



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEODINÂMICA E GEOFÍSICA

TESE DE DOUTORADO

**EVOLUÇÃO TECTONO-ESTRATIGRÁFICA DA SEÇÃO CRETÁCEA NA
BACIA DE BARREIRINHAS, MARGEM EQUATORIAL BRASILEIRA**

Autora:

BÁRBARA FERREIRA RAPOZO

Orientadora:

PROF^a. DRA. VALÉRIA CENTURION CÓRDOBA

Tese nº 94/PPGG

Setembro de 2025

Natal/RN, Brasil

BÁRBARA FERREIRA RAPOZO

**EVOLUÇÃO TECTONO-ESTRATIGRÁFICA DA SEÇÃO CRETÁCEA NA
BACIA DE BARREIRINHAS, MARGEM EQUATORIAL BRASILEIRA**

Tese apresentada em 30 de setembro de 2025 ao
Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e
Geofísica (PPGG) da Universidade Federal do
Rio Grande do Norte (UFRN) como requisito à
obtenção do Título de Doutora em Geodinâmica
e Geofísica, Área de Concentração Geodinâmica

BANCA EXAMINADORA:

DRA. VALÉRIA CENTURION CÓRDOBA
Presidente e orientadora (PPGG-UFRN)

DR. YOE ALAIN REYES PÉREZ
Membro interno ao PPGG

DR. CARLOS CÉSAR NASCIMENTO DA SILVA
Membro interno ao PPGG

DR. JOÃO MARINHO DE MORAIS NETO
Membro externo ao PPGG (PETROBRAS)

DR. JORGE DE JESUS PICANÇO DE FIGUEIREDO
Membro externo ao PPGG (PPGL-UFRJ)

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Setorial Prof. Ronaldo Xavier de Arruda - CCET

Rapozo, Bárbara Ferreira.

Evolução tectono-estratigráfica da seção cretácea na Bacia de Barreirinhas, Margem Equatorial Brasileira / Bárbara Ferreira Rapozo. - 2025.

126 f.: il.

Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica. Natal, RN, 2025.

Orientação: Profa. Dra. Valéria Centurion Córdoba.

1. Margem Equatorial Brasileira - Tese. 2. Bacia de Barreirinhas - Tese. 3. Sistema Pull-apart - Tese. 4. Rifte - Tese. 5. Cretáceo - Tese. 6. Breakup - Tese. I. Córdoba, Valéria Centurion. II. Título.

RN/UF/CCET

CDU 551.468(81)(043.2)

A meus pais, Ineuda e José Rapozo,

com amor e dedicação.

“Se me der guerra, eu quero mais.
O tempo fecha e eu tô de pé chamando temporais.”
— **Black Alien**, “*Aniversário de Sobriedade*”, 2019.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Ineuda Alves e José Rapozo, por todo amor, apoio e compreensão ao longo desta caminhada. Este trabalho não seria possível sem a ajuda de vocês. Obrigada por sempre me incentivarem e por me mostrarem o estudo como uma forma de transformar vidas. Ganga, Ginga, Pipa e Half-Graben, meus amores de quatro patas, parte inseparável da família e razão diária para eu me levantar.

À minha orientadora, professora Valéria Centurion Córdoba, que nunca deixou de acreditar em mim e que topou “todas as paradas” comigo, inclusive a loucura de trabalhar e fazer um doutorado ao mesmo tempo. Seus conselhos foram e sempre serão valiosos. Obrigada por tudo e saiba que sempre poderá contar comigo. Estendo meu agradecimento também aos professores Carlos César Nascimento, Débora Sousa e Emanuel Jardim de Sá pela oportunidade de atuar como pesquisadora e pelo conhecimento compartilhado.

Aos meus eternos colegas de laboratório (Castelo), que hoje seguem voos maiores como professores, pesquisadores e geocientistas em grandes empresas, vocês são inspiração. Em especial, à minha querida amiga Karol Alves, com quem tive o prazer de compartilhar alegrias e angústias desta jornada. Iniciamos juntas a aventura do doutorado e juntas também a encerramos.

Agradeço ao projeto “Análise tectono-estratigráfica da seção aptiana-maastrichtiana no setor entre as bacias de Pará-Maranhão, Grajaú e o Sistema de Grabens Gurupi, Norte–Nordeste do Brasil”, firmado por meio do Termo de Cooperação PETROBRAS/FUNPEC/UFRN, pela oportunidade de atuar como pesquisadora, bem como pelo financiamento da bolsa de doutorado.

À família que construí em Aracaju durante quase dois anos em que morei lá: Anna Pauletti, André Giskard, Fernando Yoshizato, Samir Costa, João Victor, Elaine Cunha, Ênio Maia, Ricardo Brejinho e Elivânia. Todos muito bem escolhidos e recrutados por Yoe Perez, a quem sou imensamente grata pela confiança e pela oportunidade do meu primeiro emprego. Agradeço também a todos os amigos que fiz nessa caminhada pelas terras sergipanas.

À minha amiga, confidente, companheira de trabalho e, por acaso, minha chefe, Leidiane Sampaio. Obrigada pela oportunidade de trabalhar ao seu lado, pela confiança, por tudo o que me ensinou e por aquilo que aprendemos juntas. Você me inspira todos os dias como pessoa, amiga e profissional.

Ao meu seleto grupo de amigos geocientistas que saíram diretamente do cajueiro para o mundo: Joyce Oliveira, Armando Lucas, Vinícius Nogueira, Khalil Bow, Carlos Ribeiro, Marcola e Clarissa Dalan. Hoje moramos em diferentes cantos do Brasil, cada um correndo atrás dos seus sonhos, mas estaremos sempre juntos, mesmo à distância.

Finalmente, gostaria de agradecer a todas as pessoas que de maneira direta ou indireta me apoiaram nessa trajetória, me encorajaram, me acolheram e seguraram minha mão em momentos difíceis: Alala, Manu, Vernon (e toda família Bitu), Jéssica e Sarita. Vocês são incríveis.

RESUMO

As bacias da Margem Equatorial Brasileira (MEB) têm recebido crescente atenção em função das descobertas de hidrocarbonetos em suas bacias análogas africanas. A Bacia de Barreirinhas, embora apresente elevado potencial exploratório, ainda possui lacunas significativas quanto à compreensão de sua evolução tectono-estratigráfica. Este trabalho analisa o arcabouço estrutural e estratigráfico da porção *onshore* e da plataforma rasa durante o Cretáceo, a partir da integração de dados sísmicos 2D, perfis geofísicos de poços e informações gravimétricas previamente publicadas. A caracterização tectono-estratigráfica foi conduzida com base no mapeamento das principais discordâncias e na aplicação dos conceitos de estratigrafia de sequências, permitindo avaliar a relação entre a atividade tectônica e os sistemas deposicionais. A seção rifte foi subdividida em cinco unidades sismoestratigráficas, definidas pela análise de sismofácies, terminações de refletores e discordâncias intra-rifte. Dados litoestratigráficos e cronoestratigráficos de poços forneceram suporte adicional para a calibração e validação das interpretações. A análise sismoestrutural possibilitou a identificação de grabens, semigrabens e *horsts*, delimitados por falhas normais de alto ângulo, predominantemente associadas ao estágio de rifteamento e controladas por heterogeneidades do embasamento cristalino, com direções variando entre E–W e NW–SE. No contexto da evolução do sistema *pull-apart* da Bacia de Barreirinhas, foram analisados depocentros relacionados às fases Rifte I (Neobarremiano ao Neoptiano), Rifte II (Neoptiano ao Eoalbiano) e Rifte III (Eoalbiano ao Neoalbiano). A elaboração de seções regionais (transectas) permitiu a visualização e a compreensão de relações estratigráficas importantes para o contexto regional da Bacia de Barreirinhas, diretamente influenciado pela Zona de Fratura Romanche (ZFR), imprimindo na mesma bacia, estruturas relacionadas a regimes trantensionais, majoritariamente, e transpressionais de maneira subordinada.

Palavras-chave: Margem Equatorial Brasileira; Bacia de Barreirinhas; Sistema *Pull-apart*; Rifte; Cretáceo; *Breakup*.

ABSTRACT

The basins of the Brazilian Equatorial Margin (BEM) have received increasing attention due to hydrocarbon discoveries in their African conjugate counterparts. The Barreirinhas Basin, although presenting high exploratory potential, still shows significant gaps in the understanding of its tectonostratigraphic evolution. This study analyzes the structural and stratigraphic framework of the onshore portion and shallow platform during the Cretaceous, through the integration of 2D seismic data, well geophysical logs, and previously published gravity data. The tectonostratigraphic characterization was based on the mapping of major unconformities and the application of sequence stratigraphy concepts, allowing the evaluation of the relationship between tectonic activity and depositional systems. The rift section was subdivided into five seismic-stratigraphic units, defined by the analysis of seismic facies, reflector terminations, and intra-rift unconformities. Lithostratigraphic and chronostratigraphic data from wells provided additional support for the calibration and validation of the interpretations. The seismic-structural analysis enabled the identification of grabens, half-grabens, and horsts, bounded by high-angle normal faults predominantly associated with the rifting stage and controlled by heterogeneities of the crystalline basement, with orientations ranging from E–W to NW–SE. In the context of the evolution of the Barreirinhas Basin pull-apart system, depocenters related to Rift Phases I (late Barremian to late Aptian), II (late Aptian to early Albian), and III (early Albian to late Albian) were analyzed. The construction of regional sections (transects) allowed the visualization and understanding of stratigraphic relationships critical to the regional context of the Barreirinhas Basin, which was directly influenced by the Romanche Fracture Zone (RFZ), imprinting transtensional structures as the dominant regime and transpressional features subordinately.

Keywords: Brazilian Equatorial Margin; Barreirinhas Basin; Pull-apart system; Rift; Cretaceous; Breakup.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	5
RESUMO.....	7
ABSTRACT.....	8
LISTA DE FIGURAS.....	12
1. INTRODUÇÃO	16
1.1 APRESENTAÇÃO.....	16
1.2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS E BASE DE DADOS	16
1.3 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS	18
2. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	22
2.1 EVOLUÇÃO TECTONOSSEDIMENTAR DA MEB	22
2.2 EVOLUÇÃO GEODINÂMICA E ARCABOUÇO CRUSTAL.....	25
2.3 O SISTEMA <i>PULL-APART</i> DE BARREIRINHAS E A BACIA DE BARREIRINHAS	26
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
3.1 O MÉTODO SÍSMICO DE REFLEXÃO.....	32
3.2 ESTRATIGRAFIA DE SEQUÊNCIAS.....	34
3.3 SISMOESTRATIGRAFIA.....	37
3.4 ESTRATIGRAFIA DE SEQUÊNCIAS EM BACIAS RIFTE.....	40
4. ARTIGO CIENTÍFICO I.....	57
<i>ABSTRACT.....</i>	<i>59</i>
<i>1. INTRODUCTION.....</i>	<i>60</i>
<i>2. DATASET AND METHODOLOGY.....</i>	<i>65</i>
<i>3. RESULTS.....</i>	<i>69</i>
<i>3.1. BARREIRINHAS ONSHORE: CENTRAL PORTION</i>	<i>69</i>
<i>3.1.1 Structural interpretation.....</i>	<i>69</i>

3.1.2	<i>Stratigraphic interpretaion.....</i>	71
3.2	<i>BARREIRINHAS OFFSHORE (SHALLOW WEST PORTION).....</i>	75
3.2.1	<i>Structural interpretation.....</i>	75
3.2.2	<i>Stratigraphic interpretation.....</i>	77
3.3	<i>BARREIRINHAS ONSHORE-OFFSHORE INTEGRATED SECTION (EAST PORTION)</i>	80
3.3.1	<i>Structural interpretation.....</i>	80
3.3.2	<i>Stratigraphic interpretation.....</i>	81
4	<i>DISCUSSION AND CONCLUSION.....</i>	85
	<i>ACKNOWLEDGMENTS.....</i>	87
	<i>REFERENCES.....</i>	88
5.	ARTIGO CIENTÍFICO II.....	94
	<i>ABSTRACT.....</i>	94
1.	<i>INTRODUCTION.....</i>	95
2.	<i>DATA AND METHODS</i>	98
3.	<i>RESULTS.....</i>	100
3.1	<i>Tectonostratigraphic Analysis Along a W-E Transect in the Barreirinhas Basin</i>	101
3.2	<i>Structural Configuration of the Tutóia High and Associated Stratigraphic Relationships.....</i>	104
3.3	<i>Structural Configuration Northwest of the Tutóia High</i>	107
3.4	<i>Three-Dimensional Seismic Integration and Structural Control of E–W-Oriented Depocenters</i>	109
4.	<i>DISCUSSION.....</i>	111
5.	<i>CONCLUSION</i>	113
	<i>AKNOWLEDGEMENTS</i>	115
	<i>REFERENCES</i>	115
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	117

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119
--	------------

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Mapa da bacia de Barreirinhas exibindo a base de dados solicitada para realização do presente trabalho. Base de dados shapefile: CPRM..... 18

Figura 02 - Carta estratigráfica da Bacia de Barreirinhas e *plays* associados aos arenitos turbidíticos da Formação Travosas, correlacionáveis ao *play* Jubilee (Golfo da Guiné) e ao *play* Zaedyus (Guiana Francesa). PELLEGRINI; SEVERIANO RIBEIRO (2018). 20

Figura 03 - Mapa simplificado do setor central da Margem Equatorial Brasileira, destacando limites e principais estruturas, compilado de AZEVEDO (1991); MOHRIAK (2003); DE CASTRO et al. (2024). Base de dados (shapefile): Serviço Geológico do Brasil — CPRM..... 22

Figura 04 - Distribuição da deformação no Atlântico Equatorial durante o estágio sin-transformante (Albiano), controlada pelas falhas transformantes, segmentando a MEB em *releasing* e *restraining bends*. Setas pretas mostram a cinemática Brasil–África; setas vermelhas indicam campos de tensão anômalos com transpressão/transtração. Pares conjugados: (1) Pará-Maranhão/Costa do Marfim; (2) Barreirinhas/Tano; (3) Icarai-Acaraú (Ceará)/Salt Pond-Accra; (4) Mundaú e W-Potiguar/Keta-Togo-Benin; (5) Potiguar-Benin-Benue. LIMA (2023), adaptado de MATOS (2000). 26

Figura 05 - Reconstrução esquemática das placas no setor central do Atlântico Equatorial, mostrando a evolução cinemática das principais fases de rifte. A América do Sul está fixa em coordenadas atuais. Indicam-se zonas de cisalhamento (linhas pretas tracejadas), zonas de fratura oceânicas (linhas pretas contínuas), braço abortado de rifte do Cretáceo (linhas vermelhas), limite continente–oceano (COB) e o arcabouço estrutural interno das bacias (compilado de AZEVEDO, 1991; MOHRIAK, 2003). Zonas de cisalhamento: Pirapemas (PR), Transbrasiliano (TB) e Tentugal (TG). DE CASTRO et al. (2024). 28

Figura 06 - Carta estratigráfica da Bacia de Barreirinhas com destaque para a seção cretácea (retângulo vermelho pontilhado), alvo do presente estudo. TROSDTORF JR. *et al.* (2007). 30

Figura 07 – Seção esquemática de um levantamento sísmico marinho 2D, no qual pulsos acústicos gerados por *airguns* refletem nas camadas geológicas e são registrados por hidrofones no *streamer*. Fonte: COX et al. (2020) 32

Figura 08 - Principais configurações internas de sismofácies em dados sísmicos: regular, subparalela e ondulada, que compõem o subgrupo das sismofácies paralelas dentro do grupo das não-progradantes. MITCHUM et al. (1977) e SEVERIANO RIBEIRO (2001). 38

Figura 09 - Geometrias externas em perfis sísmicos: lençol (*sheet*), lençol ondulado (*wavy sheet*), cunha (*wedge*), banco (*bank/mounded sheet*), lente (*lens*), preenchimento de calha (*channel fill*), preenchimento de bacia (*basin fill*), preenchimento de talude (*slope fill*), montiforme (*mounded*), leque (*fan*). MITCHUM et al. (1977) e SEVERIANO RIBEIRO (2001). 39

Figura 10 - Terminações de refletores (proxy dos estratos) contra superfícies cronoestratigráficas — onlap, downlap, toplap e truncamento erosivo — que auxiliam na definição de limites de sequência e superfícies-chave de trato. MITCHUM et al. (1977) e SEVERIANO RIBEIRO (2001).....	39
Figura 11 - Unidade estrutural fundamental de um rifte: proposta de compartimentação interna de um semi-gráben isolado, composto por hangingwall (setor em subsidência) e footwall (setor em soerguimento), separados pelo ponto de rotação (<i>tilt point</i>). KUCHLE et al. (2005).	42
Figura 12 - Modelos propostos por KUCHLE et al. (2005): (A) para a relação de contemporaneidade entre a deposição no hangingwall e erosão no footwall, e (B) para a chegada atrasada do aporte sedimentar em relação ao pulso gerador.	44
Figura 13 - Modelo de ROSENDAHL et al. (1986): (A) arranjo tridimensional de semi-grábens com morfologia sinusoidal e inversões da falha de borda, resultando em uma sucessão de blocos rotacionados; (B) geometria em planta de um semi-gráben isolado, com depocentro bem definido, falha de borda arqueada e componente de cisalhamento ao longo das extremidades. Retirado de ROSENDAHL et al. (1986).	45
Figura 14 - Modelo de tratos de sistemas tectônicos de PROSSER (1993) — Início de Rifte (S2), Clímax de Rifte (S3), Pós-rifte Imediato (S4) e Pós-rifte Tardio (S5). Em (A), sucessão vertical idealizada; em (B), seção sísmica idealizada. PROSSER (1993).	47
Figura 15 - Classificação do preenchimento de riftes proposta por BOSENCE (1998), com critérios estratais e geométricos para distinguir as seções pré-, sin- e pós-rifte, bem como suas discordâncias limítrofes.	48
Figura 16 - Modelo esquemático de GAWTHORPE; LEEDER (2000) para a evolução de um rifte: (A) zona de falha com segmentos isolados e pequenos rejeitos; (B) fase de interação/conexão entre os segmentos; (C) completa coalescência e estabelecimento da falha de borda.	49
Figura 17 - Figura esquemática do modelo <i>fault propagation</i> idealizado por MORLEY (2002), mostrando: (A) ligação progressiva de segmentos de falha em longo período evolutivo; (B) ligação progressiva de curta duração. Retirado de MORLEY (2002).	50
Figura 18 - Estágios evolutivos de um semi-gráben segundo o modelo de MORLEY (2002): (A) Rifte Inicial; (B) Meio-gráben Inicial; (C) Meio-gráben Maduro; (D) Meio-gráben Final.	51
Figura 19 - Modelo evolutivo de KUCHLE et al. (2005) para uma bacia rifte, exibindo os tratos de sistemas tectônicos de Início de Rifte, Clímax de Rifte e Preenchimento de Rifte, bem como suas superfícies limítrofes. KUCHLE et al. (2005).	52
Figura 20 - Modelo evolutivo aperfeiçoado de KUCHLE; SCHERER (2010), composto pelos tratos de sistemas tectônicos de Início de Rifte, Desenvolvimento de Semi-gráben, Clímax de Rifte e Final do Rifte.	54

Figura 21 - Adaptação do modelo evolutivo de KUCHLE; SCHERER (2010), proposta por ENE et al. (2015), RAMIREZ et al. (2015) e ALVARENGA (2016), na qual a seção rifte é dividida em três tratos: Início de Rife, Alta Atividade Tectônica e Baixa Atividade Tectônica. 55

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

O presente documento intitulado “Evolução tectono-estratigráfica da seção cretácea na Bacia de Barreirinhas, Margem Equatorial Brasileira” é parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor junto ao Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

Este trabalho está inserido em um projeto de pesquisa mais amplo, denominado: “Análise tectono-estratigráfica da seção aptiana-maastrichiana no setor entre as bacias de Pará-Maranhão, Grajaú e o Sistema de Grabens Gurupi, Norte-Nordeste do Brasil” firmado através do Termo de Cooperação entre a PETROBRAS/FUNPEC/UFRN e coordenado pelo Prof. Dr. Emanuel Ferraz Jardim de Sá.

Os dados sísmicos e dados de poços que suportam esta tese foram fornecidos parte pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), enquanto outra parte foi obtida através do portal REATE – a base de dados aberta da ANP e do Serviço Geológico Brasileiro (CPRM) que fornece acesso gratuito aos dados públicos terrestres.

O trabalho foi desenvolvido majoritariamente no Laboratório de Geologia e Geofísica do Petróleo I (LGGP-I), o qual pertence ao Centro de Ciências Exatas e da Terra (CCET) da UFRN, sob orientação da Prof^a. Dra. Valéria Centurion Córdoba.

1.2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS E BASE DE DADOS

A Bacia de Barreirinhas, tema central deste estudo, faz parte do conjunto de bacias da Margem Equatorial Brasileira (MEB). Essa margem, com orientação predominante WNW–NW, apresenta a alternância de segmentos NW–SE e E–W ao longo de sua extensão. Estendendo-se por cerca de 2.000 km, desde a plataforma do Amapá, a oeste, até o Alto de Touros, a leste, a MEB abriga um complexo sistema de bacias sedimentares formadas entre o Neobarremiano e o Albiano, antes da abertura do oceano Atlântico (AZEVEDO, 1991; MATOS, 1992, 1999, 2000; MILANI et al., 2007; SOARES JÚNIOR et al., 2008, 2011; YE et al., 2017). Entre essas bacias, destacam-se a Foz do Amazonas, Marajó, o Sistema de

Grábens do Gurupi (que se conecta à Bacia do Grajaú, ao sul), Pará-Maranhão, Barreirinhas, Ceará e Potiguar.

A Bacia de Barreirinhas, mais especificamente, abrange uma área 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. Geograficamente, está localizada entre os meridianos de 44° O e 42° O, e os paralelos de 0° e 3° S, abrangendo o litoral leste do estado do Maranhão (Figura 01; TROSDTORF JR. *et al.*, 2007).

Geologicamente, a sul, a bacia é limitada por falhas de borda que separam o embasamento raso da Plataforma de Sobradinho. O Alto de Tutóia separa, a leste, a bacia estudada da Bacia do Ceará, ao passo que o limite oeste é dado pela Plataforma de Ilha de Santana. O limite entre as bacias de Barreirinhas e Pará-Maranhão não é definido por uma feição geológica marcante, tornando-se quase imperceptível (TROSDTORF JR. *et al.*, 2007).

A base de dados solicitada para esta pesquisa compreende seções de diversos levantamentos sísmicos 2D que imageiam a Bacia de Barreirinhas e adjacências, além de informações de aproximadamente 126 poços exploratórios e respectivos perfis geofísicos como raios gama, resistividade, densidade e sônico (Figura 02). Os dados adquiridos na porção *offshore* da Bacia de Barreirinhas foram cedidos pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), por meio da política de cessão de dados de forma gratuita para instituições de pesquisa. No que diz respeito aos dados localizados na porção *onshore* da Bacia de Barreirinhas, foram baixados do portal REATE, uma base de dados aberta da ANP e do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) que fornece acesso gratuito aos dados públicos terrestres.

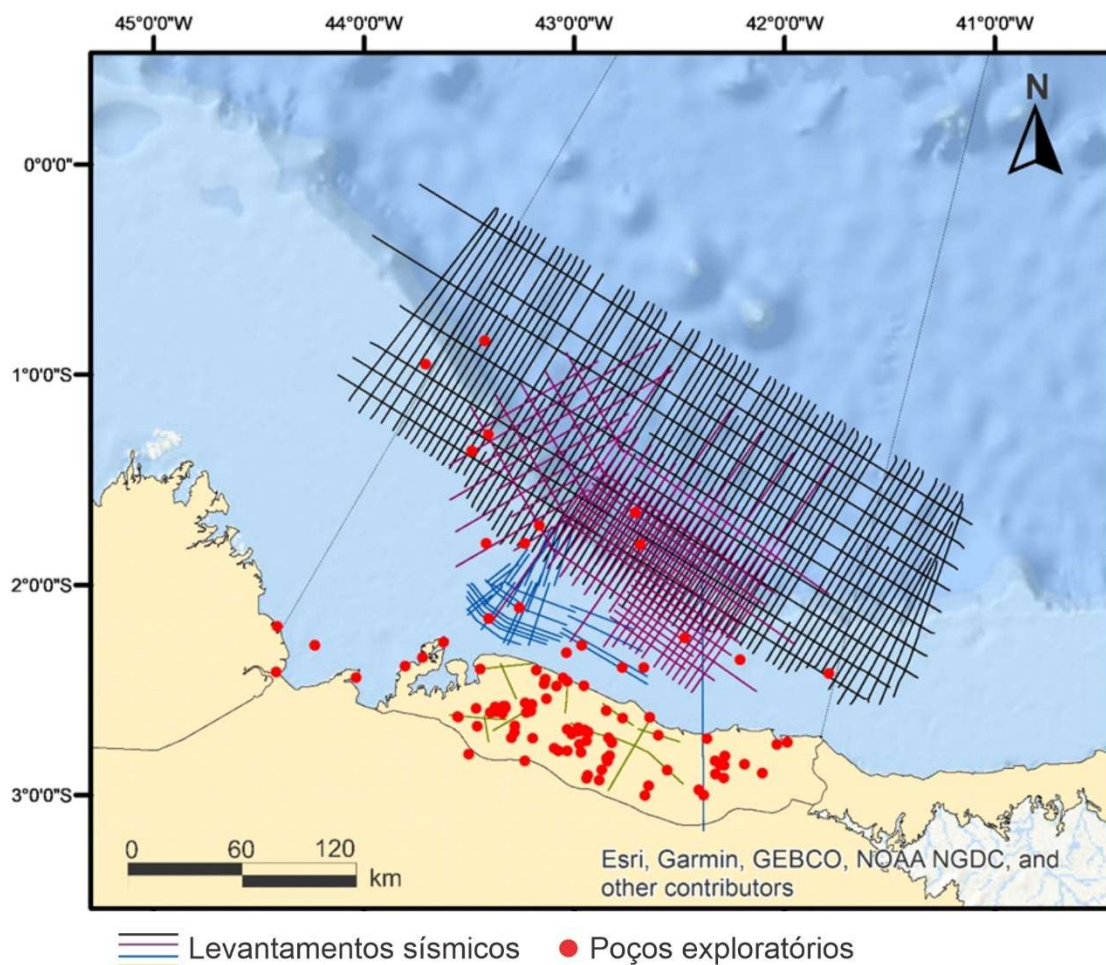


Figura 01 - Mapa da bacia de Barreirinhas exibindo a base de dados solicitada para realização do presente trabalho. Base de dados shapefile: CPRM

1.3 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS.

Nos últimos anos, as bacias da Margem Equatorial Brasileira (MEB) têm despertado interesse crescente, impulsionado pelas descobertas de hidrocarbonetos na margem continental de Gana e em países vizinhos da América do Sul, como Suriname e Guiana, reforçando a necessidade de compreender a evolução geológica da MEB e sua relação com bacias correlatas do Atlântico Equatorial (MASCLE; BLAREZ, 1987; AZEVEDO, 1991; MATOS, 1999, 2000; SOARES JÚNIOR et al., 2008, 2011; ANTOBREH et al., 2009; MOULIN et al., 2010; ZALÁN, 2012; YE et al., 2017; MATOS et al., 2019). Nesse contexto, a análise de dados sísmicos é crucial para as caracterizações do arcabouço estrutural e do preenchimento sedimentar das bacias.

Nas porções mais ocidentais da MEB, entretanto, as informações ainda são escassas e baseiam-se, em grande parte, nos dados adquiridos pela PETROBRAS desde a década de

1960, o que mantém uma lacuna científica significativa — especialmente nas bacias de Barreirinhas, Pará-Maranhão e Foz do Amazonas, ainda pouco exploradas na literatura e com número reduzido de estudos de detalhe. Neste trabalho, o foco recai sobre o intervalo cretáceo da Bacia de Barreirinhas, com ênfase no mapeamento da seção sedimentar relacionada à fase rifte e à transição rifte–drifte. A identificação e o mapeamento de discordâncias, aliados à estratigrafia de sequências, buscam elucidar a relação entre tectônica e sistemas deposicionais, bem como avaliar a contemporaneidade desses eventos — aspectos fundamentais tanto para reconhecer elementos-chave de sistemas petrolíferos quanto para prever sua ocorrência. Além disso, a análise geométrica das estruturas, a posição de depocentros e a caracterização da deformação associada são essenciais para interpretar a evolução da bacia e sua potencialidade exploratória. A Bacia de Barreirinhas apresenta arcabouço estrutural complexo e é frequentemente interpretada como bacia transtraccional rômica sob influência da Zona de Fratura Romanche (AZEVEDO, 1986; SZATMARI, 1987; TROSDTORF JR. et al., 2007; SOARES JÚNIOR et al., 2008; TAVARES, 2017; MONTENEGRO et al., 2021).

Apesar da relevância, estudos voltados ao Cretáceo — sobretudo ao Cretáceo Inferior — ainda são escassos, em especial na porção *offshore*, devido à limitação de dados de poços (muitos não atingem os intervalos alvo) e à qualidade variável dos dados sísmicos, cuja razão sinal/ruído tende a decrescer com a profundidade. Na porção *onshore*, embora haja maior densidade de poços, a disponibilidade de seções sísmicas permanece restrita. Embora Barreirinhas ainda seja pouco explorada — com perfurações concentradas em águas rasas e ausência de dados de águas ultraprofundas —, sua semelhança com as bacias de Tano e Costa do Marfim (Golfo da Guiné) indica alto potencial exploratório. Nesse cenário, Barreirinhas abriga sistemas petrolíferos associados a rochas geradoras aptianas, albiano-cenomanianas e cenomaniano-turonianas; as rochas geradoras aptianas da Formação Codó são de origem evaporítica lagunar e marinha anóxica, enquanto as rochas do Albiano superior–Cenomaniano inferior do Grupo Caju consistem em folhelhos e calcissiltitos de ambiente marinho transgressivo (PELLEGRINI; SEVERIANO RIBEIRO, 2018).

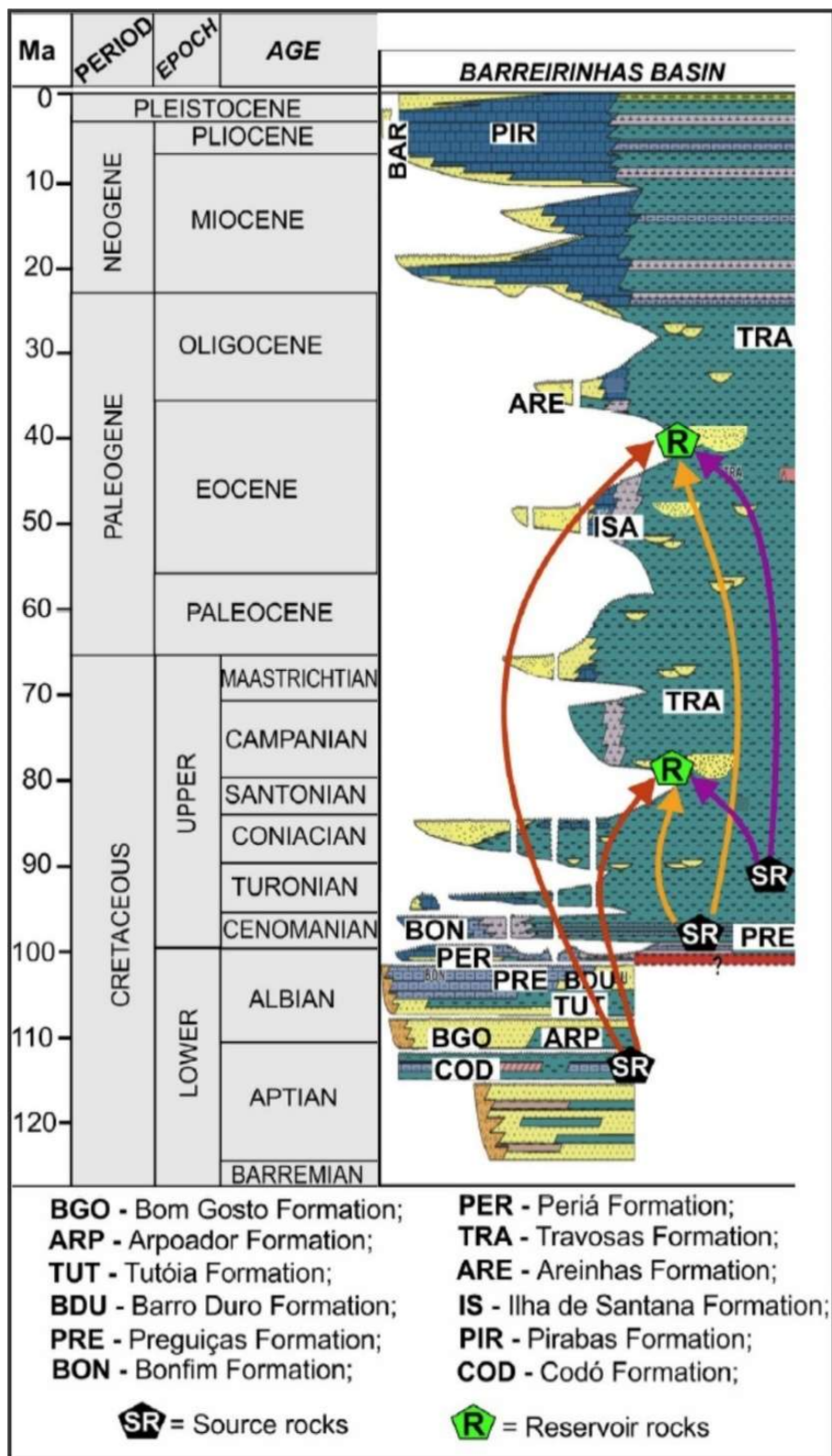


Figura 02 - Carta estratigráfica da Bacia de Barreirinhas e *plays* associados aos arenitos turbidíticos da Formação Travosas, correlacionáveis ao *play* Jubilee (Golfo da Guiné) e ao *play* Zaedyus (Guiana Francesa). PELLEGRINI; SEVERIANO RIBEIRO (2018).

CAPÍTULO II

CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

2. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

2.1 EVOLUÇÃO TECTONOSSEDIMENTAR DA MEB

O embasamento das bacias da MEB é composto por blocos crustais pré-cambrianos e pelos depósitos paleozoicos da Bacia do Parnaíba, sotopostos às rochas cretáceas das bacias de São Luís, Pará-Maranhão e Barreirinhas (Figura 03).

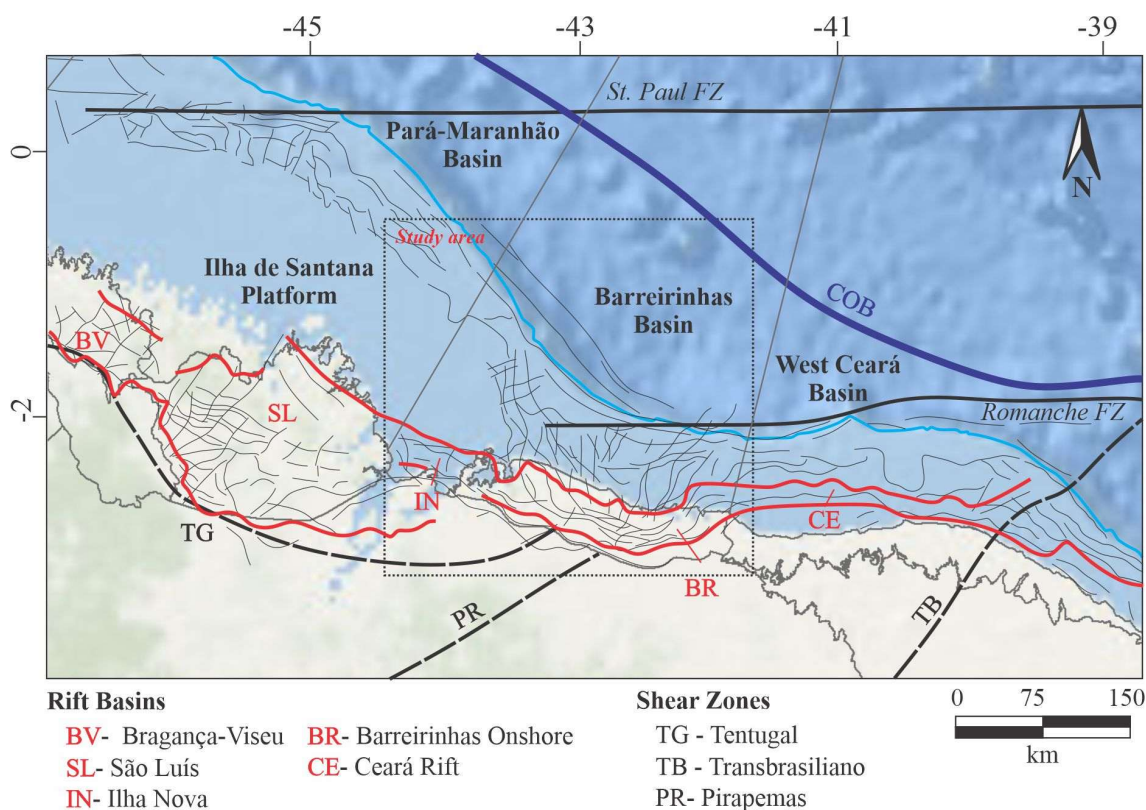


Figura 03 - Mapa simplificado do setor central da Margem Equatorial Brasileira, destacando limites e principais estruturas, compilado de AZEVEDO (1991); MOHRIAK (2003); DE CASTRO et al. (2024). Base de dados (shapefile): Serviço Geológico do Brasil — CPRM.

A evolução tectonossedimentar da Margem Equatorial Brasileira (MEB) pode ser subdividida em cinco estágios, conforme proposto por MILANI *et al.* (2007). O primeiro estágio evolutivo é o Pré-Rifte Triássico–Mesojurássico, associado à abertura do Oceano Atlântico Central. O rifteamento do Atlântico promoveu a formação de junções triplíceis e soerguimentos relacionados ao magmatismo jurássico da Província Magmática do Atlântico Central (CAMP), com registro sedimentar correspondente a uma seção sag pré-rifte e ao Gráben de Tacutu, onde ocorrem *red beds* e rochas vulcânicas da Formação

Calçoene na Bacia da Foz do Amazonas. No mesmo contexto registram-se o evento magmático da Suíte Mosquito e a deposição dos arenitos das formações Pastos Bons e Corda na Bacia do Parnaíba.

O estágio seguinte (Rifte I de MILANI *et al.* (2007)) desenvolveu-se ao longo do Neocomiano–Barremiano. A tectônica responsável pela abertura da Margem Leste Brasileira, de sul para norte, instaurou uma junção tríplice associada aos principais eixos de rifteamento no Nordeste do Brasil — *trends* Gabão–Sergipe–Alagoas, Recôncavo–Tucano–Jatobá e Cariri–Potiguar — sob forte controle das zonas de cisalhamento neoproterozoicas da Província Borborema. Seguiram evoluções distintas: os segmentos Recôncavo–Tucano–Jatobá e Cariri–Potiguar foram abortados, originando as bacias de Recôncavo, Tucano e Jatobá e as Bacias Interiores do Nordeste, enquanto o trend Gabão–Sergipe–Alagoas evoluiu para margem passiva (bacias de Sergipe e Alagoas). Esse período também foi marcado pelo magmatismo eocretáceo da EQUAMP (Província Magmática do Atlântico Equatorial), com registros em soleiras e diques da Formação Sardinha (Bacia do Parnaíba) e no enxame de diques do Rio Ceará-Mirim (MACÊDO FILHO *et al.*, 2017; MACÊDO FILHO; HOLLANDA, 2022). Estudos indicam acomodação desses diques sob distensão NW–SE, associada à abertura das Bacias Interiores do Nordeste e ao rifte abortado na Bacia Potiguar; diques em arco (E–W a NE–SW) são compatíveis com regime de transtensão sinistral E–W. Na MEB, esse evento está registrado nas bacias da Foz do Amazonas (Formação Cassiporé), Marajó (formações Jacarezinho e Breves) e Potiguar (Formação Pendências).

Com a migração da deformação e a extinção do *trend* cariri–Potiguar no Aptiano, inicia-se um novo episódio tectônico de caráter transcorrente dextral (Rifte II de MILANI *et al.* (2007)), bem evidenciado nas bacias do Ceará (Formação Mundaú) e Potiguar (formações Pendências e Pescada). A Formação Bragança, presente nas bacias de Bragança-Viseu e Ilha Nova, parece associar-se a esse evento, conforme a carta estratigráfica de ZALÁN (2007).

Ao final do Aptiano, durante o estágio denominado Pré-Rifte Albiano (ou Pós-Rifte Aptiano; Pré-Rifte III de MILANI *et al.* (2007)), a região experimenta baixa atividade tectônica e subsidência termal, caracterizada por amplo *sag*. Os depósitos dessa fase relacionam-se à Formação Codó nas bacias da Foz do Amazonas, Pará-Maranhão e

Barreirinhas; às formações Codó e Grajaú nas bacias de Grajaú, Bragança-Viseu, São Luís e Ilha Nova; à Formação Paracuru na Bacia do Ceará; e à Formação Alagamar na Bacia Potiguar. O desenvolvimento durante o Neoaptiano–Cenomaniano da Bacia do Grajaú foi marcado pelo deslocamento dos depocentros da Bacia do Parnaíba para o extremo N e NW, em decorrência da abertura do Atlântico; para depósitos marinhos, as transgressões e regressões passam a ter origem oceânica. ZALÁN (2007) ressalta que estruturas significativas ligadas à abertura da Margem Atlântica Equatorial nuclearam-se nas proximidades das bacias de São Luís, Ilha Nova e Bragança-Viseu, condicionando estilos estruturais e evolução desses sistemas.

No estágio Albiano (Rifte III de MILANI *et al.* (2007)), um novo evento transcorrente dextral expande lateralmente a margem. Segundo ZALÁN (2007), esse rifteamento, dirigido a W/SW em padrão *backstepping*, deu origem ao Sistema de Grábens do Gurupi (Grupo Itapecuru) e à parte continental da Bacia de Barreirinhas (Grupo Canárias). Na região *onshore*, as bacias mais ocidentais mantiveram intensa atividade do Rifte Albiano, enquanto as bacias do Ceará e Potiguar já se encontravam em drifte, permitindo a deposição dos arenitos das formações Ubarana e Açu sob transgressão marinha. Na Bacia do Marajó, esse episódio é marcado por depósitos continentais das formações Itapecuru e Jacarezinho; na seção *offshore*, a expansão das bacias de Barreirinhas e Pará-Maranhão prosseguiu com deposição dos litotipos do Grupo Canárias.

Os estágios finais são marcados por episódios transpressivos. MATOS (2000) descreve um evento de cinemática dextral, do final do Albiano ao Cenomaniano, caracterizado por tectônica *wrench*, que originou amplo cinturão transpressivo nas sub-bacias de Piauí–Camocim e Acaraí (Bacia do Ceará). TROSDTORF JR. (2007) identificou fase pós-rifte transpressiva de idade similar nos depósitos das formações Peria, Preguiças e Bonfim (Bacia de Barreirinhas). BEZERRA *et al.* (2020) destacam dois campos de paleotensões no pós-rifte: um com compressão N–S e distensão E–W, atuante do Campaniano ao Mesomioceno, e outro, posterior ao Mesomioceno, com compressão E–W a NW–SE e distensão N–S a NE–SW, acomodadas por falhas de rejeito direcional ou reversas.

2.2 EVOLUÇÃO GEODINÂMICA E ARCABOUÇO CRUSTAL

A formação da MEB deu-se por divergência oblíqua dextral, acomodada principalmente por falhas normais NW–SE e falhas transcorrentes dextrais E–W (MATOS, 2000; MOULIN *et al.*, 2010; FRIZON DE LAMOTTE *et al.*, 2015; MATOS *et al.*, 2021a, 2021b). Segundo MATOS (2000), a fragmentação do *Gondwana* e, por conseguinte, a abertura do Oceano Atlântico Equatorial, teria ocorrido em três estágios (Figura 04).

No Estágio Pré-transformante (MATOS, 2000; ou Estágio Pré-rifte, conforme YE *et al.*, 2017), rochas e estruturas jurássicas a cretáceas (pré-Barremiano) antecederam a fase principal de estiramento no Atlântico Equatorial; está registrado nos riftes das bacias de Marajó e Potiguar (pré-transtração). Durante o Neobarremiano, eventos magmáticos iniciaram a fragmentação continental que culminou, no Aptiano, na implantação de falhas e zonas de fratura intracontinentais que produziram bacias *en échelon* com direção NW–SE (sintranstração; MATOS, 2000).

O Estágio Sin-transformante (MATOS, 2000; ou Estágio Rifte Principal de YE *et al.*, 2017) é marcado pelo desenvolvimento de falhas distensionais NW–SE associadas a falhas E–W de rejeito direcional/transtrativo dextral, como consequência da movimentação entre as placas Sul-americana e Africana entre o Aptiano e o Cenomaniano. A deformação progressiva foi controlada por um conjunto inicial de falhas transformantes que definiu regiões de *releasing* e *restraining bends* ao longo do corredor de cisalhamento da MEB. A partir do Cenomaniano, a evolução do contexto divergente permitiu a formação de crosta oceânica em meio à crosta continental adelgada, especialmente ao longo de protodorsais oceânicas. Falhas de rejeito normal, oblíquo e direcional dextral alternantes são produtos do desenvolvimento dos centros de expansão, definindo um limite litosférico entre as placas Sul-americana e Africana (AZEVEDO, 1991; MATOS, 2000).

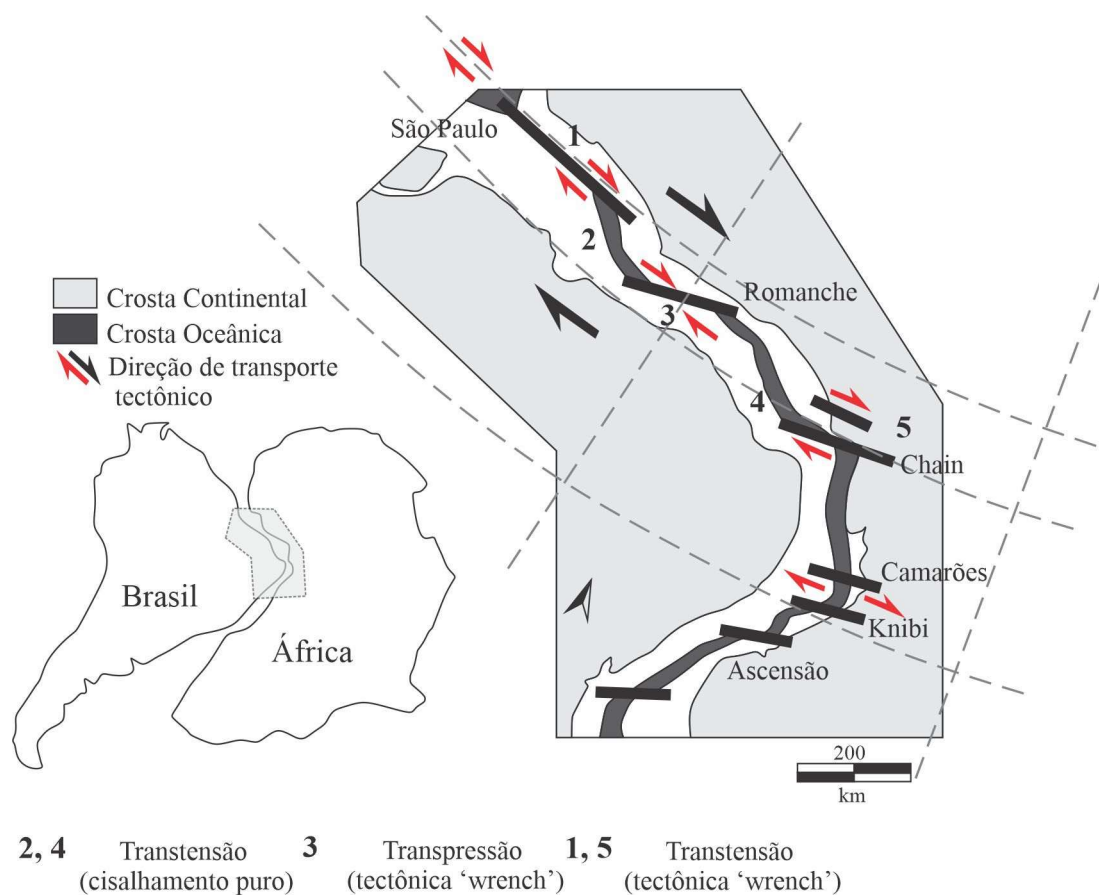


Figura 04 - Distribuição da deformação no Atlântico Equatorial durante o estágio sin-transformante (Albiano), controlada pelas falhas transformantes, segmentando a MEB em *releasing* e *restraining bends*. Setas pretas mostram a cinemática Brasil-África; setas vermelhas indicam campos de tensão anômalos com transpressão/transtração. Pares conjugados: (1) Pará-Maranhão/Costa do Marfim; (2) Barreirinhas/Tano; (3) Icarai-Acaraú (Ceará)/Salt Pond-Accra; (4) Mundaú e W-Potiguar/Keta-Togo-Benin; (5) Potiguar-Benin-Benue. LIMA (2023), adaptado de MATOS (2000).

O Estágio Pós-Transformante de Margem Passiva (MATOS, 2000) é caracterizado pela cessão da intensa atividade tectônica nas margens continentais. Resfriamento litosférico e subsidência generalizada são consequências, refletindo a transferência da movimentação transformante para regiões próximas das dorsais (AZEVEDO, 1991; MATOS, 2000)

2.3 O SISTEMA *PULL-APART* DE BARREIRINHAS E A BACIA DE BARREIRINHAS

O setor central da Margem Equatorial Brasileira (MEB) e sua contraparte africana configuram um sistema *pull-apart* desenvolvido na interface entre segmentos transformantes e divergentes, cuja evolução se deu sob cinemática predominantemente

transcorrente-transtricional sobre embasamento cristalino heterogêneo rifteado em múltiplas fases (DE CASTRO et al., 2024; MATOS, 1999; MILANI et al., 2000). Em Barreirinhas, a geometria romboédrica em “lazy-Z” e os depocentros assimétricos refletem a interação entre zonas de fratura oceânicas de grande porte — notadamente St. Paul e Romanche — e feições herdadas do embasamento (DE CASTRO et al., 2024; ASLANIAN et al., 2021; MOULIN et al., 2021). Modelos físicos e numéricos de bacias transcorrentes corroboram esse arranjo, incluindo a formação de estruturas em flor e depocentros *en échelon* durante pulsos de transtração/intercalações de encurtamento (MCCLAY; WHITEHOUSE, 2004; WU et al., 2009).

A evolução tectônica proposta para Barreirinhas envolve três fases principais (Figura 05): (i) Fase I (Barremiano superior–Aptiano), com o estabelecimento do Eixo de Rifte do Gurupi, caracterizado por *grabens* de falhas normais de alto ângulo; (ii) Fase II (Albiano inferior), marcada por tectônica *strike-slip* e geração de depocentros *en échelon* com estruturas em flor e episódios de soerguimento; e (iii) Fase III, associada ao desenvolvimento pleno do sistema *pull-apart* entre St. Paul e Romanche (DE CASTRO et al., 2024). A comparação entre as margens conjugadas indica maior sinuosidade de falhas e compartimentação na porção brasileira, versus falhas mais contínuas em domínio crustal relativamente mais homogêneo no lado africano — contraste consistente com bacias *pull-apart* transtensionais assimétricas (DE CASTRO et al., 2024; ASLANIAN et al., 2021; MOULIN et al., 2021).

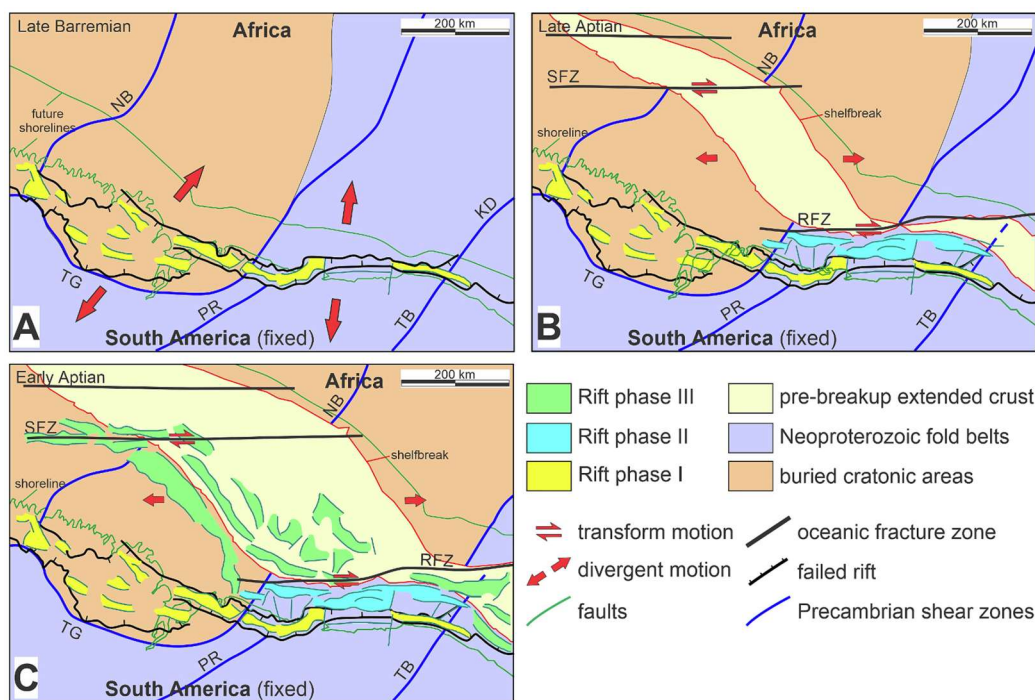


Figura 05 - Reconstrução esquemática das placas no setor central do Atlântico Equatorial, mostrando a evolução cinemática das principais fases de rifte. A América do Sul está fixa em coordenadas atuais. Indicam-se zonas de cisalhamento (linhas pretas tracejadas), zonas de fratura oceânicas (linhas pretas contínuas), braço abortado de rifte do Cretáceo (linhas vermelhas), limite continente-oceano (COB) e o arcabouço estrutural interno das bacias (compilado de AZEVEDO, 1991; MOHRIAK, 2003). Zonas de cisalhamento: Pirapemas (PR), Transbrasiliano (TB) e Tentugal (TG). DE CASTRO et al. (2024).

No contexto regional, a Bacia de Barreirinhas integra a MEB ao lado de Foz do Amazonas, Pará-Maranhão, Ceará e Potiguar, formadas durante a abertura do Atlântico Sul no Cretáceo, o que justifica correlações com depósitos marginais do Oeste africano (MATOS, 1999; MILANI et al., 2000). A estruturação segue trends NE-SW e E-W: os primeiros tendem a regimes distensionais a transtracionais, enquanto os segundos registram transcorrência/tranpressão, refletindo o controle das zonas de fratura oceânicas (ZALÁN et al., 2004). Em escala de bacia, a influência da Zona de Fratura Romanche separa domínios com estilos tectonossedimentares contrastantes, incluindo sistemas de horsts e grabens NW-SE por reativação distensional no rifte *onshore* e plataforma rasa, seguidos por ativação transformante com cinemática dextral E-W de caráter sobretudo transtrativo, provavelmente desde o Albiano (MONTENEGRO et al., 2021; ZALÁN et al., 2004).

Do ponto de vista estratigráfico (Figura 06), a Bacia de Barreirinhas apresenta megassequências pré-rifte, rifte e drifte, análogas às demais margens passivas brasileiras

(FEIJÓ, 1994; TROSDTORF JR. et al., 2007). O Grupo Canárias (rifte) reúne arenitos e folhelhos com forte controle tectônico e variação faciológica nas bordas (Formações Barro Duro, Tutóia e Bom Gosto), passando a folhelhos lacustres centrais (Arpoador), com idade eo- a mesoalbiana sustentada por foraminíferos planctônicos e palinómorfos (REGALI et al., 1985; TROSDTORF JR. et al., 2007). O Grupo Caju (drifte transgressivo) inicia com arenitos marinho-rasos (Periá) e progride para calcilitos, folhelhos e margas (Preguiças), culminando em calcarenitos/biolititos (Bonfim) de plataforma rasa, datados do Neoalbio–Cenomaniano por microfósseis (PAMPLONA, 1969; REGALI et al., 1985; TROSDTORF JR. et al., 2007). O Grupo Humberto de Campos (Turoniano–Chattiano) abrange leques costeiros (Areinhas), carbonatos plataformais/talúdicos (Ilha de Santana) e um pacote de folhelhos, calcilitos, margas e turbiditos de mar profundo (Travosas); em plataforma, são comuns falhas lítricas com *rollovers* no intervalo Mesocenomaniano–Mesocampaniano (ZALÁN et al., 2004). A coluna se completa com carbonatos de alta energia (Pirabas) e depósitos siliciclásticos do Grupo Barreiras (FEIJÓ, 1994; TROSDTORF JR. et al., 2007). Para o Cretáceo Superior, assembleias de ostracodes indicam paleoambientes neríticos interno-a-externo (TROSDTORF JR. et al., 2007; SANTOS FILHO et al., 2017).

Em síntese, a integração do arcabouço transcorrente-transtensional (*pull-apart*) com a arquitetura rifte–drifte explica a compartimentação de depocentros, a assimetria estrutural e a distribuição das sequências sedimentares em Barreirinhas. As visões estruturais regionais (MATOS, 1999; MILANI et al., 2000; ZALÁN et al., 2004), os modelos de bacias *strike-slip* (MCCLAY; WHITEHOUSE, 2004; WU et al., 2009) e a interpretação sismoestrutural local (DE CASTRO et al., 2024; MONTENEGRO et al., 2021) convergem para um cenário em que o controle transformante e as heterogeneidades do embasamento ditaram tanto a geometria quanto a evolução estratigráfica da bacia.

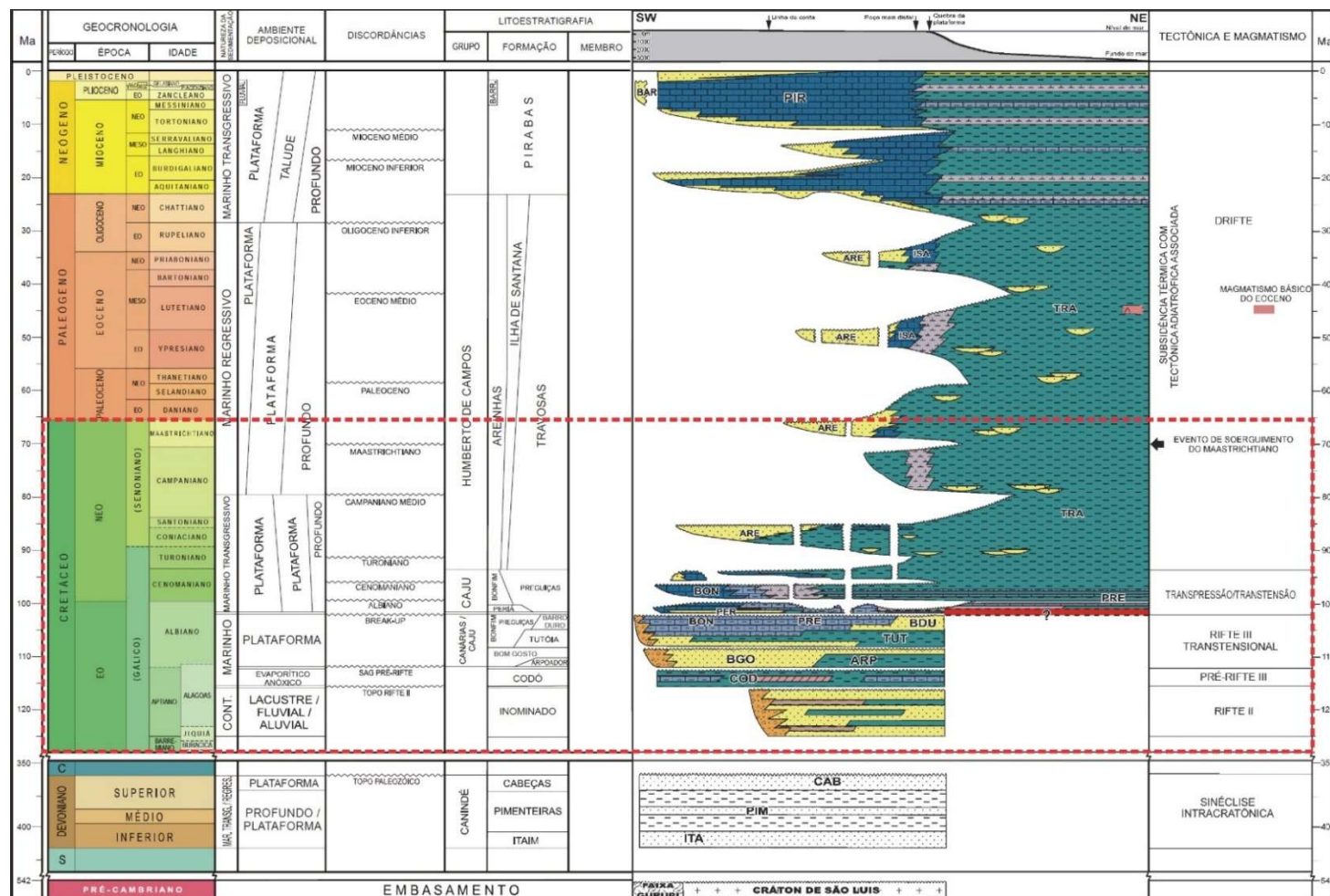


Figura 06 - Carta estratigráfica da Bacia de Barreirinhas com destaque para a seção cretácea (retângulo vermelho pontilhado), alvo do presente estudo. TROSDTORF JR. *et al.* (2007).

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 O MÉTODO SÍSMICO DE REFLEXÃO

A sísmica de reflexão é um método indireto de imageamento da subsuperfície que se baseia na geração e na propagação de ondas elásticas e em princípios análogos aos da ótica geométrica (reflexão e refração). Uma fonte controlada — em geral canhões de ar em ambiente marinho ou explosivos e vibradores em terra — emite frentes de onda que se propagam até interfaces com contraste de impedância acústica; nesse limite de propriedades, a energia incidente particiona-se em componentes refletidas e refratadas conforme as leis de Snell-Descartes (SHERIFF; GELDART, 1995; TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990; YILMAZ, 2001). As ondas refletidas retornam à superfície e são registradas por hidrofones ou geofones como variações de amplitude no tempo, compondo traços sísmicos que, organizados espacialmente, formam seções (2D) ou volumes (3D). O sinal útil corresponde à parcela do registro associável a feições geológicas, distinguindo-se do ruído e de artefatos de aquisição inevitáveis (LAVERGNE, 1989; SHERIFF, 2002; Figura 07).

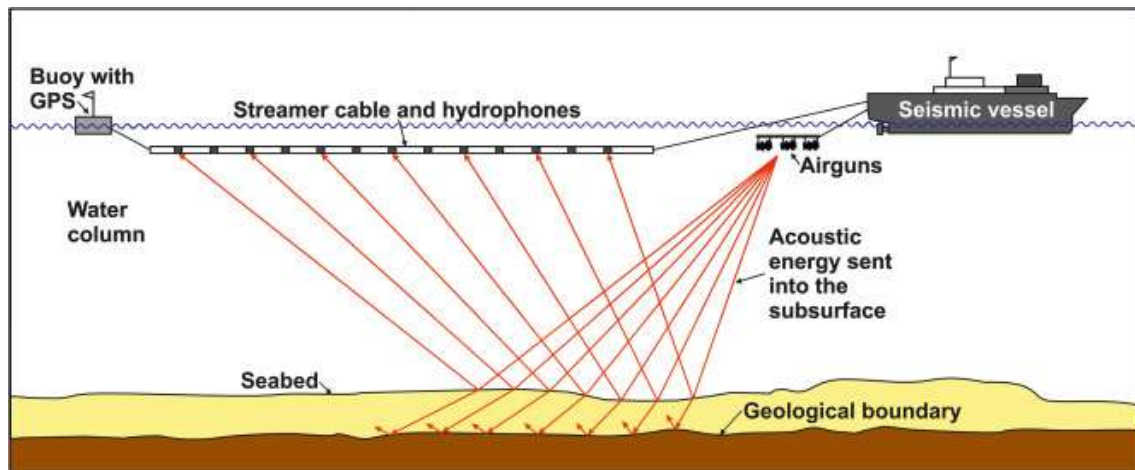


Figura 07 – Seção esquemática de um levantamento sísmico marinho 2D, no qual pulsos acústicos gerados por *airguns* refletem nas camadas geológicas e são registrados por hidrofones no *streamer*. Fonte: COX et al. (2020)

A aquisição 2D amostra a subsuperfície ao longo de linhas que produzem uma imagem com um eixo espacial e o eixo do tempo de trânsito; a aquisição 3D, por sua vez, coleta famílias de linhas e geometrias de receptores que permitem reconstruir um volume de refletividade, aumentando a fidelidade geométrica de refletores e estruturas. A qualidade

do imageamento depende criticamente da razão sinal-ruído, da largura de banda da fonte, da amostragem temporal e espacial e da acurácia da geometria de tiros e receptores (SHERIFF; GELDART, 1995; BROWN, 2011; CHOPRA; MARFURT, 2007). Em ambos os casos, as medidas brutas incluem múltiplas reflexões, ruído aleatório e coerente, efeitos de topografia e de superfície livre, exigindo um processamento criterioso antes da etapa interpretativa (YILMAZ, 2001).

O processamento aplica um encadeamento de rotinas destinadas a maximizar a coerência do sinal primário e o posicionamento estrutural. Inicia-se usualmente por pré-processamentos e condicionamento (edição de traços, deconvolução, correções estáticas/topográficas e de maré, supressão de ruído), avança para a análise de velocidades e correção NMO seguidas de empilhamento CMP, e incorpora atenuação de múltiplas por esquemas preditivos e de superfície (BERKHOUT, 1984; YILMAZ, 2001). A construção do modelo de velocidades subsidia migração em tempo ou em profundidade, que colapsa difrações e reposiciona eventos para sua localização verdadeira; etapas finais de equalização preparam seções/volumes para interpretação (BIONDI, 2006; BROWN, 2011). Quando requerido por objetivos estratigráficos ou estruturais, realizam-se conversões tempo-profundidade com velocidades calibradas por perfis geofísicos de poços como o perfil sônico.

A interpretação sísmica, por definição, é ambígua e sensível à qualidade do dado, buscando descrever a geologia e sua evolução ao longo do tempo (HERRON, 2011). A leitura sismoestrutural mapeia superfícies-chave, sistemas de falhas (normais, reversas, transcorrentes), dobras e zonas de deformação; a leitura sismoestratigráfica organiza as imagens em sismo-sequências com base em terminações (onlap, downlap, toplap, truncamento) e padrões de refletores, permitindo reconstruir arquitetura e controles de acomodação e aporte (MITCHUM; VAIL; SANGREE, 1977; BROWN, 2011). Em paralelo, atributos sísmicos — transformações do traço/volume que exploram amplitude, fase, frequência, descontinuidade e geometria — ampliam a capacidade de detecção de feições sutis e a discriminação de fácies sísmicas, auxiliando na extração de elementos arquiteturais deposicionais e na caracterização de heterogeneidades estruturais (TANER; KOEHLER; SHERIFF, 1979; CHOPRA; MARFURT, 2005; CHOPRA; MARFURT, 2007).

A escolha e a combinação de atributos dependem do objetivo: atributos instantâneos de amplitude, fase e frequência podem realçar padrões estratigráficos; coerência e semelhança ajudam a delinear descontinuidades e traçados de falhas; curvatura e derivados geométricos evidenciam dobras suaves, rollovers e zonas de flexura; decomposição espectral em janelas específicas pode destacar empilhamentos sutilmente afinados ou variações de espessura abaixo do poder de resolução da banda dominante (PARTYKA; GRIDLEY; LOPEZ, 1999; CHOPRA; MARFURT, 2007). A análise AVO e atributos elásticos, quando disponíveis, oferecem indícios adicionais de contrastes de propriedades rocha-fluido, embora demandem controle rigoroso de condicionamento e calibração.

Mesmo quando o foco primário não é a identificação direta de reservatórios, a integração entre processamento robusto, interpretação sismoestrutural e sismoestratigráfica e análise de atributos fornece subsídios sólidos para caracterizar a arquitetura tectono-estratigráfica de bacias e apoiar modelos evolutivos regionais. Em aplicações exploratórias, essa mesma estrutura metodológica ancora a identificação dos elementos e processos do sistema petrolífero — rochas geradoras, reservatórios, selantes, armadilhas, migração e sincronismo — com o devido reconhecimento das incertezas e da não-unicidade interpretativa (MAGOON; DOW, 1994; BROWN, 2011). Por fim, recomenda-se integrar sistematicamente o imageamento de reflexão com dados de poços, refração, gravimetria e magnetometria para reduzir ambiguidades e calibrar velocidades e propriedades elásticas em escala regional (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990; BIONDI, 2006).

3.2 ESTRATIGRAFIA DE SEQUÊNCIAS

A Estratigrafia de Sequências consolidou-se como um método inovador de análise estratigráfica e uma mudança de paradigma na geologia de bacias sedimentares. Essa evolução metodológica superou a perspectiva gradualista ao enfatizar o catastrofismo atualista e a sedimentação episódica, reconhecendo que o registro sedimentar é pontuado, em todas as escalas, por hiatos de erosão e não deposição; eventos episódicos de grande magnitude deixam assinatura predominante na coluna em relação aos processos cotidianos (DELLA FÁVERA, 2011; HOLZ, 2012). O modelo estratigráfico moderno,

com ênfase genética e dinâmica, ganhou forma em 1977 com a “revolução sismoestratigráfica” da Exxon Production Research Company, integrando técnicas sísmicas digitais multicanais e afastando-se da estratigrafia descritiva centrada na “trindade” lito-, bio- e cronoestratigráfica (DELLA FÁVERA, 2011; HOLZ, 2012).

Nessa abordagem, estudam-se as relações entre rochas sedimentares em um arcabouço cronoestratigráfico de estratos geneticamente relacionados, limitados por superfícies de erosão ou não deposição — as discordâncias — ou por suas conformidades correlativas (DELLA FÁVERA, 2001). A estratigrafia observa e descreve sucessões de rochas e interpreta sua gênese, definindo unidades estratigráficas como pacotes distintos baseados em critérios geológicos. A arquitetura deposicional — os padrões de empilhamento e a assinatura estratigráfica de uma bacia — é controlada por quatro variáveis principais: subsidência tectônica, eustasia, aporte sedimentar e clima; por simplificação analítica, o controle climático é frequentemente desconsiderado e o aporte tratado como aproximadamente constante ao longo dos ciclos (HOLZ, 2012).

A interação entre eustasia e subsidência determina variações relativas do nível do mar que criam espaço de acomodação para deposição. Consequentemente, os sedimentos contidos entre duas discordâncias formam um pacote geneticamente vinculado, a sequência deposicional (VAIL, 1987), perspectiva genética que sustenta a Estratigrafia de Sequências contemporânea (HOLZ, 2012).

3.2.1 Conceitos básicos

A criação e a destruição do espaço de acomodação — suporte para a deposição da sucessão de estratos que compõe uma sequência — são regidas pelas variações do nível de base, definido como uma superfície teórica abaixo da qual ocorre deposição (no domínio continental ou marinho) e acima da qual predomina erosão, sendo tomado, em essência, como o nível do mar. Ao longo do tempo geológico, o nível de base oscila com diferentes magnitudes e frequências, resultando em três movimentos da linha de costa: regressão normal, regressão forçada e transgressão. Durante a evolução de bacias sedimentares, sucessivas oscilações de nível do mar influenciam diretamente os padrões de sedimentação; assim, cada sequência representa a deposição durante um ciclo completo de mudança do nível de base (CATUNEANU, 2011; HOLZ, 2012).

A análise envolve o espessamento ou afinamento de sucessões, a identificação de fácies sedimentares e a definição de empilhamentos retrogradacionais, agradacionais ou progradacionais. Este último, resultante da interação entre acomodação e sedimentação, fornece a base metodológica para interpretar uma sequência em termos de seus tratos de sistemas e de suas superfícies estratigráficas (HOLZ, 2012).

As superfícies estratigráficas que limitam unidades são identificadas por critérios de contato entre fácies, mudanças significativas na composição das rochas e, especialmente, pela geometria estratal. Em escala regional, as terminações estratais — *onlap*, *downlap*, *toplap* e truncamento — indicam a geometria deposicional. Entre as superfícies mapeáveis destacam-se: discordância subaérea, conformidade correlativa, superfície de inundação máxima, superfície regressiva máxima, superfície regressiva de erosão marinha e superfícies transgressivas de ravinamento (CATUNEANU, 2006; CATUNEANU, 2011). Nem todo tipo de dado permite reconhecer todas as superfícies, e nem todas ocorrem em todos os ambientes; ainda assim, a superfície fundamental do arcabouço é a discordância, formada ao término da regressão forçada, tendo como equivalente distal a conformidade correlativa (HOLZ, 2012).

Uma sequência pode ser subdividida em tratos de sistemas e em parassequências. Os tratos de sistemas deposicionais são os blocos fundamentais de uma sequência, definidos por posição interna, superfícies limitantes e geometria (empilhamentos retrogradacionais, agradacionais e progradacionais). Reconhecem-se quatro tratos: Trato de Sistemas de Nível Baixo (TSNB), Trato de Sistema Transgressivo (TST), Trato de Sistemas de Nível Alto (TSNA) e Trato de Sistemas de Regressão Forçada (TSRF), formados em quatro fases específicas do ciclo de variação do nível de base e refletindo situações deposicionais distintas (CATUNEANU, 2006; CATUNEANU, 2011). Parassequências são unidades compostas por sistemas deposicionais ligados entre si genética e temporalmente, formando sucessões de fácies progradantes delimitadas por superfícies de inundação marinha; seu caráter progradacional produz ciclos de raseamento para o topo (e, por vezes, engrossamento/afinamento textural ascendente; VAN WAGONER et al., 1988). Quando agrupadas (duas ou mais), constituem conjuntos de parassequências, cuja configuração pode ser progradacional, retrogradacional ou agradacional (VAN WAGONER et al., 1988; VAN WAGONER et al., 1990).

Dessa forma, o registro sedimentar organiza-se em unidades hierárquicas de diferentes ordens: elementos de menor escala espacial e temporal são agrupados em unidades progressivamente mais abrangentes. A sequência deposicional é a unidade de hierarquia máxima (menor número de ordem), subdividida em tratos de sistemas, que por sua vez são constituídos por parassequências; no outro extremo da hierarquia situam-se as fácies sedimentares. Cada nível representa um ciclo sedimentar com magnitude própria (HOLZ, 2012).

3.3 SISMOESTRATIGRAFIA

A estratigrafia possui diversos ramos definidos pelo atributo utilizado para estabelecer e caracterizar unidades estratigráficas. Quando se baseia no método sísmico de reflexão — aplicando as propriedades físicas das ondas — denomina-se sismoestratigrafia. O avanço da sísmica digital multicanal introduziu novas técnicas de interpretação na análise de bacias, permitindo subdividir, correlacionar e mapear rochas de modo geneticamente consistente e inaugurando a Estratigrafia de Sequências (DELLA FÁVERA, 2001). Nessa abordagem, imagens contínuas de subsuperfície representam, entre outros elementos, geomorfologia, contexto tectônico, estilos estruturais, componentes deposicionais e arquitetura estratigráfica regional (CATUNEANU, 2006). Formalizada em 1977 na série de artigos do *AAPG Memoir 26*, a sismoestratigrafia passou a agrupar refletores (proxy de estratos) em pacotes geneticamente relacionados, limitados cronoestratigraficamente — as sismosequências — que expressam, no domínio sísmico, as sequências deposicionais (HART, 2013). Cada refletor resulta do contraste de impedância acústica entre pacotes rochosos adjacentes, propriedade que marca superfícies cronologicamente significativas; o objetivo central é analisar sequências e sismofácies para, a partir das variações dos parâmetros sísmicos, interpretar tratos de sistemas e mudanças geológicas, oferecendo um arcabouço para reconhecer ambientes e litofácies deposicionais (DELLA FÁVERA, 2001).

O método de reflexão envolve aquisição, processamento e interpretação; neste trabalho, foram empregadas técnicas de processamento pós-empilhamento e interpretação, tradicionalmente estruturada, na “Escola da Exxon”, em etapas de análise de sismosequências, análise por perfis, amarração com sismogramas sintéticos, análise de

sismofácies, interpretação de ambientes e litofácies, modelagem sísmica e interpretação final (DELLA FÁVERA, 2001). Inicialmente ancoradas em dados 2D, as análises sismoestratigráficas evoluíram para volumes 3D, ampliando a robustez espacial das interpretações (HART, 2013). A base interpretativa inclui a identificação de sismofácies (Figura 08), da geometria externa (Figura 09) dos corpos e dos padrões de continuidade e terminações de refletores (*onlap*, *downlap*, *toplap* e truncamento; Figura 10) nos pontos de convergência, que definem as superfícies cronoestratigráficas limitantes dos tratos de sistemas (MITCHUM et al., 1977; EMERY; MYRES, 1996). O resultado integra a história deposicional da bacia e sustenta a predição de litologias em áreas não perfuradas (HART, 2013).

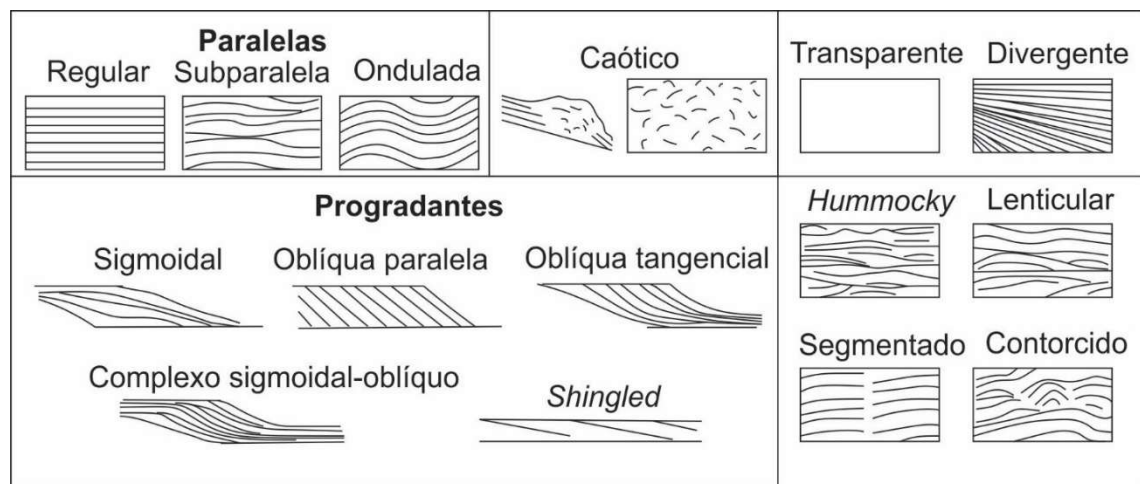


Figura 08 - Principais configurações internas de sismofácies em dados sísmicos: regular, subparalela e ondulada, que compõem o subgrupo das sismofácies paralelas dentro do grupo das não-progradantes. MITCHUM et al. (1977) e SEVERIANO RIBEIRO (2001).

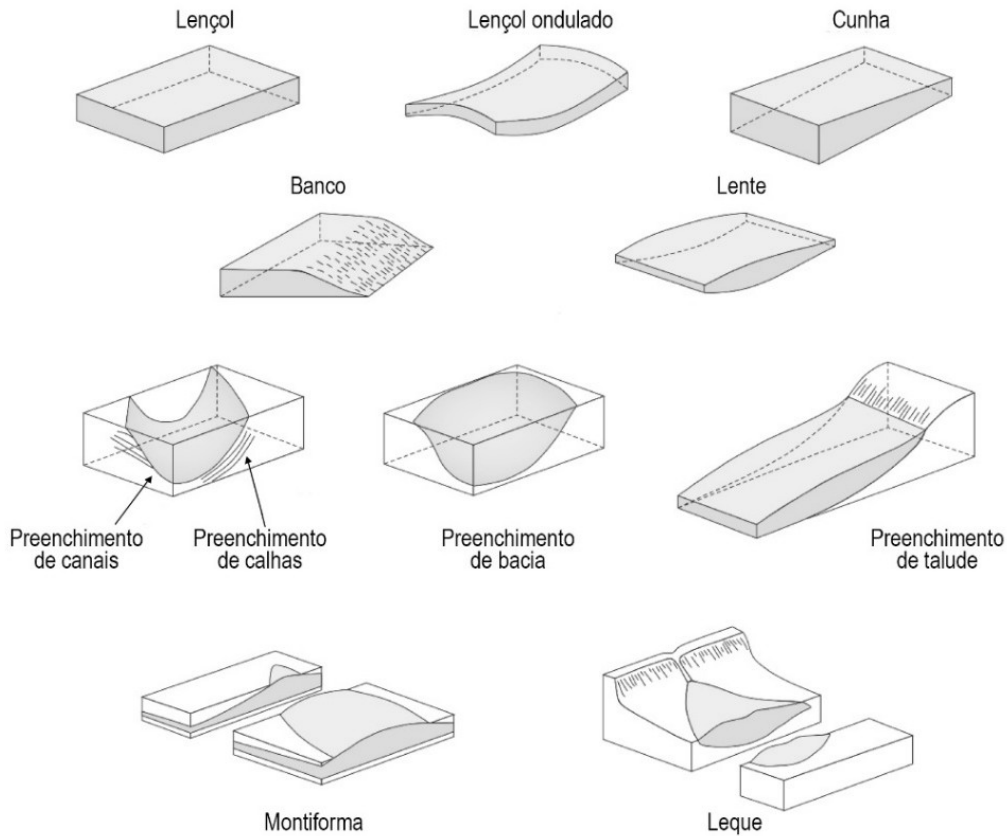


Figura 09 - Geometrias externas em perfis sísmicos: lençol (*sheet*), lençol ondulado (*wavy sheet*), cunha (*wedge*), banco (*bank/mounded sheet*), lente (*lens*), preenchimento de calha (*channel fill*), preenchimento de bacia (*basin fill*), preenchimento de talude (*slope fill*), montiforme (*mounded*), leque (*fan*). MITCHUM et al. (1977) e SEVERIANO RIBEIRO (2001).

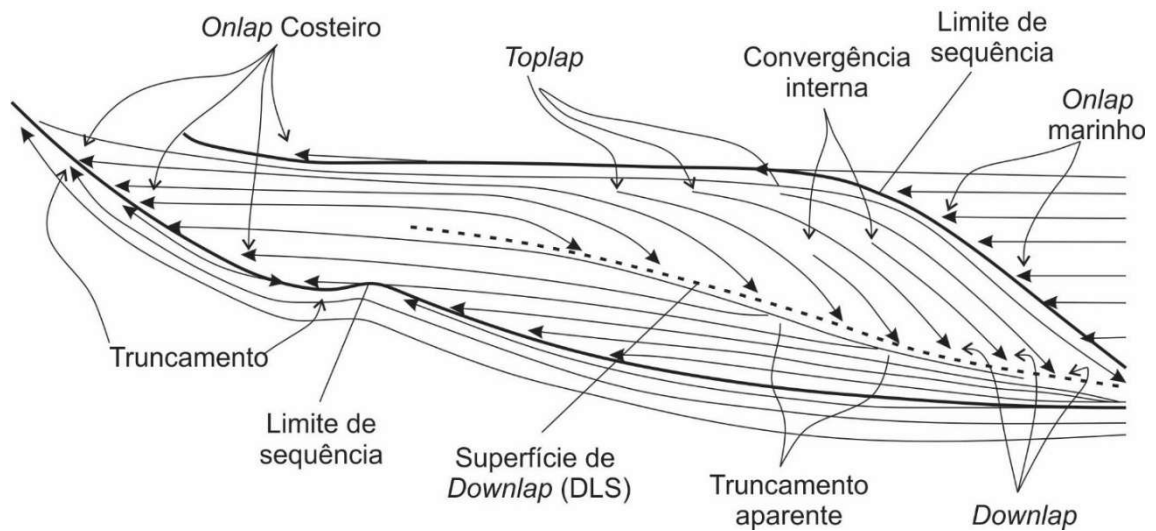


Figura 10 - Terminações de refletores (proxy dos estratos) contra superfícies cronoestratigráficas — onlap, downlap, toplap e truncamento erosivo — que auxiliam na definição de limites de sequência e superfícies-chave de trato. MITCHUM et al. (1977) e SEVERIANO RIBEIRO (2001).

3.4 ESTRATIGRAFIA DE SEQUÊNCIAS EM BACIAS RIFTE

A sismoestratigrafia, surgida em meados da década de 1960, impulsionou uma verdadeira revolução nos métodos de análise estratigráfica de unidades sedimentares. Originalmente, foi definida como uma nova abordagem de interpretação aplicada a dados de reflexão sísmica, na qual as propriedades das reflexões permitem correlações diretas com conceitos geológicos (MITCHUM; VAIL, 1977b). O marco unificador desse campo foi a publicação do *AAPG Memoir 26* (PAYTON, 1977), desenvolvida na EXXON, que consolidou princípios e procedimentos interpretativos (KUCHLE; SCHERER, 2010). Nessa coletânea, VAIL *et al.* (1977) formalizaram a “sequência deposicional” como unidade composta por uma sucessão de estratos relativamente concordantes e geneticamente relacionados, limitados na base e no topo por discordâncias ou por suas conformidades correlativas. Anos depois, POSAMENTIER *et al.* (1988) forneceram os pilares da Estratigrafia de Sequências moderna, ampliando seu uso para além das linhas sísmicas e possibilitando aplicações integradas a dados de poço e afloramento; nesse escopo, reafirmaram a sequência deposicional como unidade fundamental.

Outras propostas complementares e definições alternativas emergiram com a noção de “sequências genéticas” limitadas por superfícies de inundação (GALLOWAY, 1989) e com o modelo “transgressivo–regressivo” (EMBRY; JOHANNESSEN, 1992). Buscando integrar e harmonizar esses desenvolvimentos, CATUNEANU (2006) revisitou a Estratigrafia de Sequências e definiu-a como o estudo das relações entre rochas dentro de um arcabouço de estratos geneticamente relacionados, limitados por **quaisquer** superfícies cronoestratigráficas (não apenas discordâncias), consolidando a sismoestratigrafia como ferramenta central dessa abordagem quando aplicada a dados sísmicos na análise de bacias.

O modelo clássico foi concebido para bacias tectonicamente estáveis sob subsidência termal, típicas de margens passivas, nas quais a acomodação é controlada majoritariamente por variações eustáticas (VAIL *et al.*, 1977; POSAMENTIER; VAIL, 1988; POSAMENTIER *et al.*, 1988; VAN WAGONER *et al.*, 1990; CATUNEANU, 2006). Nesse contexto, POSAMENTIER *et al.* (1988) discutem a deposição sob três premissas: aumento da taxa de subsidência em direção à bacia, taxa de aporte sedimentar aproximadamente constante e oscilações do nível do mar relativo com comportamento

sinusoidal. A partir de sua consolidação, a Estratigrafia de Sequências tornou-se amplamente empregada na análise de bacias por sua utilidade na predição de eventos deposicionais e por sua contribuição direta à indústria do petróleo, estimulando variantes do modelo original.

Em bacias do tipo rifte, entretanto, o principal fator controlador da sedimentação não é a eustasia, mas a atividade tectônica, seguida por magmatismo e variações climáticas (BOSENCE, 1998). Assim, para análises coerentes nesse tipo de contexto, impõe-se adaptar o modelo clássico a um cenário tectonicamente ativo, cuja estruturação geométrica e padrões de preenchimento diferem substancialmente dos observados em margens passivas (KUCHLE *et al.*, 2005).

3.4.1 Premissas básicas

Uma vez que os conceitos da Estratigrafia de Sequências clássica não podem ser aplicados diretamente a bacias rifte, impõe-se reavaliar parâmetros como o contexto tectônico, a evolução e a estruturação geométrica da bacia, bem como os fatores controladores da sedimentação, adotando premissas específicas para a análise estratigráfica. De acordo com KUCHLE *et al.* (2005), o semi-gráben constitui a unidade estrutural básica de um rifte e é formado por uma rampa de declive variável e uma falha de borda (Figura 11). Em um semi-gráben isolado, a região que sofre movimento ascendente relativo (soerguimento) corresponde ao *footwall*, enquanto a que sofre subsidência corresponde ao *hangingwall*. Em semi-grábens adjacentes, pulsos tectônicos promovem rotação da rampa: o setor subsidente integra o *hangingwall* do semi-gráben ativo, ao passo que o setor soerguido integra o *footwall* do semi-gráben vizinho. O limite entre esses domínios define o ponto de rotação (*tilt point*), cuja posição varia no espaço e no tempo em função da intensidade do pulso tectônico gerador (KUCHLE *et al.*, 2005).

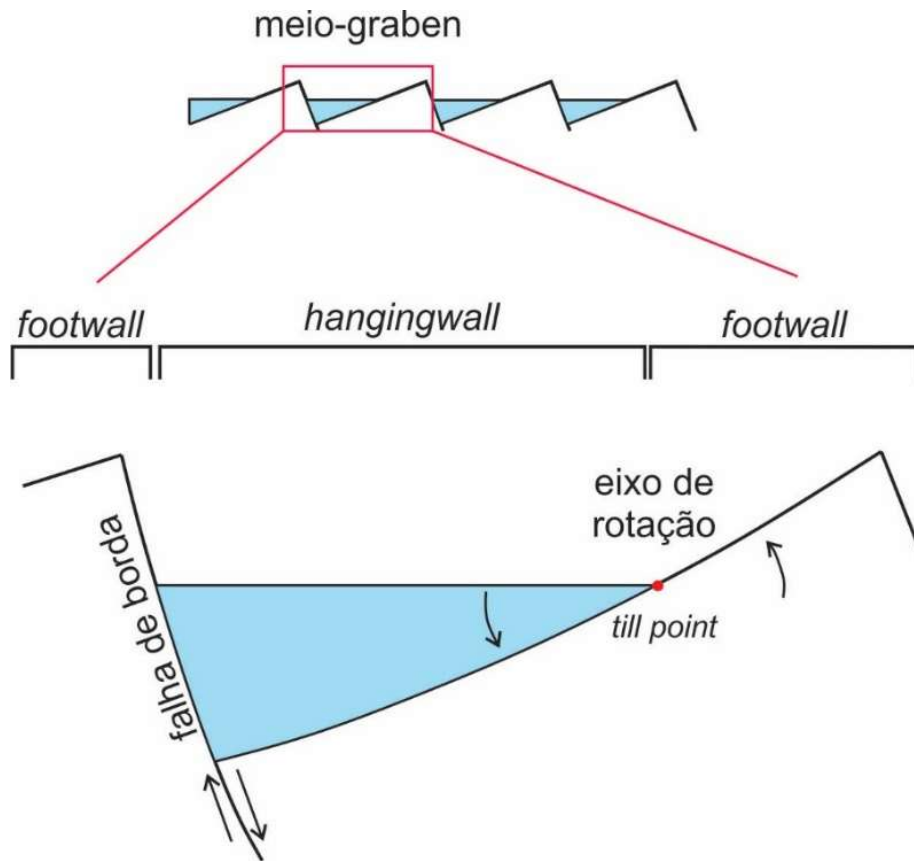


Figura 11 - Unidade estrutural fundamental de um rifte: proposta de compartimentação interna de um semi-gráben isolado, composto por hangingwall (setor em subsidência) e footwall (setor em soerguimento), separados pelo ponto de rotação (*tilt point*). KUCHLE et al. (2005).

A sedimentação em bacias rifte não pode ser explicada apenas pelos conceitos da Estratigrafia de Sequências clássica; por isso, impõe-se reavaliar parâmetros como o contexto tectônico, a evolução e a estruturação geométrica da bacia, bem como os fatores que controlam a criação de espaço de acomodação e o aporte sedimentar, adotando premissas específicas para a análise estratigráfica. Além da tectônica, BOSENCE (1998) destaca o papel do magmatismo e do clima na modulação tanto das taxas de criação de espaço quanto do fornecimento de sedimentos. Em linha com essa visão, KUCHLE et al. (2005) propõem seis parâmetros controladores do preenchimento em riftes, discutidos a seguir.

Do ponto de vista tectônico, principal fator de controle nos riftes, a preservação sedimentar decorre de pulsos que criam e, simultaneamente, podem destruir espaço de acomodação em função da rotação dos blocos. O clima, embora não determine a formação dos riftes — que ocorrem em todas as zonas climáticas —, é crucial para o preenchimento e a preservação, pois condiciona padrões e estilos de sedimentação, tipos litológicos, taxas

de transporte e acumulação, intensidade de intemperismo e erosão, variações do nível de base, ocorrência de carbonatos e tendências diagenéticas (BOSENCE, 1998; KUCHLE et al., 2005). O aporte sedimentar, como resposta integrada de tectônica e clima, controla os padrões de empilhamento: em semi-grábens, a sedimentação concentra-se preferencialmente na margem flexural, de modo que empilhamentos progradacionais tendem a avançar da margem para o depocentro, enquanto empilhamentos retrogradacionais se organizam do depocentro em direção à margem (KUCHLE et al., 2005).

O espaço de acomodação é primariamente controlado pela tectônica; em termos gerais, não há bacia sedimentar sem criação de espaço, nem preenchimento sucessivo sem incremento de espaço, e tampouco preservação quando o espaço previamente criado é destruído. Seu efetivo preenchimento, entretanto, depende do nível de base (nível lacustre, freático ou perfil de equilíbrio fluvial), parâmetro diretamente influenciado pelo clima (KUCHLE et al., 2005). O magmatismo atua como indicador de rifte ativo — especialmente quando associado a plumas mantélicas — e, em riftes continentais, as variações eustáticas (subordinadas aos controles anteriores) relacionam-se ao nível do lago; as oscilações do nível de base, por sua vez, balizam o ritmo de preenchimento do espaço disponível (KUCHLE et al., 2005).

Um aspecto adicional chave é a contemporaneidade entre deposição e erosão durante pulsos tectônicos. A rotação de blocos cria espaço por subsidência no *hangingwall* (favorecendo deposição) ao mesmo tempo em que destrói espaço por soerguimento no *footwall* (promovendo erosão). Assim, eventos deposicionais no *hangingwall* são cronocorrelatos a eventos erosivos no *footwall* de um mesmo semi-gráben (KUCHLE, 2004; KUCHLE et al., 2005, 2007). Ademais, há tipicamente um atraso do aporte em relação ao pulso gerador: o pulso cria quase instantaneamente (à escala geológica) o espaço de acomodação, mas a área-fonte demanda tempo para erodir, transportar e depositar. Em consequência, espera-se uma sucessão vertical característica formada por folhelhos lacustres profundos na base, sobrepostos por arenitos e sedimentos grossos deltaicos e costeiros lacustres associados a progradação retardada (Figura 12; KUCHLE, 2004; KUCHLE et al., 2005, 2007).

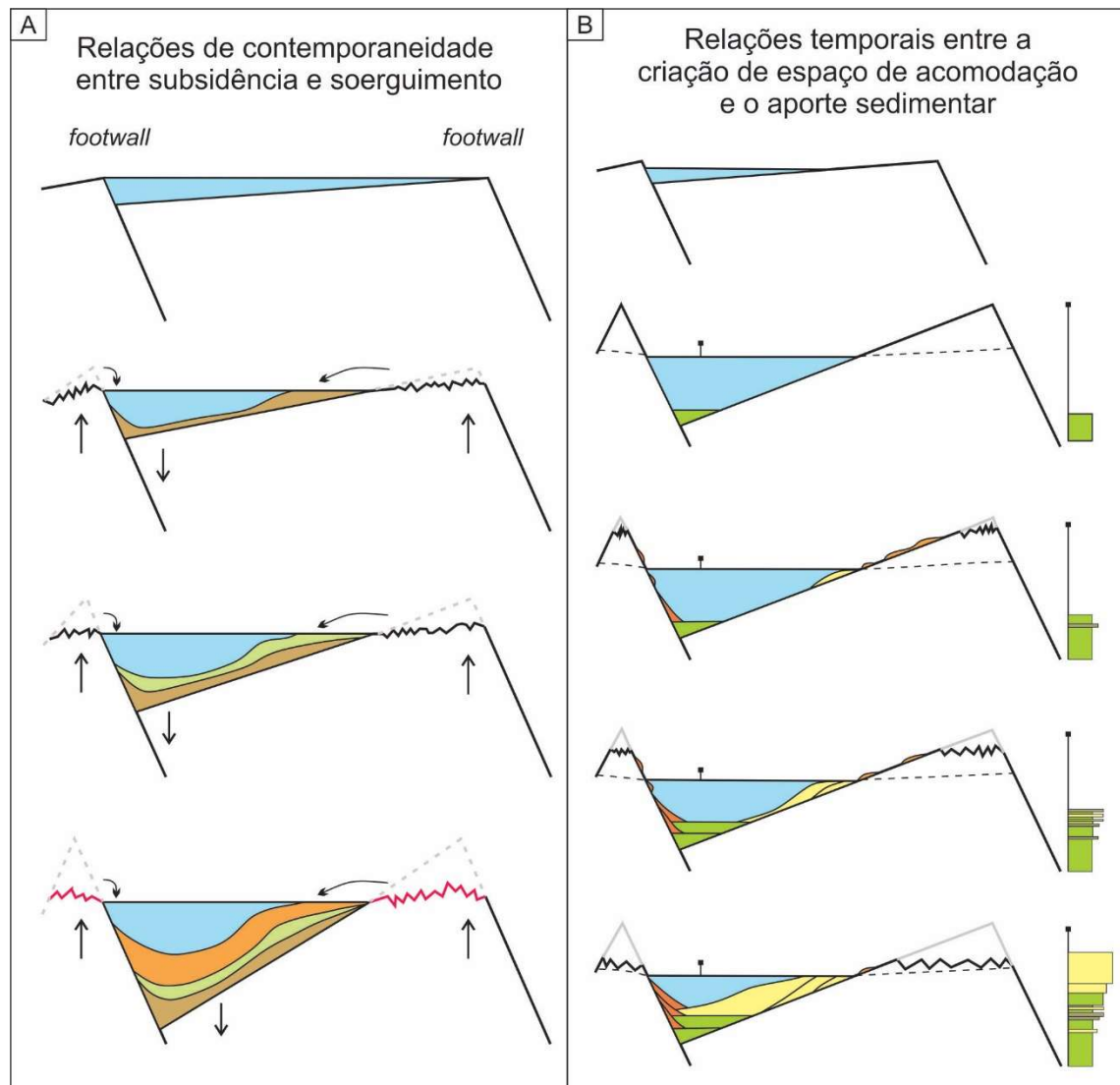


Figura 12 - Modelos propostos por KUCHLE et al. (2005): (A) para a relação de contemporaneidade entre a deposição no hangignwall e erosão no footwall, e (B) para a chegada atrasada do aporte sedimentar em relação ao pulso gerador.

3.4.2 Modelos tectono-estratigráficos de evolução de bacias rifte

Com base na interpretação de dados sísmicos e em observações do sistema de semi-grábens do Lago Tanganyika (leste africano), ROSENDAHL et al. (1986) propõem um modelo empírico para a caracterização estrutural e morfológica de semi-grábens ao longo da evolução dos riftes. No modelo, o semi-gráben é a unidade fundamental (*bloco construtor*) e sua interligação no tempo e no espaço leva à organização de sistemas de riftes mais complexos. Idealmente, os semi-grábens exibem morfologia sinusoidal, enquanto a falha de borda (ou sistema de falhas) apresenta geometria lítrica em corte

transversal (Figura 13a) e aspecto arqueado em mapa (Figura 13b). A subsidência da bacia implica uma componente de movimento horizontal que gera cisalhamento nas extremidades da falha de borda; formam-se, assim, calhas com maior rejeito no depocentro, diminuindo lateralmente em direção às extremidades. Conexões laterais e inversões ao longo da falha-mestra podem originar altos estruturais associados a rotação e cisalhamento (ROSENDAHL et al., 1986).

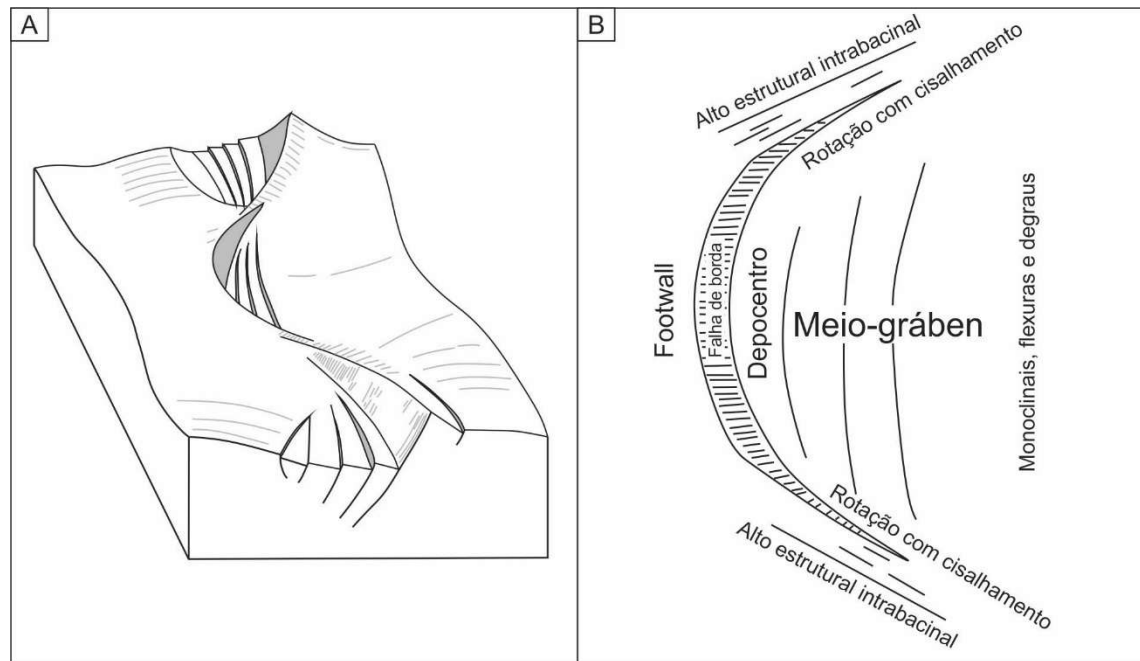


Figura 13 - Modelo de ROSENDAHL et al. (1986): (A) arranjo tridimensional de semi-grábens com morfologia sinusoidal e inversões da falha de borda, resultando em uma sucessão de blocos rotacionados; (B) geometria em planta de um semi-gráben isolado, com depocentro bem definido, falha de borda arqueada e componente de cisalhamento ao longo das extremidades. Retirado de ROSENDAHL et al. (1986).

A distribuição espacial e a evolução temporal dos sistemas deposicionais em bacias rifte são controladas predominantemente pela tectônica; ainda assim, clima, composição da área-fonte e flutuações do nível de base também modulam a sedimentação (PROSSER, 1993). Com base nessa premissa e em dados sísmicos, a autora propõe um modelo de evolução tectono-estratigráfica que integra padrões de reflexão e sistemas deposicionais (Figura 14).

No esquema de PROSSER (1993), distinguem-se cinco tratos de sistemas tectônicos (S1–S5). O estágio S1 corresponde ao pré-rifte (Figura 14). O Trato de Sistema de Início de Rifte (S2) marca o primeiro incremento de movimento ao longo da falha de borda, gerando depressão topográfica e redirecionamento de drenagens pré-existentes; as taxas

de criação de espaço de acomodação são baixas e o preenchimento fluvial–eólico tende a empilhamentos progradacionais a aggradacionais. O Trato de Sistema de Clímax de Rife (S3) registra a máxima extensão: a falha de borda atinge maiores rejeitos e se estabelece a geometria do semi-gráben, com soerguimento da área-fonte e desestabilização da rede de drenagens. Como a taxa de criação de espaço por subsidência supera a de sedimentação, idealiza-se um empilhamento retrogradacional, com predomínio de sedimentação lacustre na porção central do semi-gráben, lateralmente associada a leques aluviais, deltas e sistemas subaquosos controlados pela falha de borda.

No Trato de Sistema de Pós-rife Imediato (S4), o regime tectônico muda e cessa o tectonismo ativo na falha principal; a subsidência diferencial ligada à rotação do *hangingwall* deixa de atuar e a subsidência regional decresce, passando a ser controlada sobretudo pelo resfriamento litosférico. Por fim, durante o Trato de Sistemas de Pós-rife Tardio (S5), a resposta ao espaço de acomodação remanescente e ao preenchimento dá-se de forma lenta e gradual: cessada a atividade tectônica, flutuações eustáticas e climáticas tornam-se os principais controladores. À medida que o perfil fluvial se aproxima do equilíbrio, tende a ocorrer erosão das escarpas de falhas e aplainamento do relevo, ou, alternativamente, preserva-se a morfologia em virtude da subsidência termal; ademais, esse trato pode ser mascarado por eventos tectônicos subsequentes (PROSSER, 1993).

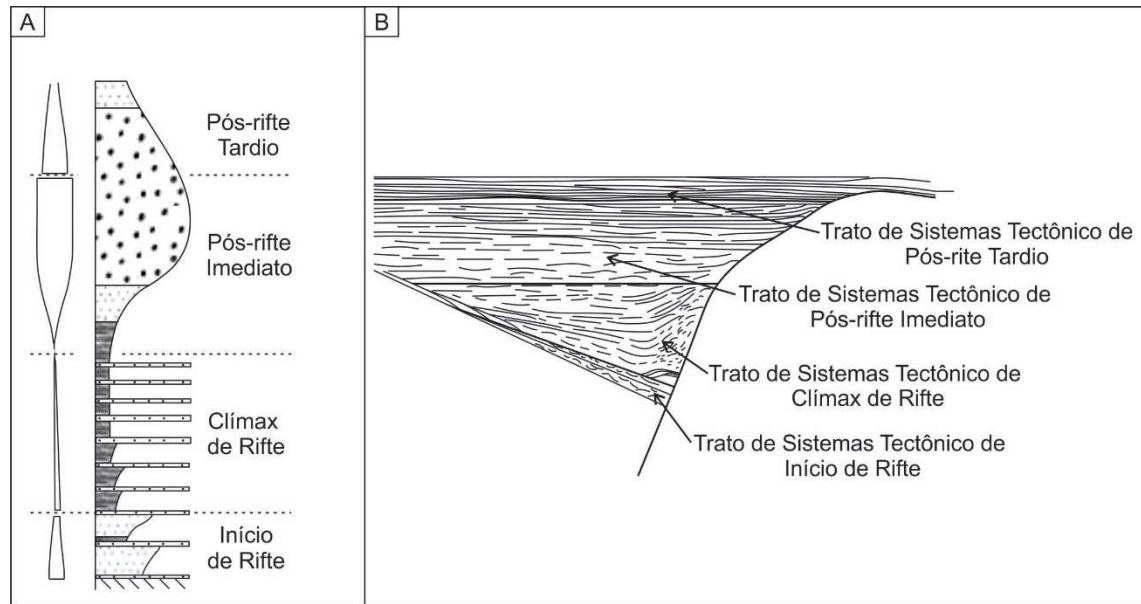


Figura 14 - Modelo de tratos de sistemas tectônicos de PROSSER (1993) — Início de Rife (S2), Clímax de Rife (S3), Pós-rife Imediato (S4) e Pós-rife Tardio (S5). Em (A), sucessão vertical idealizada; em (B), seção sísmica idealizada. PROSSER (1993).

BOSENCE (1998) propõe a classificação do preenchimento de bacias rife através do reconhecimento de discordâncias, desenvolvidas ao longo dos estágios de sua evolução tectonossedimentar. De acordo com o autor, a seção rife pode ser identificada a partir de suas superfícies limítrofes: na base, a discordância sin-rife, e no topo, a discordância pós-rife (Figura 15) (BOSENCE, 1998). A discordância sin-rife corresponde a uma superfície erosiva de expressão regional ou restrita, definida por uma não conformidade, marcada por onlaps dos estratos sin-rife sobre os blocos rotacionados da sucessão pré-rife. Uma característica importante dos estratos sin-rife é o espessamento destas unidades em direção à falha de borda, uma vez que estes sedimentos foram depositados durante distensão mecânica e subsidência. Além disso, variações laterais de fácies e estruturas de arrasto associadas a falhamentos também são indicativos de uma deposição sin-rife (BOSENCE, 1998). Por outro lado, a discordância pós-rife corresponde a uma superfície erosiva de expressão regional que limita a base dos estratos depositados durante a fase de subsidência termal ou pós-rife (BOSENCE, 1998). As três fases evolutivas de uma bacia rife (pré-, sin- e pós-) podem ser distinguidas através do reconhecimento das superfícies supracitadas e pela análise do padrão dos estratos (ou reflexões). Os estratos pré-rife encontram-se essencialmente basculados, porém paralelos, ao passo que os

estratos sin-rifte, apesar de também basculados, apresentam configuração divergente, gerada em função do caráter sin-tectônico da sedimentação; aqueles relacionados ao estágio pós-rifte, por sua vez, encontram-se paralelos e uniformes (BOSENCE, 1998).

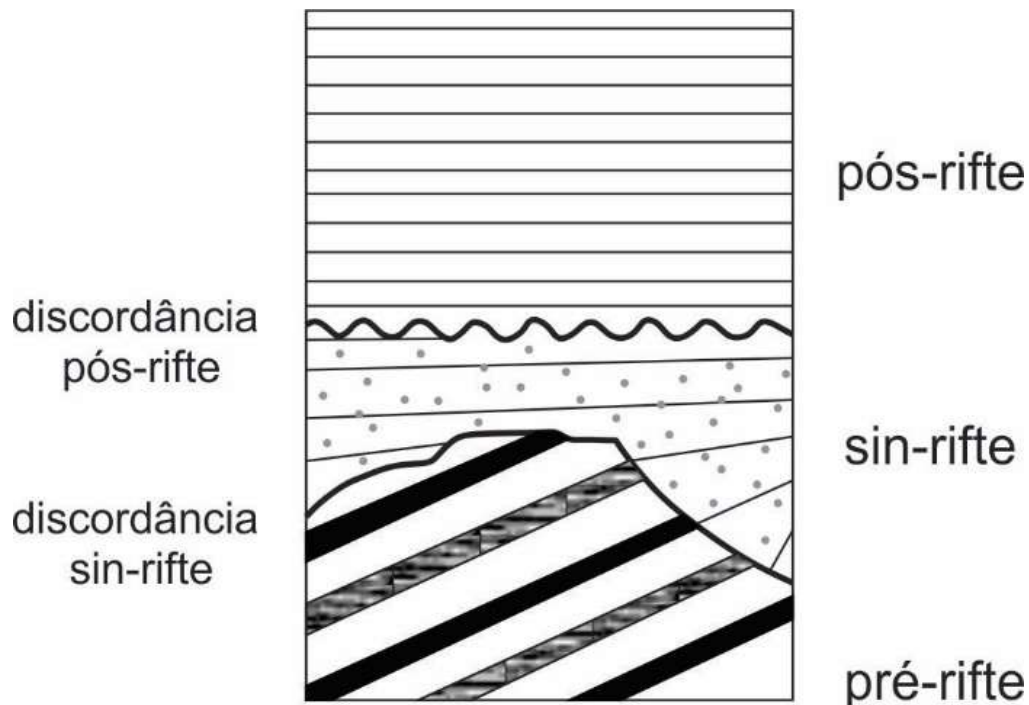


Figura 15 - Classificação do preenchimento de riftes proposta por BOSENCE (1998), com critérios estratigráficos e geométricos para distinguir as seções pré-, sin- e pós-rifte, bem como suas discordâncias limítrofes.

GAWTHORPE; LEEDER (2000) propõem um modelo conceitual para a evolução tectonossedimentar de bacias rifte, considerando a interação entre (i) a evolução tridimensional da bacia a partir do modelo de *fault-linkage*; (ii) a evolução do sistema de drenagens; e (iii) as implicações decorrentes de mudanças climáticas e variações no nível de base. Esses autores consideram o processo de propagação, crescimento, interação e “morte” de falhas como o principal fator controlador da arquitetura da bacia, ao passo que fatores não tectônicos — decorrentes de mudanças climáticas e variações do nível de base — respondem pelas mudanças nos padrões de sedimentação da bacia (GAWTHORPE; LEEDER, 2000). Segundo o modelo de *fault-linkage*, nos estágios iniciais do rifte, segmentos de falhas paralelos encontram-se isolados e apresentam pequeno deslocamento, constituindo uma zona de falha (Figura 16a). No estágio seguinte, ocorre a interação/ligação entre esses segmentos, aumentando seu comprimento e resultando em maiores deslocamentos (Figura 16b). Ao final, a interação entre todos os segmentos constitui uma falha de borda bem desenvolvida (Figura 16c); nesse contexto, a relação

entre comprimento da falha e deslocamento torna-se consistente com a de um único segmento, isto é, uma zona de falha segmentada que atua essencialmente como uma única falha com o mesmo comprimento do arranjo de segmentos (GAWTHORPE; LEEDER, 2000).

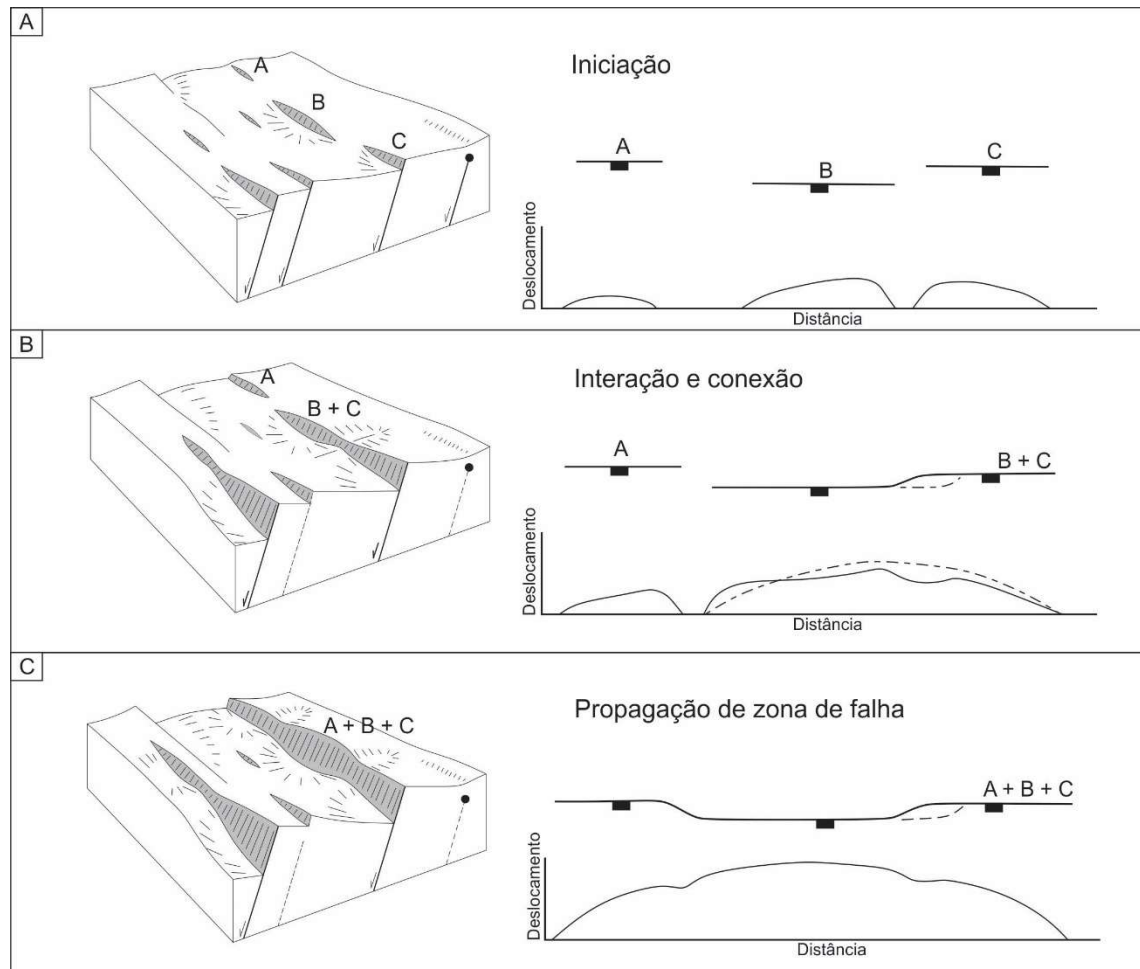


Figura 16 - Modelo esquemático de GAWTHORPE; LEEDER (2000) para a evolução de um rifte: (A) zona de falha com segmentos isolados e pequenos rejeitos; (B) fase de interação/conexão entre os segmentos; (C) completa coalescência e estabelecimento da falha de borda.

Com base em dados sísmicos do Sistema de Riftes do Leste Africano, MORLEY (2002) propôs um mecanismo de evolução de falhas normais — *fault propagation* — semelhante ao de GAWTHORPE; LEEDER (2000), além de um modelo evolutivo para semi-grábens em quatro estágios estruturais. No estágio inicial do *fault propagation*, ocorre um arranjo de falhas paralelas, isoladas e de pequeno rejeito, formando pequenos semi-grábens independentes; a conectividade lateral desses segmentos, por propagação da deformação, leva ao estabelecimento da falha de borda e à configuração de um amplo semi-gráben (Figura X).

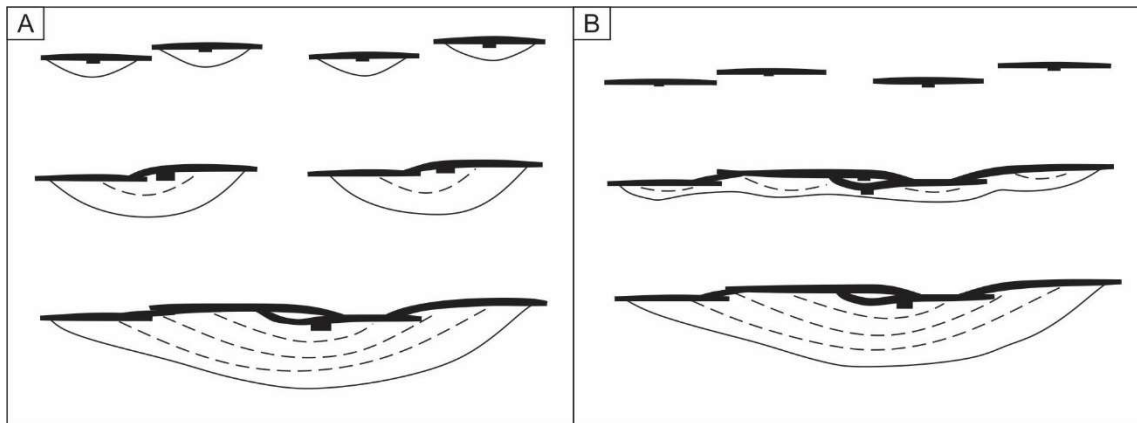


Figura 17 - Figura esquemática do modelo *fault propagation* idealizado por MORLEY (2002), mostrando: (A) ligação progressiva de segmentos de falha em longo período evolutivo; (B) ligação progressiva de curta duração. Retirado de MORLEY (2002).

Segundo MORLEY (2002), os estágios de evolução de um semi-gráben podem ser resumidos em Rifte Inicial, Meio-gráben Inicial, Meio-gráben Maduro e Meio-gráben Final. Durante o processo inicial de rifteamento, a falha principal é pouco expressiva e não acumula rejeito vertical, de modo que a deformação se distribui em pequenas falhas; a geometria em cunha do semi-gráben ainda é pouco evidente e o preenchimento sedimentar apresenta geometria sinclinal, com espessuras relativamente pequenas (Figura 18a). No estágio seguinte, conforme o modelo de *fault propagation*, o desenvolvimento e a concentração da deformação na falha de borda resultam no Meio-gráben Inicial (Figura 18b). O Meio-gráben Maduro é caracterizado por amplo desenvolvimento do semi-gráben, migração da falha principal e erosão dos estratos do rifte inicial, além do soerguimento do *footwall* da falha de borda (Figura 18c). Por fim, o Meio-gráben Final marca o término da atividade da falha principal — que pode cessar de forma abrupta (por inversões tectônicas) ou gradual (por migração de falhas) — e o preenchimento final da calha, com erosão efetiva do *footwall* (Figura 18d) (MORLEY, 2002).

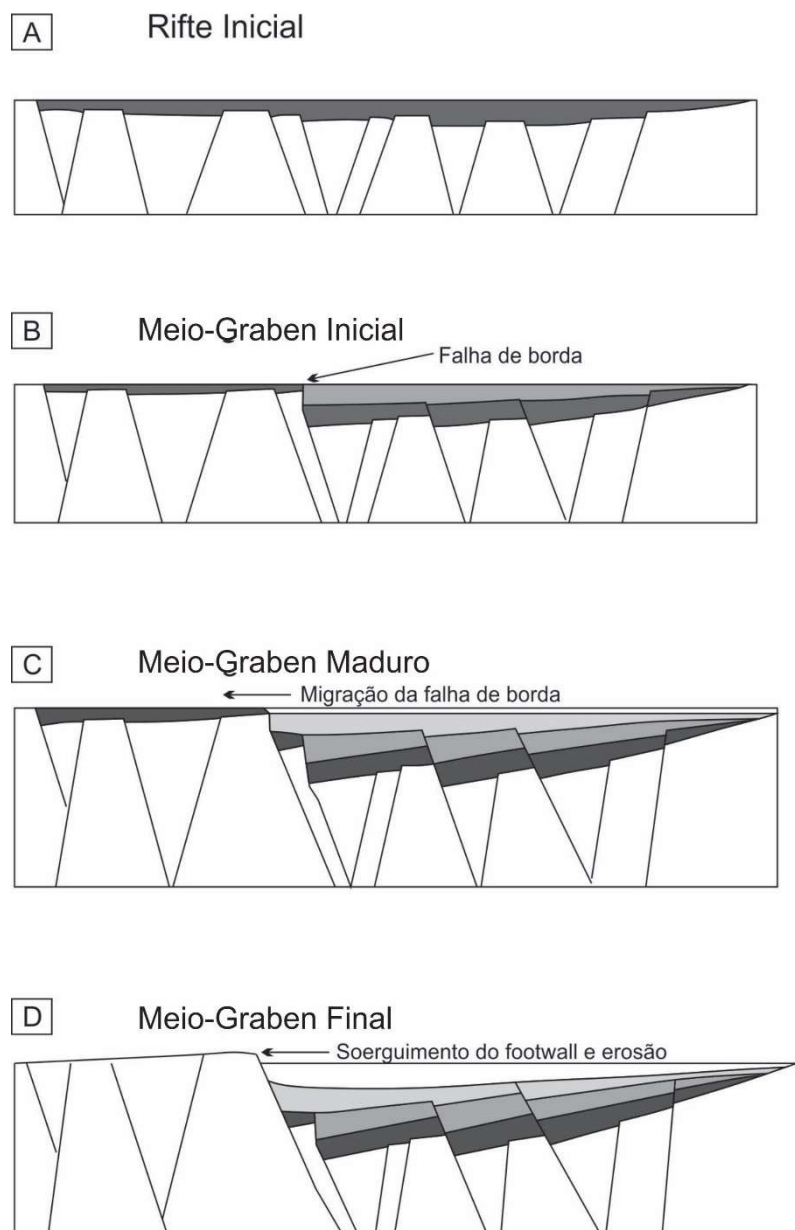


Figura 18 - Estágios evolutivos de um semi-gráben segundo o modelo de MORLEY (2002): (A) Rifte Inicial; (B) Meio-gráben Inicial; (C) Meio-gráben Maduro; (D) Meio-gráben Final.

Para MORLEY (2002), a distinção entre a sedimentação sin-rifte e pós-rifte ainda permanece controversa; entretanto, no contexto de riftes continentais, a tendência à progradação e ao assoreamento do lago facilita a individualização.

KUCHLE et al. (2005), a partir da análise crítica de modelos pré-existentes e da reavaliação das variáveis controladoras da sedimentação em bacias rifte, propõem um modelo evolutivo e preditivo para esse grupo de bacias, baseado na análise dos padrões

de empilhamento. Adaptando PROSSER (1993), os autores reconhecem três tratos de sistemas tectônicos associados a um pulso tectônico (Figura 19). O Trato de Sistemas Tectônico de Início de Rife retrata um pulso incipiente em que o espaço de acomodação criado é aproximadamente equivalente ao aporte sedimentar disponível, imprimindo padrão progradacional a agradacional. O Trato de Sistemas Tectônico de Clímax de Rife representa o evento de máxima extensão da bacia e a rápida criação de espaço de acomodação; o padrão retrogradacional característico decorre do atraso do aporte sedimentar em relação ao pulso gerador. Por fim, o Trato de Sistemas Tectônico de Preenchimento de Rife registra a chegada do aporte “atrasado”, preenchendo o espaço criado no estágio anterior; observa-se padrão progradacional (KUCHLE et al., 2005; PROSSER, 1993).

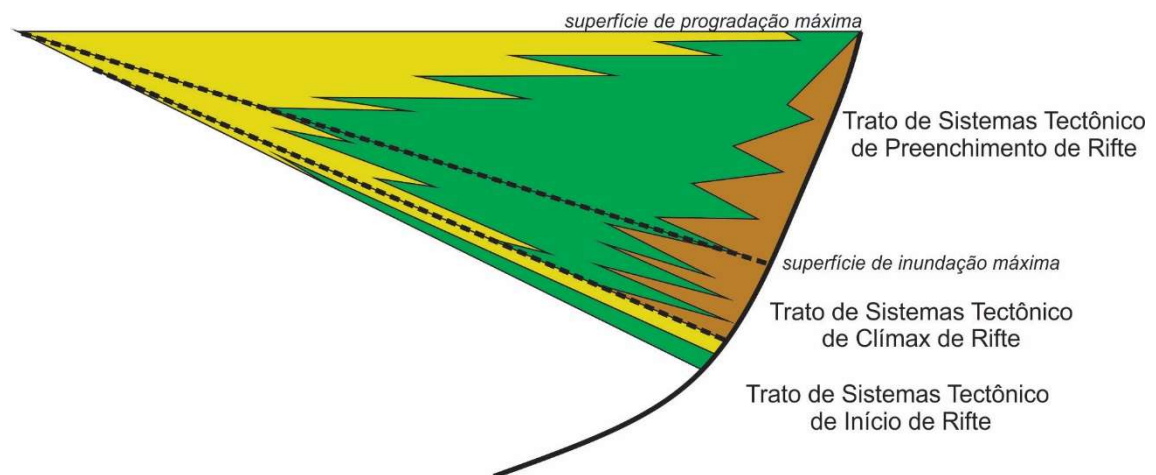


Figura 19 - Modelo evolutivo de KUCHLE et al. (2005) para uma bacia rifte, exibindo os tratos de sistemas tectônicos de Início de Rife, Clímax de Rife e Preenchimento de Rife, bem como suas superfícies limítrofes. KUCHLE et al. (2005).

Diante da carência de um modelo que fornecesse padrões de predição de preenchimento, arranjo de sistemas deposicionais e distribuição de fácies sísmicas, KUCHLE; SCHERER (2010) reuniram conceitos apresentados em trabalhos prévios (PROSSER, 1993; BOSENCE, 1998; MORLEY, 2002; GAWTHORPE; LEEDER, 2000; KUCHLE et al., 2005) e desenvolveram um modelo estratigráfico–sismoestratigráfico que divide a seção rifte em quatro fases (Tratos de Sistemas Tectônicos; Figura 21). Trata-se de um modelo suportado por interpretações de poço, cujos resultados podem ser incorporados e integrados com seções sísmicas, estabelecendo

critérios sismoestratigráficos. Dessa forma, é possível interpretar tratos tectônicos em dados sísmicos com base em terminações e configurações de refletores e nas geometrias das sismofácies (conforme MITCHUM et al., 1977). Assim, a ausência de dados de poço não impede o desenvolvimento e a aplicação do modelo. Outro aspecto importante é que todas as superfícies apresentadas, retratadas como inundações na porção central do semi-gráben, são correlatas a discordâncias na margem flexural.

O Trato de Sistemas Tectônico de Início de Rifte é limitado na base pela discordância sin-rifte (definida por BOSENCE, 1998) e reúne os primeiros depósitos associados aos pulsos iniciais. Esses depósitos relacionam-se a ciclos de inundação lacustre e recobrimento fluvial em uma ampla bacia rasa continental, imprimindo padrão de empilhamento agradacional. Embora semelhante a uma sinéclise, sua gênese vincula-se aos esforços distensivos da fase inicial do rifte.

O Trato de Sistemas Tectônico de Desenvolvimento de Meio-gráben representa um rearranjo das drenagens, já na forma embrionária de um meio-gráben, preenchido por sistemas flúvio-lacustres rasos. O limite inferior é marcado por uma inundação no *hangingwall*, correspondente a uma discordância na margem flexural, referida pelos autores como superfície de desenvolvimento de meio-gráben (KUCHLE; SCHERER, 2010).

O Trato de Sistemas Tectônico de Clímax de Rifte, registrando a máxima atividade tectônica, resulta em padrão retrogradacional na margem flexural e progradação de leques deltaicos associados à falha de borda em direção ao depocentro. A base é definida pela superfície de clímax de rifte, e o topo, pela superfície de máximo rifteamento, que marca o momento de máxima expansão do sistema lacustre, máximo recuo dos sistemas continentais na margem flexural e máximo avanço da cunha conglomerática de falha de borda (KUCHLE; SCHERER, 2010).

Por fim, o Trato de Sistemas Tectônico de Final do Rifte reflete diminuição da atividade tectônica e, portanto, da taxa de criação de espaço de acomodação, com recuo do sistema lacustre e chegada “atrasada” do aporte sedimentar, imprimindo padrão progradacional na margem flexural e recuo dos conglomerados de borda. O encerramento da fase rifte origina a discordância pós-rifte (KUCHLE; SCHERER, 2010).

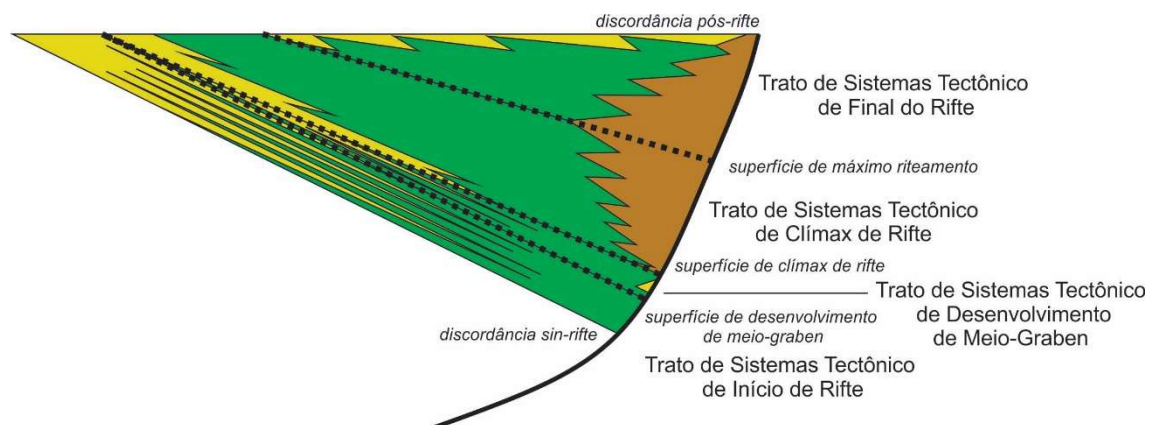


Figura 20 - Modelo evolutivo aperfeiçoado de KUCHLE; SCHERER (2010), composto pelos tratos de sistemas tectônicos de Início de Rifte, Desenvolvimento de Semi-gráben, Clímax de Rifte e Final do Rifte.

Uma vez que a definição dos tratos de Clímax de Rifte e Final de Rifte de KUCHLE; SCHERER (2010) baseia-se principalmente em padrões de empilhamento, a ausência ou limitação de dados de poço na seção sin-rifte dificulta a distinção entre essas duas unidades. Assim, uma adaptação (mais simplista) do modelo de KUCHLE; SCHERER (2010) é apresentada por ENE et al. (2015), RAMIREZ et al. (2015) e ALVARENGA (2016). Basicamente, esses autores definem três tratos com base em mudanças de atividade tectônica, mas sem um padrão de empilhamento determinável para cada trato (Figura 21): o Trato de Sistemas de Início de Rifte, semelhante aos já descritos, cujo limite superior é marcado pela superfície de desenvolvimento de semi-gráben; o Trato de Sistemas de Alta Atividade Tectônica, que engloba os tratos de Desenvolvimento de Meio-gráben e a maior parte do Clímax de Rifte, encerrando-se na superfície de mudança da atividade tectônica; e, por fim, o Trato de Sistemas de Baixa Atividade Tectônica, limitado pela discordância pós-rifte (ENE et al., 2015; RAMIREZ et al., 2015; ALVARENGA, 2016).

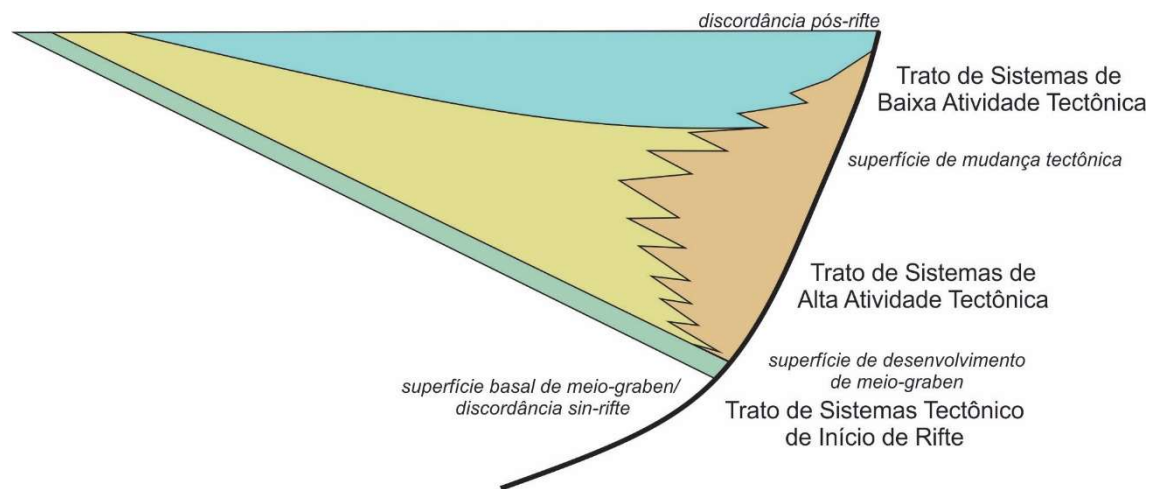


Figura 21 - Adaptação do modelo evolutivo de KUCHLE; SCHERER (2010), proposta por ENE et al. (2015), RAMIREZ et al. (2015) e ALVARENGA (2016), na qual a seção rift é dividida em três tratos: Início de Rift, Alta Atividade Tectônica e Baixa Atividade Tectônica.

CAPÍTULO IV

ARTIGO CIENTÍFICO I

**Tectonostratigraphic framework of the onshore and shallow
platform of Barreirinhas Basin during Early Cretaceous, Brazilian
Equatorial Margin**

(Marine and Petroleum Geology)

Os Capítulos 4 e 5 desta tese correspondem a artigos científicos derivados diretamente dos resultados da pesquisa desenvolvida, os quais foram submetidos a periódicos internacionais de referência nas áreas de Geociências e Geologia do Petróleo. O Capítulo 4 apresenta o Artigo I, submetido à revista *Marine and Petroleum Geology*, enquanto o Capítulo 5 reúne o Artigo II, submetido à revista *Basin Research*.

O Artigo I aborda a evolução tectonoestratigráfica da Bacia de Barreirinhas durante o Cretáceo Inferior, com ênfase nos domínios onshore e de plataforma rasa. A partir da integração de dados sísmicos, de poço e de campo potencial, o estudo caracteriza os principais sistemas de rifte, os depocentros controlados por reativações de zonas de cisalhamento do embasamento e a arquitetura dos grabens assimétricos, além de discutir a dinâmica deposicional sintectônica e o papel da Superfície de Breakup na transição rifte–deriva.

O Artigo II foca na compartimentação estrutural da margem Equatorial Brasileira, com ênfase no papel do Alto de Tutóia como elemento de primeira ordem no controle da arquitetura da Bacia de Barreirinhas. O trabalho integra sísmica 2D, dados de poços e anomalias gravimétricas para reconstruir a evolução desde o rifte até a deriva, incluindo reativações pós-rifte, inversões tectônicas e a influência de estruturas de transferência e do regime transformante. Os resultados contribuem para o refinamento do arcabouço cinemático regional e para a avaliação de riscos exploratórios.

Marine and Petroleum Geology

Tectonostratigraphic framework of the onshore and shallow platform of Barreirinhas Basin during Early Cretaceous, Brazilian Equatorial Margin

--Manuscript Draft--

Manuscript Number:	JMPG-D-25-01332
Article Type:	Research Paper
Keywords:	Brazilian Equatorial Margin; Barreirinhas Basin; Rift; Early Cretaceous; Barreirinhas Onshore
Corresponding Author:	Bárbara Ferreira Rapozo, M.Sc. Federal University of Rio Grande do Norte Natal, Rio Grande do Norte BRAZIL
First Author:	Bárbara Ferreira Rapozo, M.Sc.
Order of Authors:	Bárbara Ferreira Rapozo, M.Sc.
	Valéria Centurion CÓRDOBA, PhD
	Carlos César NASCIMENTO da Silva, PhD
	Debora do Carmo SOUSA
	Emanuel Ferraz JARDIM DE SÁ
	Ana Karoliny Alves de MEDEIROS, M.Sc.
	Isabelle Teixeira da SILVA, M.Sc.
	Iupanque Vinícius Ferreira MORALES
	Emilson Fernandes SOARES
Abstract:	The Barreirinhas Basin, located along the Brazilian Equatorial Margin, records a complex tectonostratigraphic evolution during the Early Cretaceous. This study integrates seismic interpretation, potential field analysis, and well data to investigate the structural and stratigraphic framework of the onshore and shallow platform domains. Regional gravity anomaly maps reveal WNW–ESE-trending depocenters associated with Rift Phase I (late Barremian to late Aptian), reaching up to 5 km in depth. These depocenters are spatially linked to brittle reactivation of Precambrian shear zones, which strongly influenced rift compartmentalization. Major rift systems developed during this stage, including the Gurupi Rift System, the Ceará Rift, and the onshore segment of the Barreirinhas Basin. Seismic sections reveal asymmetric grabens bounded by listric normal faults dipping predominantly to the NE and N, resulting in block tilting toward the SSE and SSW. A synform associated with the master fault of the graben is interpreted as a fault-related fold, formed by drag along fault planes. Stratigraphic analysis indicates progressive thickening of synrift units toward the bounding faults, characteristic of syntectonic deposition, whereas upper units display reduced thickening, suggesting diminished tectonic activity or depocenter migration during the late Albian. The Breakup Unconformity, defines the upper boundary of the analyzed interval and separates synrift successions from overlying drift-stage units. This integrated tectonostratigraphic framework provides new insights into rift dynamics and the structural evolution of the Barreirinhas Basin during the Early Cretaceous.

4. ARTIGO CIENTÍFICO I

Tectonostratigraphic framework of the onshore and shallow platform of Barreirinhas Basin during Early Cretaceous, Brazilian Equatorial Margin

Bárbara Ferreira RAPOZO ^{a*}, Valéria Centurion CÓRDOBA^{a,b}, Carlos César NASCIMENTO da Silva ^c, Debora do Carmo SOUSA^b, Emanuel Ferraz JARDIM DE SÁ, Ana Karoliny Alves de MEDEIROS ^a, Isabelle Teixeira da SILVA^a, Iupanque Vinícius Ferreira MORALES ^d, Emilson Fernandes SOARES ^d

^a Postgraduate Program in Geodynamics and Geophysics, Federal University of Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, Brazil.

^b Department of Geology, Federal University of Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, Brazil.

^c Department of Geophysics, Federal University of Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, Brazil.

^d PETROBRAS- Research Center Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES/PETROBRAS), Petróleo Brasileiro S.A., Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil.

ABSTRACT

The Barreirinhas Basin, located along the Brazilian Equatorial Margin, records a complex tectonostratigraphic evolution during the Early Cretaceous. This study integrates seismic interpretation, potential field analysis, and well data to investigate the structural and stratigraphic framework of the onshore and shallow platform domains. Regional gravity anomaly maps reveal WNW–ESE-trending depocenters associated with Rift Phase I (late Barremian to late Aptian), reaching up to 5 km in depth. These depocenters

are spatially linked to brittle reactivation of Precambrian shear zones, which strongly influenced rift compartmentalization. Major rift systems developed during this stage, including the Gurupi Rift System, the Ceará Rift, and the onshore segment of the Barreirinhas Basin. Seismic sections reveal asymmetric grabens bounded by listric normal faults dipping predominantly to the NE and N, resulting in block tilting toward the SSE and SSW. A synform associated with the master fault of the graben is interpreted as a fault-related fold, formed by drag along fault planes. Stratigraphic analysis indicates progressive thickening of synrift units toward the bounding faults, characteristic of syntectonic deposition, whereas upper units display reduced thickening, suggesting diminished tectonic activity or depocenter migration during the late Albian. The Breakup Unconformity, defines the upper boundary of the analyzed interval and separates synrift successions from overlying drift-stage units. This integrated tectonostratigraphic framework provides new insights into rift dynamics and the structural evolution of the Barreirinhas Basin during the Early Cretaceous.

Keywords:

Brazilian Equatorial Margin, Barreirinhas Basin, Rift, Early Cretaceous, Barreirinhas Onshore

1. INTRODUCTION

The Barreirinhas Basin is a segment of the Brazilian Equatorial Margin (BEM) that occupies the coastal region and part of the continental shelf of the state of Maranhão. Alongside the Foz do Amazonas, Pará-Maranhão, Ceará, and Potiguar basins, it developed during the opening of the Atlantic Ocean as a result of the separation between the South American and African plates in the Cretaceous (Matos, 1999; Milani et al.,

2000). Recent investigations into the deep crustal structure of this region of the Atlantic reveal a pull-apart system with two strike-slip boundaries (e.g., Aslanian et al., 2021; Moulin et al., 2021, De Castro et al. 2024), which are controlled by large-scale transform segments and oceanic fracture zones oriented generally in an E-W Direction. Rifting along the transform fault zones gave rise to a set of pull-apart systems, with initially isolated depocenters nucleated along these structures (De Castro et al., 2024). The pull-apart system that includes the Barreirinhas Basin also comprises the Brazilian Pará-Maranhão (PAMA) and Western Ceará basins, as well as the Ivory Coast–Ghana basins on the African margin (Figure 1; De Castro et al., 2024).

The Equatorial Atlantic Ocean evolved during the Early Cretaceous through dextral strike-slip plate motions along extensive E–W oceanic fracture zones (Blarez and Mascle, 1988; Nemčok et al., 2016). Pre-existing lithospheric heterogeneities, inherited from Precambrian and Mesozoic tectonic events, acted as crustal weakness zones during continental breakup, resulting in a stepped system of divergent and transform margin segments (Matos, 1992, 2000; Basile, 2015; Tavares et al., 2020; De Castro et al., 2022). In the central sector of the BEM, this process generated the Gurupi Rift Axis and the Barreirinhas transform margin, bounded by the St. Paul and Romanche fracture zones (De Castro et al., 2024). Together with the Pará-Maranhão and West Ceará basins, and their African conjugates in the Ivory Coast–Ghana region, these structures constitute the ancient Barreirinhas pull-apart system (Figure 1; De Castro et al., 2024).

According to Matos et al. (2021), the rifting process occurred in three main stages. Rift Phase I (late Barremian – Aptian) developed the WNW–ESE-oriented Gurupi Rift Axis, encompassing the Bragança-Viseu, São Luís, Ilha Nova, onshore Barreirinhas, and West Ceará basins (Matos, 2000). During the late Aptian, this rift arm became inactive due to

the onset of eastward motion of the African plate, leading to a northward migration of rifting (Matos, 2000). During Rift Phase II (early Albian), transtensional en-echelon depocenters formed along the Barreirinhas transform margin, south of the Romanche Fracture Zone, under mixed transtensional–transpressional regimes (Davison et al., 2016; Montenegro et al., 2021). Rift Phase III was marked by isolated rift systems that evolved into divergent margin segments, characterized by continental lithosphere thinning, local mantle exhumation, and subsequent oceanic accretion (Brownfield and Charpentier, 2006; Antobreh et al., 2009; Zalán, 2015).

The stratigraphic record of the Barreirinhas Basin spans from the Barremian to the Recent (Azevedo, 1991; Soares et al., 2007; Trosdtorf Jr. et al., 2007). Basal syn-rift deposits consist of fluvio-deltaic sandstones and shales (late Barremian – Aptian), overlain by mid-Albian sag sequences, followed by upper Cenomanian continental siliciclastics grading into carbonates, shales, and marine sandstones (Feijó, 1994). Rift Phase III is recorded by Albian siliciclastics deposited in deltaic to shallow marine environments (De Castro et al., 2024). Drift-phase successions (late Albian – Recent) comprise thick carbonate–siliciclastic sequences, including the development of a carbonate platform on the Ilha de Santana Platform and siliciclastic-dominated deep-water deposits with turbidite systems (Figure 2).

Structurally, the Barreirinhas Basin is a rhombic transtensional basin influenced by the Romanche FZ, exhibiting a complex framework of grabens and half-grabens formed under transtensional and subordinate transpressional regimes (Azevedo, 1986; Szatmari, 1987; Trosdtorf Jr. et al., 2007; Soares Jr. et al., 2008; Tavares, 2017; Montenegro et al., 2021). Despite being underexplored — with drilling restricted to shallow waters and no ultra-deepwater data—the basin presents high exploratory potential due to its structural

and stratigraphic similarities with the Tano and Ivory Coast basins in the Gulf of Guinea (Pellegrini and Ribeiro, 2018). Petroleum systems are associated with Aptian, Albian–Cenomanian, and Cenomanian–Turonian source rocks.

This paper investigates the structural framework and stratigraphic infill of the Barreirinhas Basin depocenters, focusing on the grabens and half-grabens formed during successive rifting phases of the Brazilian Equatorial Margin. The objective is to map and correlate structural styles and evaluate their role in controlling stratigraphic evolution, thereby advancing the understanding of the tectonostratigraphic framework and hydrocarbon potential of this underexplored basin.

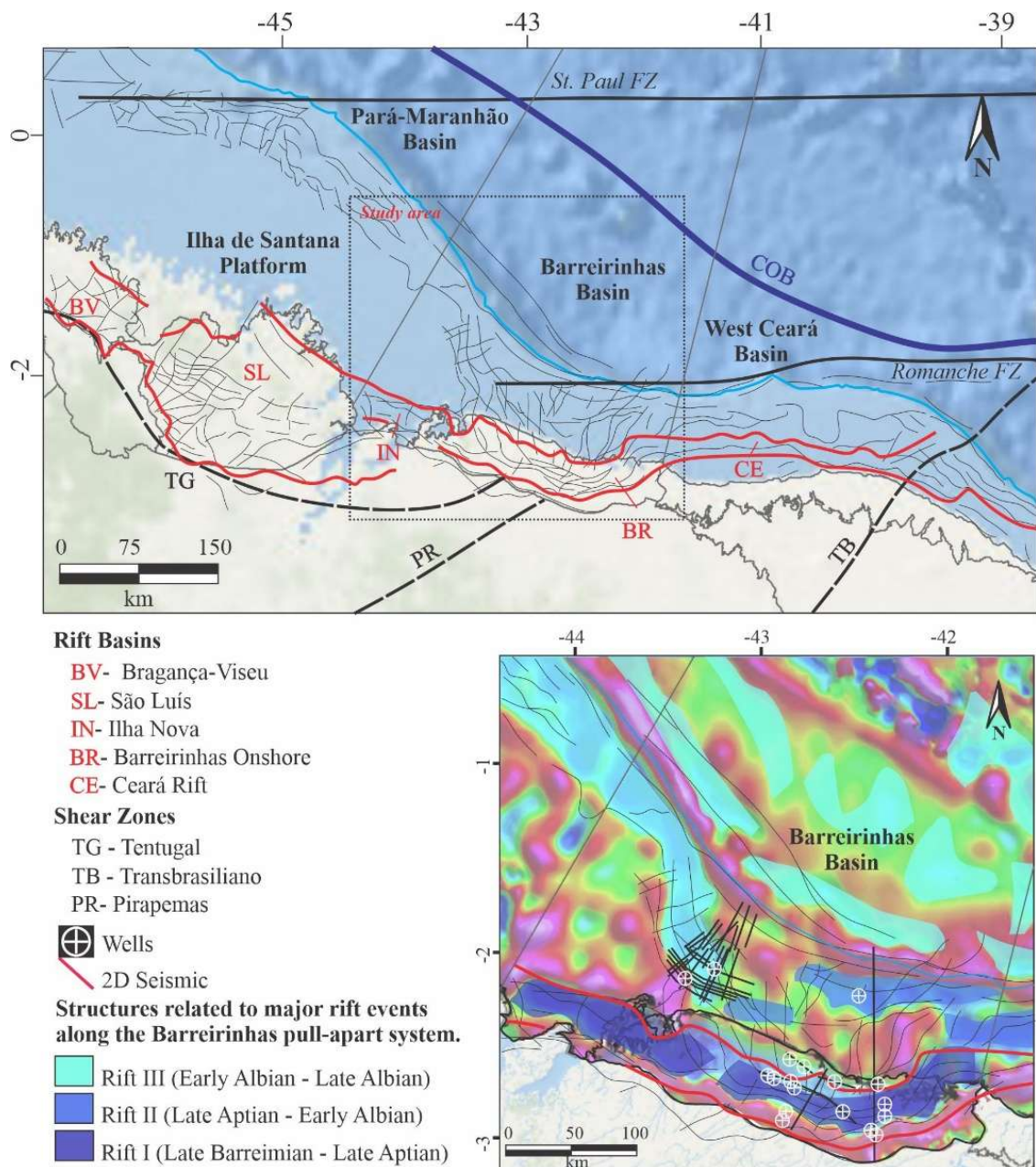


Figure 1 - Geological map of the central sector of the Brazilian Equatorial Margin (MEB). In both maps the shear zones (black dashed lines), and Cretaceous aborted rift arm (red lines), oceanic fracture zones (black lines), and the continental-ocean boundary (COB). Internal basin structural framework (black lines), compiled from Azevedo (1991) and Mohriak (2003). Residual Bouguer anomaly map published by De Castro et al. (2024).

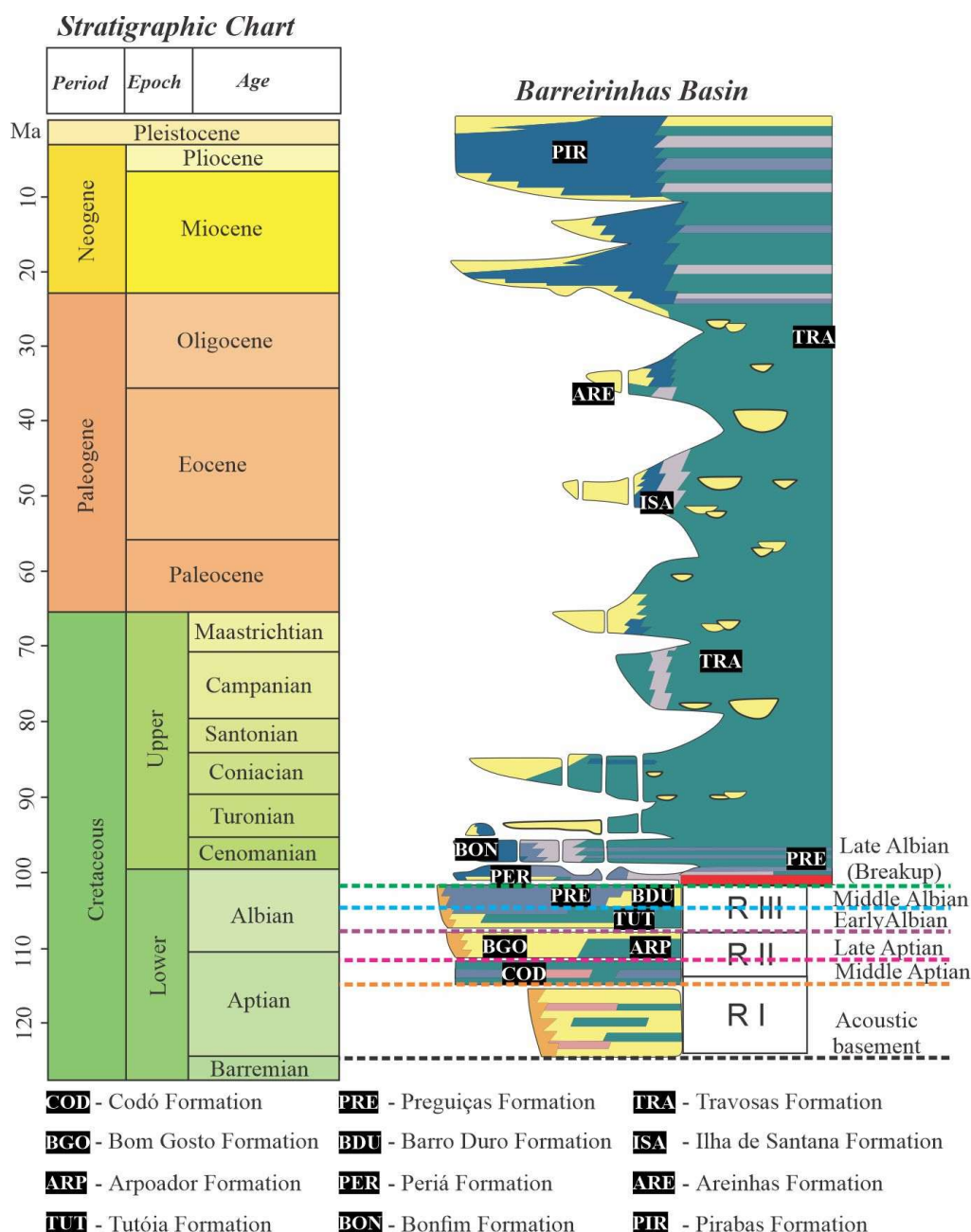


Figure 2 - Stratigraphic chart of the Barreirinhas Basin based on Trosdorf Jr. et al. (2007) and Pellegrino & Ribeiro (2018), showing the main unconformities mapped in this study. Solid lines represent surfaces calibrated by well data, while dashed lines indicate unconformities interpreted solely from seismic criteria. Rift Stages I, II, and III follow the classification proposed by De Castro et al. (2024).

2. DATASET AND METHODOLOGY

The Barreirinhas Basin has been imaged through several 2D seismic surveys, encompassing both regular and irregular grid patterns, as well as localized 3D acquisitions in isolated areas. The seismic data from the offshore portion of the basin,

primarily held by Petrobras, were made available by the National Agency of Petroleum, Natural Gas, and Biofuels (ANP). Meanwhile, the data for the onshore portion were obtained through the REATE program, an open-access database provided by ANP and the Brazilian Geological Survey (CPRM), which grants free access to public geological and geophysical information.

In this study, 30 seismic sections and 18 wells were selected for analysis. The post-stack seismic data, recorded in two-way travel time (TWT), span approximately 4000 ms in the onshore region and up to 12000 ms in the offshore domain. To enhance interpretation quality, workflows were applied, including filtering and seismic attribute computation, aiming to improve the signal-to-noise ratio, highlight geological features, and refine the seismic-stratigraphic and structural analysis.

Seismic interpretation was integrated with well data, whose lithostratigraphic and chronostratigraphic information enabled the subdivision of the basin fill into the rift and drift megasequences. Geophysical well logs, including gamma-ray, resistivity, sonic, and density logs, were crucial for establishing time-depth relationships, allowing the calibration of seismic and well data. Furthermore, these logs facilitated the analysis of seismic facies expression and the detailed correlation between well data and seismic sections.

Three seismic datasets were defined to investigate the structural framework and sedimentary fill of different sectors of the Barreirinhas Basin: almost twenty five sections in the western offshore sector, four sections in the central onshore portion, and one section in the eastern sector of the basin. This approach allowed for an integrated geological

interpretation of both the onshore and offshore domains, providing a more integrated understanding of the basin's evolution.

The interpretation of seismic stratigraphic units (SSUs) was conducted based on the characteristic seismic reflection patterns, including internal and external geometric configurations, reflector continuity, amplitude variations, frequency content, impedance contrasts, and termination patterns. This analysis follows classical seismic stratigraphy principles, as outlined by Mitchum Jr. and Vail (1977).

The interpretation of the rift-related section, supported by seismic attribute analysis, enabled the identification of five distinct rift-related seismic facies: (i) parallel to sub-parallel with high amplitude and continuity; (ii) parallel to sub-parallel with variable amplitude and continuity; (iii) parallel to sub-parallel with low amplitude and low to medium continuity; (iv) hummocky; and (v) chaotic (Figure 3).

Seismic facies 1 (Sf1) is characterized by parallel reflections with high amplitude and continuity, corresponding to widely continuous deposits with systematic lithological intercalations. The high-amplitude reflections result from significant acoustic impedance contrasts, primarily driven generally by lithological variations. These deposits are interpreted as having formed under conditions of constant sedimentation rates within a stable or uniformly subsiding basin, characteristic of lacustrine environments.

Seismic facies 2 (Sf2) exhibits parallel to sub-parallel reflections with variable amplitude and continuity. This facies is also associated with deposits formed in a stable tectonic setting and is interpreted as shallow lacustrine sedimentation. It is likely influenced by sediment supply from fan delta systems, which contribute to the observed variability in amplitude and continuity of seismic reflections.

Seismic facies 3 (Sf3), which occupies the largest portion of the seismic data, consists of parallel to sub-parallel reflections with low amplitude and low to medium continuity. This facies is associated with discontinuous deposits, primarily siliciclastic in nature. It is vertically associated with Sf1 and can be interpreted as representing the predominance of fluvio-deltaic systems sourced from basin margins and/or structural highs, where sediment input is transported by tractional flows towards the basin center.

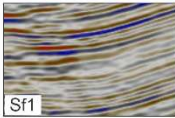
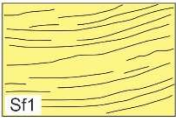
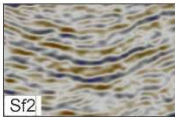
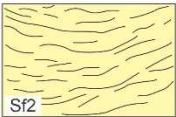
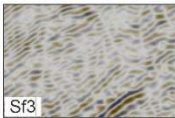
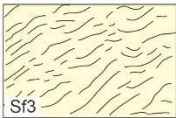
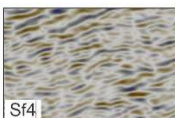
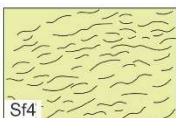
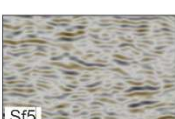
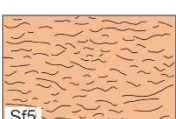
Rift-related Seismic Facies			
Seismic Facies	Sketch	Description	Interpretation
		Parallel with high amplitude and continuity	Lacustrine-related deposits characterized by extensive lateral continuity and systematic intercalations.
		Parallel to sub-parallel with variable amplitude and continuity	Lacustrine deposits laterally interdigitated with fluvio-deltaic deposits from the margins of grabens and semi-grabens and/or axial drainages in a tectonically active setting.
		Parallel to sub-parallel with low amplitude and low to medium continuity	Predominance of fluvio-deltaic systems sourced from basin margins, delivering sediment input into the basin through traction-dominated flows.
		Hummocky	Predominance of deposits generated by turbidity currents in prodelta and/or deep lacustrine environments.
		Chaotic	Predominance of gravity-driven deposits, including alluvial fan systems and conglomeratic clastic wedges associated with fault activity during syntectonic deposition.

Figure 3 - Summary showing the main seismic facies related to the units of the Rift Sequence, including the interpretation of each facies in terms of the predominance of depositional systems.

Seismic facies 4 (Sf4) is characterized by hummocky reflections, described as discontinuous, irregular, and sub-parallel, with a concave-convex pattern. In terms of depositional systems, this facies represents deposits predominantly formed by turbidity currents in prodelta environments or deep lacustrine settings.

Seismic facies 5 (Sf5) is chaotic, consisting of discontinuous reflections of low amplitude with non-systematic terminations. From a depositional perspective, this facies corresponds to gravity-driven deposits associated with border faults and is interpreted as being dominated by alluvial fan systems (Córdoba et al., 2008; Kuchle and Scherer, 2010; Rapozo et al., 2021).

3. RESULTS

3.1. BARREIRINHAS ONSHORE: CENTRAL PORTION

As previously mentioned, the limited seismic coverage in the offshore sector of the Barreirinhas Basin hampers the imaging of the main depocenters associated with Rift Phase I. Nevertheless, the abundant lithostratigraphic and chronostratigraphic data from numerous onshore wells provide critical support for interpretations.

In this part of the basin, four seismic profiles were interpreted and integrated with lithostratigraphic and chronostratigraphic data from 10 wells. The integration of these datasets, enabled the subdivision of the sedimentary record into rift and drift sequences, as well as the identification of significant intra-rift unconformities.

The upper boundary of the analyzed interval is defined by the Breakup Unconformity, whereas the lower boundary corresponds to the acoustic basement, which may represent either the crystalline basement or the sedimentary succession of the Parnaíba Basin.

3.1.1 Structural interpretation

Regional data obtained from potential field methods, such as residual Bouguer anomaly maps (De Castro et al., 2024), reveal gravity lows associated with WNW–ESE-trending depocenters reaching depths of up to ~5 km in the onshore portion of the

Barreirinhas Basin (Montenegro et al., 2021). These depocenters are related to Rift Phase I (late Barremian – late Aptian; Figure 2), during which major rift systems developed, including the Gurupi Rift System, the Ceará Rift, and the onshore segment of the Barreirinhas Basin. The formation of these structures was strongly influenced by brittle reactivation of Precambrian shear zones oriented NE–SW and E–W.

In seismic line 0224-0052 (Figure 4), WNW–ESE-trending normal faults, consistent with the potential field data (Figure 1), were interpreted. These faults are characterized by high angles, curvilinear traces, and predominant dip toward the ENE. Displacements along these faults resulted in the tilting of fault blocks toward the SSW. A synform associated with the master fault of Graben 1 (Figure 4), which exhibits the greatest displacement, is particularly noteworthy. This synform is interpreted as a fault-related fold, generated by the drag of strata along the fault plane, with its axial plane aligned to the dominant WNW–ESE structural orientation. Correlation of this line with seismic profile 0224-0043 (Figure 4) highlights the presence of a horst separating the previously described structure from an adjacent depocenter to the east (Graben 2). In addition, antithetic normal faults affect the upper units of the rift megasequence.

The sedimentary infill of this depocenter shows progressive thickening toward the master fault, consistent with syntectonic deposition. In the upper units, a reduction in thickening toward the fault is observed, suggesting either a decrease in tectonic activity or a possible migration of the depocenter. The upper boundary of the studied interval is represented by the Breakup Unconformity, mapped between 300 and 900 ms and supported by well data. Above this horizon, seismic units corresponding to the drift stage are recognized.

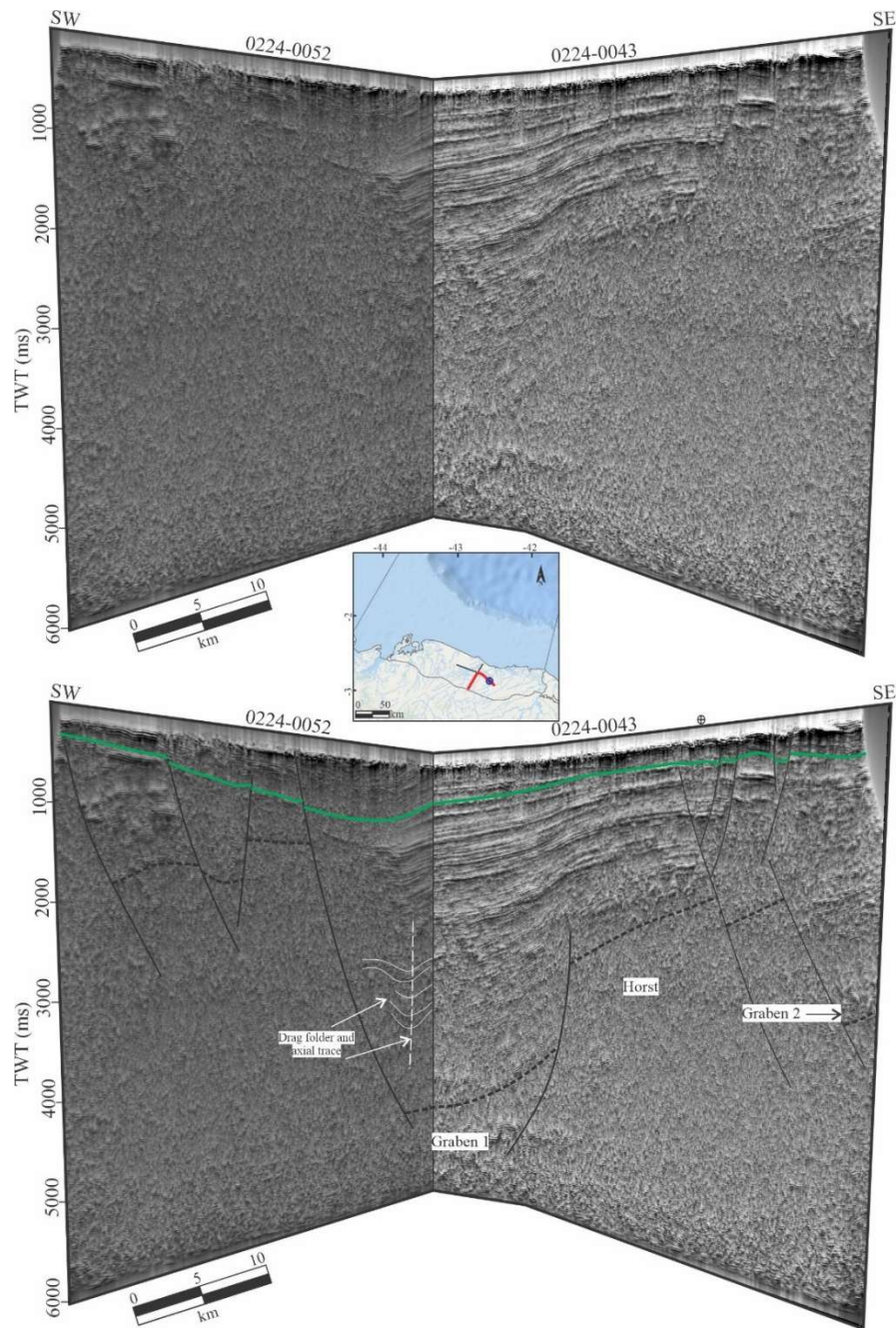


Figure 4 - Interpreted seismic section 0224-0052 (SW–NE) across the onshore Barreirinhas Basin. Normal listric faults trending WNW–ESE generate block tilting toward the SSW. Progressive thickening of synrift units toward the bounding fault indicates syntectonic deposition, whereas reduced thickening in the upper interval suggests a decline in tectonic activity or possible depocenter migration.

3.1.2 Stratigraphic interpretaion

The interpreted seismic section reveals a depocenter (Graben 1, Figure 4 and 5) characterized by significant sediment accumulation. A major normal fault bounding the

graben to the southwest accommodated substantial displacement during the rifting phase, acting as one of the main structural features in this segment. This interpretation is supported by the pronounced thickening of sedimentary units toward the fault and the presence of a conglomeratic wedge, interpreted as alluvial fan and gravity-flow deposits directly linked to tectonic activity. These deposits are represented by the chaotic seismic facies (Sf5).

The infill of Graben 1 was subdivided into five Seismic Stratigraphic Units (SSU-1 to SSU-5), based on seismic criteria and chronostratigraphic data from adjacent wells (Figure 5).

The basal unit (SSU-1) is bounded at the base by the acoustic basement and at the top by the Middle Aptian unconformity (SSUb-1). Both boundaries were defined solely based on seismic patterns, including the transition from chaotic reflectors to more continuous reflections and truncation terminations. SSU-1 presents a combination of parallel to sub-parallel facies with variable amplitude (Sf2), low amplitude and medium continuity (Sf3), and chaotic facies (Sf5), suggesting an initial phase of tectonic activity. The tilting of strata to the southwest, thickening toward the northeast-dipping border fault, and the presence of a well-developed conglomeratic wedge support this interpretation.

SSU-2 is overlain by the Late Aptian Unconformity (SSUb-2). It shows no significant thickening toward faults. The retrogradation of the conglomeratic wedge (Sf5), combined with the presence of Sf2, Sf3, and hummocky facies (Sf4), suggests a decrease in tectonic activity and an increase in sediment supply from the rift shoulders.

The overlying unit, SSU-3, is bounded at the top by the Early Albian Unconformity (SSUb-3). It is thinner compared to overlying units, with a subtle thickening toward the border fault and a reappearance of Sf5, suggesting renewed tectonic activity.

The uppermost rift units, SSU-4 and SSU-5, are limited at the top by the middle Albian and late Albian (Breakup Unconformity) surfaces, respectively. The presence of all seismic facies (Sf1 to Sf5) in SSU-4 reflects intensified tectonic activity, while their configuration in SSU-5 indicates a decrease in tectonic influence. The observed sedimentary architecture suggests a possible migration of the depocenter toward more distal areas of the basin.

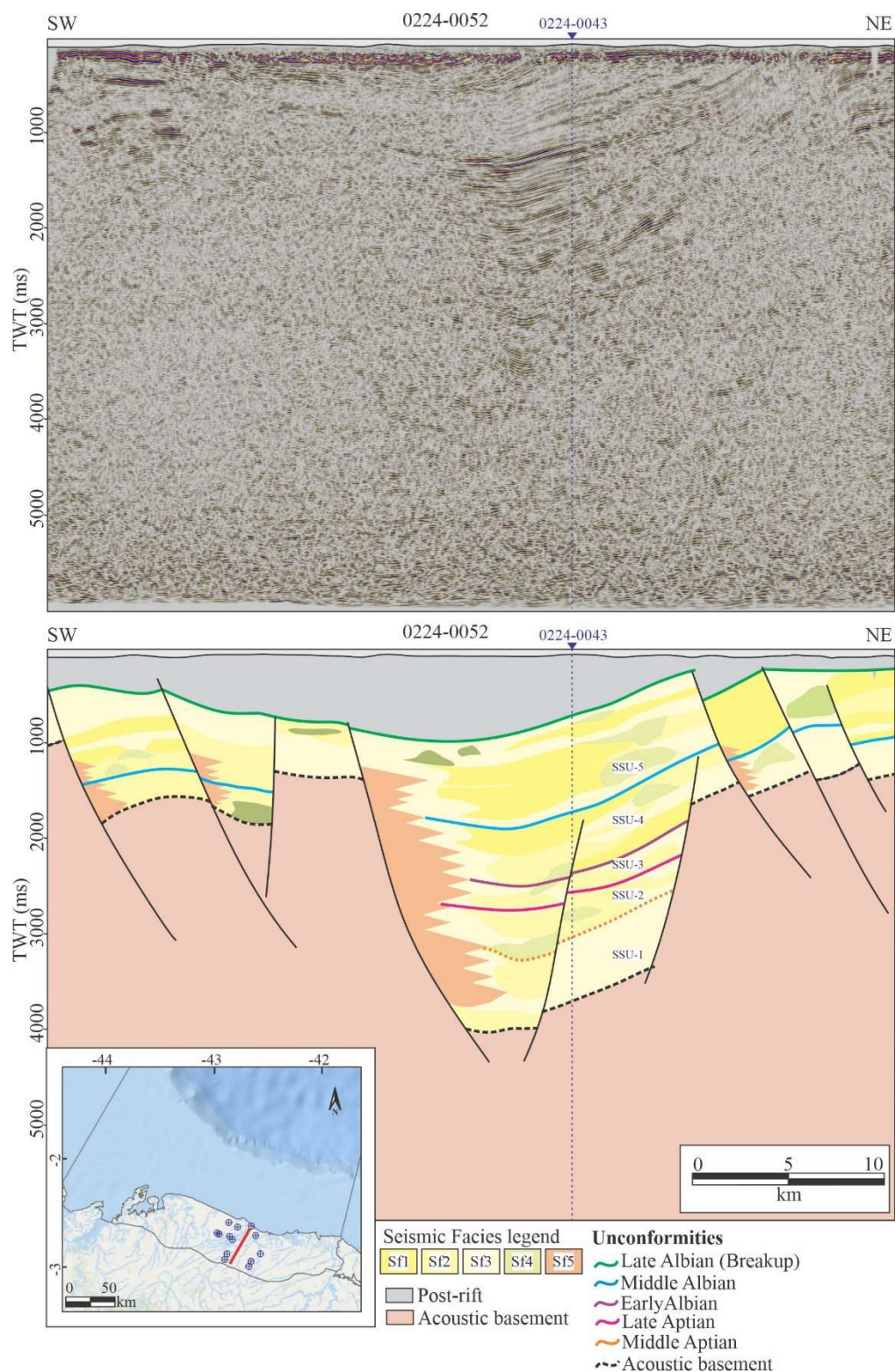


Figure 5 – Seismic line 0224-0052 (amplitude) oriented SW–NE, crossing the main depocenter (Graben 1) followed by the schematic interpretation showing the seismic facies (Sf1–Sf5) and seismic stratigraphic units (SSU-1 to SSU-5) filling Graben 1. The basal unit (SSU-1) records the onset of rifting with chaotic and sub-parallel facies and conglomeratic wedges (Sf5). Overlying units reflect changes in tectonic activity and sediment supply. The uppermost unit (SSU-5), bounded by the Breakup Unconformity, indicates waning tectonics and possible migration of the depocenter.

3.2 BARREIRINHAS OFFSHORE (SHALLOW WEST PORTION)

In this sector of the basin, the seismic sections were interpreted with the support of wells MAS14A and MAS15. Although these wells do not cross the entire rift section, they were for the interpretation of the Breakup Unconformity, providing crucial stratigraphic and structural insights into the evolution of the basin.

3.2.1 Structural interpretation

The Breakup Unconformity (late Albian) was identified in well MAS-14A at a depth of 1,755 m, corresponding in the seismic section to the interval between 1,000 and 2,000 ms TWT (Figure 6). This well was drilled over a structural high where a negative flower-type transtensive structure was interpreted.

A possible dextral oblique-slip component associated with these faults can be inferred from the stress field linked to the opening of the BEM during the Aptian–Albian interval.

Below the Breakup Unconformity, chronostratigraphic data from well MAS-14A indicate the presence of Paleozoic strata belonging to the Parnaíba Basin. However, characterization of the acoustic basement proved challenging due to the absence of other wells penetrating the entire rift succession down to the basement, as well as because the basement in this case is sedimentary. Under such conditions, seismic contrasts may be ambiguous, making it difficult to distinguish between basement and rift units.

Given these limitations, the residual Bouguer anomaly map was essential for the characterization of the main depocenters and structural highs, providing additional control for the integrated interpretation of seismic and well data.

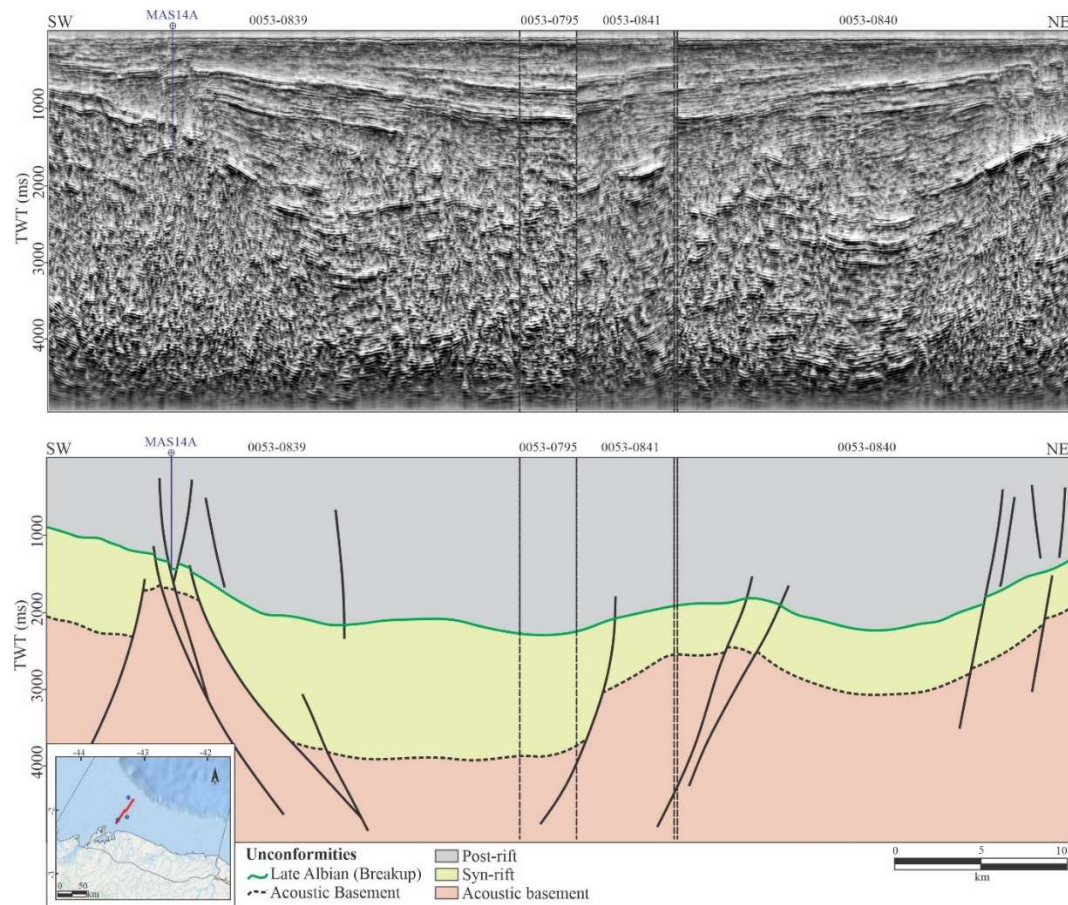


Figure 6 - (Top) TECVA attribute display over an uninterpreted seismic section crossing well MAS-14A, located on a structural high. (Bottom) Schematic structural interpretation highlighting the main faults, the negative flower structure, and the stratigraphic division between the acoustic basement (Paleozoic strata of the Parnaíba Basin), rift infill, and post-rift succession. The Breakup Unconformity (late Albian) is shown as a key horizon separating syn-rift and post-rift units.

3.2.2 Stratigraphic interpretation

The interpreted seismic section corresponds to a SW–NE composite profile constructed by merging four seismic lines: 0053-0839, 0053-0795, 0053-0841, and 0053-0840. Chronostratigraphic surfaces were primarily identified using well MAS-14A, which was drilled on a structural high. As a result, the oldest unit penetrated and observable in the seismic section is the Breakup Unconformity. The Middle and Early Albian unconformities were interpreted solely on the basis of seismic criteria—such as reflector terminations, changes in seismic facies, and external geometries—and are therefore represented as dashed lines in Figure 7.

The main depocenter imaged corresponds to a graben structure, as corroborated by the residual Bouguer anomaly map (De Castro et al., 2024). Its infill was subdivided into three seismic-stratigraphic units (SSU-3, SSU-4, and SSU-5), all of Albian age.

The SSU-3 is bounded at its base by the acoustic basement and at the top by the Early Albian Unconformity. It is restricted to the main depocenter. In the absence of a well that fully penetrates the syn-rift section down to basement, the lower boundary was defined using seismic criteria supported by gravity anomaly data. The interpretation remains uncertain due to the relatively continuous and high-amplitude internal reflectors that deviate from the typical signature of crystalline basement. Internally, SSU-3 is characterized predominantly by *parallel to sub-parallel reflections with variable amplitude and continuity* (Sf2), with local occurrences of *hummocky* (Sf4) and *chaotic* (Sf5) seismic facies.

The SSU-4 and SSU-5 are bounded at the top by the Middle Albian and Late Albian (Breakup) unconformities, respectively. Both surfaces were mapped based on seismic

criteria. These units comprise all described seismic facies, with a predominance of Sf3 (*parallel to sub-parallel reflections with low amplitude and low-to-medium continuity*), in lateral association with Sf2 and Sf1 (*continuous high-amplitude reflections*). The occurrence of Sf5 is restricted to areas adjacent to the main bounding fault, indicating increased tectonic activity during the deposition of these units.

.

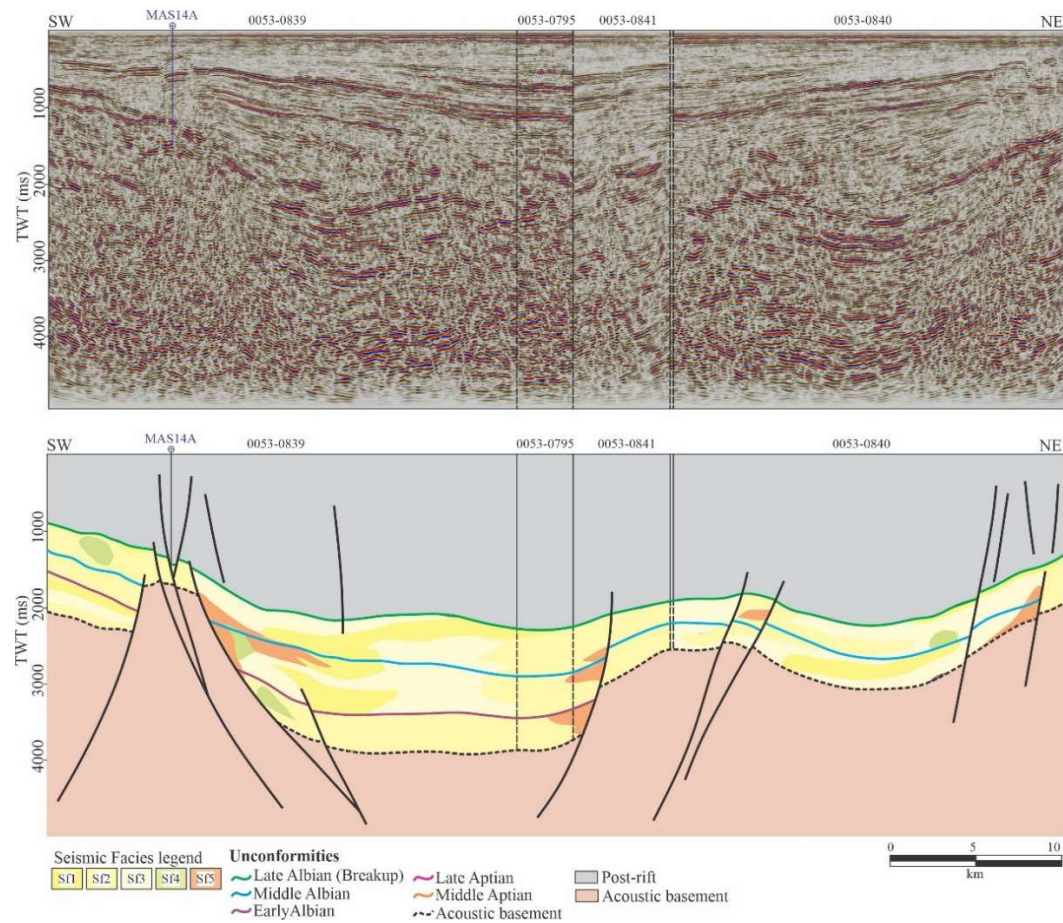


Figure 7 - (Top) Uninterpreted composite seismic section in amplitude mode, constructed from lines 0053-0839, 0053-0795, 0053-0841, and 0053-0840, oriented SW–NE and crossing well MAS-14A. (Bottom) Schematic interpretation showing seismic facies distribution (Sf1 to Sf5) and subdivision into seismic-stratigraphic units SSU-3 to SSU-5. Key unconformities (Early, Middle, and Late Albian) are indicated, with SSU-3 restricted to the main graben and SSU-4 and SSU-5 showing lateral facies associations. The presence of chaotic facies (Sf5) near the main fault suggests tectonic influence on sedimentation.

3.3 BARREIRINHAS ONSHORE-OFFSHORE INTEGRATED SECTION (EAST PORTION)

This sector of the Barreirinhas Basin was interpreted using a S–N-oriented seismic line with approximately 132 km of length, of which nearly 50 km cover the onshore portion of the basin. The interpretation of this seismic section is crucial for integrating both sectors of the basin and for highlighting differences in their structural and stratigraphic framework. Lithostratigraphic and chronostratigraphic data from five wells provided additional support for the seismic interpretation.

3.3.1 Structural interpretation

The residual Bouguer anomaly map (De Castro et al., 2024) indicates that this seismic line intersects structurally significant features for the present study, including two depocenters separated by a structural high (Tutóia High), which are associated with two distinct rifting stages of the BEM (Figure 1 and 8). As illustrated in figure 1, the section images, from south to north, an onshore depocenter developed during Rift Phase I (late Barremian – late Aptian), a structural high related to the Tutóia High, and a second depocenter formed during Rift Phase II (late Aptian – early Albian).

In the onshore sector of the Barreirinhas Basin, high-amplitude reflections between 2,000 and 3,000 ms are associated with sedimentary successions of the Parnaíba Basin, here referred to as the acoustic basement. The Breakup Unconformity (late Albian), mapped between 250 and 500 ms, is represented by a relatively planar surface. This portion of the section also exhibits a well-developed rift succession, compartmentalized by E–W to ESE–WNW-striking, north-dipping normal faults that delineate a graben interpreted as the main depocenter during the initial rifting stage. These faults were

generated during the earliest phases of rifting and basin opening and remained active until the late Albian.

In the offshore sector, strata show pronounced northward tilting and a migration of deformation toward more distal portions of the basin, also expressed by progressive thickening of the units toward the bounding faults, which accommodate larger displacements. In this sector, south-dipping, E–W to ESE–WNW-oriented normal faults predominate. Another significant structural element is the horst associated with the Tutóia High, which separates the two grabens and constitutes the structural divide between the main depocenters imaged in the seismic section.

3.3.2 Stratigraphic interpretation

The seismic-stratigraphic interpretation of the rift section presented here was conducted on the highlighted portion of seismic line 0053-0859 (Figure 9). In this sector, four seismic-stratigraphic units (SSU-2 to SSU-5) and their bounding surfaces (SSUbs), corresponding to unconformities, were mapped with support from four adjacent wells.

The basal unit, SSU-2, occurs in the central portion of the section, restricted to the depocenter. It is bounded at the base by the acoustic basement and at the top by the Late Aptian Unconformity (SSUb-2), both represented by dashed lines, as they were characterized solely on the basis of seismic criteria, given that no wells penetrate this interval. The geometry of SSU-2 does not exhibit significant thickening towards the bounding faults, and the association of seismic facies Sf3 and Sf5 suggests moderate tectonic activity.

The overlying SSU-3 is capped by the Early Albian Unconformity (SSUb-3), which was mapped in wells 1SB, 1BD, and 1BD2A. The seismic facies association in this unit

reveals a lateral transition from Sf5 (commonly associated with faults) to Sf3 and Sf2, with localized occurrences of Sf4. This configuration suggests the progradation of fluvio-deltaic systems supplying sediments into the main depocenter. The geometry of SSU-3 shows northward tilting of strata, discrete thickening towards faults, and evidence of increased tectonic activity compared to the underlying unit.

The internal seismic facies associations and geometry of SSU-4 indicate further intensification of tectonic activity. The presence of Sf5 is interpreted as a conglomeratic wedge formed in direct response to fault activity, particularly near wells 2FA and 1BD2A, which bound the main depocenter and exhibit larger displacements and thicker sediment accumulations. Similar to SSU-3, the distribution of SSU-4 extends beyond the main depocenter. Considering the dominant S–N sediment transport direction, it is suggested that between the early and late Albian there was an increase in sediment supply accompanied by northward migration of deformation.

The uppermost SSU-5 is bounded at the top by the Breakup Unconformity. In this section, strata are tilted northward, and the association of seismic facies Sf1, Sf2, Sf3, and Sf4 indicates enhanced sediment supply. The localized occurrence of Sf5 suggests a decrease in tectonic activity compared with the underlying unit. The pronounced thickening of SSU-5 northward indicates a shift in deformation, no longer concentrated in the graben imaged in the interpreted section, but migrating to more distal portions of the basin.

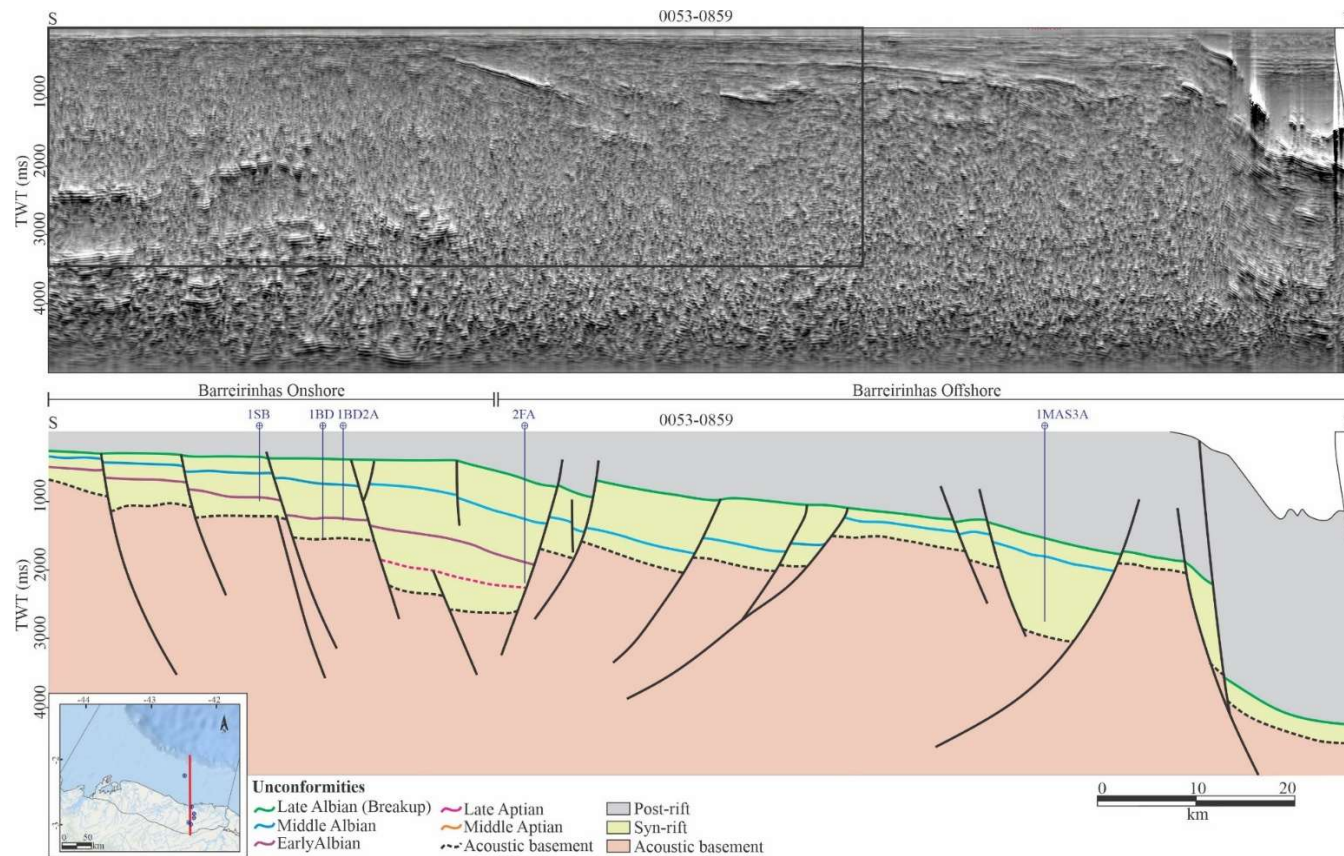


Figure 8 - *(Top)* Uninterpreted seismic section with TECVA attribute, imaging key structural domains of the central Barreirinhas Basin, including two major depocenters and the intervening Tutóia High. *(Bottom)* Structural interpretation highlighting the main tectonostratigraphic framework. Two rift phases are differentiated: Rift Phase I (late Barremian – late Aptian) represented by a southern graben bounded by north-dipping normal faults, and Rift Phase II (late Aptian – early Albian), associated with a northern graben formed by south-dipping faults. The Tutóia High forms a horst structure dividing both depocenters. The acoustic basement (Parnaíba Basin) is imaged onshore below 2,000 ms, overlain by a thick syn-rift succession and capped by the Breakup Unconformity (250–500 ms). Offshore, strata exhibit northward tilting and increased fault displacement toward basinward segments.

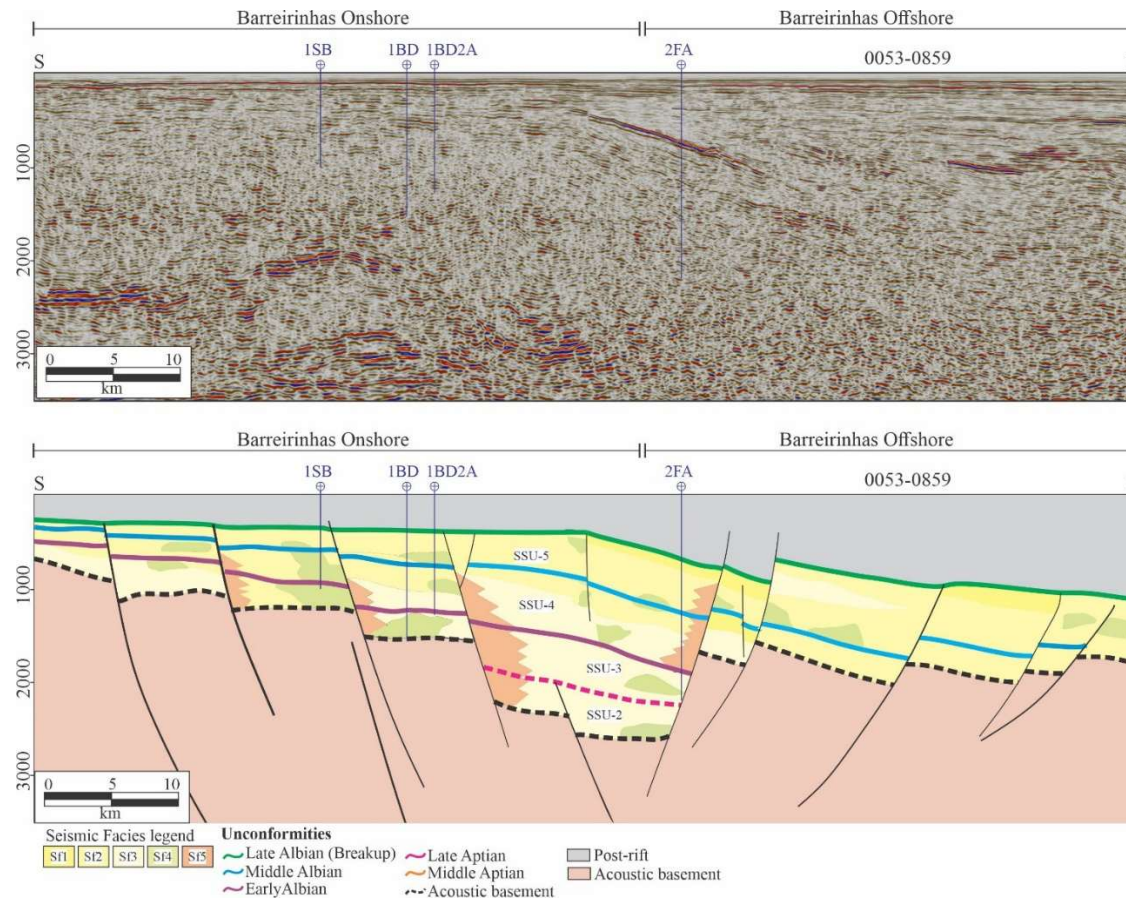


Figure 9 - (Top) Uninterpreted seismic line 0053-0859 in amplitude mode, crossing the main depocenter imaged in this sector of the central Barreirinhas Basin. (Bottom) Schematic interpretation showing seismic facies distribution and subdivision into seismic-stratigraphic units SSU-2 to SSU-5. SSU-2 is confined to the graben and characterized by a mix of Sf3 and chaotic Sf5, reflecting moderate tectonic activity. SSU-3 shows northward tilting and progradation of fluvio-deltaic systems (Sf5 transitioning laterally to Sf3 and Sf2), indicating increasing deformation. SSU-4 records intensified tectonic activity, with thick conglomeratic wedges (Sf5) adjacent to main border faults. SSU-5 displays reduced tectonic influence, northward tilting, and increased sediment supply (predominance of Sf1–Sf4), suggesting deformation migration toward distal basin sectors. Unconformities (SSUb-2 to SSUb-5) were mapped using integrated seismic and well data.

4 DISCUSSION AND CONCLUSION

The seismic-stratigraphic interpretation, integrated with well data and residual Bouguer gravity anomaly maps, has refined the understanding of the tectonostratigraphic evolution of the onshore sector of the Barreirinhas Basin. The results indicate the occurrence of at least two distinct rifting phases, whose depositional products and associated structures differ in style, thickness, fault patterns, and internal graben geometries.

The first rifting phase (*Rift I*), correlated with the upper Barremian – upper Aptian interval, led to the formation of a graben system predominantly oriented in the WNW–ESE direction. This configuration appears to be controlled by the brittle reactivation of Precambrian shear zones trending NE–SW and E–W (De Castro et al., 2024; Fetter, 2009). Residual Bouguer anomaly maps reveal well-defined gravity lows, indicating zones of greater crustal subsidence (Montenegro et al., 2021). The compartmentalization of the rift sequences is evidenced by high-angle normal faults bounding well-defined grabens filled with thick syn-rift deposits and conglomeratic wedges, interpreted as alluvial fans adjacent to major fault scarps (cf. Mascle & Blarez, 1987).

The development of drag folds, the preferential orientation of faults, and possible transpressive features (e.g., the negative flower structure identified at well MAS-14A) suggest the influence of oblique-slip or strike-slip components during the more advanced stages of rifting. This observation aligns with the oblique rifting model proposed for the opening of the BEM by Basile et al. (2005) and Mascle & Blarez (1987). Such features point to a complex interaction between orthogonal rifting, oblique strike-slip deformation,

and the reactivation of inherited structures—particularly near the Romanche Fracture Zone transform margin.

The second rifting phase (*Rift II*), chronostratigraphically constrained between the upper Aptian and lower Albian, appears to have promoted a northward migration of deformation into more distal parts of the basin. This change is inferred from the opposite dip direction of normal faults (southward), the presence of horst-type structures (e.g., the Tutóia High) separating the main grabens, and a pronounced thickening of sedimentary units in the northern portion of the seismic section. The thickening of these units, combined with the tilted geometry of the strata and the occurrence of high-amplitude, low-continuity seismic facies, supports the interpretation of a tectonically active environment with structural control over accommodation space.

From a stratigraphic perspective, the rift succession was subdivided into five seismic-stratigraphic units (SSU-1 to SSU-5), bounded by unconformities correlated with regional surfaces (Breakup, intra-Aptian, intra-Albian). The lateral distribution of seismic facies indicates variations in subsidence rate, sediment supply, and depositional style, with fluvio-deltaic systems predominantly feeding the depocenters during the later rift stages (SSU-4 and SSU-5).

The identification of the acoustic basement, composed of Paleozoic successions from the Parnaíba Basin, was essential to delineate the base of the rift megasequence. However, its recognition becomes challenging in areas lacking well control, particularly because the seismic response of older sedimentary layers can be similar to that of the true basement. In these sectors, the integration of potential field data proved fundamental for mapping deeper structural features.

Finally, the migration of depocenters and the reduction of tectonic activity in proximal sectors during the upper Albian suggest the onset of lithospheric breakup and the establishment of the Breakup Surface, interpreted as a planar horizon with minimal fault offset. Above this surface, post-rift infill deposits associated with the drift phase are observed, marking the transition of the Barreirinhas Basin into a fully passive margin setting.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank PETROBRAS for financial support through the Cooperation Agreement between PETROBRAS/FUNPEC/UFRN, which enabled the project "Tectonostratigraphic analysis of the Aptian-Maastrichtian section in the sector between the Pará-Maranhão and Grajaú Basins and the Gurupi Graben System, Northern-Northeastern Brazil," under the coordination of Prof. Dr. Emanuel Ferraz Jardim de Sá and Debora do Carmo Sousa. The authors are also grateful to the Brazilian Agency of Oil and Gas (ANP) for supplying the seismic and well datasets. Furthermore, this study constitutes part of the first author's doctoral research within the Postgraduate Program in Geodynamics and Geophysics at the Federal University of Rio Grande do Norte

REFERENCES

Antobreh, A.A., Faleide, J.I., Tsikalas, F., Planke, S., 2009. Rift–shear architecture and tectonic development of the Ghana margin deduced from multichannel seismic reflection and potential field data. *Marine and Petroleum Geology* 26, 345–368. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2008.04.005>.

Aslanian, D., Gallais, F., Afilhado, A., Schnürle, P., Moulin, M., Evain, M., Dias, N., Soares, J.E.P., Fuck, R.A., Pessoa Neto, O.C., Viana, A., 2021. Deep structure of the Pará–Maranhão/Barreirinhas passive margin in the equatorial Atlantic (NE Brazil). *Journal of South American Earth Sciences* 110, 103322. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103322>.

Basile, C., 2015. Transform continental margins: Part 1—Concepts and models. *Tectonophysics* 661, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.08.034>.

Basile, C., Mascle, J., Popoff, M., Bouillin, J.P., Mascle, G., 1993. The Ivory Coast–Ghana transform margin: A marginal ridge structure deduced from seismic data. *Tectonophysics* 222, 1–19. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(93\)90186-N](https://doi.org/10.1016/0040-1951(93)90186-N).

Blarez, E., Mascle, J., 1988. Shallow structures and evolution of the Ivory Coast and Ghana transform margin. *Marine and Petroleum Geology* 5, 54–64.

Brownfield, M.E., Charpentier, R.R., 2006. Geology and total petroleum systems of the Gulf of Guinea Province of West Africa. *U.S. Geological Survey Bulletin* 2207-C, 32 pp.

Córdoba, V., Antunes, A., Sá, E., Sousa, D., Lins, F., 2008. Análise estratigráfica e estrutural da Bacia do Rio do Peixe, Nordeste do Brasil: integração a partir do levantamento sísmico pioneiro 0295_RIO_DO_PEIXE_2D. *Boletim de Geociências da Petrobras* 16, 53–868.

Davison, I., Faull, T., Greenhalgh, J., O’Beirne, E., Steel, I., 2016. Transpressional structures and hydrocarbon potential along the Romanche Fracture Zone: A review.

Geological Society, London, Special Publications 431, 17–35.
<https://doi.org/10.1144/SP431.2>.

de Castro, D.L., Almeida, N.M., Oliveira, D.C., Bezerra, F.H.R., 2022. Crustal evolution of divergent and transform segments of the Brazilian Equatorial Margin derived from integrated geophysical data: Insights from basement grain heritage. *Earth and Planetary Science Letters* 588, 117563.

de Castro, D.L., Oliveira, D.C., Bezerra, F.H.R., 2024. Evolution of the transtensional Barreirinhas pull-apart system in the Brazilian Equatorial Margin and its correlation with the African conjugate counterpart. *Tectonophysics* 230470.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2024.230470>.

Feijó, F.J., 1994. Bacia de Barreirinhas. *Boletim de Geociências da Petrobras* 8(1), 103–109.

Kuchle, J., Scherer, C.M.S., 2010. Sismoestratigrafia de bacias rifte: técnicas, métodos e sua aplicação na Bacia do Recôncavo. *Boletim de Geociências da Petrobras* 18(2), 33–60.

Matos, R.M.D., 1992. The Northeast Brazilian Rift System. *Tectonics* 11(4), 766–791.
<https://doi.org/10.1029/91TC03092>.

Matos, R.M.D., 1999. History of the Northeast Brazilian Rift System: Kinematic implications for the break-up between Brazil and West Africa. *Geological Society, London, Special Publications* 153(1), 55–73.
<https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1999.153.01.04>.

Matos, R.M.D., 2000. Tectonic evolution of the equatorial South Atlantic. In: Mohriak, W., Talwani, M. (Eds.), *Atlantic Rifts and Continental Margins*. AGU Geophysical Monograph 115, 331–354. <https://doi.org/10.1029/GM115p0331>.

Matos, R.M.D., Krueger, A., Norton, I., Casey, K., 2021a. The fundamental role of the Borborema and Benin–Nigeria provinces of NE Brazil and NW Africa during the development of the South Atlantic Cretaceous rift system. *Marine and Petroleum Geology* 127, 104872. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104872>.

Milani, E.J., Thomaz Filho, A., 2000. Sedimentary basins of South America. In: *31st International Geological Congress*, Rio de Janeiro, 389–449.

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, pp. 87–165.

Montenegro, C.G.L., Bezerra, F.H.R., de Castro, D.L., Corrêa, A.C.B., 2021. Internal architecture of the Barreirinhas Basin and evidence of transform movements along the Romanche Fracture Zone, Brazilian Equatorial Margin. *Marine and Petroleum Geology* 123, 104748. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104748>.

Moulin, M., Schnürle, P., Afilhado, A., Gallais, F., Dias, N., Evain, M., Soares, J.E.P., Fuck, R.A., Pessoa Neto, O.C., Viana, A., Aslanian, D., 2021. Imaging early oceanic crust spreading in the Equatorial Atlantic Ocean: Insights from the MAGIC wide-angle experiment. *Journal of South American Earth Sciences* 111, 103493. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103493>.

Nemčok, M., Rybar, S., Sinha, S.T., Hermeston, S.A., Ledvényiová, L. (Eds.), 2016. *Transform margins: Development, controls and petroleum systems*. Geological Society, London, Special Publications 431.

Pellegrini, B.S., Ribeiro, M., 2018. Exploratory plays of Pará–Maranhão and Barreirinhas basins in deep and ultra-deep waters, Brazilian Equatorial Margin. *Brazilian Journal of Geology* 48(3), 485–504. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201820180007>.

Rapozo, B.F., Córdoba, V.C., Antunes, A.F., 2021. Tectono-stratigraphic evolution of a Cretaceous intracontinental rift: Example from Rio do Peixe Basin, north-eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology* 126, 104899. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.104899>.

Soares Jr., A.V., Costa, J.B.S., Hasui, Y., 2008. Evolução da margem atlântica equatorial do Brasil: Três fases distensivas. *Geociências* 27(4), 427–437.

Soares, E.F., Zalán, P.V., Figueiredo, J.J.P., Trosdorf Jr., I., 2007. Do Pará–Maranhão. *Boletim de Geociências da Petrobras* 15, 321–329.

Tavares, A.C., de Castro, D.L., Bezerra, F.H.R., Oliveira, D.C., Vannucchi, P., Iacopini, D., Jovane, L., Vital, H., 2020. The Romanche Fracture Zone influences the segmentation of the equatorial margin of Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 103, 102738. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102738>.

Trosdorf Jr., I., Zalán, P.V., Caldeira, J.L., Tanaka, A., Oliveira, M.J.R., Santarém, P., Moraes, A., 2007. Bacia de Barreirinhas. *Boletim de Geociências da Petrobras* 15(2), 331–339.

Zalán, P.V., 2015. Re-interpretation of an ultra-deep seismic section in the Pará–Maranhão Basin—Implications for the petroleum potential of the ultra-deep waters. In: *Offshore Technology Conference* (OTC-26134-MS). <https://doi.org/10.4043/26134-MS>.

CAPÍTULO V

ARTIGO CIENTÍFICO II

*“Tectonostratigraphic Architecture and Structural Segmentation of the
Barreirinhas Basin (Equatorial Margin, Brazil) from Seismic
Interpretation”*

(Basin Research)

Basin Research

Research Article

Tectonostratigraphic Architecture and Structural Segmentation of the Barreirinhas Basin (Equatorial Margin, Brazil) from Seismic Interpretation

Submission ID 7d372395-bb5e-4d60-9cbd-f66af5788d54

Submission Version Initial Submission

PDF Generation 29 Sep 2025 12:22:31 EST by Atypon ReX

Authors

Miss Bárbara Ferreira RAPOZO
Corresponding Author
Submitting Author



<https://orcid.org/0000-0003-3118-0879>

Affiliations

- Postgraduate Program in Geodynamics and Geophysics, Federal University of Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, Brazil

Dr. Carlos César NASCIMENTO da Silva

Affiliations

- Department of Geophysics, Federal University of Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, Brazil

Dr. Valéria Centurion CÓRDOBA

Affiliations

- Postgraduate Program in Geodynamics and Geophysics, Federal University of Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, Brazil
- Department of Geology, Federal University of Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, Brazil

Dr. Debora do Carmo SOUSA

Affiliations

- Department of Geology, Federal University of Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, Brazil

Dr. Emanuel Ferraz JARDIM DE SÁ

Affiliations

- Department of Geology, Federal University of Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, Brazil

Miss Ana Karoliny Alves de MEDEIROS

Affiliations

- Postgraduate Program in Geodynamics and Geophysics, Federal University of Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, Brazil

Miss Isabelle Teixeira da SILVA

Affiliations

- Postgraduate Program in Geodynamics and Geophysics, Federal University of Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, Brazil

Mr. Emilson Fernandes SOARES

Affiliations

- PETROBRAS- Research Center Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES/PETROBRAS), Petróleo Brasileiro S.A., Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil

Mr. Alexandre de Castro MEDEIROS

Affiliations

- PETROBRAS- Research Center Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES/PETROBRAS), Petróleo Brasileiro S.A., Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil

5. ARTIGO CIENTÍFICO II

Tectonostratigraphic Architecture and Structural Segmentation of the Barreirinhas Basin (Equatorial Margin, Brazil) from Seismic Interpretation

Bárbara Ferreira RAPOZO ^{a*}, Carlos César NASCIMENTO da Silva ^c, Valéria Centurion CÓRDOBA ^{a,b}, Debora do Carmo SOUSA ^b, Emanuel Ferraz JARDIM DE SÁ, Ana Karoliny Alves de MEDEIROS ^a, Isabelle Teixeira da SILVA ^a, , Emilson Fernandes SOARES ^d, Alexandre de Castro MEDEIROS ^d

^a Postgraduate Program in Geodynamics and Geophysics, Federal University of Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, Brazil.

^b Department of Geology, Federal University of Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, Brazil.

^c Department of Geophysics, Federal University of Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, Brazil.

^d PETROBRAS- Research Center Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES/PETROBRAS), Petróleo Brasileiro S.A., Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil.

ABSTRACT

The Barreirinhas Basin, along the Brazilian Equatorial Margin (BEM), preserves a tectonostratigraphic record shaped by oblique rifting, transform linkage to the Romanche Fracture Zone, and post-rift reactivation. We integrate publicly available 2D seismic profiles, well ties, and residual Bouguer anomalies to construct composite regional transects and fence diagrams that image basin-scale architecture. A principal objective is to evaluate the Tutóia High, an NE–SW-oriented, long-wavelength antiform at the boundary between the Gurupi Belt and Borborema Province, and its role in structural segmentation and sequence development. Rift to drift successions include the Canárias Group, and Barro Duro, Tutóia and Bom Gosto formations overlain by the Humberto de Campos Group (Ilha de Santana carbonates and Travosas deep-water clastics). Along W–

E transects, rift-bounding normal faults (low-angle, high-throw) and margin-parallel strike-slip accommodation generate E–W-oriented depocenters that correlate with negative gravity anomalies, indicating fault-controlled subsidence and transverse compartmentalization. Near the Tutóia High, seismic packages thicken westward and are truncated by Maastrichtian – Paleocene unconformities, consistent with uplift and partial inversion. Locally, subhorizontal deeper reflectors overlain by shallow antiforms suggest décollement levels and gravitational shortening across the slope. We infer that the Tutóia High functions as a first-order structural compartment, focusing strain and governing thickness patterns, facies distribution, and the lateral connectivity of E–W depocenters with NE–SW transfer structures. Regionally mapped unconformities (SAG/pre-rift, breakup, Turonian, Maastrichtian, Paleocene) register shifts from extension to thermal subsidence and late inversion. Altogether, the Barreirinhas Basin exemplifies transform-margin segmentation where inherited basement anisotropy and syn- to post-rift reactivation dictate depocenter orientation and stacking. These results refine a kinematic framework for the BEM and inform exploration risk by linking structural inheritance and the evolution of potential reservoir–seal pairs across the Tutóia High domain.

Keywords: Barreirinhas Basin, Tutóia High, Seismic Transects, Brazilian Equatorial Margin

1. INTRODUCTION

The Barreirinhas Basin, a segment of the Brazilian Equatorial Margin (BEM), occupies the coastal zone and continental shelf of the state of Maranhão (Azevedo, 1991; Trosdorf et al., 2007). The BEM extends for ~2,200 km from the Potiguar to the Amapá basins and is classically described as a transform-type margin formed during the Mesozoic separation of the South American and African plates (Montenegro et al., 2020; Mohriak, 2003). Under the influence of this mega–strike-slip system, the Foz do Amazonas, Pará-Maranhão, Barreirinhas, Ceará, and Potiguar basins developed along the margin (Azevedo, 1991).

Barreirinhas is a rhombohedral transtensional basin whose origin is intimately linked to the Romanche Oceanic Fracture Zone (Azevedo, 1991; Trosdorf et al., 2007). Its structural style reflects the interaction between crustal extension and dextral strike-slip

motion associated with continental crust translation along the fracture zone (Tavares, 2017). This kinematic complexity typifies the BEM, where deformation arises from both margin-normal extension and margin-parallel shear (Withjack & Jamison, 1986). The continent–ocean transition is notably narrow, on the order of ~20 km (Krueger, 2014).

The tectonic framework of the basin was conditioned by the geological and rheological character of its intensely deformed Precambrian basement (Zalán et al., 2004; de Castro et al., 2022). Regionally, the BEM alternates between E–W segments dominated by strike-slip/transpression and NW–SE segments dominated by extension/transtension, interpreted to reflect, respectively, the nucleation of oceanic fracture zones and oblique rupture of Precambrian cratons (Zalán et al., 2004).

Sediment fill in Barreirinhas records three major phases—pre-rift, rift, and drift (Figure 1; Trosdtorf et al., 2007). The rift phase (Aptian to late Albian) is marked by clastic deposition of the Canárias Group followed by the Barro Duro, Tutóia, and Bom Gosto formations (Zalán et al., 2004). Rift-bounding faults are low-angle, high-displacement structures ranging from ~5 to 50 km in length (Krueger, 2014). The drift phase (late Albian to Recent) comprises the Humberto de Campos Group, including the Ilha de Santana Formation (shallow-marine carbonates) and the Travosas Formation (deep-water turbiditic shales and sandstones), deposited under thermal subsidence (Zalán et al., 2004).

Region-scale transects are fundamental to visualizing the internal architecture of the basin and correlating tectonic and stratigraphic phases. Such analysis enables mapping of structural styles and evaluation of their control on stratigraphic evolution, with direct implications for the basin’s petroleum potential. Within this context, the Tutóia High stands out as a key structural feature developed at the boundary between the Gurupi Belt and the Borborema Province (Zalán et al., 1985; Trosdtorf et al., 2007). This broad anticlinal structure, produced by intense dextral transpressional deformation, defines the eastern limit of the basin and forms an effective barrier influencing the deposition of several sedimentary sequences, notably the Caju Group (Trosdtorf et al., 2007). Its evolution is directly related to strike-slip reactivation along the Romanche Fracture Zone, which imposed significant deformation on the rift-phase structural framework (Zalán et al., 2004).

Together, these characteristics make Barreirinhas na example for assessing how transform-margin kinematics, inherited basement anisotropy, and syn- to post-rift segmentation govern tectonostratigraphic architecture along the Brazilian Equatorial Margin (BEM).

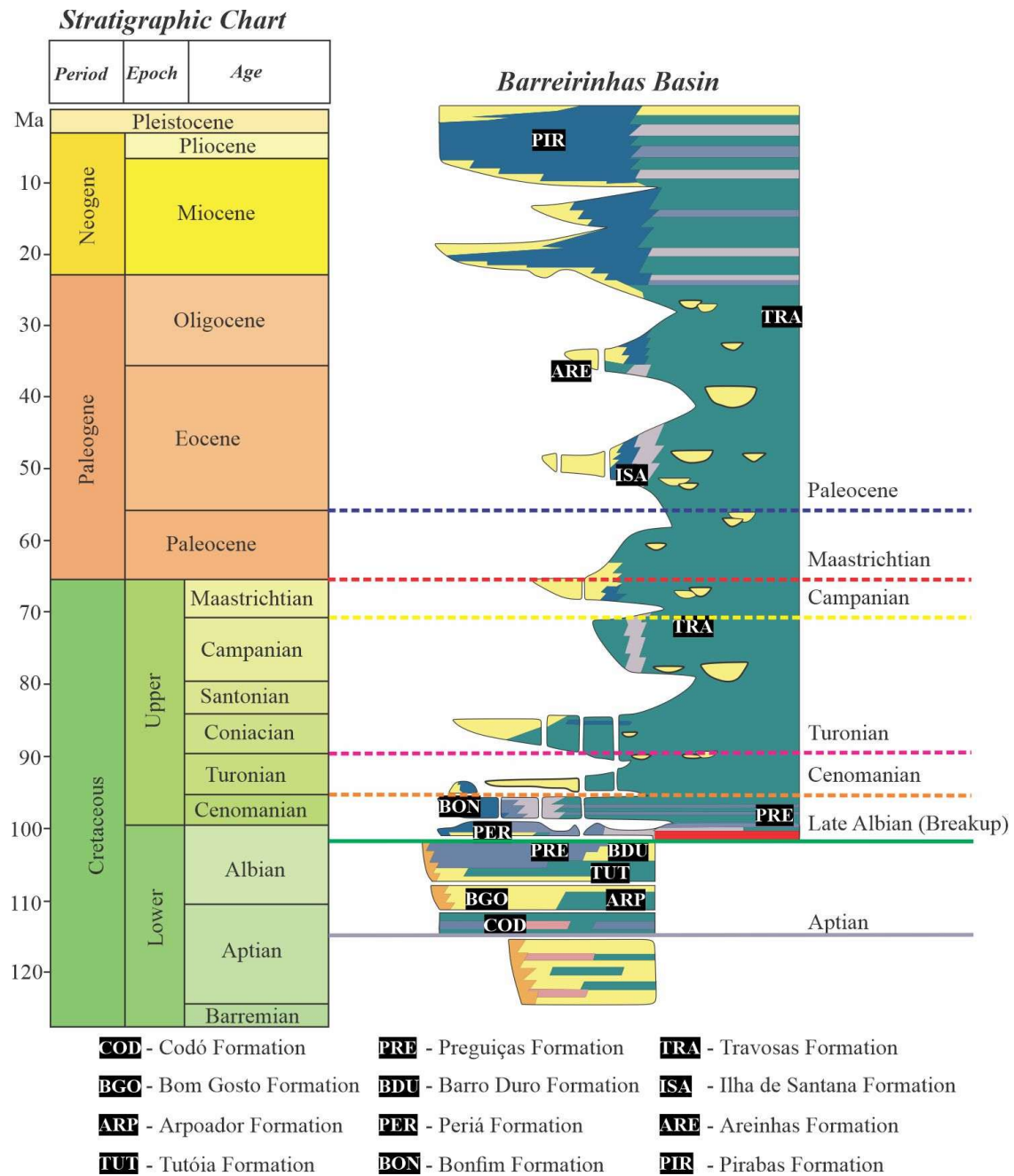


Figure 10 - Stratigraphic chart of the Barreirinhas Basin based on Trosdorf Jr. et al. (2007) and Pellegrino & Ribeiro (2018), showing the main unconformities mapped in this study.

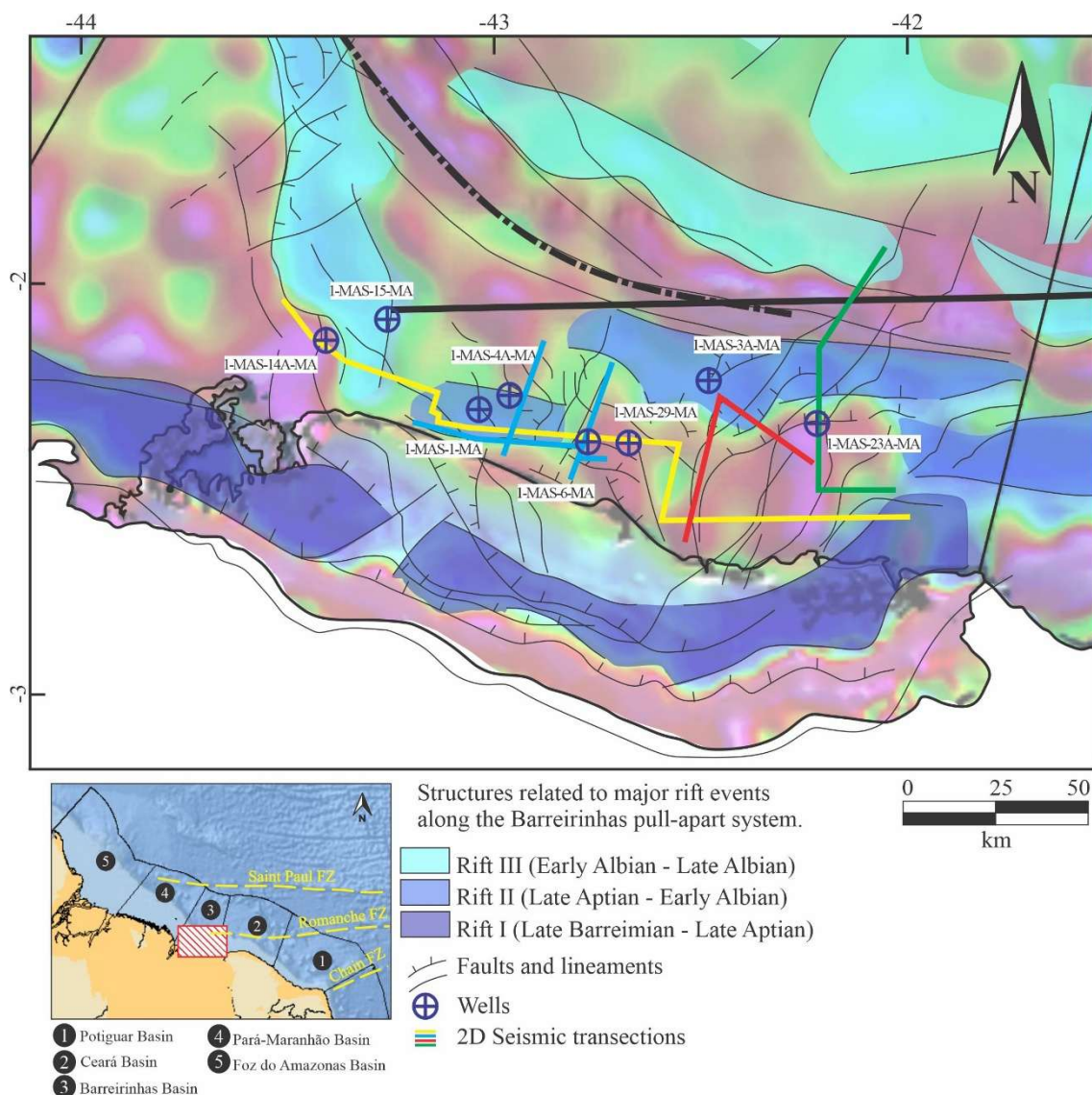


Figure 11 - Overlay of residual Bouguer anomalies (de Castro et al., 2024) indicating the transects illustrated in subsequent figures. Datum SIRGAS2000; projection UTM Zone 24S.

2. DATA AND METHODS

The geophysical and well dataset employed in this study, both publicly available, was provided by the Exploration and Production Database (BDEP) of the Brazilian National Agency for Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP). For the Barreirinhas Basin, the BDEP/ANP offers a substantial volume of 2D seismic data, complemented by geophysical well logs, predominantly from exploratory wells. Although the primary focus

of this work is tectonostratigraphic analysis, the interpretations provide direct insights into the evolution of the Brazilian Equatorial Margin, which is highly relevant for hydrocarbon exploration.

Due to the diversity of seismic surveys, georeferencing standardization was required. While all datasets were referenced to the same datum (SIRGAS2000), they were projected in three distinct UTM zones (24S, 23S, and 23N). To ensure compatibility within OpendTect, which requires all data to share the same projection, seismic traces were reprocessed using the Python script `seg2seg` (Barraud, 2019). This procedure standardized all coordinates to UTM zone 24S.

Well-to-seismic ties were established to integrate well information with seismic sections, following a sequence of steps: (i) velocity analysis based on checkshots and Integrated Transit Time (ITT) derived from sonic logs; (ii) generation of depth–time curves; (iii) incorporation of wells into the project; (iv) evaluation of density and sonic logs; (v) generation of synthetic seismograms; and (vi) calibration of key reflectors by extrapolating seismic responses in the vicinity of wells. This workflow ensured greater reliability in the identification and correlation of stratigraphic horizons.

For the interpretation, seismic amplitude data were processed to generate simple and combined attributes (meta-attributes) aimed at enhancing stratigraphic and structural features. Seismic facies characterization was based on reflector amplitude, frequency, and continuity patterns, consistent with the sequence stratigraphy concepts proposed by Vail et al. (1977). This approach enabled the recognition of depositional units, their boundaries, and key unconformities. From a structural perspective, discontinuities were mapped from fault patterns, drag features, and fault–strata relationships, supporting the

interpretation of deformation styles linked to different tectonic stages (e.g., normal faults associated with crustal stretching during rifting; strike-slip faults associated with kinematic accommodation; Raja Gabaglia & Milani, 1991).

To provide a comprehensive and robust analysis, regional transects were constructed by merging multiple 2D seismic lines into continuous regional cross-sections. These transects, together with fence diagrams, were crucial for the three-dimensional visualization of structural geometries and stratigraphic relationships. This approach provided a detailed understanding of the tectonostratigraphic architecture of the basin, highlighting depocenter geometries and the relationships among seismic sequences.

Additionally, seismic interpretations were integrated with a published Residual Bouguer Anomaly map of the study area to support the analysis. The integration of gravity anomalies with seismic sections confirmed the correlation between negative anomalies and depocenter locations, reinforcing the interpretation that structural features are controlled by normal fault systems. Fault geometries and their relationships with sedimentary strata were further analyzed to infer basin kinematics and evolutionary stages, providing a framework for understanding the rifting processes.

3. RESULTS

To better understand the evolution of the Equatorial Margin of Brazil (EMB) in its central sector, specifically in the Barreirinhas Basin, four transects were constructed, oriented parallel and orthogonal to the main direction of mass transport along NE–SW and WNW–ESE trending faults in the offshore domain. As previously mentioned, these transects were generated by combining distinct segments of 2D seismic lines with various orientations and were designed primarily to: (i) select lines with high signal-to-noise ratio

that intersect significant stratigraphic and structural features, and (ii) integrate them with gravity data (De Castro et al., 2024), which supports the interpretation of relative structural highs and lows.

3.1 TECTONOSTRATIGRAPHIC ANALYSIS ALONG A W-E TRANSECT IN THE BARREIRINHAS BASIN

The analyzed W–E transect extends from the vicinity of well 1-MAS-14A-MA, near the Ilha de Santana Platform (~40 km to the west), to the Tutóia High, an NE–SW-trending antiformal structure bounded by normal faults that marks the boundary between the Barreirinhas and Ceará basins.

In the western sector, near well 1-MAS-14-MA, the breakup unconformity is recorded at ~1.5 s TWT, overlying a depocenter (graben) bounded by normal faults to the east. The residual Bouguer anomaly (De Castro et al., 2024) shows positive values west of well 1-MAS-14A-MA, indicating a structural high that affects the acoustic basement (Figure 2 and 3).

In the central portion, along seismic line 0048-0256, the residual Bouguer anomaly reveals a regional-scale structural low, expressed by negative values of about –2.0 mGal. This depocenter is associated with fault displacement accumulated during the rifting phase, producing significant subsidence. Below the breakup unconformity, reflectors dip steeply westward and are occasionally offset by faults, generating local highs and lows. Structural inversion is possible, consistent with Maastrichtian uplift reported in the literature (Trosdorf et al., 2007). Westward thickening of breakup-related and younger sequences is evident, all truncated by the Maastrichtian and Paleocene unconformities.

The eastern segment of line 0048-0256, near wells 1-MAS-6-MA and 1-MAS-29-MA, reveals another pronounced depocenter. Sedimentary sequences thicken westward, likely controlled by normal faulting to the west and/or significant structural uplift to the east. Older strata, including those bounded by the breakup unconformity, are deformed into a series of NNE-trending antiforms and synforms.

Seismic line 0048-0245 displays an apparent northward dip of rift-related strata capped by the breakup unconformity (acoustic basement). In contrast to the previous segment, which shows westward dip, this configuration indicates a true northwestward dip of the basement, suggesting regional tilting.

On seismic line 0068-0069, strong-amplitude reflectors at 2–3 s TWT define the crest of a large-wavelength anticlinal structure (tens of kilometers), with alternating dips to the west and east. Well 1-MAS-23A-MA, projected slightly south of its location, intersects this structure. The deeper reflector (~3 s TWT) is correlated with the top of the Alagoas Stage, marking the Aptian SAG (pre-rift) unconformity. Between this horizon and the Paleocene unconformity, a thick sedimentary succession is preserved, which becomes progressively eroded (or not deposited) northward, toward the original position of well 1-MAS-23A-MA.

Finally, positive and negative gravity anomalies along the transect do not exclusively reflect brittle tectonic depocenters. In the western and central sectors, grabens show direct correlation with negative anomalies. In contrast, in the central and eastern sectors, alternating gravity highs and lows correspond to sediment-filled troughs aligned with synformal axes and adjacent antiformal structures, mainly affecting the acoustic basement.

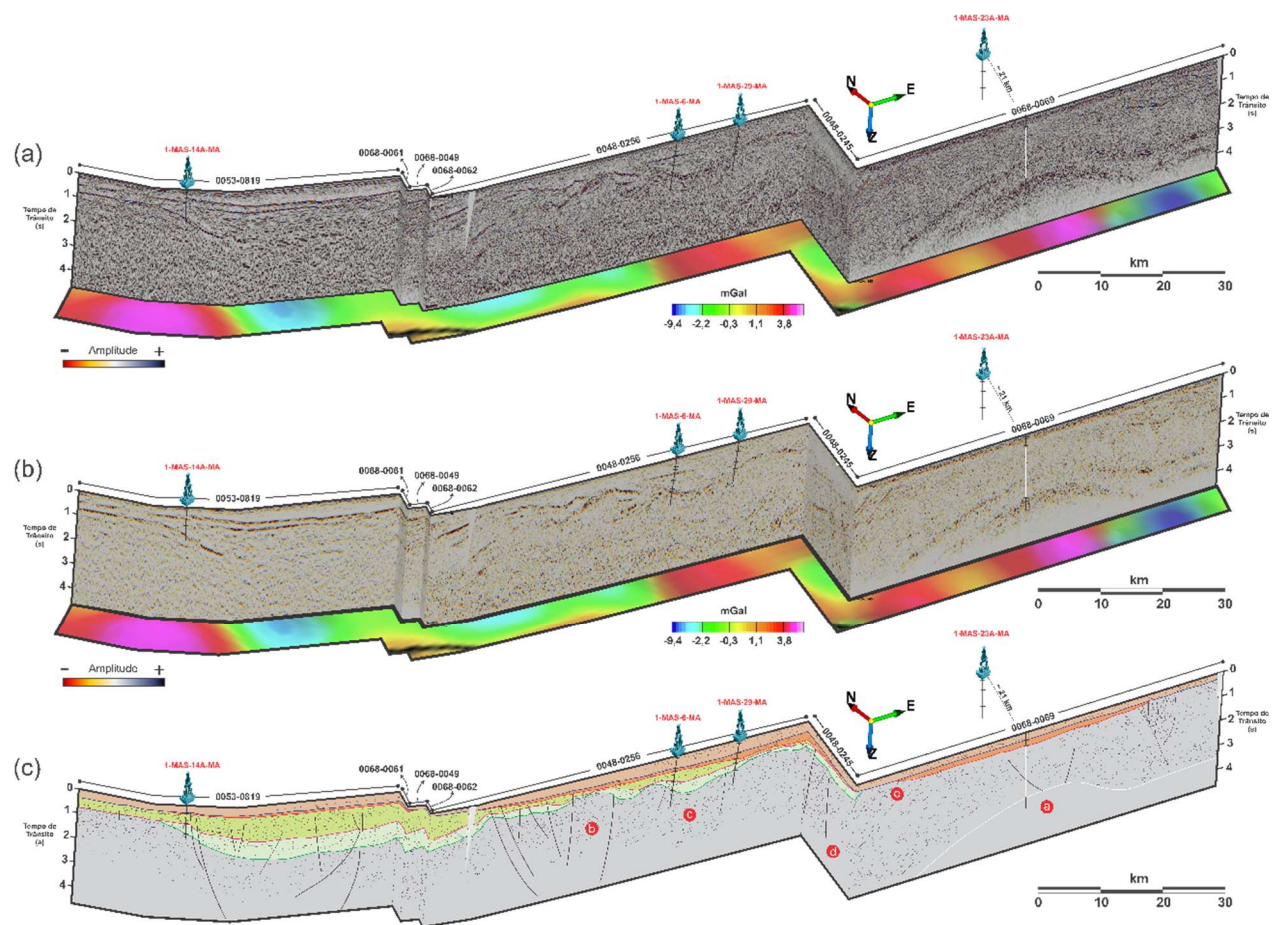


Figure 12 - presents a west–east-oriented transect (see location in Figure 2), extending from the vicinity of well 1-MAS-14A-MA, located near the Ilha de Santana Platform (approximately 40 km to the west), to the Tutóia High, a prominent antiform that marks the eastern boundary of the Barreirinhas Basin with the adjacent Ceará Basin.

3.2 STRUCTURAL CONFIGURATION OF THE TUTÓIA HIGH AND ASSOCIATED STRATIGRAPHIC RELATIONSHIPS

The second transect analyzed covers the easternmost sector of the Barreirinhas Basin, in the vicinity of well 1-MAS-23-MA, and is composed of seismic lines 0068-0068 (E–W), 0067-0081A (S–N), and R0239-0226A (SW–NE). The integration of these lines provides a comprehensive view of the antiformal structure that defines the Tutóia High, encompassing both its eastern flank and the fold axis dipping southward. This transect was designed to investigate the stratigraphic relationships of the strata overlying the Tutóia High, as introduced in the previous section.

Along line 0068-0068, strong-amplitude reflectors indicate a steep eastward dip on the flank of the antiform, with normal faults at the top, probably nucleated during or after the folding process, suggesting syn- to post-rift tectonic reactivation.

Line 0067-0081A shows a progressive northward erosional process controlled by the Maastrichtian unconformity, which truncates the older sedimentary succession. Southward, the succession thickens gradually, consistent with observations in the eastern portion of the W–E transect (Figure 3). This erosion–thickening pattern is compatible with regional uplift events documented in the literature, associated with Maastrichtian-age tectonic inversion along the Equatorial Margin (Trosdorf et al., 2007; Mohriak et al., 2012).

The pre-rift SAG sequence, marked by a distinctive white reflector, was tied to well 1-MAS-23A-MA and extrapolated across the area, indicating the southward plunge of the Tutóia High antiformal axis. North of well 1-MAS-23A-MA, the lower signal-to-noise

ratio makes the interpretation more ambiguous, but still allows the identification of north-dipping normal faults extending into the deeper portions of the basin.

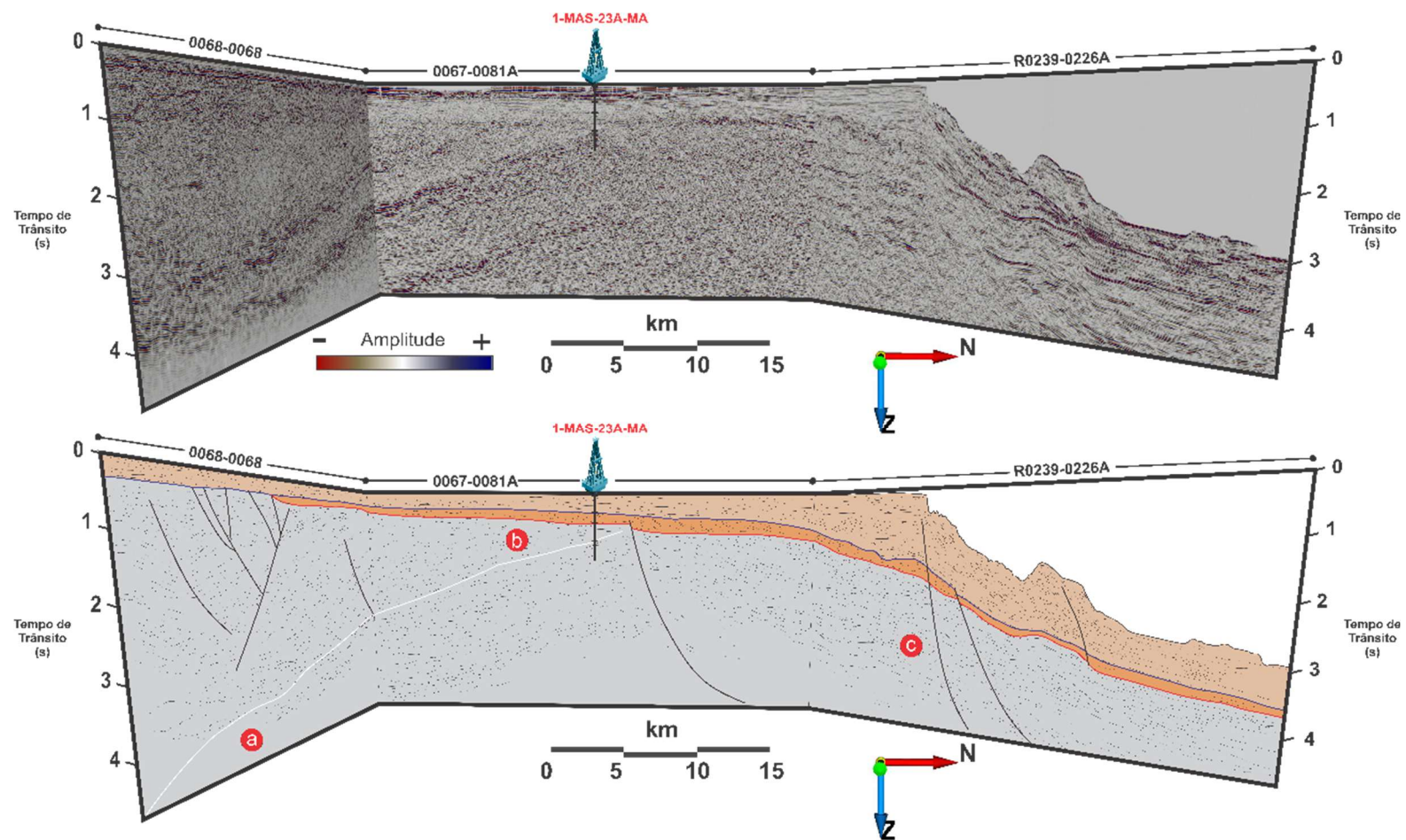


Figure 13 - a composite transect constructed from seismic lines 0068-0068, 0067-0081A, and R0239-0226A, which provides a detailed depiction of the Tutóia High and its associated structural features. This antiform delineates the eastern boundary of the Barreirinhas Basin and is interpreted from its structural projection south of well 1-MAS-23A-MA, encompassing its eastern flank and the fold axis, which dips southward.

On line R0239-0226A, normal faulting is prominent along the continental slope. In addition, in the central portion of this line, reverse faults are observed, which can be interpreted as gravitationally induced features, triggered by sediment loading and downslope transport towards deepwater. These compressional structures are part of the so-called “compressional domain,” a common feature of passive margins, and have been discussed by several authors (e.g., Zalán et al., 2004; Montenegro et al., 2021).

In summary, the Tutóia High constitutes a positive structural feature whose antiformal geometry segments the Barreirinhas Basin and controls both the differential thickening of depositional sequences and the distribution of deformational features related to rifting, inversion, and gravitational tectonics. Its role as a major structural compartment is fundamental for understanding the tectonostratigraphic evolution of the Brazilian Equatorial Margin (Azevedo, 1991; Matos, 2000; Aslanian et al., 2010).

3.3 STRUCTURAL CONFIGURATION NORTHWEST OF THE TUTÓIA HIGH

The transect discussed in this section, composed of segments of seismic lines 0048-0247S (SSW–NNE) and 0239-0230 (WNW–ESE), focuses on the northwestern sector of the Tutóia High. At the intersection of these lines, a thick sedimentary trough is observed, with packages deposited between the Upper Albian (breakup) and the Paleocene that show a lateral thinning trend (*pinch-out*) to the south and east. This thinning imparts a saucer-shaped geometry to the depocenter. The absence of major normal fault displacements suggests that this configuration is not exclusively controlled by brittle tectonics, but possibly by differential subsidence or flexural adjustments, as reported for other segmented Atlantic margins (Davison, 2007; Hudec & Jackson, 2007).

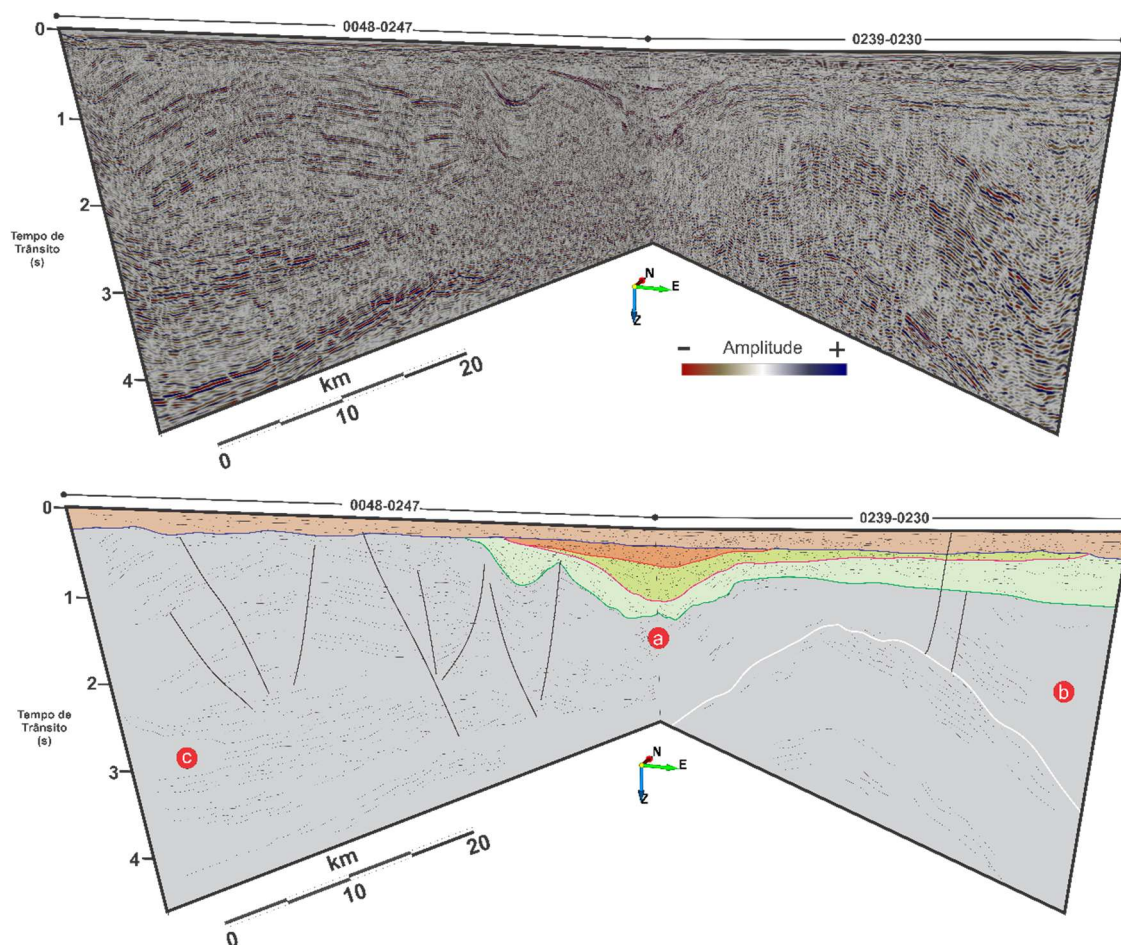


Figure 14 - presents a transect composed of segments from seismic lines 0048-0247 and 0239-0230, oriented approximately in a northwest direction. This transect enables the characterization of a major depocenter located in the northwestern sector of the Barreirinhas Basin, as well as its structural boundaries.

On the eastern margin, along line 0239-0230, the depocenter is bounded by the Tutóia High. However, in this sector, the seismic expression does not clearly display an antiformal geometry, as observed in other segments (see section “Structural Configuration of the Tutóia High and Associated Stratigraphic Relationships”), which may reflect variations in the deformational style or in seismic imaging quality.

On the southern margin of the depocenter, line 0048-0247 reveals, near its southernmost end at ~3 s TWT, subhorizontal reflectors. At shallower levels (between 1 and 2 s TWT), these are overlain by curved reflectors delineating an antiformal structure.

The absence of deformation at deeper levels may be explained, albeit speculatively, by the subhorizontal reflector acting as a décollement surface, accommodating deformation independently in the overlying strata (Figure 6). The lack of seismic data with high signal-to-noise ratio or with orientation compatible with imaging this feature makes the interpretation ambiguous.

Correlation with the residual Bouguer anomaly map confirms the presence of the depocenter, expressed by negative values between -9.4 and -8.0 mGal aligned W–E, encompassing the area of well 1-MAS-3A-MA. This association between seismic sedimentary troughs and gravity lows is consistent with previous observations from other sectors of the Barreirinhas Basin and adjacent basins (De Castro et al., 2024; Aslanian et al., 2010), reinforcing the influence of fault-controlled subsidence and regional structural segmentation.

3.4 THREE-DIMENSIONAL SEISMIC INTEGRATION AND STRUCTURAL CONTROL OF E–W-ORIENTED DEPOCENTERS

In this section, the analysis is based on a **fence diagram** that integrates seismic lines in the E–W (0048-0258 and 0048-0257) and S–N (0048-0239 and 0048-0229) directions, forming a view with a general SW orientation. The use of a fence diagram is fundamental when analyzing 2D data, as it allows validation of the lateral continuity of interpreted features and the determination of the dip direction of fold axes and faults. This tool confirmed that the depocenters already identified in the W–E transect (see Figure 3) show a preferential orientation close to E–W.

Some depocenters previously recognized in the E–W transect (Figure 3 and) had their orientations better constrained through correlation with the S–N lines. These depocenters

display an approximately E–W orientation, with margins bounded by well-defined normal faults. A notable example occurs immediately south of well 1-MAS-4A-MA, on line 0048-0229, where normal faults offset both the breakup and the Turonian unconformities, all capped by the Maastrichtian unconformity. This pattern suggests a tectonostratigraphic evolution in successive stages of extensional accommodation and erosion, consistent with what has been described for segmented margins of the South Atlantic (Zalán et al., 2004; Mohriak et al., 2012).

On line 0048-0239, the fault segment described in the previous subsection occurs near the intersection with line 0048-0257, maintaining the same kinematic pattern. On line 0048-0258, a normal fault is observed east of well 1-MAS-6-MA, reinforcing structural compartmentalization along this alignment. This structural coherence suggests that the E–W-oriented depocenters act as accommodation zones controlled by inherited fault systems, laterally connecting to the NE–SW structures associated with the Tutóia High.

The seismic interpretation is corroborated by gravity data, as residual Bouguer anomalies reveal an E–W-oriented gravity low in the region (Figure 6 a), consistent with the alignment of the seismic depocenters. The correlation between the E–W orientation of the depocenters and the kinematics of bounding normal faults indicates a predominant extensional structural control in this direction during the rifting phase of the basin. This pattern is consistent with previous studies on the tectonic evolution of the Brazilian Equatorial Margin, which document the presence of listric fault systems and transfer faults responsible for subsidence and depocenter formation (Raja Gabaglia & Milani, 1991).

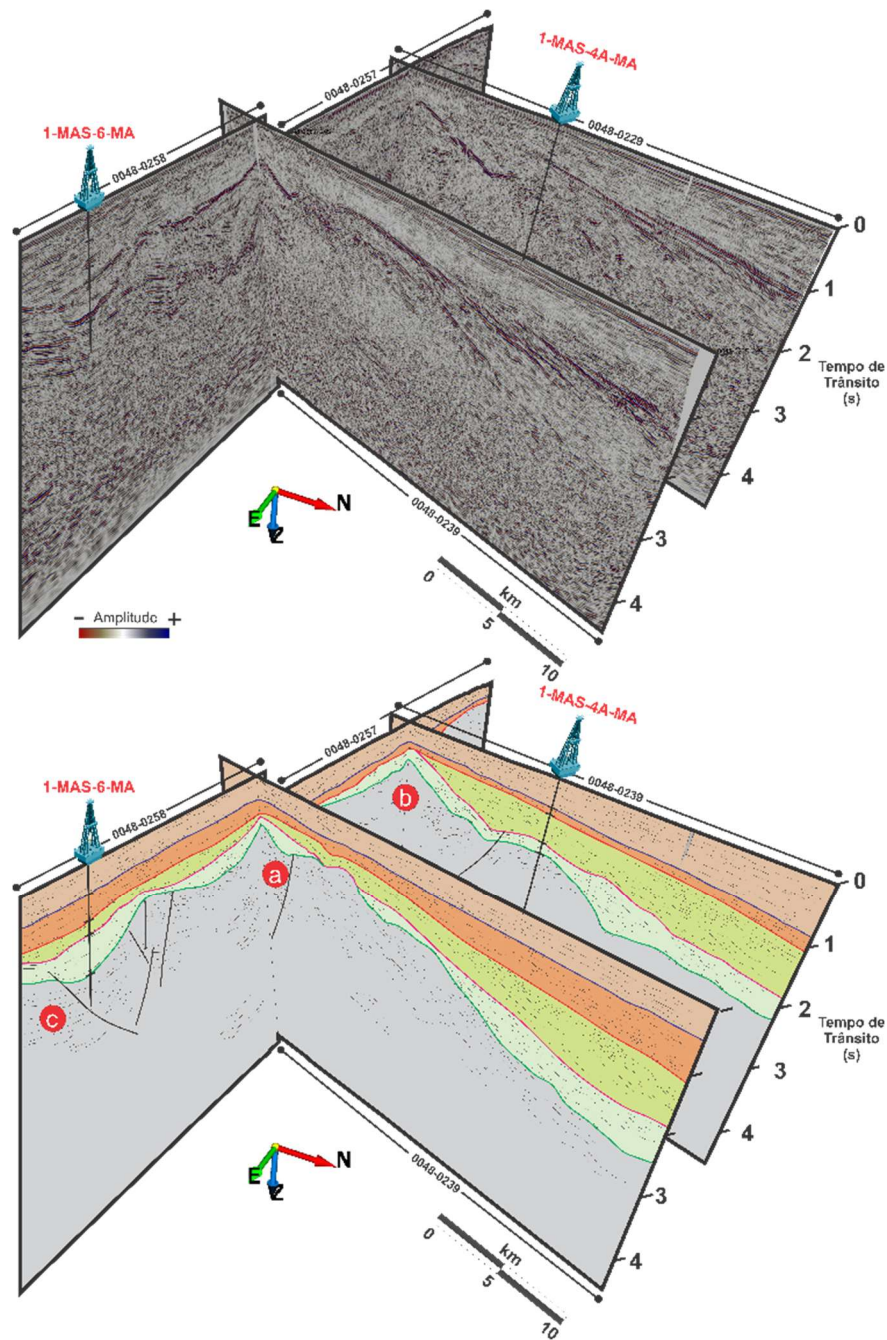


Figure 15 - W-E-N transect along distinct seismic lines (line numbers indicated at the top) and a well, in the Tutóia High region (see location in Figure 2). (Top) amplitude attribute; (Bottom) interpreted geological section. Further details in the text.

4. DISCUSSION

The integrated interpretation of 2D seismic lines, well data, and gravity information allowed the characterization of the tectonostratigraphic framework of the Barreirinhas

Basin, highlighting the structural and stratigraphic complexity of the central sector of the Brazilian Equatorial Margin. Mapping of the main unconformities (pre-rift SAG, breakup, Turonian, Maastrichtian, and Paleocene), combined with the analysis of depocenters and structural highs, revealed the key tectonostratigraphic controls that shaped the basin.

Regional transects and the use of fence diagrams proved essential for the three-dimensional visualization of the tectonostratigraphic architecture, validating the lateral continuity of interpreted features and determining dip directions of faults and fold axes.

The results indicate that depocenters show a preferential E–W orientation, bounded by well-defined normal faults. The association between seismic depocenters and negative residual Bouguer anomalies confirms that these structural lows reflect subsidence zones controlled by normal faults and inherited systems. This configuration suggests that the rift phase of the basin was governed not only by NE–SW faults but also by transverse compartmentalization, consistent with segmented rift models described for other South Atlantic margins (Zalán et al., 2004; Aslanian et al., 2010; Mohriak et al., 2003).

In the central portion of the basin, subhorizontal reflectors at deeper levels, overlain by shallow antiformal structures, suggest the possible development of décollement surfaces that accommodated differential deformation. Although interpretation is limited by data quality and orientation, this pattern is compatible with gravitational tectonics documented in other passive margins (Davison, 2007; Hudec & Jackson, 2007).

The Tutóia High represents one of the most prominent structural features of the Barreirinhas Basin. With a NE–SW orientation and antiformal geometry, it acts as a tectonic boundary with the Ceará Basin and exerts strong control on the internal

compartmentalization of the basin. Seismic analyses show that the high controlled the thickness and distribution of sedimentary sequences, leading to thinning eastward and differential thickening westward.

Its deformation involves both pre-rift (SAG) and breakup-related sequences, indicating prolonged structural activity throughout the evolution of the margin. The occurrence of normal faults at its crest, truncated by the Maastrichtian unconformity, is consistent with regional uplift events documented in the literature (Trosdorf et al., 2007; Zalán, 2004). Thus, the Tutóia High acted as a transfer zone and structural compartment, influencing depocenter distribution and the development of potential structural traps. This role is consistent with the segmentation observed in other Equatorial Margin basins (Azevedo, 1991; Matos, 2000).

Seismic stratigraphy shows that breakup and post-rift sequences are truncated at the top by the Maastrichtian and Paleocene unconformities, reflecting episodes of uplift, erosion, and depositional reorganization. These events led to partial inversion of some depocenters and differential erosion of sedimentary packages. The presence of long-wavelength folds further suggests the influence of flexural mechanisms and late-stage tectonic inversion (Trosdorf et al., 2007; Mohriak et al., 2003).

5. CONCLUSION

In summary, this study outlines the tectonostratigraphic framework of the Barreirinhas Basin, leading to the following conclusions:

1. The Barreirinhas Basin contains depocenters with a preferential E–W orientation, controlled by normal faults and differential subsidence, consistent with negative gravity anomalies.
2. Seismic evidence suggests the presence of décollement surfaces linked to gravitational tectonics, although interpretation is limited by data resolution and orientation.
3. The Tutóia High is a positive structural feature that plays a key role in basin compartmentalization, controlling both sequence thickness and depocenter distribution, while marking the tectonic boundary with the Ceará Basin.
4. Basin stratigraphy is characterized by regional unconformities (SAG, breakup, Turonian, Maastrichtian, and Paleocene), which record the transition between rifting, thermal subsidence, and tectonic inversion.
5. The integration of seismic, gravity, and well data, combined with the use of composite transects and fence diagrams, was essential for reconstructing the three-dimensional tectonostratigraphic framework and for understanding structural segmentation along the margin.

Together, these results reinforce that the evolution of the Barreirinhas Basin should be understood within the context of a segmented rift, controlled by the interplay of normal faulting, décollement surfaces, and structural highs—most notably the Tutóia High—that governed deposition, tectonic compartmentalization, and stratigraphic architecture along the Brazilian Equatorial Margin.

AKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank PETROBRAS for financial support through the Cooperation Agreement between PETROBRAS/FUNPEC/UFRN, which enabled the project "Tectonostratigraphic analysis of the Aptian-Maastrichtian section in the sector between the Pará-Maranhão and Grajaú Basins and the Gurupi Graben System, Northern-Northeastern Brazil," under the coordination of Prof. Dr. Emanuel Ferraz Jardim de Sá. The authors are also grateful to the Brazilian Agency of Oil and Gas (ANP) for supplying the seismic and well datasets. Furthermore, this study constitutes part of the first author's doctoral research within the Postgraduate Program in Geodynamics and Geophysics at the Federal University of Rio Grande do Norte.

REFERENCES

- Azevedo, R.P., 1991. Tectonic evolution of Brazilian Equatorial Continental Margins. PhD thesis, Imperial College London, 282 pp.
- de Castro, D.L., Oliveira, D.C., Herrera, D.R.H., et al., 2022. Crustal evolution of divergent and transform segments of the Brazilian Equatorial Margin derived from integrated geophysical data: Insights from basement grain heritage. *Earth-Science Reviews* **232**, 104132.
- de Castro, D.L., Oliveira, D.C., Bezerra, F.H.R., 2024. Evolution of the transtensional Barreirinhas pull-apart system in the Brazilian Equatorial Margin and its correlation with the African conjugate counterpart. *Tectonophysics* **889**, 230470.
- Davison, I., 2007. Geology and tectonics of the South Atlantic Brazilian salt basins. In: Ries, A.C., Butler, R.W.H., Graham, R.H. (Eds.), *Deformation of the Continental Crust: The Legacy of Mike Coward*. Geological Society, London, Special Publication **272**, 345–359. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2007.272.01.18>.

Krueger, A., 2014. A snapshot in time of an oblique rifted margin: the Brazilian Equatorial Margin. *AAPG Search and Discovery*, Article 30325.

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, pp. 87–165.

Montenegro, C.G.L., Almeida, N.M., Santos, C.S., et al., 2021. The Barreirinhas Basin internal architecture and the evidence of transform movements along the Romanche Fracture Zone (Brazilian Equatorial Margin). *Marine and Petroleum Geology* **128**, 104994.

Tavares, A.C., 2017. *Evolução da Zona de Fratura Romanche na Margem Equatorial do Brasil*. MSc thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 83 pp.

Trosdorf Júnior, I., Zalán, P.V., Figueiredo, J.J.P., Soares, E.F., 2007. Bacia de Barreirinhas. *Boletim de Geociências da Petrobras* **15**(2), 331–339.

Vail, P.R., Mitchum, R.M., Thompson, S., 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 4: Global cycles of relative changes of sea level. In: Payton, C.E. (Ed.), *Seismic Stratigraphy—Applications to Hydrocarbon Exploration*. AAPG Memoir **26**, 83–97.

Withjack, M.O., Jamison, W.R., 1986. Deformation produced by oblique rifting. *Tectonophysics* **126**, 99–124.

Zalán, P.V., 2004. Evolução fanerozóica das bacias sedimentares brasileiras. In: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C.D.R., Brito-Neves, B.B. (Eds.), *Geologia do Continente Sul-Americano—Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Beca, São Paulo, pp. 595–612.

Zalán, P.V., Nelson, E., Warme, J., Davis, T., 1985. The Piauí Basin: rifting and wrenching in an equatorial Atlantic transform basin. In: *Strike-Slip Deformation, Basin Formation, and Sedimentation*. SEPM Special Publication **37**, 177–192. <https://doi.org/10.2110/pec.85.37.0177>.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração entre sísmica 2D, dados lito e cronosestratigráficos de poços, e anomalias residuais de Bouguer permitiu refinar o entendimento da evolução tectono-estratigráfica da Bacia de Barreirinhas e de sua inserção no contexto transtensional da Margem Equatorial Brasileira. O uso de transectas regionais compostas e de diagramas em cerca mostrou-se crucial para validar a continuidade lateral das feições interpretadas, relações estratigráficas, estabelecer direções de mergulho de falhas e eixos de dobras, e reconstruir a arquitetura em três dimensões dos principais depocentros e altos estruturais (Alto de Tutóia).

Os resultados apontam para a existência de, pelo menos, três fases de rifteamento com expressão estratigráfica e estrutural distinta. O Rifte I (Neobarremiano ao Neoptiano) organizou um sistema de grabens WNW–ESE, controlado por reativações frágeis de descontinuidades pré-cambrianas, com depósitos sin-rifte espessos e fácies conglomeráticas proximais. O Rifte II (Neoaptiano ao Eoalbiano) registra migração da deformação para setores mais distais, inversão do sentido de mergulho das falhas normais e o desenvolvimento de horsts como o Alto de Tutóia, que segmenta os principais depocentros. Em escala de bacia, os depocentros exibem orientação preferencial E–W e correlacionam-se a anomalias gravimétricas negativas, evidenciando subsidência controlada por falhas e compartimentação transversal. O Rifte III (Eoalbiano ao Neoalbiano) associado ao desenvolvimento pleno do sistema *pull-apart* entre St. Paul e Romanche (DE CASTRO et al., 2024)

O Alto de Tutóia emerge como compartimento estrutural de primeira ordem. Sua geometria antiformal de dezenas de quilômetros e posição limítrofe com a Bacia do Ceará condicionam o espessamento diferencial das sequências, o redirecionamento de fluxos sedimentares e a conectividade lateral entre depocentros E–W e estruturas NE–SW de transferência. Localmente, refletores sub-horizontais basais sobrepostos por antiformes rasos sugerem a existência de horizontes/ zonas de décollement.

Em síntese, a tese demonstra que a evolução da Bacia de Barreirinhas é melhor compreendida como um rifte segmentado em margem transformante, governado pela

interação entre estruturas e direções preferenciais herdadas do embasamento, falhas normais, altos herdados — com destaque para o Alto de Tutóia. Essa leitura integrada aprimora o modelo cinemático da MEB, reduz incertezas exploratórias ao vincular segmentação estrutural à distribuição de unidades reservatório–selo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARENGA, R. S. Análise sismoestratigráfica de bacias rifte: definição de sismofácies e arcabouço tectono-estratigráfico. 2016. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 161 p.

ANTOBREH, A. A.; FALEIDE, J. I.; TSIKALAS, F.; PLANKE, S. Rift-shear architecture and tectonic development of the Ghana margin deduced from multichannel seismic reflection and potential field data. *Marine and Petroleum Geology*, v. 26, p. 345–368, 2009. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2008.04.005.

ASLANIAN, D. et al. Deep structure of the Pará-Maranhão/Barreirinhas passive margin in the equatorial Atlantic (NE Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, v. 110, 2021. DOI: 10.1016/j.jsames.2021.103322.

AZEVEDO, R. P. Bacia de Barreirinhas: um rift não convencional. In: ‘Rifts’ Intracontinentais. Internal Workshop. Rio de Janeiro: Petrobras, 1987. p. 140–159.

AZEVEDO, R. P. Tectonic Evolution of Brazilian Equatorial Continental Margin Basins. 1991. Thesis (Ph.D.) — University of London, London.

BACON, M.; SIMM, R.; REDSHAW, T. 3-D Seismic Interpretation. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

BASILE, C.; MASCLE, J.; POPOFF, M.; BOUILLIN, J. P.; MASCLE, G. The Ivory Coast–Ghana transform margin: a marginal ridge structure deduced from seismic data. *Tectonophysics*, v. 222, p. 1–19, 1993. DOI: 10.1016/0040-1951(93)90186-N.

BERKHOUT, A. J. Seismic Migration: Imaging of Acoustic Energy by Wave Field Extrapolation. Amsterdam: Elsevier, 1984.

BEZERRA, F. H.; DE CASTRO, D. L.; MAIA, R. P.; SOUSA, M. O. L.; MOURA-LIMA, E. N.; ROSSETTI, D. F.; BERTOTTI, G.; SOUZA, Z. S.; NOGUEIRA, F. C. C. Postrift stress field inversion in the Potiguar Basin, Brazil – Implications for petroleum

systems and evolution of the equatorial margin of South America. *Marine and Petroleum Geology*, v. 111, p. 88–104, 2020.

BIONDI, B. 3D Seismic Imaging. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2006.

BROWN, A. R. Interpretation of Three-Dimensional Seismic Data. 7. ed. Tulsa: AAPG/SEG (Memoir 42/Investigations in Geophysics 9), 2011.

CATUNEANU, O.; GALLOWAY, W. E.; KENDALL, C. G. St C.; MIAL, A. D.; POSAMENTIER, H. W.; STRASSER, A.; TUCKER, M. E. Sequence stratigraphy: methodology and nomenclature. *Newsletters on Stratigraphy*, v. 44, n. 3, p. 173–245, 2011.

CHOPRA, S.; MARFURT, K. J. Seismic attributes—A historical perspective. *The Leading Edge*, v. 24, n. 5, p. 498–514, 2005.

CHOPRA, S.; MARFURT, K. J. Seismic Attributes for Prospect Identification and Reservoir Characterization. Tulsa: SEG, 2007.

CLIFT, P. D.; LORENZO, J.; CARTER, A.; HUTTON, A. J. Transform tectonics and thermal rejuvenation on the Côte d'Ivoire–Ghana margin, West Africa. *Journal of the Geological Society*, v. 154, p. 483–489, 1997. DOI: 10.1144/gsjgs.154.3.0483.

CONDÉ, V. C. et al. Bacia do Ceará. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 15, n. 2, p. 347–355, 2007.

COX, David R.; NEWTON, Andrew M. W.; HUUSE, Mads. An introduction to seismic reflection data: acquisition, processing and interpretation. In: SCARSELLI, Nicola; ADAM, Jürgen; CHIARELLA, Domenico; ROBERTS, David G.; BALLY, Albert W. (org.). *Regional geology and tectonics*. 2. ed. Amsterdam: Elsevier, 2020. p. 571–603. DOI: 10.1016/B978-0-444-64134-2.00020-1.

DE CASTRO, D. L.; OLIVEIRA, D. C.; BEZERRA, F. H. R. Evolution of the transtensional Barreirinhas pull-apart system in the Brazilian Equatorial margin and its correlation with the African conjugate counterpart. *Tectonophysics*, v. 889, 230470, 2024.

EDWARDS, R. A.; WHITMARSH, R. B.; SCRUTTON, R. A. The crustal structure across the transform continental margin off Ghana, eastern equatorial Atlantic. *Journal of Geophysical Research*, v. 102, n. B1, p. 747–772, 1997. DOI: 10.1029/96JB02098.

EMERY, D.; MYERS, K. (eds.). *Sequence Stratigraphy*. London: Blackwell Science, 1996. 297 p.

ENE, P.; KUCHLE, J.; ALVARENGA, R.; IACOPINI, D.; GOLDBERG, K. Evolução complexa de um meio-gráben: seção rifte da Bacia de Campos baseada em análise sismoestratigráfica. *Pesquisas em Geociências*, v. 42, n. 1, p. 45–60, 2015. DOI: 10.22456/1807-9806.78108.

FEIJÓ, F. J. Bacia de Barreirinhas. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 8, n. 1, p. 103–109, 1994.

GALLOWAY, W. E. Genetic stratigraphic sequences in basin analysis II: application to northwest Gulf of Mexico Cenozoic basin. *AAPG Bulletin*, v. 73, n. 2, p. 143–154, 1989.

GORINI, M. A. The tectonic fabric of the equatorial Atlantic and adjoining continental margins: Gulf of Guinea to northeastern Brazil. In: ASMUS, H. E. (ed.). *Estruturas e tectonismo da margem continental brasileira e suas implicações nos processos sedimentares e na avaliação do potencial de recursos minerais*. Rio de Janeiro: Petrobras/Projeto REMAC, 1981. p. 11–116.

HERRON, D. A. *First Steps in Seismic Interpretation*. Tulsa: AAPG (Methods in Exploration 16), 2011.

HOLZ, M. *Estratigrafia de sequências: histórico, princípios e aplicações*. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2012.

HOLZ, M.; VILAS-BOAS, D. B.; TROCCOLI, E. B.; SANTANA, V. C.; VIDIGAL-SOUZA, P. A. Conceptual models for sequence stratigraphy of continental rift successions. In: *STRATIGRAPHY & TIMESCALES*. v. 2. London: Academic Press, 2017. p. 119–186. DOI: 10.1016/bs.sats.2017.07.002.

KUCHLE, J.; HOLZ, M.; SCHERER, C. M. S.; FERNANDES, F.; BEDREGAL, R. P. Mapeamento estratigráfico de bacias rifte a partir de padrões de empilhamento e seus significados genéticos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 4., 2007, Campinas. Anais [...]. Campinas: ABPG, 2007. p. 1–8.

KUCHLE, J.; SCHERER, C. M. S. Sismoestratigrafia de bacias rifte: técnicas, métodos e sua aplicação na Bacia do Recôncavo. Boletim de Geociências da Petrobras, v. 18, n. 2, p. 33–60, 2010.

LAVERGNE, M. Seismic signal processing. Paris: IFP Publications, 1989.

LÉPINAY, M. M.; LONCKE, L.; BASILE, C.; ROEST, W. R.; PATRIAT, M.; MAILLARD, A.; CLARENS, P. Transform continental margins – Part 2: a worldwide review. Tectonophysics, v. 693, p. 96–115, 2016. DOI: 10.1016/j.tecto.2016.05.038.

MAGOON, L. B.; DOW, W. G. (ed.). The Petroleum System—From Source to Trap. Tulsa: AAPG (Memoir 60), 1994.

MASCLE, J. Atlantic-type continental margins: distinction of two basic structural types. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 48, p. 149–155, 1976.

MASCLE, J.; BLAREZ, E. Evidence for transform margin evolution from the Ivory Coast–Ghana continental margin. Nature, v. 326, p. 378–381, 1987. DOI: 10.1038/326378a0.

MASCLE, J.; BLAREZ, E.; MARINHO, M. The shallow structure of the Guinea and Côte d’Ivoire–Ghana transform margins: their bearing on the equatorial Atlantic Mesozoic evolution. Tectonophysics, v. 155, p. 193–209, 1988. DOI: 10.1016/0040-1951(88)90266-1.

MATOS, R. M. D. The northeast Brazilian rift system. Tectonics, v. 11, n. 4, p. 766–791, 1992. DOI: 10.1029/91TC03092.

MATOS, R. M. D. History of the northeast Brazilian rift system: kinematic implications for the break up between Brazil and West Africa. In: CAMERON, N. R.; BATE, R. H.; CLURE, V. S. (eds.). The oil and gas habitats of the South Atlantic. London: Geological Society (Special Publication 153), 1999. p. 55–73.

MATOS, R. M. D. Tectonic evolution of the equatorial South Atlantic. In: MOHRIAK, W.; TALWANI, M. (eds.). Atlantic rifts and continental margins. Washington, DC: American Geophysical Union (Geophysical Monograph Series, 115), 2000. p. 331–354. DOI: 10.1029/GM115p0331.

MATOS, R. M. D.; KRUEGER, A.; NORTON, I.; CASEY, K. The fundamental role of the Borborema and Benin–Nigeria provinces of NE Brazil and NW Africa during the development of the South Atlantic Cretaceous Rift system. *Marine and Petroleum Geology*, v. 127, 104872, 2021. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2020.104872.

MILANI, E. J.; RANGEL, H. D.; BUENO, G. V.; STICA, J. M.; WINTER, W. R.; CAIXETA, J. M.; PESSOA NETO, O. C. Bacias sedimentares brasileiras – Cartas estratigráficas. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 15, p. 183–205, 2007.

MITCHUM, R. M.; VAIL, P. R.; SANGREE, J. B. Seismic stratigraphy and global changes of sea level. Part 6: Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. *AAPG Memoir*, v. 26, p. 117–133, 1977.

MOHRIAK, W. U.; ROSENDAHL, B. R. Transform zones in the South Atlantic rifted continental margins. *Geological Society, London, Special Publications*, v. 210, p. 211–228, 2003. DOI: 10.1144/GSL.SP.2003.210.01.13.

MOULIN, M.; ASLANIAN, D.; UNTERNEHR, P. A new starting point for the South and Equatorial Atlantic Ocean. *Earth-Science Reviews*, v. 98, p. 1–37, 2010.

MOULIN, M. et al. Imaging early Oceanic Crust spreading in the Equatorial Atlantic Ocean: insights from the MAGIC wide-angle experiment. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 111, 103493, 2021.

PAMPLONA, H. R. P. Litoestratigrafia da Bacia Cretácea de Barreirinhas. *Boletim Técnico da Petrobras*, v. 12, n. 3, p. 261–290, 1969.

PARTYKA, G.; GRIDLEY, J.; LOPEZ, J. Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization. *The Leading Edge*, v. 18, n. 3, p. 353–360, 1999.

PAYTON, C. E. (ed.). Seismic Stratigraphy—Applications to Hydrocarbon Exploration. Tulsa: AAPG (Memoir 26), 1977.

PELLEGRINI, B. S.; RIBEIRO, H. J. P. S. Exploratory plays of Pará-Maranhão and Barreirinhas basins in deep and ultra-deep waters, Brazilian Equatorial Margin. *Brazilian Journal of Geology*, v. 48, n. 3, p. 485–502, 2018. DOI: 10.1590/2317-4889201820180146.

PROSSER, S. Rift-related linked depositional systems and their seismic expression. *Geological Society, London, Special Publications*, v. 71, n. 1, p. 35–66, 1993. DOI: 10.1144/GSL.SP.1993.071.01.03.

RAMIREZ, A. A.; KUCHLE, J.; ALVARENGA, R. S.; SCHERER, C.; GOLDBERG, K. Análise sismoestratigráfica da seção rifte da Bacia de Santos, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, v. 42, n. 3, p. 263–280, 2015. DOI: 10.22456/1807-9806.78195.

REGALI, M. S. P.; UESUGUI, N.; LIMA, E. C. Palinoestratigrafia e paleoambiente da Bacia de Barreirinhas – Maranhão, Brasil. In: DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). *Coletânea de Trabalhos Paleontológicos. Série Geologia*, v. 27, Seção Paleontologia e Estratigrafia, n. 2. Rio de Janeiro: DNPM, 1985. p. 461–470.

RIGOTI, C. A. Tectonic Evolution of Santos Basin with emphasis on crustal geometry: Integrated interpretation of seismic reflection and refraction, gravity and magnetic data. 2015. 134 f. Dissertação (Mestrado em Análise de Bacias e Faixas Móveis) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

SHERIFF, R. E. *Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics*. 4. ed. Tulsa: SEG, 2002.

SHERIFF, R. E.; GELDART, L. P. *Exploration Seismology*. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.

SOARES JÚNIOR, A. V.; HASUI, Y.; COSTA, J. B. S.; MACHADO, F. B. Evolução do rifteamento e paleogeografia da margem Atlântica Equatorial do Brasil: Triássico ao Holoceno. *Geociências*, v. 30, p. 669–692, 2011.

SZATMARI, P.; FRANÇOLIN, J. B. L.; ZANOTTO, O.; WOLFF, S. Evolução tectônica da Margem Equatorial Brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 17, n. 2, p. 180–188, 1987.

SZATMARI, P.; MILANI, E. J. Microplate rotation in northeast Brazil during South Atlantic rifting: analogies with the Sinai microplate. *Geology*, v. 27, n. 12, p. 1115–1118, 1999. DOI: 10.1130/0091-7613(1999)027<1115:MRINBD>2.3.CO;2.

TANER, M. T. Attributes revisited. *First Break*, v. 19, n. 10, p. 13–19, 2001.

TANER, M. T.; KOEHLER, F.; SHERIFF, R. E. Complex seismic trace analysis. *Geophysics*, v. 44, n. 6, p. 1041–1063, 1979.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. *Applied Geophysics*. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

TROSDTORF JÚNIOR, I.; ZALÁN, P. V.; FIGUEIREDO, J. J. P.; SOARES, E. F. Bacia de Barreirinhas. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 15, n. 2, p. 331–339, 2007.

VAN WAGONER, J. C.; MITCHUM, R. M.; CAMPION, K. M.; RAHMANIAN, V. D. Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops: concepts for high-resolution correlation of time and facies. *AAPG Methods in Exploration Series*, n. 7, p. 4–55, 1990.

WU, J. E. et al. 4D analogue modeling of transtensional pull-apart basins. *Marine and Petroleum Geology*, v. 26, p. 1608–1623, 2009.

YILMAZ, O. *Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data*. Tulsa: SEG, 2001.

ZALÁN, P. V. Bacias de Bragança-Viseu, São Luís e Ilha Nova. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 15, p. 341–345, 2007.

ZALÁN, P. V. Evolução fanerozóica das bacias sedimentares brasileiras. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO NEVES, B. B. B. (eds.). *Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Beca, 2004. p. 595–612.

ZALÁN, P. V. Fault-related folding in the deep waters of the equatorial margin of Brazil. In: MCCLAY, K.; SHAW, J. H.; SUPPE, J. (eds.). Thrust fault-related folding. AAPG Memoir, v. 94, p. 335–355, 2011.

Picanço

Introdução da tese – hipóteses a serem testadas