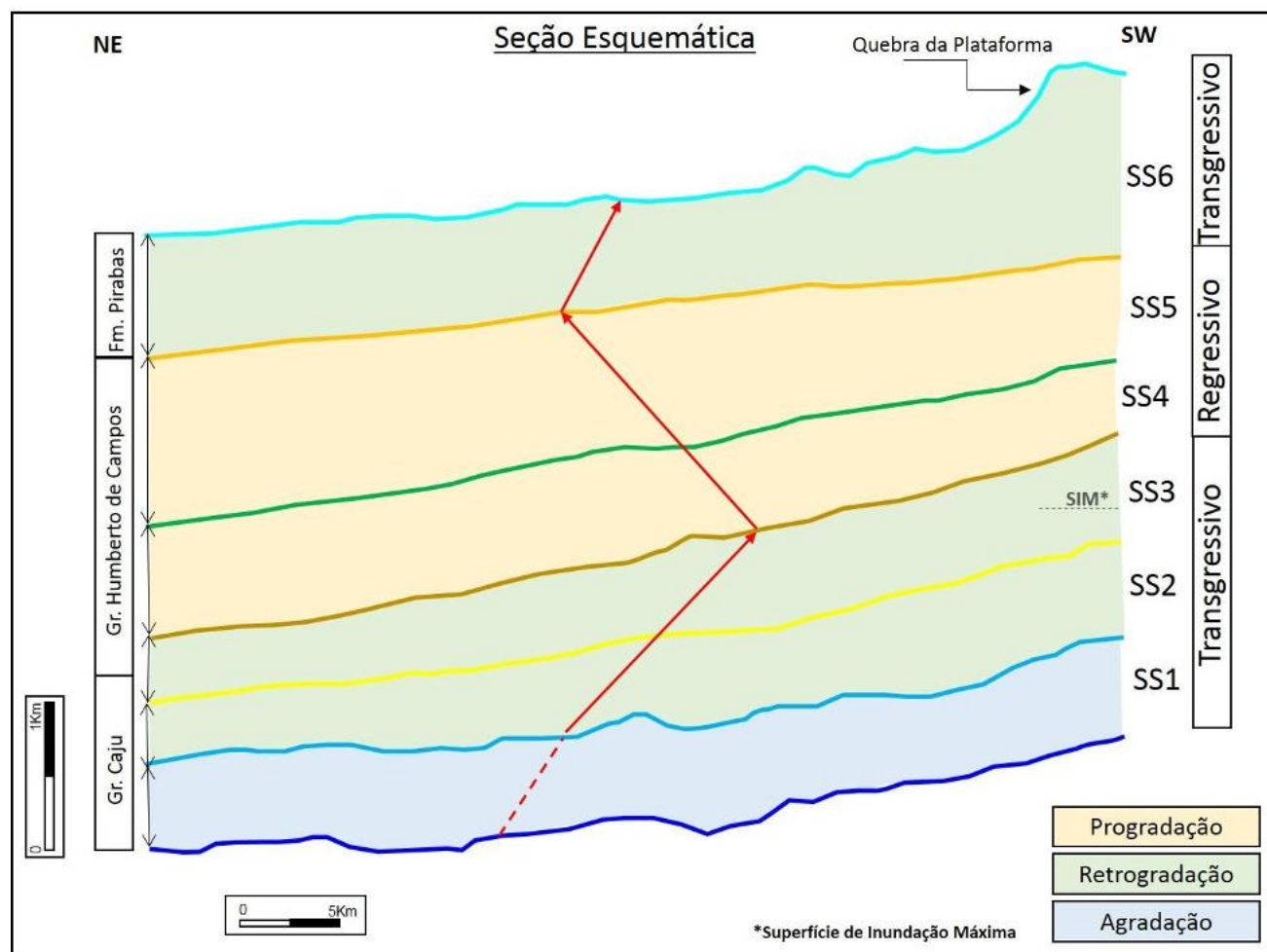


Figura 28. Seção esquemática evidenciando as sismossequências (SS1-SS6) interpretadas e seus ciclos regressivo-transgressivos.

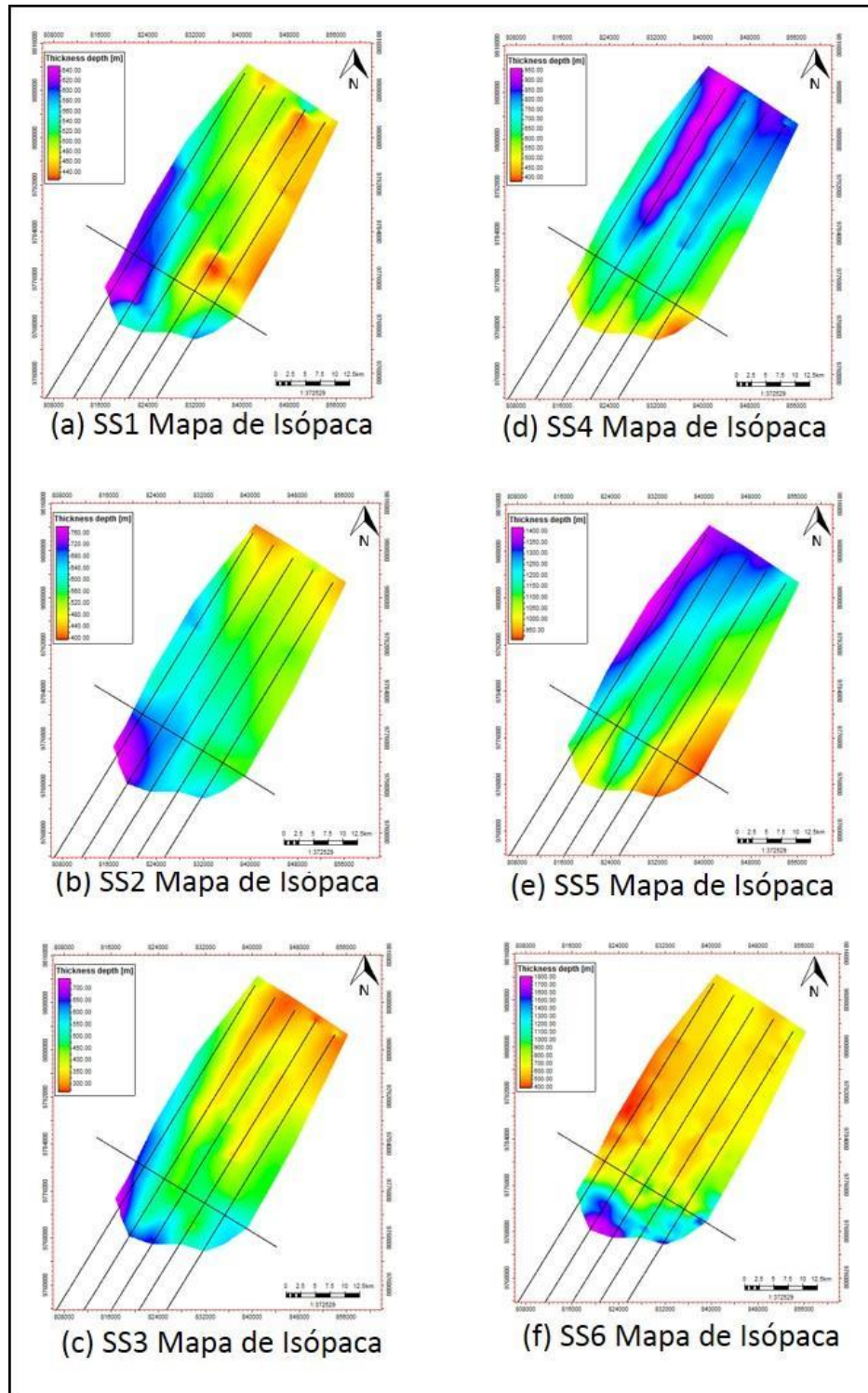


Figura 29. Mapas de Isópacas das sismossequências (SS1-SS6), mostrando as geometrias das mesmas e indicando os ciclos retrogradacionais e progradacionais. Observar que as cores quentes (vermelho) representam as seções menos espessas e as cores frias (azul) representam as seções mais espessas.

A sismossequência 1 (SS1) é, provavelmente, correlacionável a porção inferior do Grupo Caju, equivalendo as sequências K70-K80 de Figueiredo et al. (1983), e a sequência K70 de Trosdtorf Jr et al. (2007). A sequência K70 é interpretada como resultado de um ambiente marinho plataformaraso, logo a SS1 pode ser entendida sendo a extensão deste paleoambiente, uma plataforma externa lamosa e seus respectivos depósitos.

Sugere-se que a sismossequência 2 (SS2) seja correlacionada à porção média do Grupo Caju, equivalente a sequência K70-K80 de Figueiredo et al. (1983), e a sequência K83 de Trosdtorf Jr et al. (2007). A sequência K82 é interpretada como resultado de um ambiente plataformaraso marinho, logo a SS2 pode ser entendida sendo uma extensão deste paleoambiente, assim como uma plataforma externa e seus respectivos depósitos.

A porção superior da sismossequência 3 (SS3) é sugerida como correlativa a porção inferior do Grupo Humberto de Campos, equivalente a sequência K90-T40 de Figueiredo et al. (1983), e a sequência K84-K86 de Trosdtorf Jr et al. (2007). A sequência K84-K86 é interpretada sendo o resultado do afogamento de uma plataforma carbonática e instalação de uma plataforma siliciclástica, logo a SS3 pode ser entendida como uma extensão deste paleoambiente, por exemplo uma plataforma externa lamosa e seus respectivos depósitos (pelágicos e hemipelágicos).

A sucessão de sismossequências SS1 a SS3 começa com uma geometria tabular agradacional (SS1) (**Figura 30**), que alterna para uma cunha retrogradacional (SS2-SS3), e essa sucessão representa um ciclo transgressivo indicando depósitos de uma plataforma externa que são sobrepostos por depósitos de talude inferior e superior. A superfície máxima de inundação desse intervalo (Cenomaniano-Turoniano) está provavelmente inserida na SS3, onde a parte superior representa o ponto inicial de um subsequente ciclo transgressivo.

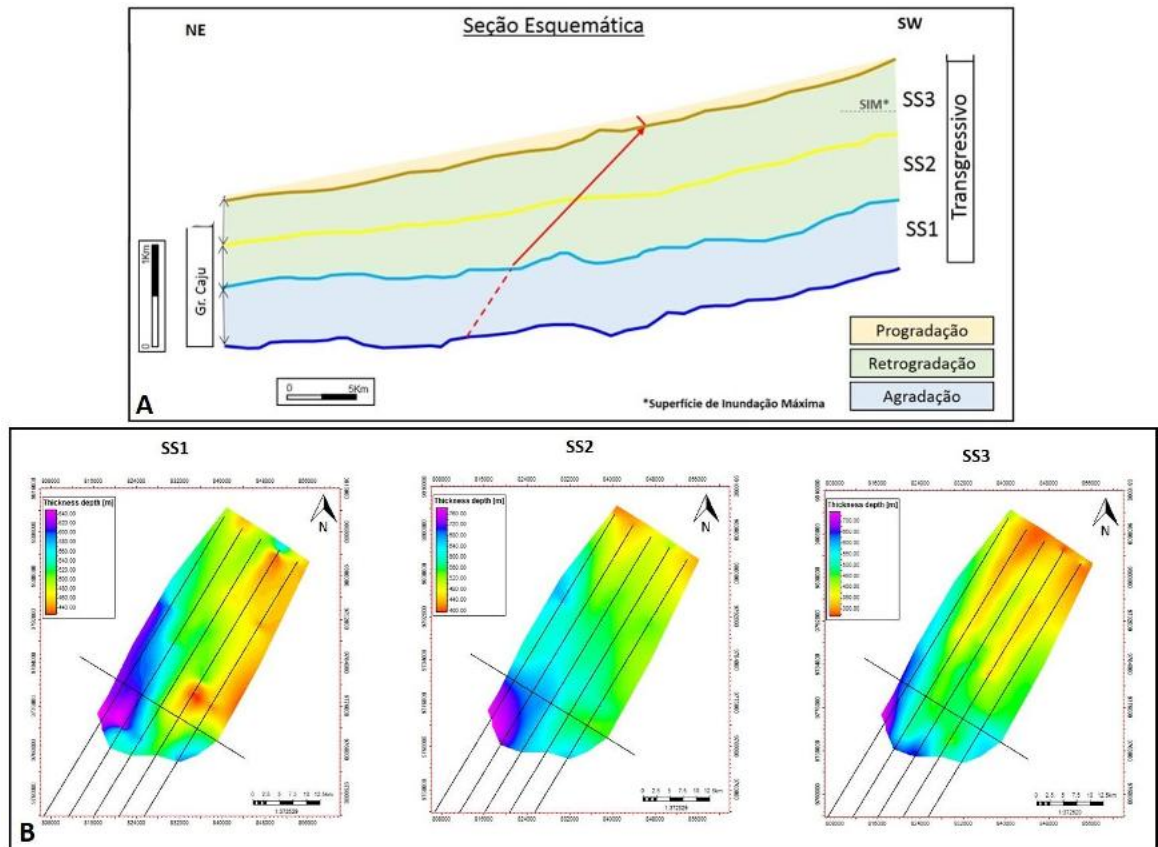


Figura 30. Ciclo Transgressivo inicial representado pelas sismossequência 1, 2 e 3, limitado pelos sismo-horizontes 1 e 4, na sessão estudada. Observar a superfície de inundação máxima (SIM) na SS3. B. Mapa de Isópaca da sismossequências 1, 2 e 3 corroborando a geometria agradacional da SS1 e retrogradacional da SS2 e SS3.

A sismossequência 4 (SS4) é provavelmente correlacionável a porção inferior do Grupo Humberto de Campos, equivalente a sequência K90-T40 de Figueiredo et al. (1983), e as sequências K88-K90 e K100-K120 de Trosdorf Jr et al. (2007). As sequências K88-K90 e K100-K120 são interpretadas como resultado de uma plataforma externa, logo a SS4 pode ser uma extensão deste paleoambiente, como um talude superior e seus respectivos depósitos.

A sismossequência 5 (SS5) é sugerida como correlativa a porção média a superior do Grupo Humberto de Campos, equivalente a sequência K90-T40 de Figueiredo et al. (1983), e as sequências K130-E20, E30-E50, E60-E70 e a parte inferior E80-N10 de Trosdorf Jr et al. (2007). As sequências de Trosdorf et al. (2007) são interpretadas como resultado de uma plataforma externa para um talude superior, logo a SS5 pode ser um talude superior para inferior e seus respectivos depósitos.

As sismossequências SS4 e SS5 são caracterizadas por geometrias de cunha que espessa para NE (em direção ao depocentro da bacia) e representa um ciclo regressivo (**Figura 31**) indicando depósitos de talude inferior e superior.

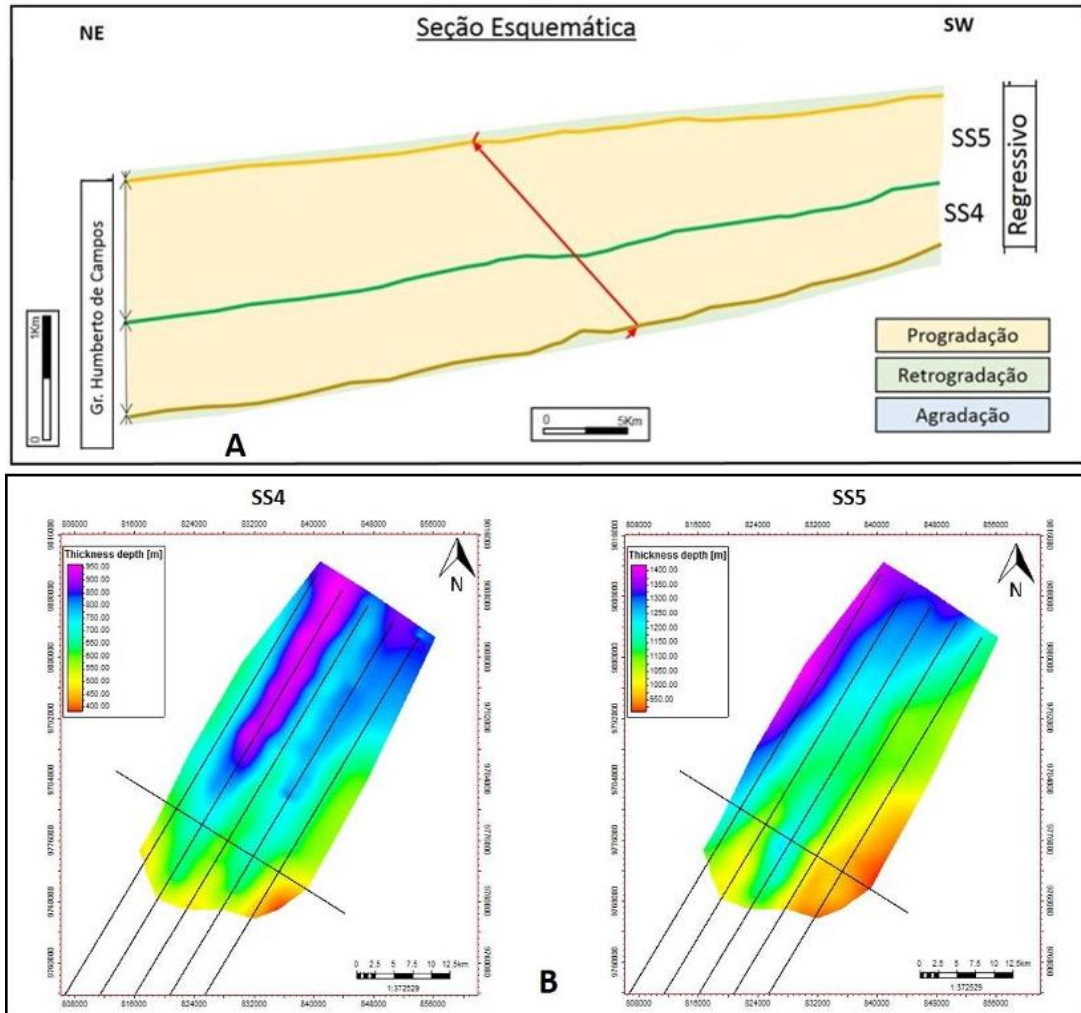


Figura 31. A. Ciclo Regressivo representado pelas sismossequência 4 e 5, limitado pelos sismo-horizontes 4 e 9, na sessão estudada. B. Mapa de Isópaca da sismossequências 4 e 5 corroborando a geometria progradacional.

A sismossequência 6 (SS6) é sugerida como correlativa a Formação Pirabas, equivalente a sequência T50-T60 de Figueiredo et al. (1983), e as sequências N20-N30, N40-N50, N60 e a parte superior da E80-N10 de Trosdorf Jr et al. (2007). As sequências de Trosdorf et al. (2007) são interpretadas sendo um ambiente carbonático marinho plataformal raso, logo a SS6 pode ser entendida como uma plataforma externa mista e seus respectivos depósitos.

A sismossequência 6 (SS6) é representada por uma geometria de cunha retrogradacional que espessa para SW em um ciclo transgressivo (**Figura 32**), indicando depósitos de plataforma externa.

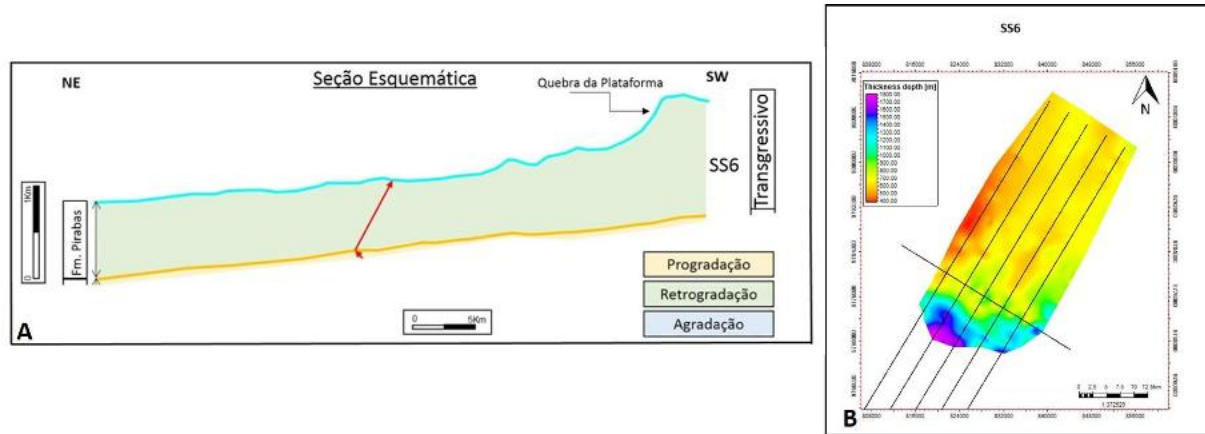


Figura 32. A. Ciclo Transgressivo final representado pela sismossequência 6, limitado pelos sismo-horizontes 9 e 10, na sessão estudada. B. Mapa de Isópaca da sismossequência 6 corroborando a geometria retrogradacional.

Resumindo o presente trabalho é representado pela alternância de comportamentos, iniciando por um ciclo transgressivo (SS1-SS3), que alterna para um regressivo (SS4-SS5) e termina com um transgressivo (SS6), que aparentemente é corroborado pelo trabalho de Trostdorf et al. (2007).

7. CONCLUSÕES

A despeito da ausência de dados bioestratigráficos e litológicos, a identificação e mapeamento das sismossequências através de suas sismofácies, geometrias e comportamentos transgressivos-regressivos, permitiram a elaboração de um modelo sismoestratigráfico em que os sismo-horizontes limitantes puderam ser correlacionados às sequências deposicionais estabelecidas na literatura. Desta forma, parece ser possível estender as correlações sísmicas da área de estudo (águas profundas) com aquelas existentes em águas rasas e em terra na Bacia de Barreirinhas.

Através da boa correlação entre as sismossequências apresentadas como resultado do presente trabalho, e as sequências da literatura, pode-se concluir que o intervalo estudado possui grande potencial exploratório, análogo à margem equatorial africana, onde recentes descobertas foram feitas. Pode-se afirmar que a bacia de Barreirinhas guarda grandes similaridades principalmente com a bacia de Tano em Gana, onde foi feita a descoberta do Campo de Jubilee.

Sendo assim pode-se afirmar que a bacia de Barreirinhas apresenta uma grande similaridade, principalmente com a bacia de Tano em Gana (Campo de Jubilee) que contém grandes descobertas, fazendo com que a bacia possua um potencial exploratório em plays análogos (turbiditos cretáceos).

O presente trabalho colabora diretamente no entendimento da evolução tectonossedimentar e do sistema petrolífero na bacia de Barreirinhas, apontando a possível localização de acumulações de hidrocarbonetos como, por exemplo, arenitos turbidíticos do Cretáceo Superior que correspondentes à Formação Travosas, análogo ao intervalo portador de óleo no Campo de Jubilee.

A sismossequência 3 (SS3) no sentido de correlação com a margem africana acaba se tornando a sismossequência mais representativa, uma vez que nesta se encontra a superfície de inundação máxima (SIM). No presente trabalho a SIM data do cenomaniano/turaniano, assim como o conhecido evento global. Esta sismossequência apresenta na sua base as principais rochas geradoras e no topo o início dos principais reservatórios, que continuam na SS4.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ayres Neto, A. 2000 Uso da sísmica de reflexão de alta resolução e da sonografia na exploração mineral submarina. *Revista Brasileira de. Geofísica*, 18(3): p.241 - 256.
- Azevedo, R.P. 1986. Interpretação Geodinâmica da Evolução Mesozóica da Bacia de Barreirinhas. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 34, Goiânia, 1986. Anais SBG, São Paulo, p.1115 - 1130.
- Badalini, G.; Brouwer, F.; Bourque, R.; Blight, R.; de Bruin, G. 2010. *Seismic-Sequence Stratigraphic Analysis of Regional 2D Lines in the Santos Basin, Offshore Brazil*. *In: AAPG International Conference and Exhibition, Rio de Janeiro, Brazil*, 2009. Search and Discovery, Article #40538.
- Basile, C.; Mascle, J. & Guiraud, R. 2005 *Phanerozoic geological evolution of the Equatorial Atlantic domain*. *Journal of African Earth Sciences* 43: 275 – 282.
- Carnevale, M.; Sperle, M. and Timbó*,I. 2007. Sismo-estratigrafia do Holoceno na porção Noroeste da Baía de Guanabara, Rio de Janeiro - Brasil. *In: International Congress of the Brazilian Geophysical Society Bulletin*, 10, Rio de Janeiro, 2007., 19-23 November 2007: pp. 883-887. doi: 10.1190/sbgf2007-172.
- Catuneanu, O., 2006. *Principles of Sequence Stratigraphy*, 375 p.
- Catuneanu, O.; ET AL. 2009. *Towards the standardization of sequence stratigraphy*. *Earth-Science Reviews*, 92: 1-33.
- Catuneanu, O.; Galloway, W.E.; et al. 2011. *Sequence Stratigraphy: Methodology and Nomenclature*. *Newsletters on Stratigraphy*, Stuttgart. 44 (3): 173–245.
- Cesero, P. & Ponte, F.C. 1997 Análise Comparativa da Paleogeologia dos Litorais Atlânticos Brasileiro e Africano. *B. Geoci. Petrobras*, Rio de Janeiro, 11 (1/2): 1-18.
- Christie-Blick, N.; Driscoll, N.W. 1995 *Sequence Stratigraphy*. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 1995. 23: 451-478.

Chevallier, J. ET AL. 2006 *Seismic Sequence Stratigraphy and Tectonic Evolution of Southern Hydrate Ridge. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results Volume 204. Web publication: 2 November 2006 Ms 204SR-121.*

Farzadi, P. 2006 High resolution seismic stratigraphic analysis: An integrated approach to the subsurface geology of the SE Persian Gulf. – University of Bergen. Dissertation for the degree philosophiae doctor (Ph.D.), 66p.

Feijó, F.J. 1994 Bacia de Barreirinhas. Boletim de Geociências da Petrobrás, Rio de Janeiro, 8 (1): 103-109.

Galloway, W.E. 1998. *Siliciclastic Slope and Base-of-Slope Depositional Systems: Component Facies, Stratigraphic Architecture, and Classification. AAPG Bulletin*, 82 (4): 569–595.

Gasparini, L.; et al. 2001 Lower Cretaceous to Eocene sedimentary transverse ridge at the Romanche Fracture Zone and the opening of the equatorial Atlantic. *Marine Geology* 176: 101-119.

Góes, A.M.O.; Feijó, F.J. Bacia do Parnaíba. 1994. Boletim de Geociências da Petrobrás, Rio de Janeiro, 8 (1): 57-67.

Jewell G., 2011, *Exploration of the Transform Margin of West Africa: Discovery Thinking – Jubilee and Beyond & Exploration of the Tano Basin and Discovery of the Jubilee Field, Ghana: A New Deepwater Game -Changing Hydrocarbon Play in the Transform Margin of WestAfrica In: AAPG Annual Convention and Exhibition, Houston, Texas, USA, June 27.*

Lima, H.P.; Rossetti, E.L.; Penna Filho, W. Modelo das acumulações de Petróleo no campo de São João – Bacia de Barreirinhas. *In: Simpósio de Geologia da Amazônia*, 2, Belém, 1985. Anais SBG, São Paulo, p. 239-253.

Macambira, T.M. & Corrêa, J.A.M. 2007 Mineralogia dos Pelitos Albianos, porção oeste da Bacia de Barreirinhas, MA. ABPG. 4o PDPETRO, Campinas, SP, p. 1-8.

Martinsen, O.J. & Helland-Hansen, W. 1994 *Sequence Stratigraphy and Facies Model of an incised Valley Fill: The Gironde Estuary, France – Discussion. Journal of Sedimentary Research*, B64 (1): 78-80.

Martinsen, O.J. 2010 *Sequence Stratigraphy 25 Years Down-the-Road: Technology Dependencies, Current Practices and Evolving Methods for Prediction of Petroleum Systems**: AAPG Association Roundtable Discussions: AAPG Bulletin, 94 (1): 119.

Matos, R. M. D. 2000 *Tectonic evolution of the Equatorial South Atlantic*. In: Mohriak W., Taiwani M. (eds) *Atlantic rifts and continental margins*. Geophys Monography 115, American Geophysical Union, pp. 331-354.

Milani, E. J.; Brandão, J.A.S.L.; Zalán, P.V. & Gamboa, L.A.P. 2001 *Petróleo na Margem Continental Brasileira: Geologia, Exploração, Resultados e Perspectivas*. *Brazilian Journal of Geophysics*, Vol. 18(3), p. 351-396.

Mitchum, R. M. Jr., Vail, P. R. and Thompson, S. III. 1977. *The depositional sequence as a basic unit for stratigraphic analysis*. In Payton, C. E. ed., *Seismic Stratigraphy – Applications to hydrocarbon exploration: American Association of Petroleum Geologists Memoir 26*, p. 53-62.

Mohriak, W. U. 2003 *Bacias Sedimentares da Margem Continental Brasileira*. In: Bizzi, L.A.; Schobbenhaus, C.; Vidotti, R.M.; & Gonçalves, J.H. (eds.) *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*. CPRM, Brasília, p.87-94 and p.132-134.

Moraes, D.M.F. 2008 *Sismoestratigrafia do Cretáceo Superior/Neógeno nas Bacias de Pernambuco e da Paraíba, NE do Brasil*. Recife-PE. Tese de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Programa de Pós-graduação em Geociências, 70p.

Neal, J.; Risch, D. & Vail, P. 1993. *Sequence Stratigraphy – A Global Theory for Local Success*. *Schlumberger Oilfield Rev.* 5 (1): 51-62.

Oliveira, M.J.R., Zalán, P.V., Caldeira, J.L., Tanaka, A., Santarém, P., Trosdorf Jr., I., and Moraes, A., 2012. *Linked extensional-compressional tectonics in gravitational systems in the Equatorial Margin of Brazil*, in D. Gao, ed., *Tectonics and Sedimentation: Implications for Petroleum Systems: AAPG Memoir 100*, p.159-178.

Pamplona, H.R.P. *Litoestratigrafia da bacia Cretácea de Barreirinhas*, 1969. *Boletim Técnico da Petrobrás*, Rio de Janeiro, 12 (3): 261-290.

Péron-Pinvidic, G.; Manatschal, G. 2009. *The final rifting evolution at deep magma-poor passive margins from Iberia-Newfoundland: a new point of view*. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)* 98: 1581–1597.

Ponte, F.C. & Asmus, H.E. 2004. As bacias marginais brasileiras: estágio atual de conhecimento. *B. Geoci. Petrobrás*, Rio de Janeiro, 12 (2): 385-420.

Trosdorf Junior, I.; Zalán, P. V.; Figueiredo, J. J. P. & Soares, E. F. 2007. Bacia de Barreirinhas. *Boletim de Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro, 15 (2): 331-339.

Rezende, W.M. & Pamplona, H.R.P. 1970. Estudo do Desenvolvimento do Arco Ferrer-Urbano Santos. *B. Geoci. Petrobrás*, Rio de Janeiro, 13 (1/2): 5-14.

Rossetti, D.F. & Truckenbrodt, W. 1992. Sedimentologia e Diagênese dos Arenitos da Formação Barro Duro (Albiano), Área oeste da Bacia de Barreirinhas. *B. Geoci. Petrobrás*, Rio de Janeiro, v. 6 (3/4): 201-221.

Rothwell, R.G.; Alibés, B. Weaver, P.P.E., 1998. *Seismic facies of the Madeira abyssal Plain: a correlation between seismic reflection profile and borehole data*, in Weaver, P.P.E., Schmincke, H.-U., Firth, J.V., and Duffield, W. (Eds.), *Proc. Ocean Drill. Prog., Sci. Res.*, vol 157, College Station, TX, 473-498

Sahoo, T. R.; Bland, K.J. & Strogon, D.P. 2013 *Seismic sequence stratigraphic framework and paleogeography of the mid Cretaceous-Neogene section in the Great South Basin. New Zeland*, in *GNS Science website* (<http://www.gns.cri.nz/>).

Sangree, J.B., and J.M. Windmier, *Seismic stratigraphy and global changes in sea level*, 9, *Seismic interpretation of depositional facies*, in *Seismic Stratigraphy: Applications to Hydrocarbon Exploration*, edited by C.E. Payton, pp. 165-184, Am. Assoc. Pet. Geol., Tulsa, Okla., 1977.

Schlager, W. 2004 Fractal nature of stratigraphic sequences. *Geological Society of America, Geology*; March 2004; v. 32; no. 3; p. 185–188; doi: 10.1130/G20253.1; 5 figures.

Severiano Ribeiro, Hélio Jorge P. (Org.). 2001. *Estratigrafia de Seqüências: Fundamentos e Aplicações*. Rio Grande do Sul. Unisinos. 428p

Soares Júnior, A.V.; Costa, J.B.S. & Hasui, Y. 2008 Evolução da Margem Atlântica Equatorial do Brasil: Três Fases Distensivas. *São Paulo, UNESP, Geociências*, 27 (4): 427-437.

Vail, P. R., 1987. *Seismic Stratigraphy Interpretation Procedure*, in Bally, A.W. (ed.), *Atlas of seismic stratigraphy: AAPG Studies in Geology*, 27 (1): 1-10.

Veeken, P.C.H., 2007. *Seismic Stratigraphy, Basin Analysis and Reservoir Characterization*. (1.ed.), Volume 37, 509p.

Walker, R.G. 1978. *Deep-Water Sandstone Facies and Ancient Submarine Fans: Models for Exploration for Stratigraphic Traps*. *The American Association of Petroleum Geologists* V. 6, No. 6, p. 932-966.

Williams, G.D. 1993. *Tectonics and seismic sequence stratigraphy: an introduction*, in G.D. Williams & A. Dobb (Eds), *Tectonics and Seismic Sequence Stratigraphy*. *Geological Society Special Publication* No. 71, London, pp.1-13.

Zalán, P.V., Palagi, P.R., Severino, M.C.G., Martins, F.A.L., Ferreira, E.P., 2004. Bacias Sedimentares Brasileiras – Bacia de Barreirinhas, Phoenix, Fundação Paleontológica Phoenix, Ano 6, Número 64, Abril, Aracaju, p.1-6.

Zalán, P.V., 2004. Evolução Fanerozóica das Bacias Sedimentares Brasileiras, in V. Mantesso-Neto, A. Bartorelli, C. D. R. Carneiro e B. B. B. Neves, eds., *Geologia do Continente Sul-Americano – Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, Beca Produções Culturais Ltda., São Paulo, p. 595-612.

Zalán, P.V., 2012. Bacias sedimentares da margem equatorial, in Hasui, Y., Dal Ré Carneiro, C., Almeida, F.F.M., Bartorelli, A., eds., *Geologia do Brasil*. Beca, São Paulo, p.497-501.

Zalán, P.V., 2005. *End Members of Gravitational Fold and Thrust Belts (GFTBs) in the Deep Waters of Brazil*, in John H. Shaw, Christopher Connors, and John Suppe, eds., *Seismic Interpretation of Contractional Fault-Related Folds; an AAPG Seismic Atlas: AAPG Studies in Geology*, 53: 147-153.

Zalán, P.V., 2011. *Fault-related folding in the deep waters of the equatorial margin of Brazil*, in K. McClay, J.H. Shaw, and J. Suppe, eds., *Thrust-fault-related folding: AAPG Memoir* 94, p. 335-355.