

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

ANÁLISE SISMO-ESTRATIGRÁFICA NA SEÇÃO RIFTE DA BACIA DE SANTOS

ANDREA FABIOLA ARIAS RAMIREZ

ORIENTADOR – Prof. Dra. Karin Goldberg

CO-ORIENTADOR – Prof. Dr. Juliano Kuchle

Volume I

Porto Alegre – 2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

ANÁLISE SISMO-ESTRATIGRÁFICA NA SEÇÃO RIFTE DA BACIA DE SANTOS

ANDREA FABIOLA ARIAS RAMIREZ

ORIENTADOR – Prof. Dra. Karin Goldberg

CO-ORIENTADOR – Prof. Dr. Juliano Kuchle

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ricardo Baitelli – UFRGS

Prof. Dr. Elírio E. Toldo Jr. – UFRGS

Prof. Dr. Francisco Tognoli – UNISINOS

Tese de Mestrado apresentada como
requisito parcial para a obtenção do Título de
Mestre em Ciências.

Porto Alegre – 2014

CIP - Catalogação na Publicação

Arias Ramirez, Andrea Fabiola
ANÁLISE SISMO-ESTRATIGRÁFICA NA SEÇÃO RIFTE DA
BACIA DE SANTOS / Andrea Fabiola Arias Ramirez. --
2014.
60 f.

Orientadora: Karin Goldberg.
Coorientador: Juliano Kuchle.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências,
Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto
Alegre, BR-RS, 2014.

1. Bacia de Santos. 2. Seção Rifte. 3.
Sismoestratigrafia. 4. Sismofacies. I. Goldberg,
Karin, orient. II. Kuchle, Juliano, coorient. III.
Título.

RESUMO

Este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar a evolução estrutural e estratigráfica, e os controles deposicionais da seção rifte da Bacia de Santos através de um estudo sismoestratigráfico. Considerando o meio-gráben como a unidade fundamental na análise de bacias tipo rifte e utilizando dados sísmicos 2D, foi realizada a interpretação dos refletores sísmicos. Como resultado, foi obtida a definição de dezesseis unidades sismoestratigráficas e quatro sismofácies (incluindo o sag), e com isto o desenvolvimento das cartas cronoestratigráficas de eventos adaptadas para o contexto sísmico. Com base na adaptação do modelo de padrões de empilhamento para mudanças na atividade tectônica, foram delimitados os tratos de sistemas tectônicos de início de rifte, de alta atividade tectônica, de baixa atividade tectônica e o pós-rifte, representado pelo sag. O desenvolvimento de cada um dos tratos respondeu a variações dos fatores controladores das bacias lacustres, interpretado como o balanço relativo entre as taxas de mudanças do espaço de acomodação gerado pela tectônica e o aporte sedimentar influenciado pelo clima.

ABSTRACT

This work was done with the objective of evaluating the structural and stratigraphic evolution, and depositional controls of the rift section in the Santos Basin through a seismic stratigraphic study. Considering the half graben as the fundamental unit in rift basins, a 2D seismic analysis was carried out, with seismic reflectors interpretation. The result was the definition of sixteen seismic stratigraphic units, four seismic facies (including the *sag*), and with it the development of chronostratigraphic charts of events adapted to the seismic context. Based on the adaptation of the stacking patterns model to tectonic activity changes model, it was possible to delimitate the rift initiation system tracts, the high tectonic activity system tract, the low tectonic activity system tract and the post-rift, represented by the *sag*. The development of each tectonic system tract responds to variations in controlling factors of lacustrine basin, interpreted as the relative balance between the rate changes in the accommodation space generated by tectonic and sediment supply influenced by climate.

SUMÁRIO

RESUMO	1
ABSTRACT.....	2
1. TEXTO EXPLICATIVO DA ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	6
2. INTRODUÇÃO	6
3. ESTADO DA ARTE	7
3.1 BACIAS RIFTE.....	7
3.1.1 Rift-related linked depositional systems and their seismic expression Prosser (1993)	7
3.1.2 Modelo de bacia rifte de Kuchle & Scherer (2010)	10
3.1.3 Modelo de lagos tectônicos de Bohacs <i>et al.</i> (2000)	12
3.2 GEOLOGIA REGIONAL BACIA DE SANTOS	14
4. METODOLOGIA.....	19
5. CORPO PRINCIPAL DA DISSERTAÇÃO – “Análise sismo-estratigráfica na seção rifte da Bacia de Santos”	24
6. ANÁLISE INTEGRADORA	55
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Seção sísmica idealizada proposta por Prosser (1993), apresentando os respectivos tratos de sistemas tectônicos e suas características diagnósticas.....	8
Figura 2. Perfil esquemático apresentando a estruturação básica do início do rifte, com um sistema de calhas escarpadas de pequena expressividade.....	9
Figura 3. Perfil esquemático do clímax do rifte, mostrando o alto relevo da escarpa da falha de borda do meio-gráben, o avanço dos leques de <i>footwall</i> e a retrogradação no <i>hangingwall</i>	9
Figura 4. Perfil esquemático do imediato pós-rifte, Caracterizado por fácies agradacionais em lugar de subsidência diferencial, e progradação dentro da bacia.	10
Figura 5. Modelo estratigráfico idealizado de uma bacia rifte (Kuchle & Scherer, 2010).	11
Figura 6. O lago superpreenchido apresenta o máximo aporte fluvial.....	13
Figura 7. Lago com preenchimento balanceado, onde o aporte fluvial é variável. ...	13
Figura 8. Lago subpreenchido, onde o aporte fluvial é mínimo.	14
Figura 9. Mapa de localização Bacia de Santos. Extraído de Google Earth.	15
Figura 10. Seção geológica esquemática da Bacia de Santos. Extraído de Pereira <i>et al.</i> (1990).....	16
Figura 11. Carta estratigráfica da Bacia de Santos. Modificada de Pereira <i>et al.</i> (1990).	18
Figura 12. Terminações das reflexões sísmicas dentro sequência sísmica idealizada (Mitchum <i>et al.</i> 1977).....	20
Figura 13. Padrões simples das configurações dos refletores: paralela, subparalela, ondulada, divergentes, caóticas e configuração transparente. Extraído de Mitchum <i>et al.</i> (1977b).	22
Figura 14. Padrões modificados das configurações dos refletores: <i>hummocky</i> , lenticular, segmentado e contorcido. Extraído de Mitchum <i>et al.</i> (1977b).	22
Figura 15. Carta cronoestratigráfica de eventos, determinado por Wheeler (1958) e adaptado para o contexto sísmico por Vail <i>et al.</i> (1977d). Modificado de Mitchum <i>et al.</i> (1977).	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros das reflexões sísmicas usados em sismoestratigrafia e sua significância geológica. Extraído de Mitchum <i>et al.</i> (1977b).....	20
---	----

1. TEXTO EXPLICATIVO DA ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação de mestrado está estruturada em torno de um artigo submetido à publicação em periódico. Consequentemente, sua organização compreende as seguintes partes principais:

- a) Introdução sobre o tema e descrição do objeto de pesquisa de mestrado, onde estão sumarizados os objetivos e a filosofia de pesquisa desenvolvidos, o estado da arte sobre o tema de pesquisa, seguidos de uma discussão integradora contendo os principais resultados e interpretações deles derivadas.
- b) Artigo submetido a periódico com corpo editorial permanente e revisores independentes, escrito pelo autor durante o desenvolvimento de seu mestrado.
- c) Anexos, compreendendo: artigo no qual o pós-graduando é autor, e documentação gráfica (figuras, diagramas, mapas, seções) e fotográfica que, por sua dimensão e/ou natureza não pode ser incluída no artigo.

2. INTRODUÇÃO

A história de evolução tectono-estratigráfica das bacias tipo rifte se apresenta com múltiplas interpretações pelos diferentes autores, todas elas focadas na geometria da bacia, taxa de aporte sedimentar e potencial de acomodação nos diferentes estágios do rifteamento. Apesar de todo o volume de informação teórica existente, são poucos os trabalhos desenvolvidos na seção rifte da Bacia de Santos, baseados em informação sísmica.

A Bacia de Santos é uma vasta porção da margem leste, com orientação geral SW-NE e geometria côncava, abrangendo cerca de 200.000 km² do sudeste brasileiro, (Milani *et al.* 2000). As primeiras análises sismoestratigráficas foram feitas por Brown *et al.*(1975) apud Gonçalves *et al.*(1979) para interpretação de sistemas deposicionais, com ênfase à exploração de petróleo na bacia.

Com a premissa de que o meio-gráben é a unidade básica do rifte e aplicando os conceitos da estratigrafia de sequências, foi traçado como objetivo principal deste

estudo o desenvolvimento do arcabouço sismoestratigráfico da seção rifte na Bacia de Santos.

Como objetivos específicos deste trabalho podem-se citar:

- Interpretação estrutural e sismoestratigráfica da seção rifte da Bacia de Santos;
- Caracterização e análise das sismofácies reconhecidas na Bacia de Santos, e interpretação de sistemas deposicionais;
- Determinação dos tratos de sistemas tectônicos, baseados nas mudanças da atividade tectônica;
- Análise dos tratos tectônicos, baseado na relação entre atividade tectônica e aporte sedimentar em função do clima (Bohacs *et al.* 2000).

3. ESTADO DA ARTE

Neste tópico será realizada uma revisão teórica sobre os conceitos pertinentes às bacias rifte, como modelo de sedimentação em bacias lacustres, modelo de evolução tectono-estratigráfico e sua expressão sísmica, além de uma revisão da geologia regional, correspondente ao desenvolvimento tectônico e arcabouço estratigráfico da Bacia de Santos.

3.1 BACIAS RIFTE

3.1.1 Rift-related linked depositional systems and their seismic expression Prosser (1993)

O modelo de evolução tectono-estratigráfico está baseado em dados do Mar do Norte, salientando a necessidade de adaptar a estratigrafia de sequências para a análise de bacias rifte. O modelo proposto por Prosser (1993) prevê que os padrões de empilhamento devem ser a base de análise e fatiamento das sequências deposicionais componentes de um meio-gráben, e que este fatiamento deve ser realizado a partir dos tratos de sistemas tectônicos. Um trato de sistema tectônico passa então a ser um conjunto de estratos geneticamente relacionados a uma fase de preenchimento específica na evolução de um rifte. Um fato interessante é a relação imediata do processo de rifteamento com o meio-gráben. Basicamente, Prosser (1993) reconhece dois tratos de sistemas tectônicos na fase sin-rifte (figura 1):

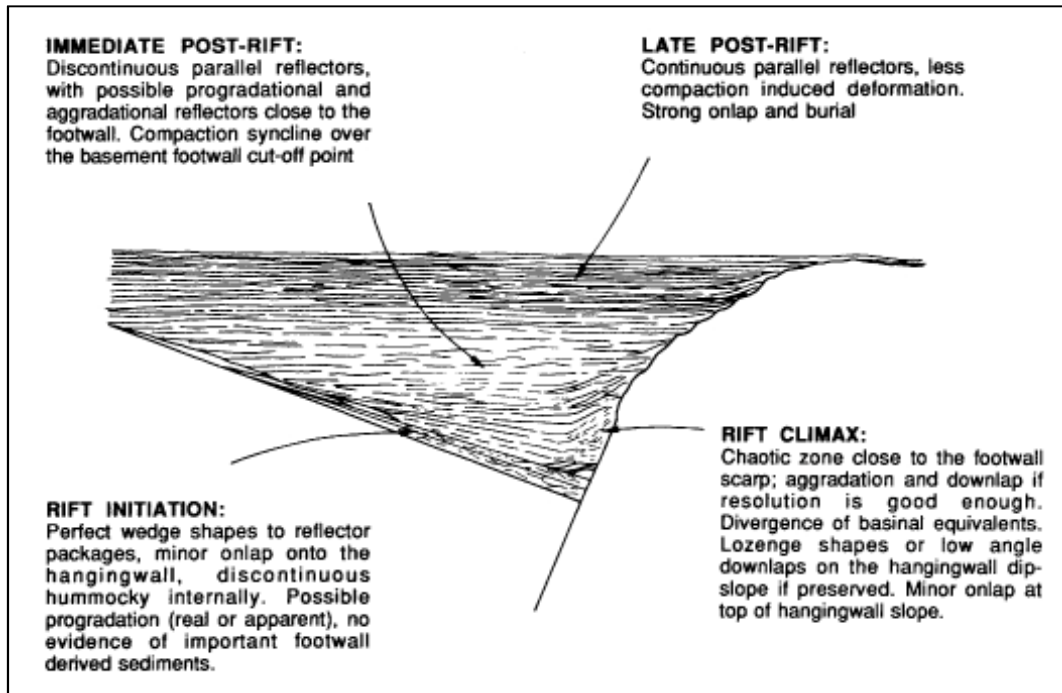


Figura 1. Seção sísmica idealizada proposta por Prosser (1993), apresentando os respectivos tratos de sistemas tectônicos e suas características diagnósticas.

- a) Trato de Sistema Tectônico de Início do Rifte (figura 2): marca as primeiras rotações de bloco, com geração de altos no *footwall* e na crista do *hangingwall*. Estas calhas são preenchidas por sistemas fluviais axiais, ocorrendo sedimentação gravitacional pouco expressiva associada à falha de borda. Os sistemas fluviais axiais acompanham o espaço criado, pois o pulso tectônico não é tão intenso ainda. Assim o início do rifte seria marcado por pacotes arenosos basais e contíguos, com progradações e *bypass*, devido a uma equivalência entre espaço de acomodação e aporte.

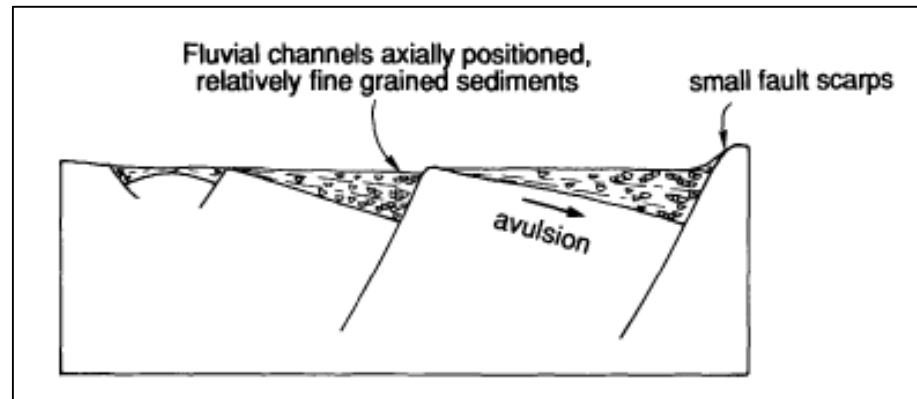


Figura 2. Perfil esquemático apresentando a estruturação básica do início do rifte, com um sistema de calhas escarpadas de pequena expressividade.

b) Trato de Sistema Tectônico de Clímax do Rifte (figura 3): a criação de espaço atinge as maiores taxas, e o aporte não consegue acompanhar estes patamares. Ocorrem marcantes retrogradações, com uma expansão na área deposicional e na geometria do lago. Na área próxima da falha de borda, ocorrem agradações relacionadas ao empilhamento de depósitos de *fan delta*. Este trato é subdividido em inicial, médio e final. O estágio final é marcado pela máxima extensão da bacia, onde nos depósitos centrais ocorre apenas a deposição de lama recobrendo toda a área. As grandes retrogradações são relacionadas ao baixo aporte sedimentar em relação ao grande espaço criado.

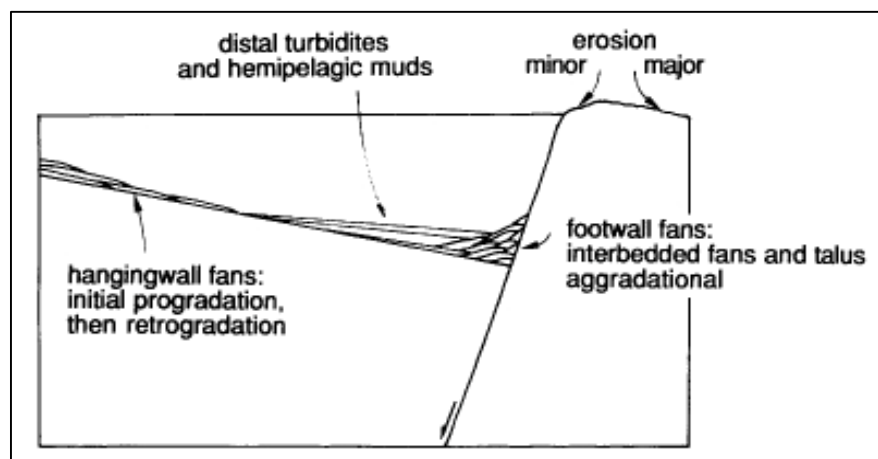


Figura 3. Perfil esquemático do clímax do rifte, mostrando o alto relevo da escarpa da falha de borda do meio-gráben, o avanço dos leques de *footwall* e a retrogradação no *hangingwall*.

- c) Trato de Sistema Tectônico de Pós-Rifte (figura 4): com uma drástica diminuição na atividade tectônica, os movimentos das falhas diminuem e o espaço até então criado na fase rifte passa a ser preenchido. Nesta fase o sistema de drenagem consegue se adaptar e fornecer sedimentos para preencher a calha deposicional, erodindo as escarpas e regiões altas adjacentes. Os expressivos espaços criados durante a fase rifte são preenchidos em um padrão progradante, até um preenchimento completo e extravasamento dos meio-grábens.

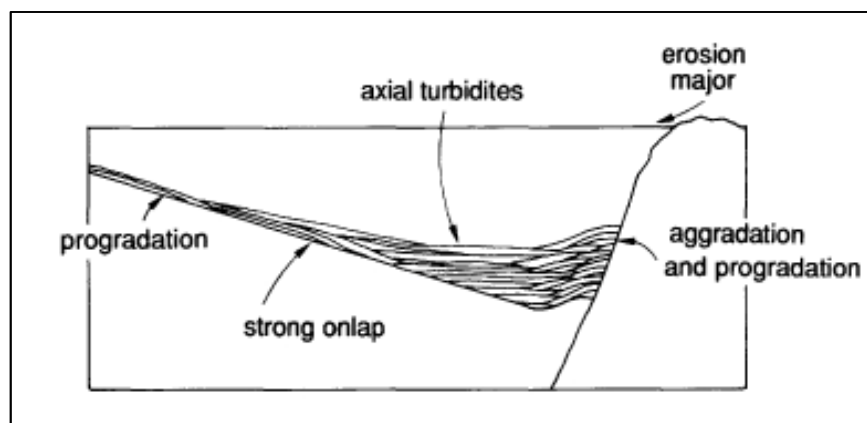


Figura 4. Perfil esquemático do imediato pós-rifte, Caracterizado por fácies agradacionais em lugar de subsidência diferencial, e progradação dentro da bacia.

O trabalho de Prosser (1993) é considerado um marco na compreensão tectono-estratigráfica de rifte. Seus padrões e modelos evolutivos explicam surpreendentemente bem a evolução de diversas bacias rifte do mundo.

3.1.2 Modelo de bacia rifte de Kuchle & Scherer (2010)

Este modelo estratigráfico de evolução e compartimentação de seções rifte se baseiam nos seguintes fundamentos: a) riftes possuem na tectônica seu maior controlador; b) os eventos tectônicos da bacia rifte – pulsos tectônicos – geram simultaneamente, subsidência (no *hangingwall*) e soerguimento (no *footwall*), devido à rotação do bloco no meio-gráben; c) o pulso tectônico e a criação de espaço são instantâneos; d) a atividade tectônica progressiva gera uma expansão do meio-gráben, através de migração do *tilt point* para fora da bacia; e por fim, e) a seção rifte é o resultado de um processo, limitando-se em sua base e em seu topo por discordâncias que a separam do pré-rifte e do pós-rifte.

A partir das premissas anteriores, foi elaborado um modelo estratigráfico preditivo que se baseia no arranjo dos sistemas deposicionais (padrões de empilhamento) para determinar as fases evolutivas de uma bacia rifte, suas superfícies limítrofes e as relações entre suas variáveis controladoras (figura 5).

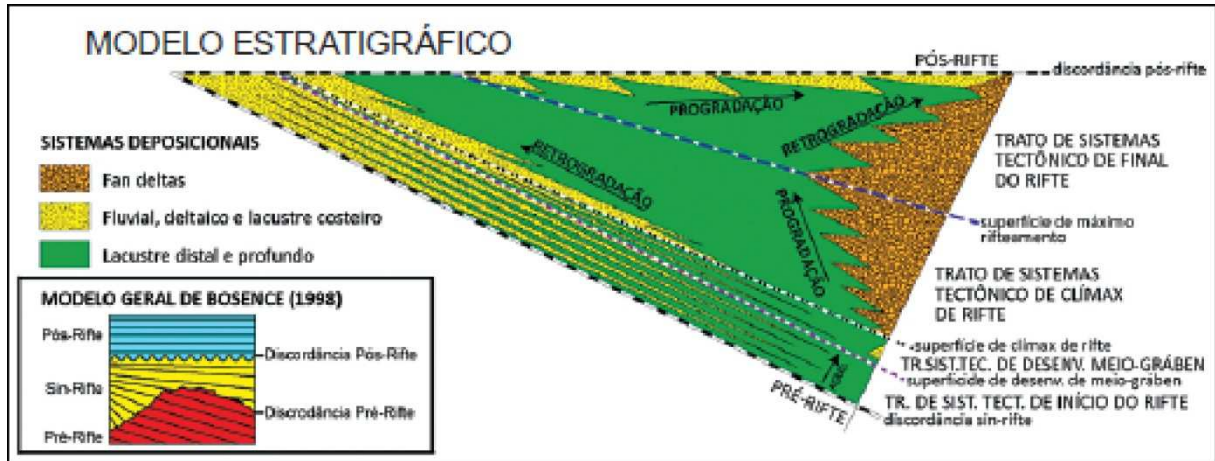


Figura 5. Modelo estratigráfico idealizado de uma bacia rifte (Kuchle & Scherer, 2010).

A compartimentação interna da seção rifte se fundamenta em tratos de sistemas tectônicos utilizados inicialmente por Prosser (1993), e baseados no conceito original de tratos de sistemas de Brown e Fischer (1977) – conjunto de sistemas deposicionais temporalmente relacionados, vinculando-se a uma relação específica de variáveis em um período também específica da fase rifte.

O Trato de Sistema Tectônico de Início do Rifte representa os primeiros depósitos associados aos pulsos iniciais de estiramento crustal. Como o início de uma fase rifte apresenta uma tectônica incipiente, estes primeiros depósitos ocorrem na forma de uma ampla bacia rasa, continental, com lagos rasos, resultando em um padrão de empilhamento de ciclo agradacional.

O Trato de Sistema Tectônico de Desenvolvimento do Meio Gráben é representado por um rearranjo do sistema de drenagem, já na forma embrionária de meio-gráben. Como a calha ainda apresenta um baixo relevo entre o *footwall* e o *hangingwall*, apenas entradas discretas de sedimento se desenvolvem, não ocorrendo conglomerados e outros sedimentos grossos.

O Trato de Sistema Tectônico de Clímax do Rifte reflete o momento de aumento e de máxima atividade tectônica na bacia. É marcado pelo pleno desenvolvimento da falha de borda, pela configuração em meio-gráben e por intensa atividade tectônica, resultando em alta taxa de criação do espaço e baixo aporte sedimentar. Como consequência, padrões retrogradacionais intensos são observados na margem flexural, em quanto os clásticos grossos associados à falha de borda progradam para dentro da bacia, como resposta automática à atividade tectônica.

Por fim, o Trato de Sistema Tectônico de Final de Rifte é marcado por uma diminuição da atividade tectônica, diminuição da extensão territorial do meio-gráben e conseqüentemente, uma diminuição na taxa de criação de espaço de acomodação. Paralelamente, toda a área lateral às calhas, bem como os *footwalls* soerguidos durante o clímax, são agora efetivamente erodidos, e um alto aporte sedimentar chega até o meio-gráben, do que resulta um padrão progradante na margem flexural e um recuo nos conglomerados da falha de borda.

3.1.3 Modelo de lagos tectônicos de Bohacs *et al.* (2000)

O modelo está focado nos controles fundamentais na sedimentação em bacias lacustres, interpretado como o balanço relativo entre as taxas de mudanças no potencial de acomodação (principalmente tectônica) e o aporte sedimentar + água (controle principalmente climático). Este balanço controla a ocorrência, distribuição e característica dos lagos. Baseado em numerosas observações empíricas em antigos sistemas do Cambriano até o Holoceno, os autores propõem que as três associações de fácies lacustres mais comuns correspondem a distintos tipos de lagos/bacias: a) lago/bacia superpreenchido (*Overfilled*); b) lago/bacia com preenchimento balanceado (*Balanced-fill*) e c) lago/bacia subpreenchido (*Underfilled*).

Um lago/bacia superpreenchido (figura 6) ocorre quando a taxa de aporte de sedimento + água consistentemente excede o potencial de acomodação (usualmente quando a precipitação/evaporação é relativamente alta ou a taxa de subsidência tectônica é baixa). A hidrologia do lago resultante é aberta, de forma permanente ou durante o intervalo de tempo da acumulação de sequências deposicionais. Flutuações no nível do lago devido ao clima são mínimas, porque o influxo de água está em equilíbrio com a saída de água.

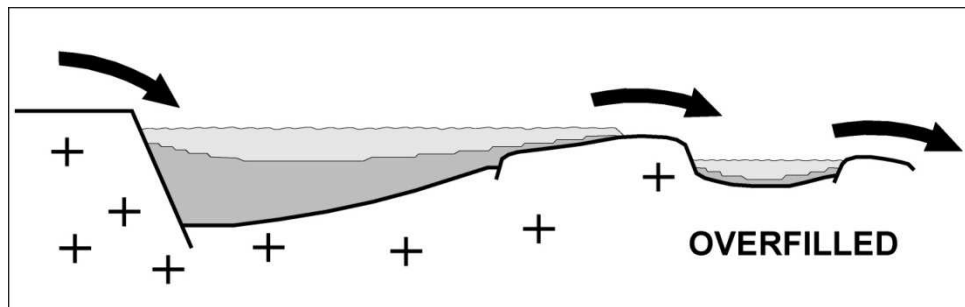


Figura 6. O lago superpreenchido apresenta o máximo aporte fluvial.

Um lago/bacia com preenchimento balanceado (figura 7) ocorre quando as taxas de aporte de sedimento + água e o potencial de acomodação em termos gerais está balanceado durante o intervalo de tempo de desenvolvimento das sequências. O influxo de água é suficiente para encher periodicamente o espaço disponível, mas nem sempre é acompanhada pela saída de água. São comuns as flutuações do nível do lago como resultado da influência do clima.

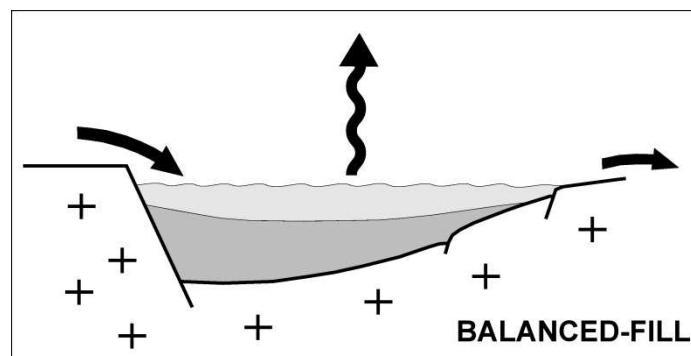


Figura 7. Lago com preenchimento balanceado, onde o aporte fluvial é variável.

Um lago/bacia subpreenchido (figura 8) ocorre quando a taxa de acomodação consistentemente ultrapassa o aporte sedimentar + água, resultando em uma bacia persistentemente fechada hidrologicamente, com depósitos de lagos efêmeros ou piscinas salobras e *playas* intercalados com lagos relativamente perenes.

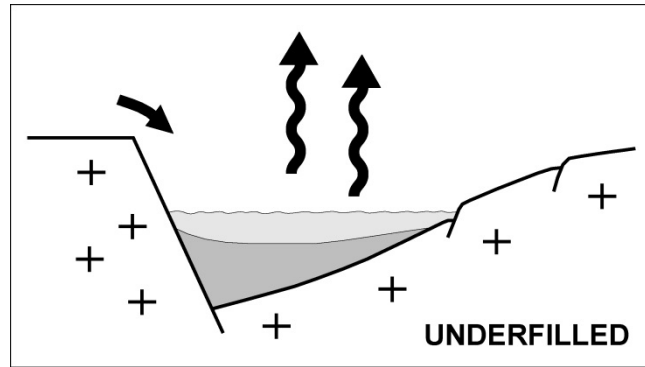


Figura 8. Lago subpreenchido, onde o aporte fluvial é mínimo.

3.2 GEOLOGIA REGIONAL BACIA DE SANTOS

A Bacia de Santos ocupa uma vasta porção da margem leste, com orientação geral SW-NE, localizada na região do sudeste brasileiro. A bacia está limitada ao norte pelo Arco de Cabo Frio e ao sul pela Plataforma de Florianópolis, e para oeste é limitada pela Serra do Mar, uma feição fisiográfica que confina a bacia marginal ao domínio oceânico (Milani *et al.* 2000). A bacia recobre uma área de cerca de 350.000 km², em frente ao litoral sul do Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná e norte de Santa Catarina (figura 9).

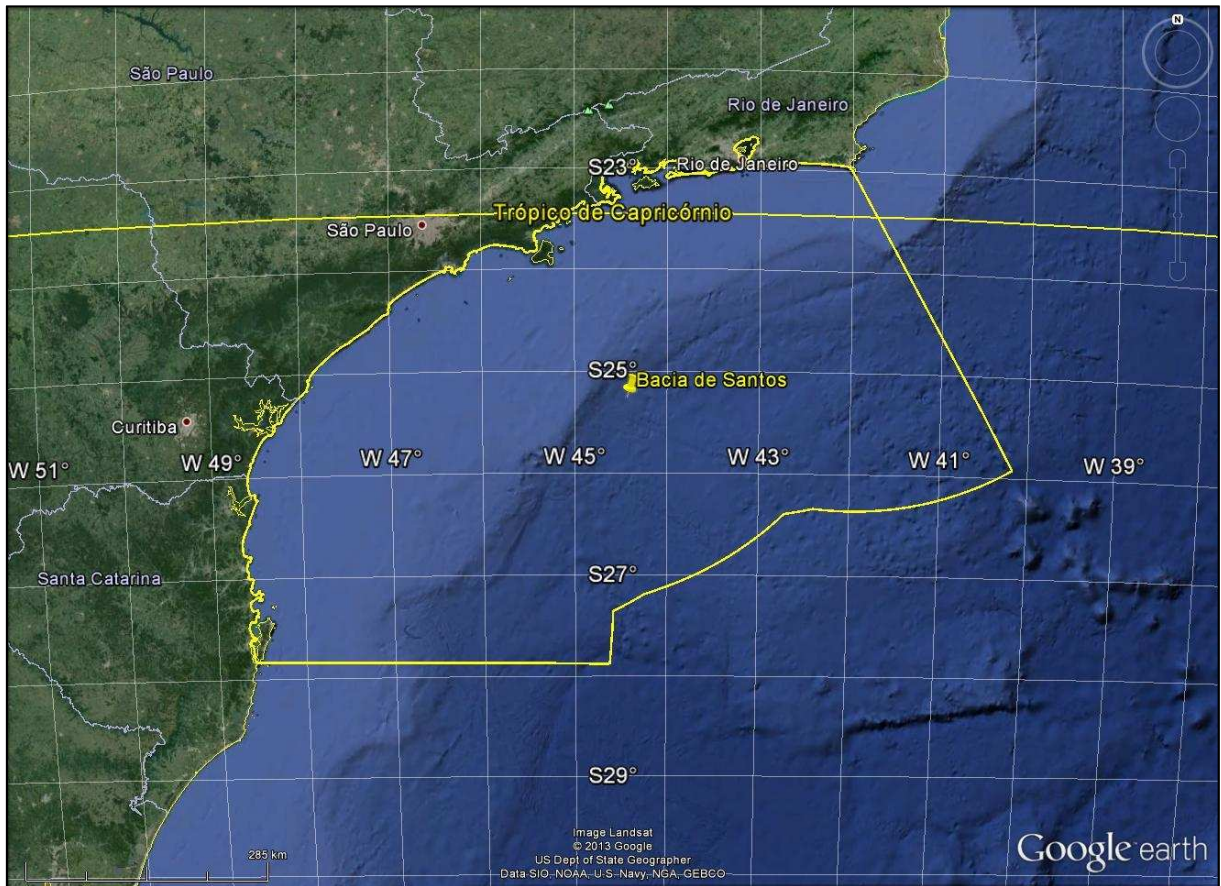


Figura 9. Mapa de localização Bacia de Santos. Extraído de Google Earth.

A evolução da fase rifte da Bacia de Santos resulta da propagação da ruptura das placas sul-americana e africana, no Eocretáceo. O rifte Sul-Atlântico propagou-se de sul para norte, controlado pela distribuição de tensões regionais que condicionou a atenuação litosférica em ampla faixa de deformação (Chang *et al.* 2008).

A Bacia de Santos recobre o platô de São Paulo, que ao longo da margem leste brasileira é a única característica altamente anômala estendida na litosfera continental (Milani & Thomaz Filho, 2000). A borda leste da placa sul-americana (norte da Dorsal de São Paulo) apresentou uma evolução estrutural mais ou menos síncrona, devido aos efeitos dos deslocamentos continentais entre a América do Sul e África desde o Eocretáceo. A ruptura do Gondwana teria se dado ao longo de um extenso sistema de fraturas, que se estendia da Argentina até o nordeste de Brasil. Nas áreas relativas a Bacia de Santos, ocorreu acréscimo de material vulcânico para o fundo das calhas do rifte (Macedo, 1990).

Na Bacia de Santos são reconhecidas falhas extensionais lítricas e de alto ângulo que afetam a crosta continental, rochas vulcânicas do Barremiano ao início do Aptiano e depósitos clásticos; domos do sal no talude continental; falhas lítricas, inversas e *thrusts* geradas pelo sal em sedimentos do Cretáceo Superior e Terciário; falhas limitando meio-grábens causados pela fase extensional entre Hauteriviano e Barremiano Superior (Contreras *et al.* 2010), como se observa na figura 10.

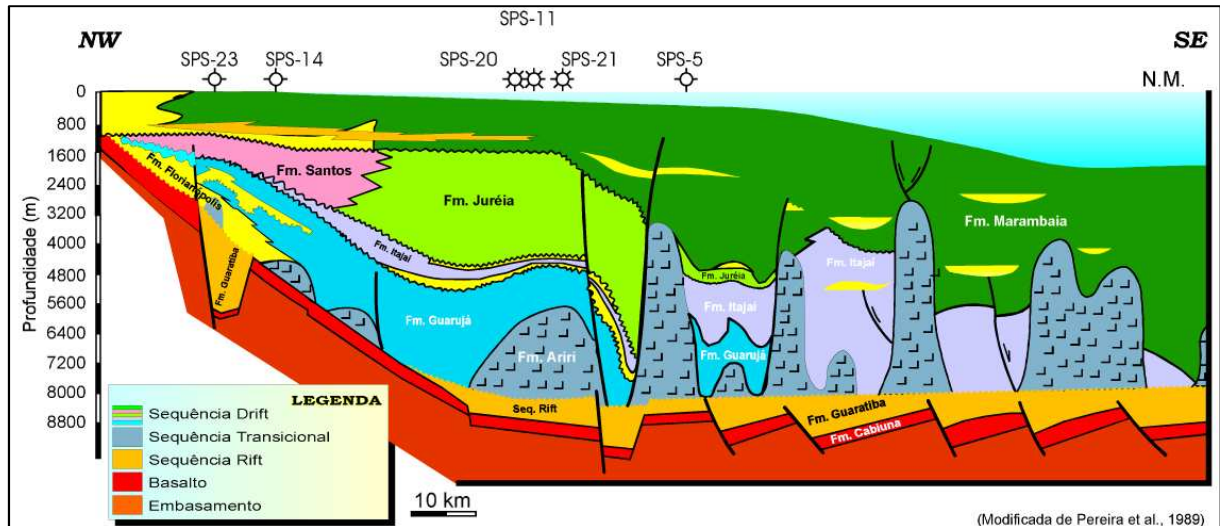


Figura 10. Seção geológica esquemática da Bacia de Santos. Extraído de Pereira *et al.* (1990).

O arcabouço tectono-estratigráfico da Bacia de Santos compreende três megassequências (Pereira e Macedo, 1990; Pereira e Feijó, 1994). A megassequência sinrife ou continental, de idade neocomiana-barremiana, foi amostrada em poucos poços proximais, registrando-se siliciclásticos grosseiros (Formação Guaratiba) assentados discordantemente sobre rochas vulcânicas (basaltos toleíticos amigdaloidais, de cor verde escuro), de idade aproximada de 130–120 Ma (Pereira e Feijó, 1994), incluídos na Formação Camboriú.

A megassequência transicional caracteriza-se pela deposição de siliciclásticos e evaporitos aptianos, depositados acima da discordância decorrente da ruptura, em ambiente marinho restrito, registrando-se carbonatos, anidrita e halita na Formação Ariri.

A terceira fase tectônica corresponde à megassequência pós-rifte ou marinha, associada à subsidência térmica durante a deriva dos continentes. Esta fase inicia-

se por depósitos siliciclásticos (Formação Florianópolis) e carbonáticos (Formação Guarujá) de idade eo/meso-albiana, que posteriormente foram recobertas por sistemas transgressivos clástico-carbonáticos (Formação Itanhaém) do Neo-Albiano ao Eo-Cenomaniano (Pereira *et al.* 1986). O subsequente aprofundamento da bacia resultou na implantação de um ambiente marinho transgressivo até o Meso-Turoniano (Formação Itajaí–Açu), seguido por fortes eventos regressivos a partir do Maastrichtiano (formações Santos e Juréia), resultando num sensível avanço da linha de costa na direção do mar (Pereira & Macedo, 1990).

O Terciário da Bacia de Santos é representado pelo sistema Iguape/Marambaia, com dominância de plataformas carbonáticas na porção centro-sul e forte influxo de clásticos grosseiros na porção norte. A sedimentação culmina com a deposição de areias e folhelhos da Formação Sepetiba, de idade pleistocênica (Pereira & Macedo, 1990; Pereira & Feijó, 1994). Na figura 11 se apresenta a carta estratigráfica da Bacia de Santos, onde se mostram as fases tectônicas e as correspondentes litologias.

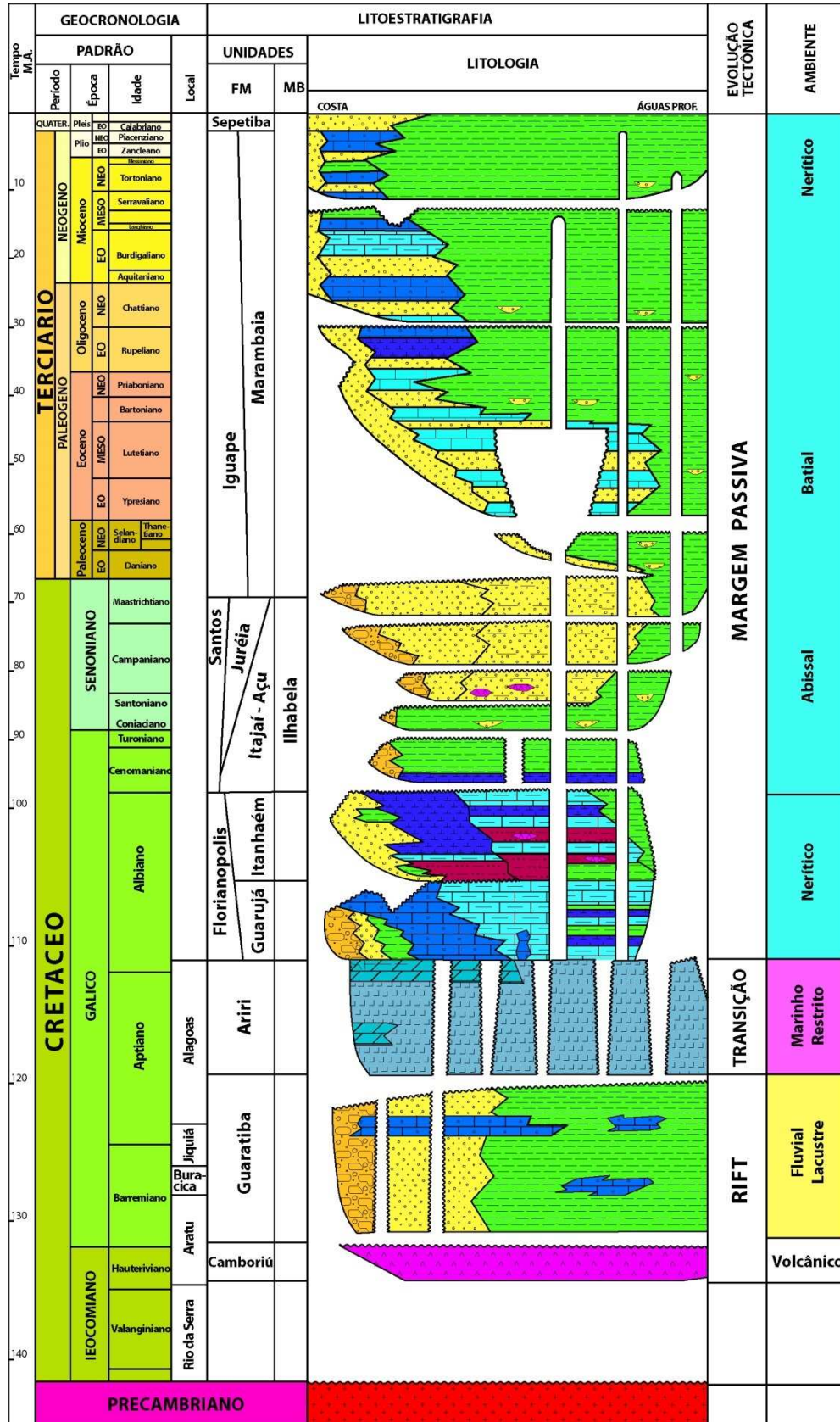


Figura 11. Carta estratigráfica da Bacia de Santos. Modificada de Pereira *et al.* (1990).

4. METODOLOGIA

Para a análise sismoestratigráfica, foram escolhidas três linhas sísmicas com boa qualidade sísmica, com o objetivo de interpretar inicialmente as terminações dos refletores, que são a base para a delimitação das unidades sismoestratigráficas, e a caracterizar as sismofácies. A integração da informação permitiram a definição do arcabouço estratigráfico.

A sequência deposicional é uma unidade estratigráfica composta por uma sucessão de estratos geneticamente relacionados e delimitados no topo e na base por discordâncias ou concordância correlata, marcada pelas terminações das reflexões. As terminações das reflexões são o critério principal para o reconhecimento dos limites de sequências (Mitchum *et al.* 1977).

Para a determinação das unidades sismoestratigráficas foram usadas as terminações e continuidade dos refletores, ilustradas na figura 12: a) Truncamento erosivo, representado pelo truncamento de refletores, implica na deposição das camadas e sua posterior remoção ao longo de uma superfície de discordância; a interpretação pode ser simples ou bastante subjetiva, dependendo da angularidade dos refletores conforme a superfície erosional; b) *Toplap* é a terminação onde refletores se encontram com uma superfície acima, produto de uma não deposição (*bypass* sedimentar) e apenas uma menor erosão; c) *Onlap* é representado por refletores horizontais terminando progressivamente contra uma superfície inclinada, ou como refletores inclinados terminando progressivamente *updip* contra uma superfície de maior inclinação; por fim, d) *Downlap* é representado por refletores inclinados terminando *downdip* contra uma superfície horizontal ou inclinada. Na figura 12 é possível observar um exemplo idealizado terminações dos refletores (Mitchum *et al.* 1977).

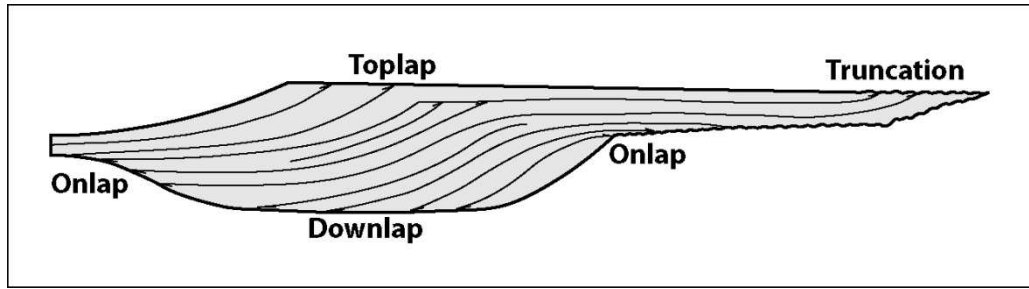


Figura 12. Terminações das reflexões sísmicas dentro sequência sísmica idealizada (Mitchum *et al.* 1977).

Depois da definição das unidades sismoestratigráficas, são caracterizadas as sismofácies, com base na configuração das reflexões sísmicas. A análise sismoestratigráfica envolve a descrição e a interpretação geológica dos parâmetros das reflexões sísmicas, como continuidade, amplitude, frequência e intervalo de velocidade. Na tabela 1 se apresentam os parâmetros sísmicos usados e suas utilidades na interpretação (Mitchum *et al.* 1977).

Parâmetros das Sismofácies	Interpretação Geológica
Configuração dos refletores	Padrões das camadas Processos deposicionais Erosão e paleotopografia Contatos de fluidos
Continuidade dos refletores	Continuidade das camadas Processos deposicionais
Amplitude dos refletores	Contraste de velocidade e densidade Espaçamento das camadas Conteúdo de fluidos
Intervalo de velocidade	Avaliação da litologia Avaliação da porosidade Conteúdo de fluidos
Forma externa e associações areais das sismofácies	Ambiente deposicional original Fonte de sedimentos Configuração/definição geológica

Tabela 1. Parâmetros das reflexões sísmicas usados em sismoestratigrafia e sua significância geológica. Extraído de Mitchum *et al.* (1977b).

As sismofácies são unidades sísmicas em três dimensões, compostas de grupos de reflexões. A descrição e interpretação das configurações internas das reflexões começam com padrões simples, como as configurações paralela, subparalela, ondulada, divergente, caótica e configuração transparente (figura 13). As configurações podem ser modificadas com a utilização de termos modificadores (figura 14) como, por exemplo, lenticular, contorcido, segmentado e *hummocky* (Mitchum *et al.* 1977).

A configuração paralela ou subparalela (figura 13) pode ocorrer em diversas formas externas, mas é mais comum nas unidades em forma de lençóis e lençóis drapeados e em unidades de preenchimento. Subdivisões dessa configuração simples são baseadas em variações de outros parâmetros sísmicos, como a amplitude ou continuidade. Esse padrão sugere taxas de deposição uniformes sobre uma plataforma uniformemente subsidente, ou configuração simples de bacia estável (Mitchum *et al.*, 1977b).

A configuração divergente (figura 13) é caracterizada por uma unidade em forma de cunha na qual a maior parte do espessamento lateral é conseguido por espessamento de ciclos de reflexões individuais no interior da unidade. Tal configuração sugere variações laterais nas taxas de deposição ou inclinação progressiva da superfície deposicional (Mitchum *et al.*, 1977b). A configuração caótica (figura 13) consiste em reflexões discordantes e descontínuas, sugerindo um arranjo desordenado das superfícies de reflexão. É interpretada como estratos depositados em um ambiente de energia alta e variável, ou como estratos inicialmente contínuos que foram deformados, de modo a interromper sua continuidade, sendo que, dependendo da intensidade da deformação, a feição deposicional original pode ser reconhecida ou não. Dobramento, falhas, estruturas de escorregamento ou convolutas e zonas contorcidas podem apresentar a configuração sísmica caótica (Mitchum *et al.*, 1977b). A configuração transparente (figura 13) representa intervalos com ausência de reflexão (*reflection-free*), que podem indicar pacotes sedimentares intensamente redobrados ou com mergulhos muito abruptos, como também litologias homogêneas para o método sísmico, ou não estratificadas (Mitchum *et al.*, 1977b).

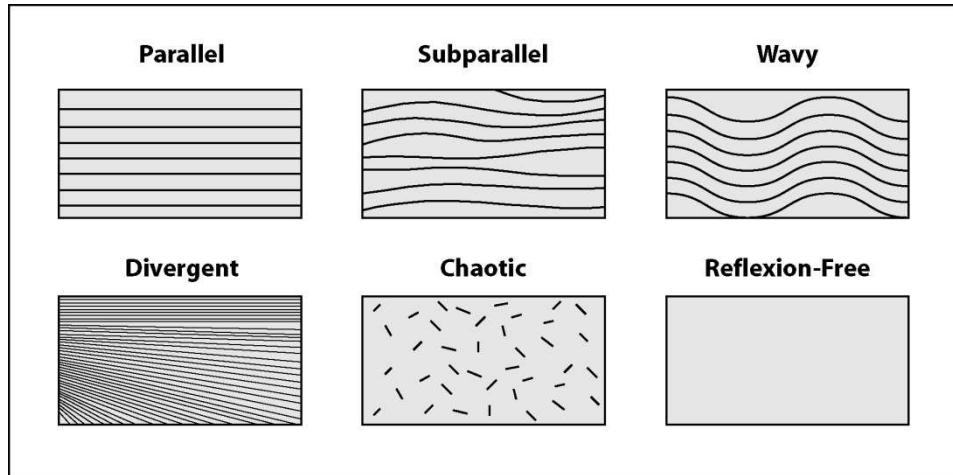


Figura 13. Padrões simples das configurações dos refletores: paralela, subparalela, ondulada, divergentes, caóticas e configuração transparente. Extraído de Mitchum *et al.* (1977b).

As configurações modificadas são variações menores nos padrões básicos da configuração dos refletores, como *hummocky*, lenticular, segmentado e contorcido. Algumas delas estão ilustradas na figura 14.

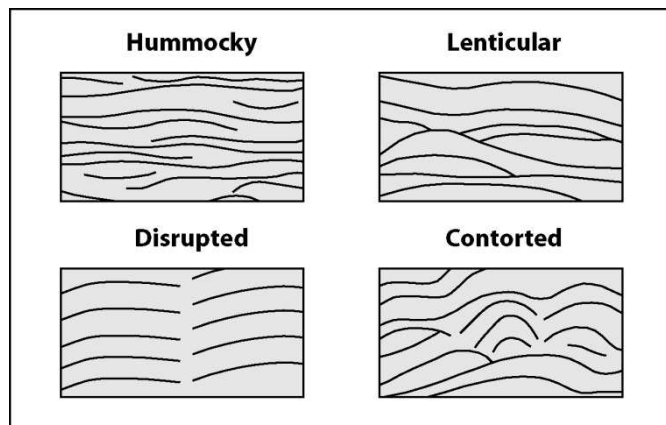


Figura 14. Padrões modificados das configurações dos refletores: *hummocky*, lenticular, segmentado e contorcido. Extraído de Mitchum *et al.* (1977b).

Depois de identificadas as unidades sismoestratigráficas e as fácies sísmicas, é elaborada a carta cronoestratigráfica de eventos, conforme determinado inicialmente por Wheeler (1958) e adaptado para o contexto sísmico por Vail *et al.* (1977d). A geometria da unidade fornece o contexto paleogeomorfológico no qual ela foi depositada, e a disposição espacial das unidades mostra o arranjo arquitetural dos sistemas deposicionais durante o preenchimento da bacia, indicando os momentos de mudança (Kuchle & Scherer 2010).

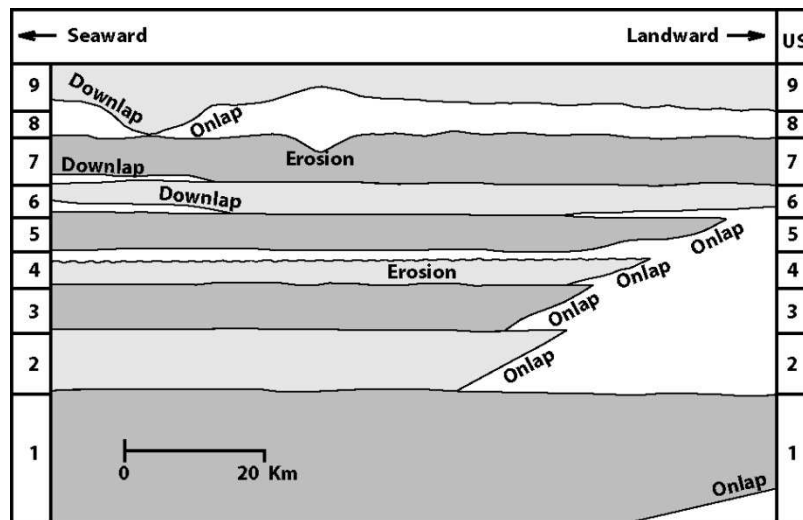


Figura 15. Carta cronoestratigráfica de eventos, determinado por Wheeler (1958) e adaptado para o contexto sísmico por Vail *et al.* (1977d). Modificado de Mitchum *et al.* (1977).

O modelo de Prosser (1993) e Kuchle & Scherer (2010), que usam padrões de empilhamento, foi adaptado para um modelo de evolução das bacias tipo rifte baseado nas mudanças da atividade tectônica, mantendo a denominação de tratos de sistemas tectônicos, mas sem um padrão de empilhamento determinável para cada trato. Seguindo esta adaptação e com a integração das informações obtidas em cada fase deste trabalho, foram identificadas as superfícies chaves que limitam os tratos de sistemas tectônicos, e que por fim indicam os estágios de desenvolvimento da seção rifte da Bacia de Santos.

5. CORPO PRINCIPAL DA DISSERTAÇÃO

TÍTULO: ANÁLISE SISMOESTRATIGRÁFICA DA SEÇÃO RIFTE DA BACIA DE SANTOS

REVISTA: Pesquisas em Geociências

AUORES: Andrea Arias Ramirez, Juliano Kuchle, Renata dos Santos Alvarenga, Claiton Scherer e Karin Goldberg

DATA DE SUBMISSÃO: 04/04/2014



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
Pesquisas em Geociências

Porto Alegre, 04 de abril 2014.

Andrea Fabiola Arias Ramirez e colaboradores

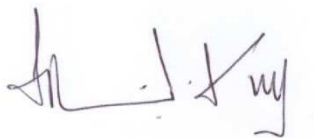
Venho comunicar o recebimento do manuscrito abaixo listado, submetido para publicação em *Pesquisas em Geociências*, órgão de divulgação científica editado pelo Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Agradeço a seleção de *Pesquisas em Geociências* para a publicação de sua contribuição. O manuscrito será analisado quanto ao conteúdo e enquadramento nas normas de preparação, para que seja iniciado o processo de análise por pares.

Título: ***Análise sismoestratigráfica da seção rifte da Bacia de Santos***

Autores: **Andrea Arias Ramirez, Juliano Kuchle, Renata dos Santos Alvarenga, Claiton Scherer & Karin Goldberg.**

Atenciosamente,



Prof. Dr. Paulo Alves de Souza
Editor Chefe

Pesquisas em Geociências
Instituto de Geociências – Departamento de Paleontologia e Estratigrafia
Av. Bento Gonçalves, n 9500 - Bloco 1 - Prédio 43127, Sala 209
CEP 91.540-000, Porto Alegre, RS, Brasil.
Email: paulo.alves.souza@ufrgs.br

COMPROVANTE DE SUMISSÃO

ANÁLISE SISMOESTRATIGRÁFICA DA SEÇÃO RIFTE DA BACIA DE SANTOS

SEISMIC STRATIGRAPHIC ANALYSIS IN THE RIFT SECTION OF SANTOS BASIN

Andrea Arias RAMIREZ^{*1}, Juliano KUCHLE², Renata dos Santos ALVARENGA³, Claiton SCHERER⁴ & Karin GOLDBERG⁵.

^{1,3} UFRGS – Pós-Graduação em Estratigrafia. Av. Bento Gonçalves, 9500. CEP 91501-970. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. afar82@gmail.com, renatalvarenga@yahoo.com.br

² UFRGS – Departamento de Paleontologia e Estratigrafia. Av. Bento Gonçalves, 9500. CEP 91501-970. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. juliano.kuchle@ufrgs.br

³ UFRGS – Programa de Geologia do Petróleo. Av. Bento Gonçalves, 9500. CEP 91501-970. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. claiton.scherer@ufrgs.br

⁵ UFRGS – Departamento de Mineralogia e Petrologia. Av. Bento Gonçalves, 9500. CEP 91501-970. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. karin.goldberg@ufrgs.br

RESUMO

A Bacia de Santos, apesar de uma das principais bacias atualmente no Brasil devido à importância do pré-sal, possui pouca informação geológica como registros de poço, sísmica 3D e sísmica 2D de boa qualidade na seção rifte. O presente trabalho visa a integração da análise sismoestratigráfica e proposição de um modelo de evolução tectono-estratigráfica para a seção rifte na Bacia de Santos. A análise sismoestratigráfica envolveu a interpretação dos refletores, que é a base da identificação das unidades sismoestratigráficas e a caracterização das sismofácies. Como resultado, foi obtida a definição de dezesseis unidades sismoestratigráficas e quatro sismofácies (incluindo o sag), e com isto o desenvolvimento das cartas cronoestratigráficas de eventos adaptadas para o contexto sísmico. Com base na adaptação do modelo de padrões de empilhamento para mudanças na atividade tectônica, foram delimitados os tratos de sistemas tectônicos de início de rifte, de alta atividade tectônica, de baixa atividade tectônica e o pós-rifte, representado pelo sag. O desenvolvimento de cada um dos tratos respondeu a variações dos fatores controladores das bacias lacustres, interpretado como o

balanço relativo entre as taxas de mudanças do espaço de acomodação gerado pela tectônica e o aporte sedimentar influenciado pelo clima.

Palavras-chave: Bacia de Santos, Seção rifte, sismoestratigrafia, sismofácies, tratos de sistemas tectônicos.

ABSTRACT

The Santos Basin, despite its surmount significance due to the pre-salt reservoirs, has limited geological information like well-logs, 3D seismic or good quality 2D seismic for the rift section. The present work aims at integrating seismic stratigraphic analysis and proposing tectonic-stratigraphic an evolution model for the rift section in the Santos Basin. Seismic stratigraphic analysis involved interpretation of reflectors, which is the base of seismic stratigraphic units identification and seismic facies characterization. The result was the definition of sixteen seismic stratigraphic units, four seismic facies (including the *sag*), and with it the development of chronostratigraphic charts of events adapted to the seismic context. Based on the adaptation of the stacking patterns model to tectonic activity changes model, it was possible to delimitate the rift initiation system tracts, the high tectonic activity system tract, the low tectonic activity system tract and the post-rift, represented by the *sag*. The development of each tectonic system tract responds to variations in controlling factors of lacustrine basin, interpreted as the relative balance between the rate changes in the accommodation space generated by tectonic and sediment supply influenced by climate.

Keywords: Santos Basin, rift section, seismic stratigraphic units, seismic facies, tectonic system tract.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, inúmeros trabalhos tem enfatizado a evolução tectono-estratigráfica de bacias rifte, focando na influência da tectônica na geometria da bacia e na razão entre a taxa de influxo sedimentar e a taxa de acomodação durante os diferentes estágios do rifteamento (e.g. Prosser, 1993; Bosence, 1998; Gawthorpe & Leeder, 2000; Morley, 2002; Kuchle & Scherer, 2009; Scherer *et al.*, 2014). Entretanto, existem poucos estudos detalhando a assinatura sismoestratigráfica de cada um dos

estágios evolutivos do rifteamento que permitam o estabelecimento de critérios precisos para o reconhecimento e diferenciação entre eles. Além disso, não existe uma base metodológica consolidada sobre a análise sismoestratigráfica de bacias rifte que possa ser aplicada universalmente.

Com o objetivo de avaliar a evolução estrutural, estratigráfica, e os potenciais reservatórios da seção rifte da Bacia de Santos com base em dados sísmicos 2D, foi realizado o mapeamento e interpretação dos refletores sísmicos, com a identificação dos padrões de empilhamento, reconhecimento das superfícies chaves e dos tratos de sistemas tectônicos (conforme Kuchle & Scherer 2010), desenvolvendo-se assim um arcabouço sismoestratigráfico para este intervalo. A interpretação dos refletores sísmicos se baseia na reflexão sísmica. Estes podem ter terminações em *onlap*, *downlap*, *toplap* e truncamentos erosivos, que são os principais critérios para o reconhecimento das unidades sismoestratigráficas (Mitchum *et al.* 1977). A análise das sismofácies consiste na descrição e a interpretação geológica dos parâmetros de reflexões sísmicas, incluindo a configuração, continuidade, amplitude, frequência e intervalo de velocidade. Com estas informações, elabora-se a carta cronoestratigráfica de eventos, conforme determinado inicialmente por Wheeler (1958) e adaptado para o contexto sísmico por Vail *et al.* (1977d).

Este trabalho baseia-se exclusivamente em dados sísmicos e, por isto, para fazer o mapeamento sismoestratigráfico da seção rifte foi adaptado o modelo de Prosser (1993) e Kuchle & Scherer (2010). Estes usam os padrões de empilhamento para propor modelos de evolução das bacias tipo rifte baseados nas mudanças da atividade tectônica. Com base nestas informações, foram definidas as superfícies e os tratos de sistemas tectônicos da seção rifte da Bacia de Santos.

2. GEOLOGIA REGIONAL

A Bacia de Santos ocorre em uma vasta porção da margem leste, com orientação geral SW-NE, localizada na região do sudeste brasileiro. A bacia está limitada ao norte pelo Arco de Cabo Frio, ao sul pela Plataforma de Florianópolis, e a oeste é limitada pela Serra do Mar, uma feição fisiográfica que confina a bacia marginal ao domínio oceânico (Milani *et al.* 2000). A bacia recobre uma área de cerca de 350.000 km², em frente ao litoral sul do Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná e norte de Santa

Catarina. A figura 1 apresenta a localização da bacia e das linhas sísmicas interpretadas dentro da área de estudo.

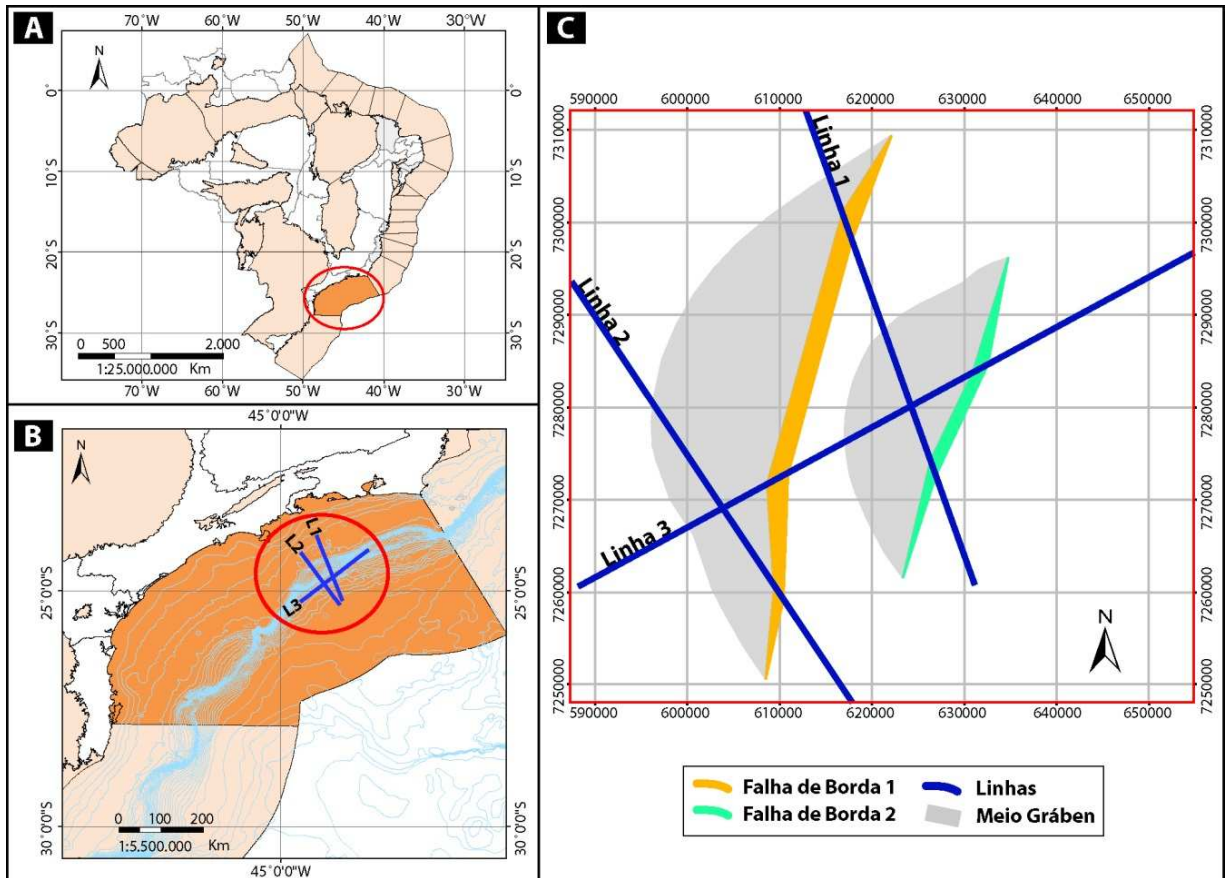


Figura 1. Localização da área estudada. **A.** Localização da Bacia de Santos no Brasil. **B.** Localização das linhas sísmicas dentro da Bacia de Santos. **C.** Orientação das falhas de borda e das calhas dos meio-grábens interpretados conforme a direção das linhas sísmicas.

A evolução da fase rifte da Bacia de Santos resulta da propagação da ruptura das placas sul-americana e africana, no Eocretáceo. O rifte Sul-Atlântico propagou-se de sul para norte, controlado pela distribuição de tensões regionais que condicionou a atenuação litosférica em ampla faixa de deformação (Chang *et al.* 2008).

Na Bacia de Santos são reconhecidas falhas extensionais lístricas e de alto ângulo que afetam a crosta continental, rochas vulcânicas do Barremiano ao início do Aptiano e depósitos clásticos; domos do sal no talude continental; falhas lístricas, inversas e *thrusts* geradas pelo sal em sedimentos

do Cretáceo Superior e Terciário; falhas limitando meio-grábens causados pela fase extensional entre o Hauteriviano e Barremiano Superior (Contreras *et al.* 2010).

A Bacia de Santos recobre o platô de São Paulo, que ao longo da margem leste brasileira é a única característica altamente anômala estendida na litosfera continental (Milani & Thomaz Filho, 2000). A borda leste da placa sul-americana (norte da Dorsal de São Paulo) apresentou uma evolução estrutural mais ou menos síncrona, devido aos efeitos dos deslocamentos continentais entre a América do Sul e África desde o Eocretáceo. A ruptura do Gondwana teria se dado ao longo de um extenso sistema de fraturas, que se estendia da Argentina até o nordeste de Brasil. Nas áreas relativas à Bacia de Santos, ocorreu acréscimo de material vulcânico para o fundo das calhas do rifte (Macedo, 1990).

O arcabouço cronoestratigráfico da Bacia de Santos está definido em sequências deposicionais. Este trabalho é concentrado na Supersequência Rifte, na qual o registro sedimentar inicia no Hauteriviano e prolonga-se ao início do Aptiano, sendo subdividido em três sequências deposicionais denominadas: a) K20-K34, composta por derrames basálticos eocretáceos sotopostos ao preenchimento sedimentar de praticamente toda a Bacia de Santos, denominada Fm. Camboriú, b) K36, correspondente a Fm. Piçarras, composta por leques aluviais de conglomerados e arenitos polimíticos constituídos de fragmentos de basalto, quartzo, feldspato, nas porções proximais, e por arenitos, siltitos e folhelhos de composição talco-estevensítica nas porções lacustres, e c) K38, correspondente a Fm. Itapema (Grupo Guaratiba), caracterizada por apresentar intercalações de calcirruditos e folhelhos escuros ricos em matéria orgânica nas porções mais distais, conglomerados e arenitos de leques aluviais nas porções proximais desta unidade (Moreira *et al.* 2007). A figura 2 apresenta a Supersequência Rifte, com as formações correspondentes às sequências deposicionais, e informações acerca da tectônica e magmatismo, geocronologia e ambiente deposicional.

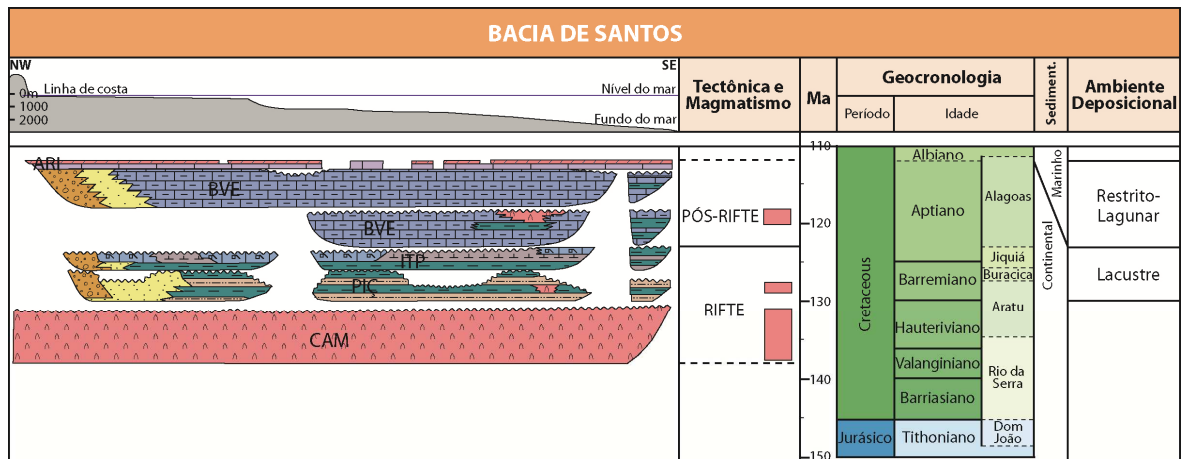


Figura 2. Carta estratigráfica da seção rifte da Bacia de Santos, modificada de Moreira *et al.* (2007).

3. METODOLOGIA E BASE DE DADOS

Para a análise sismoestratigráfica foram escolhidas três linhas sísmicas de boa qualidade e com definição suficiente das sismofácies que permitiram a definição do arcabouço estratigráfico.

Inicialmente foi feita a interpretação dos refletores, que podem ter terminações em *onlap*, *downlap*, *toplap* e truncamentos erosivos. Estes são os principais critérios para o reconhecimento das unidades sismoestratigráficas (Mitchum *et al.* 1977). Com a informação obtida dos refletores e o auxílio dos atributos sísmicos *Cosine Phase*, *Sweetness*, *Relative Acoustic Impedance* (RAI), *RMS Amplitude* foram caracterizados os limites dos meio-grábens, falhas, discordância pós-rifte e base do sal.

Os atributos sísmicos são descrições matemáticas da forma característica de um traço sísmico em intervalos de tempo específicos. Estes atributos permitem aos intérpretes extrair mais informações dos dados sísmicos (Schroeder, 2011). Na figura 3 pode-se observar a expressão sísmica e a utilidade de cada atributo.

Com base nos conjuntos de terminações dos refletores ao longo de uma superfície, foram individualizadas Unidades Sismoestratigráficas, que são conjuntos de estratos cronoestratigraficamente relacionados, com expressão sísmica, limitados no topo e na base por terminações de refletores (Mitchum *et al.* 1977). As Unidades Sismoestratigráficas acabam por

equivaler assim, aos tratos de sistemas, conforme definido por Brown & Fischer (1977), conjunto de estratos geneticamente relacionados, o que não necessariamente implica na ocorrência (nem exclusão) de discordâncias como superfícies limítrofes. Assim, as Unidades Sismoestratigráficas são unidades deposicionais relacionadas a um período de tempo específico e distinto das unidades abaixo e acima.

A análise de fácies sísmicas é baseada na configuração de reflexões e de outros parâmetros sísmicos, incluindo a configuração de reflexão, amplitude, continuidade, frequência e velocidade de intervalo. Estes parâmetros são interpretados como expressão de certos grupos litológicos, e as características de deposição dos sedimentos gerando os ciclos no âmbito da sequência sísmica correlacionada com a estrutura (Mitchum *et al.* 1977). Com a avaliação dos parâmetros mais o auxílio dos atributos sísmicos são definidas as fácies sísmicas.

Após a definição das unidades sismoestratigráficas e as fácies sísmicas, é elaborada a carta cronoestratigráfica de eventos, conforme determinado inicialmente por Wheeler (1958) e adaptado para o contexto sísmico por Vail *et al.* (1977d). Na carta cronoestratigráfica, a geometria da unidade fornece o contexto paleogeomorfológico no qual ela foi depositada, e a disposição espacial das unidades mostra o arranjo arquitetural dos sistemas deposicionais durante o preenchimento da bacia, indicando os momentos de mudança (Kuchle & Scherer 2010).

Com a integração das informações obtidas em cada fase deste trabalho, foram identificadas as superfícies chaves que limitam os tratos de sistemas tectônicos, e que por fim indicam os estágios de desenvolvimento da seção rifte da Bacia de Santos. O modelo evolutivo foi adaptado do modelo de Prosser (1993) e Kuchle & Scherer (2010), que usam padrões de empilhamento para propor um modelo de evolução das bacias tipo rifte baseado nas mudanças da atividade tectônica, mantendo a denominação de tratos de sistemas tectônicos, mas sem um padrão de empilhamento determinável para cada trato.

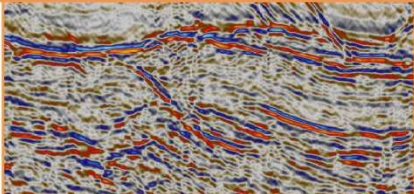
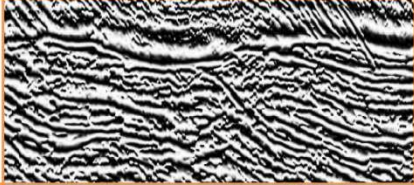
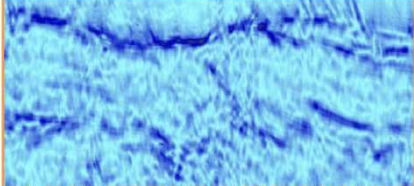
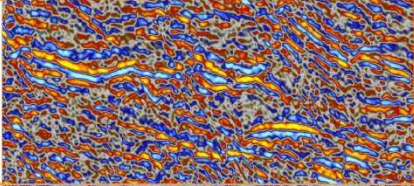
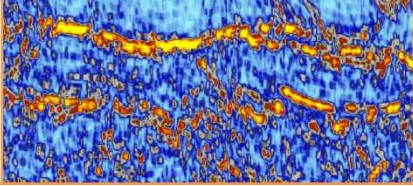
Atributo	Expressão	Utilidade/Interpretação
Normal Phase		Reflexão sísmica, análise estrutural, análise estratigráfica, análise de sismofácies, geração de atributos sísmicos, etc.
Cosine Phase		Continuidade dos padrões de reflexão e visualização de falhas. Limite entre padrões.
Sweetness		Áreas de sombras e claros para mapear a seção rifte. Limite entre as áreas de sombra e claros.
RMS Amplitude		Melhora as fácies sísmicas, principalmente carbonatos e evaporitos. Bom para mapear a base do sal.
Relative Acoustic Impedance (RAI)		Melhora as fácies sísmicas, principalmente carbonatos e evaporitos. Bom para mapear a base do sal. Junto Cosine phase, para mapear as falhas.

Figura 3. Expressão, utilidade e interpretação dos atributos sísmicos gerados a partir de uma linha sísmica em *normal phase*.

4. SISMOESTRATIGRAFIA

Embora as seqüências deposicionais também possam ser observadas em perfis de poço, afloramentos e testemunhos de sondagem, o método baseado nas reflexões sísmicas é a ferramenta mais eficaz para a aplicação de conceitos de seqüência. As reflexões sísmicas são geradas por superfícies estratigráficas com diferentes propriedades acústicas, e por esta razão, as reflexões seguem uma tendência paralela dos estratos, tendo um significado cronoestratigráfico. Portanto, é possível fazer correlações cronoestratigráficas usando padrões de reflexões sísmicas (Mitchum *et al.* 1977).

Para a realização da análise sismoestratigráfica, foram selecionadas três linhas sísmicas 2D com a melhor qualidade, que permitiu a identificação da geometria do meio-gráben (falha de borda e

margem flexural) e a definição do arcabouço estratigráfico dentro da seção rifte. As Linhas 1 e 2 são linhas *dip* com direção NW-SE, e a Linha 3 é uma linha *strike* com direção SW-NE, localizadas no setor nordeste da Bacia de Santos (Figura 1). As linhas foram trabalhadas em tempo (*TWT*).

4.1 INTERPRETAÇÃO DOS REFLETORES

Inicialmente, foi feito o mapeamento dos refletores de cada uma das linhas sísmicas escolhidas. Com o atributo sísmico *Cosine Phase* foram definidas as falhas de borda e outras falhas secundárias que afetam os meio-grábens, o limite basal (Topo da Fm. Camboriú) e o topo do intervalo de estudo, delimitados pela base do sal. As linhas se encontram no intervalo entre 4500 e 7000 milissegundos (*TWT*). Na seção sísmica trabalhada, a falha de borda foi identificada no leste e a margem flexural no oeste da seção.

Na Linha 1 foi delimitado o primeiro meio-gráben, apresenta diferentes padrões nas reflexões ao longo da linha (Figura 4). Contudo é possível observar uma configuração divergente, tipo *wavy* no lado oeste; restrito ao lugar onde foi definida a falha de borda, se observa um padrão caótico de baixa continuidade (Figura 4).

Na Linha 2 foi delimitado o segundo meio-gráben, o qual tem a mesma disposição estrutural do primeiro. Os refletores apresentam uma disposição tipo *wavy* no lado oeste, caótica e *hummocky* no lado leste da seção; do centro até o topo do meio-gráben é possível identificar um padrão subparalelo. Em geral a continuidade e amplitude são baixas, com algumas exceções onde os refletores têm alta continuidade e amplitude (Figura 5).

Na Linha 3 (com disposição *strike*), foi possível mapear os meio-grábens 1(MG-1) e 2 (MG-2), identificados previamente nas linhas *dip*, onde as falhas de borda foram interpretadas a leste e as margens flexurais a oeste da seção. O MG-2 apresenta, na porção oeste até o centro, uma configuração de refletores divergentes; no sul, uma configuração *wavy*, e caótico restrito à falha de borda. Do centro do MG-2 até o centro do MG-1, os refletores exibem uma configuração subparalela, e na zona leste são ondulados (Figura 6).

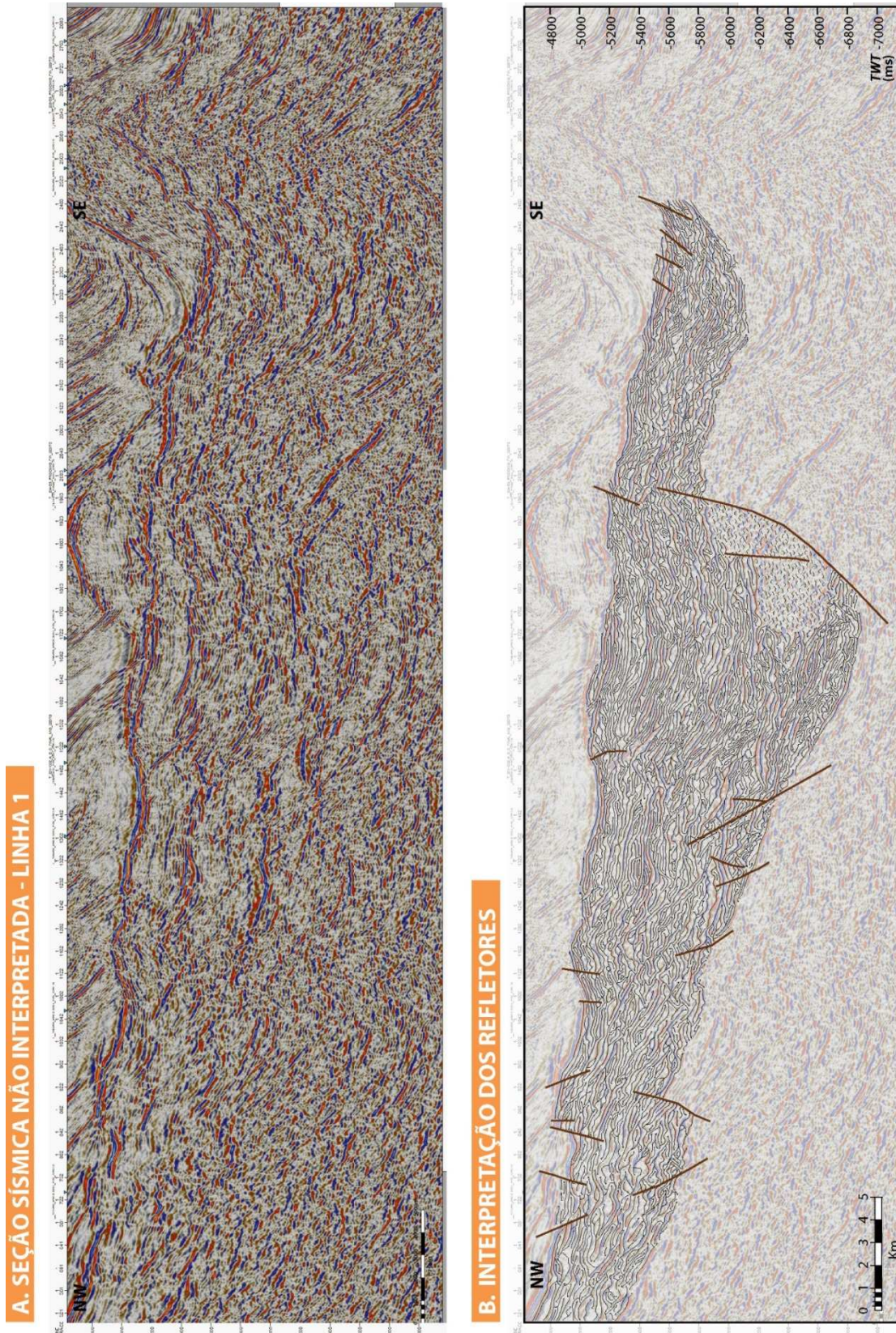


Figura 4. Linha sísmica 1. **A.** Seção sísmica não interpretada, direção NW-SE. **B.** Interpretação dos refletores, da falha de borda e algumas falhas menores.

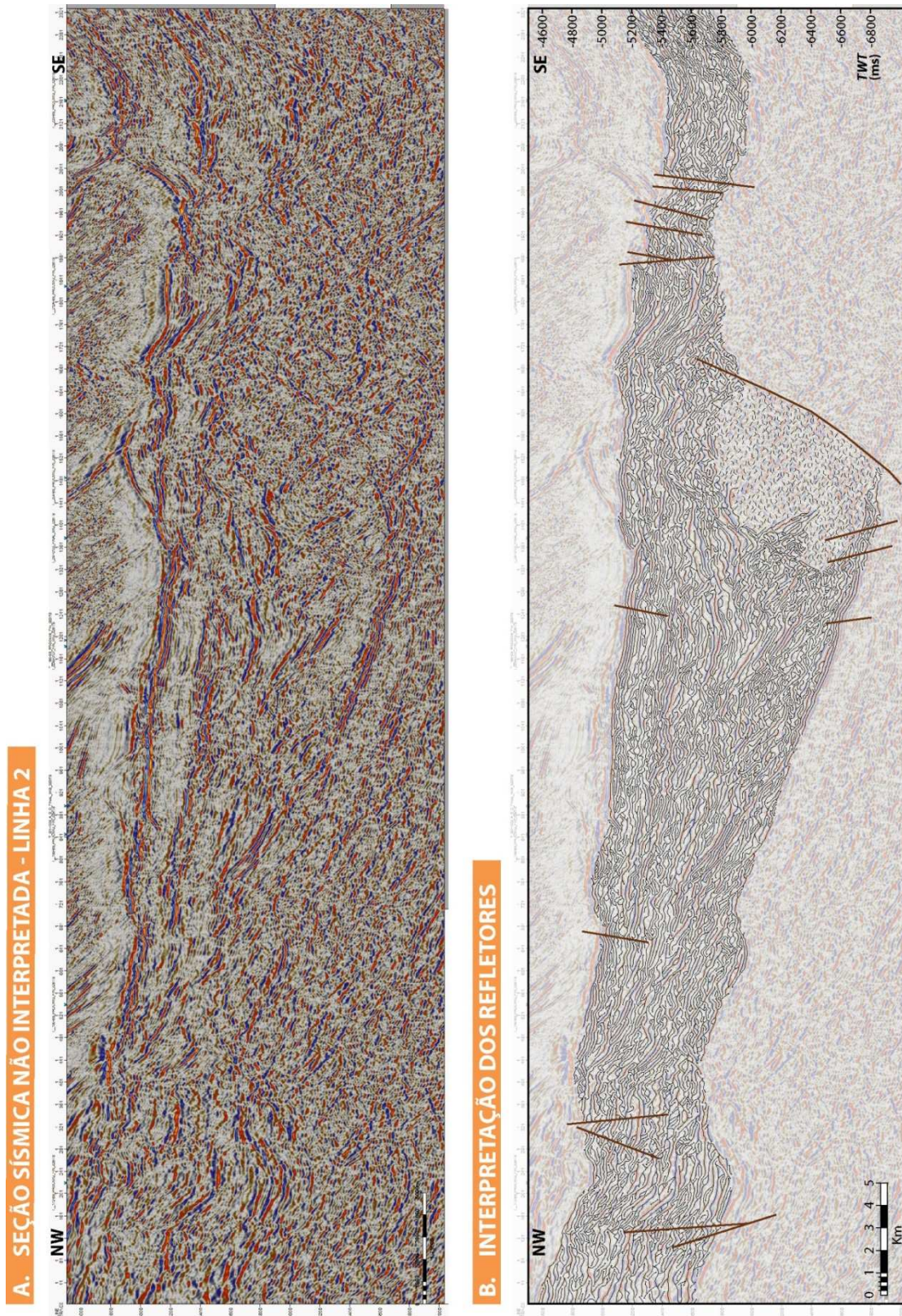


Figura 5. Linha sísmica 2. **A.** Seção sísmica não interpretada, direção NW-SE. **B.** Interpretação dos refletores, da falha de borda e algumas falhas menores.

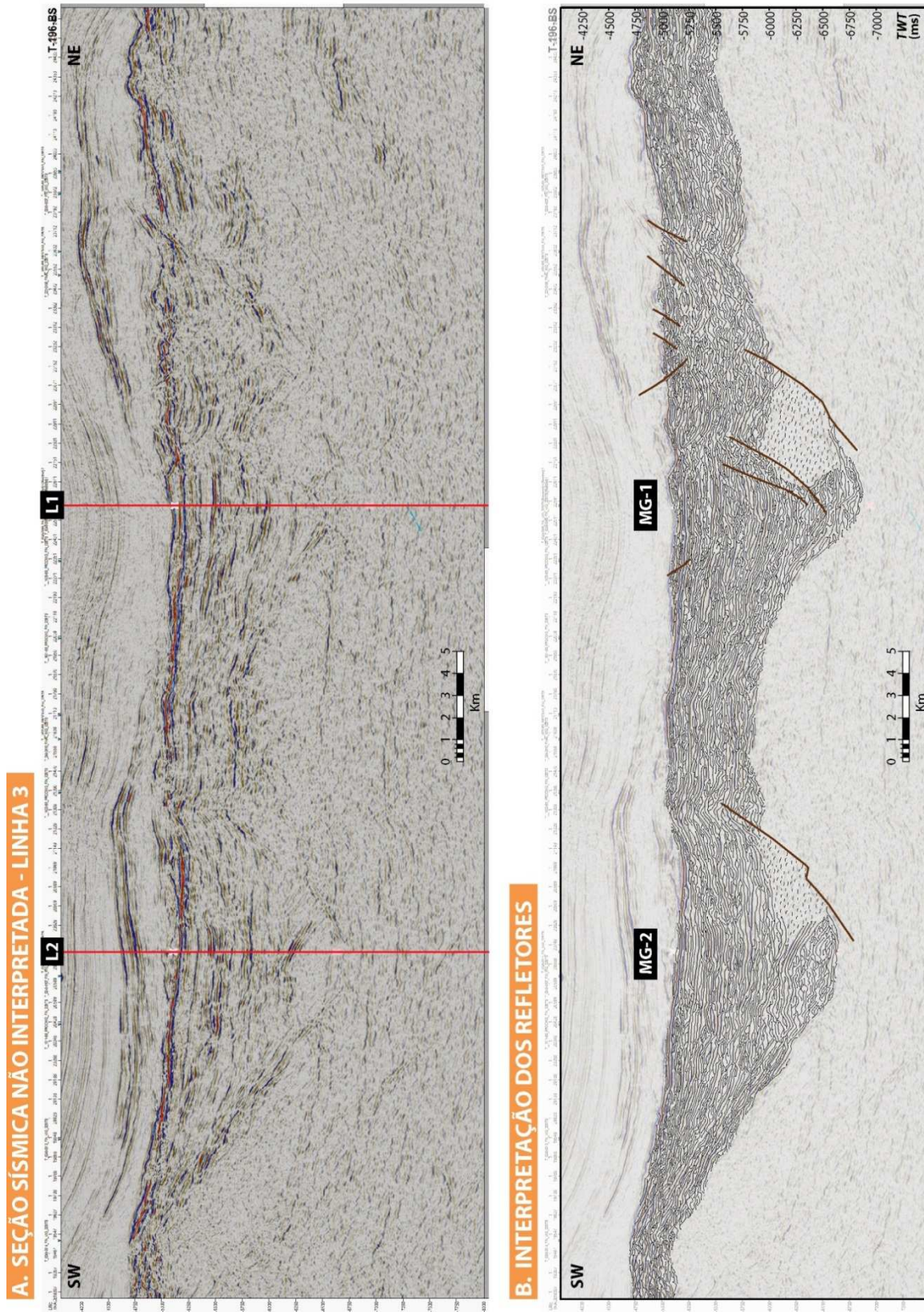


Figura 6. Linha sísmica 3. **A.** Seção sísmica não interpretada, direção SW-NE. **B.** Interpretação dos refletores, da falha de borda e algumas falhas menores.

4.2 UNIDADES SISMOESTRATIGRÁFICAS

Baseados na continuidade e nas terminações dos refletores foram definidos 16 unidades sismoestratigráficas (US) que possuem um significado temporal e proporcionam a compreensão do desenvolvimento e evolução dos meio-grábens caracterizados. As US e sismofácies definidas nas linhas sísmicas 1, 2 e 3 encontram-se ilustradas nas figuras 7, 8 e 9, respectivamente.

A US 1 está limitada na base pelo topo da Formação Camboriú (rochas vulcânicas). Esta US foi identificada na Linha 2 e no meio-gráben oeste da linha 3. A US 2 deposita-se em *downlap* sobre a US 1, da mesma forma que as US 3, US 4 e US 5. As US 2, US 3, US 4 e US 5 são reconhecidas somente na Linha 2 (Figura 8A).

A US 6 é delimitada na base pelo topo da Formação Camboriú na linha 1 e no meio gráben leste da Linha 3 (Figura 9A). Na Linha 2 e no meio-gráben oeste da Linha 3, a US 6 ocorre em *downlap* sobre a US 1. A US 7, em alguns lugares das linhas 1 e 3, a base é delimitada pelo topo da Formação Camboriú. Essa unidade foi interpretada em todas as linhas (Figuras 7A, 8A e 9A). A US 8 deposita-se em *downlap* sobre a US 7, assim como a US 9 sobre a US 8. As unidades sismoestratigráficas 7 e 8 só foram interpretadas no meio-gráben 1 (Figura 7A). A US 10 é depositada ao longo das estruturas, no meio-gráben 2, e as US 5, 7 e 10 se encontram em *toplap* contra a US 11.

A US 11 foi interpretada ao longo das estruturas na Linha 3, onde se deposita em *downlap* sobre a US 10. A US 12 deposita-se em *downlap* sobre a US 11 nas linhas 1 e 3, enquanto que na Linha 2 essa a unidade se apresenta em *onlap* sobre a US 13 (Figura 8A). A US 13 na Linha 3 não é contínua, e termina em *onlap* sobre a US 14, reaparecendo em *toplap* na US 14, no centro da estrutura (Figura 9A). A US 14 está limitada no topo pela discordância pós-rifte ao longo das estruturas. Na Linha 1 foi interpretada do centro para a zona leste (Figura 7A), enquanto que na Linha 2 se encontra restrita no centro (Figura 8A). A discordância pós-rifte corresponde a uma possível superfície de exposição subaérea, com intensa erosão (representada por truncamentos erosivos) na Linha 1 das unidades 9, 1, 11, 12, 13 e 14; na Linha 2 das unidades 3, 4, 11, 12, 13 e 14, e na Linha 3 afeta as unidades 7, 10, 12, 13, e 14 (Figuras 7A-9A).

Por fim, são depositadas as US 15 e US 16, marcando a deposição da fase sag (pós-rifte), limitada pela discordância de pós-rifte.

4.3 SISMOFÁCIES

O processo de análise das sismofácies envolve a delimitação e a interpretação da geometria da reflexão, continuidade, amplitude, frequência, e intervalo de velocidade. Cada um destes parâmetros sísmicos contém informações de significado estratigráfico (Vail *et al.* 1977). Assim, a identificação de comportamentos distintos baseados nestes parâmetros nas linhas sísmicas analisadas possibilitou a caracterização de quatro sismofácies: a) SF-A, interpretada como depósitos da falha de borda, b) SF-B, interpretada como depósitos de sedimentos finos, c) SF-C, interpretada como litologias carbonáticas, e d) SF-D, pertencente à fase sag, não analisada por estar fora do intervalo de estudo.

A sismofácies A (SF-A) possui refletores com uma resposta sísmica caótica, sem continuidade, e de baixa amplitude. Na Linha 1 esta sismofácies aparece na unidade sismoestratigráfica (US) 7, onde tem seu maior desenvolvimento e é encontrada novamente na US 11, onde se observa uma notável diminuição deste padrão (Figura 7A). Na Linha 2, a SF-A tem uma disposição mais contínua. Sua ocorrência inicia na US 6, passando pelas US 7, US 10 (onde esta sismofácies tem o maior desenvolvimento), e termina na US 11 (Figura 8A). Na Linha 3, a SF-A está localizada na zona leste, associada com a falha de borda 1. Esta sismofácies inicia seu desenvolvimento na US 7 e termina na US 10, e a SF-A localizada na zona oeste, associada com a falha de borda 2, só foi reconhecida na US 7 (Figura 9A). Este tipo de padrão foi interpretado como o reflexo sísmico de sedimentos grossos gerados pela movimentação das falhas de borda.

Na sismofácies B (SF-B) os refletores tem uma configuração de baixa a média amplitude, porém é possível identificar alguns refletores com amplitude maior, e tem uma continuidade média, conforme observado na Linha 1 (Figura 7A). Na Linha 2, os refletores apresentam baixa amplitude e alguns refletores de amplitude maior. A continuidade e a frequência é média (Figura 8A). Na Linha 3, os refletores apresentam uma amplitude baixa, a continuidade é média, e a frequência é de média a alta

em toda a seção (Figura 9A). A SF-B foi interpretada como depósitos de sedimentos finos, e está distribuída ao longo dos meios grábens.

A sismofácies C (SF-C) é composta por refletores com alta amplitude, alta frequência, maior continuidade, e com uma configuração divergente. A SF-C é encontrada em lugares específicos dos meio-grábens interpretados. Por exemplo, na Linha 1 este padrão está concentrado principalmente no centro do meio-gráben (Figura 7A). No caso da Linha 2, esta sismofácies ocorre em diferentes pontos ao longo do todo o meio-gráben, com refletores de alta amplitude, continuidade e frequência. Na Linha 3, a SF-C foi reconhecida em maior proporção no meio-gráben oeste, mas está distribuída ao longo deste meio-gráben (Figura 9A). No meio-gráben oeste, as terminações também são de alta amplitude, continuidade e frequência, com configuração subparalela. A SF-C foi interpretada como rochas carbonáticas, devido à resposta sísmica particular dos refletores com alta amplitude, alta frequência, maior continuidade, e por similaridade com interpretações sísmicas de reflexões na Bacia de Campos. Segundo Abrahão & Warne (1990) e Rangel & Carminatti, (2000), estas rochas representam depósitos carbonáticos denominados de coquinas. Assim, dada a continuidade do sistema de *rift valley* de Campos em direção a Santos, e a grande semelhança das reflexões intensas, contínuas e bem definidas dos carbonatos lacustres de Campos (Figura 10A e B), as reflexões da SF-C foram interpretadas como a expressão sísmica destes corpos carbonáticos.

Por fim, a sismofácies D (SF-D) está limitada pela discordância pós-rifte na base, e pela base do sal no topo da seção rifte. Esta sismofácies é rastreável ao longo das linhas por suas características sísmicas, definidas por refletores com continuidade média a alta, com uma configuração de baixa amplitude, porém com algumas áreas com refletores de alta amplitude. Com relação às terminações dos refletores, a SF-D não apresenta um padrão definido. Esta sismofácies foi interpretada como o *sag*.

4.4 CARTA CRONOESTRATIGRÁFICA

Com a integração da informação das terminações dos refletores (*onlaps*, *downlaps*, *toplaps* e truncamentos erosivos), unidades sismoestratigráficas, e sismofácies, foram construídas as cartas

cronoestratigráficas de eventos, conforme determinado inicialmente por Wheeler (1958) e adaptado para o contexto sísmico por Vail *et al.* (1977d).

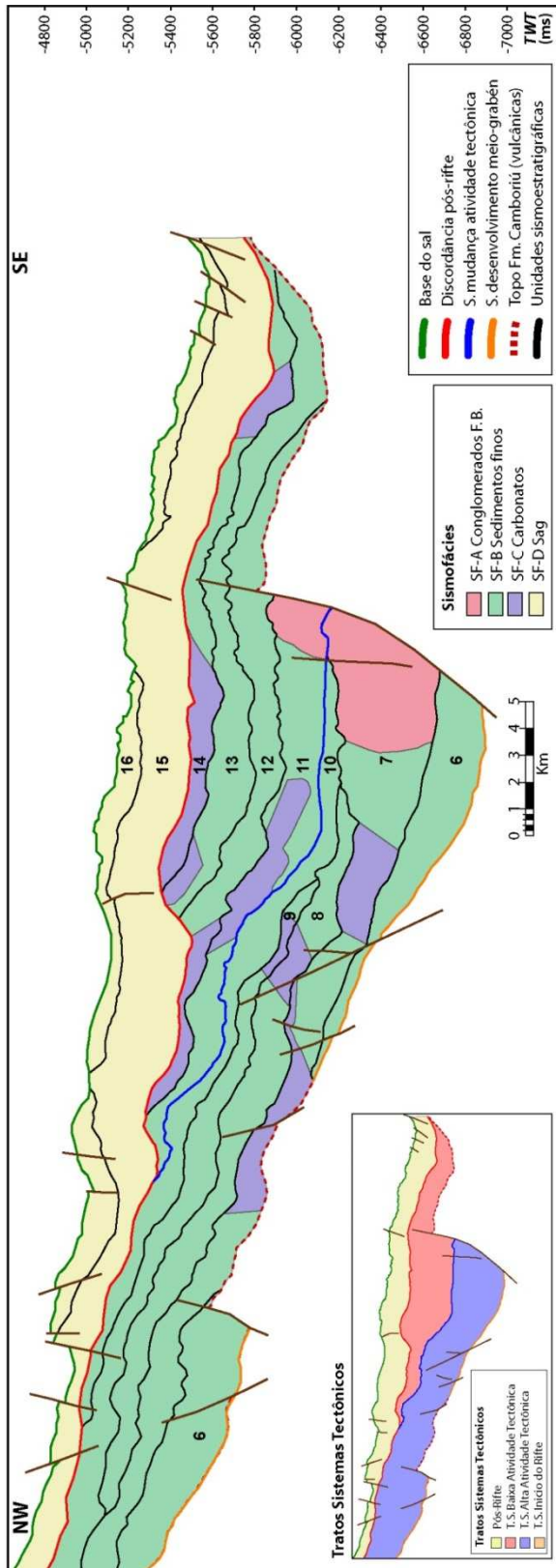
Na carta cronoestratigráfica da Linha 1 (Figura 7B) é possível observar o início de desenvolvimento do meio-gráben 1 na US 6, alcançando sua máxima expansão na US 9. Este intervalo é dominado pela SF-B, interpretada como sedimentos finos. Entretanto, ocorre ainda a presença da SF-C, interpretada como carbonatos, e um primeiro pulso da SF-A, associada aos conglomerados gerados pela falha de borda. A partir da US 10, começa uma redução na área da bacia, culminando com a US 14 sendo fortemente afetada pela erosão que gerou a discordância pós-rifte. Este intervalo também é dominado pela SF-B, com ocorrências da SF-C e um segundo pulso de conglomerados (SF-A). O preenchimento final é representado pelas US 15 e US 16, correspondentes a SF-D, interpretadas como sag.

Na carta cronoestratigráfica da Linha 2, se observa o início do desenvolvimento do meio-gráben 2, que começa na US 1 como uma bacia isolada, dominada por rochas carbonáticas, alcançando sua máxima extensão na US 3 (Figura 8B). A partir da US 4, ocorre uma redução da bacia até a US 7. Neste intervalo ocorre o primeiro pulso de conglomerados, com um hiato na sedimentação que corresponde as US 8 e US 9. Na US 10, ocorre um segundo pulso de extensão da bacia e aparição dos conglomerados, seguido de nova diminuição na área da bacia até a US 14, afetada pela erosão.

Na Linha 3 (Figura 9B), a carta cronoestratigráfica ressalta os seguintes aspectos: a) início do desenvolvimento do MG-2 na US 1; b) um primeiro hiato no qual a US 2 até US 5 não são depositadas; c) início do desenvolvimento do MG-1 na US 6, com máxima extensão do MG-2 até a US 7 e o primeiro pulso de geração de conglomerados associados às falhas de borda; d) um segundo hiato correspondente as US 8 e US 9; e) um segundo pulso de geração de conglomerados associados com a falha de borda 1, aumento na extensão do MG-1 da US 11 até a US 14, e diminuição na bacia do MG-2 da US 10 até a US 14. Nesse intervalo, ocorre a conexão dos dois meio-grábens, se comportando como uma única bacia na US 10 e US 12.

Por fim, as unidades sismoestratigráficas 15 e 16, correspondentes à sismofácies D (interpretada como o *sag*), são marcadas pela erosão na base da US 15 associada com a discordância pós-rifte, e o topo da US 16. Estas unidades são identificadas no topo das três linhas trabalhadas.

A. UNIDADES SISMOESTRATIGRÁFICAS, SISMOFÁCIES E TRATOS SISTEMAS TECTÔNICOS - LINHA 1



B. CARTA CRONOESTRATIGRÁFICA

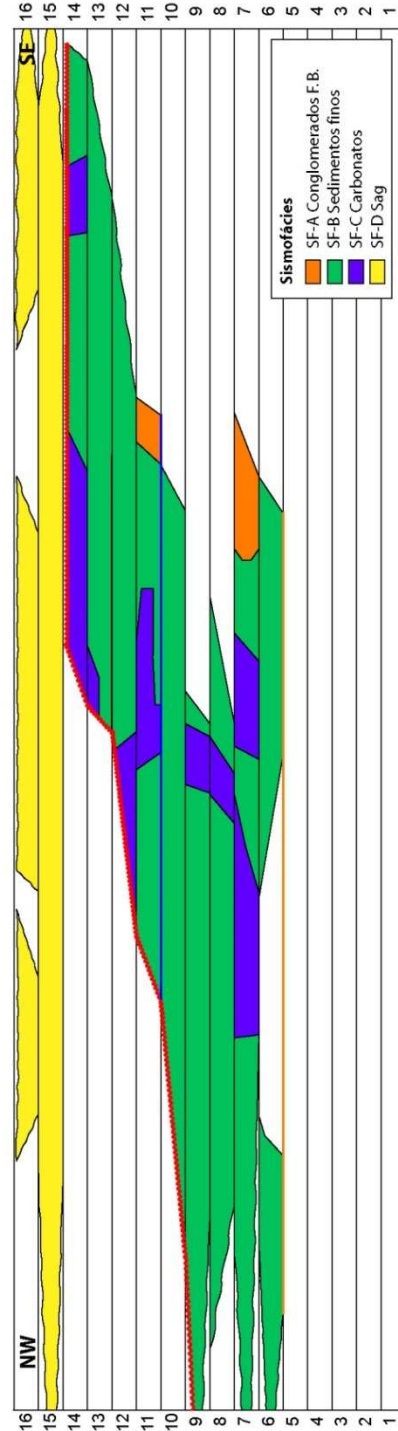
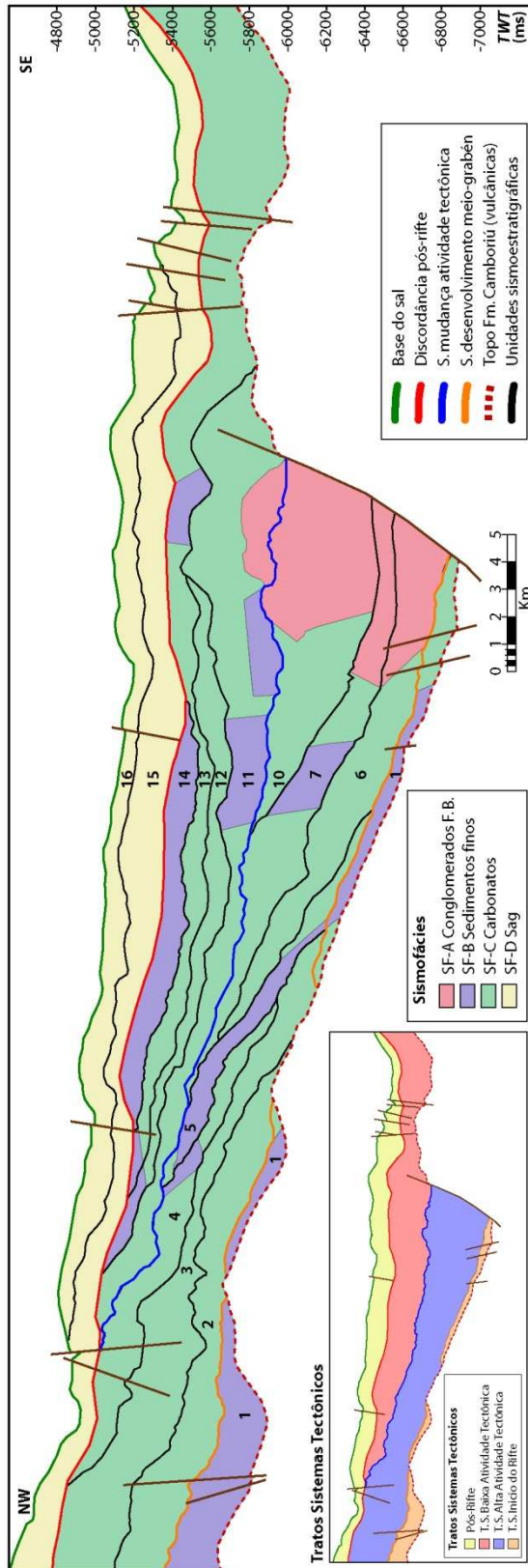


Figura 7. Linha sísmica 1. **A.** Interpretação das unidades sismoestratigráficas, sismofácies e tratos de sistemas tectônicos. **B.** Carta cronoestratigráfica de eventos detalhada para o MG-1.

A. UNIDADES SISMOESTRATIGRÁFICAS, SISMOFÁCIES E TRATOS SISTEMAS TECTÔNICOS - LINHA 2



B. CARTA CRONOESTRATIGRÁFICA

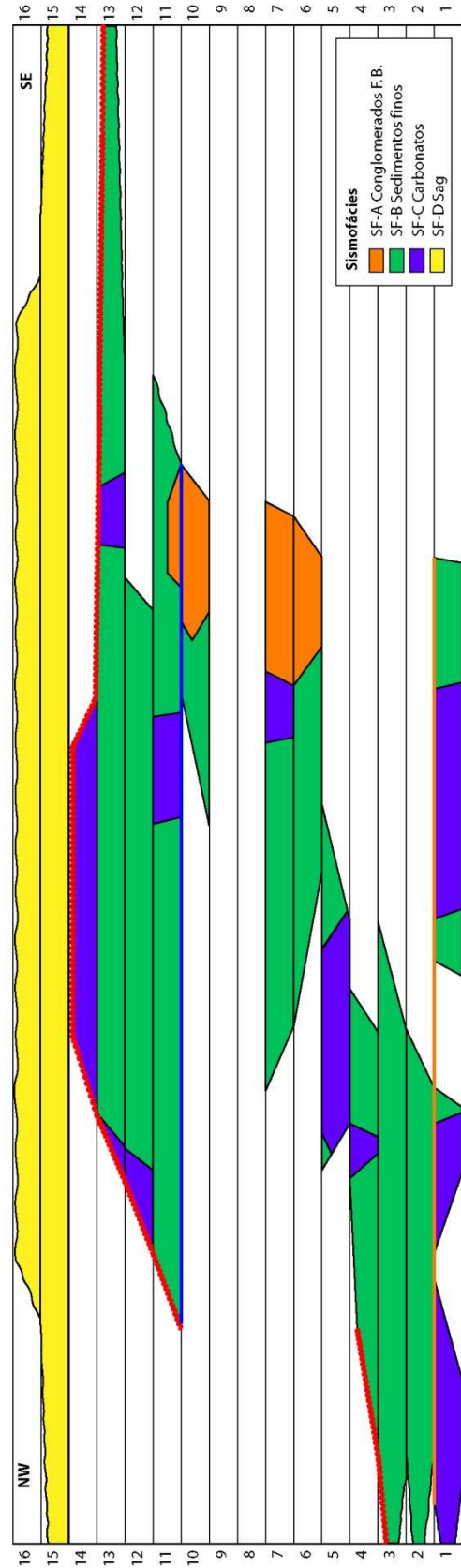
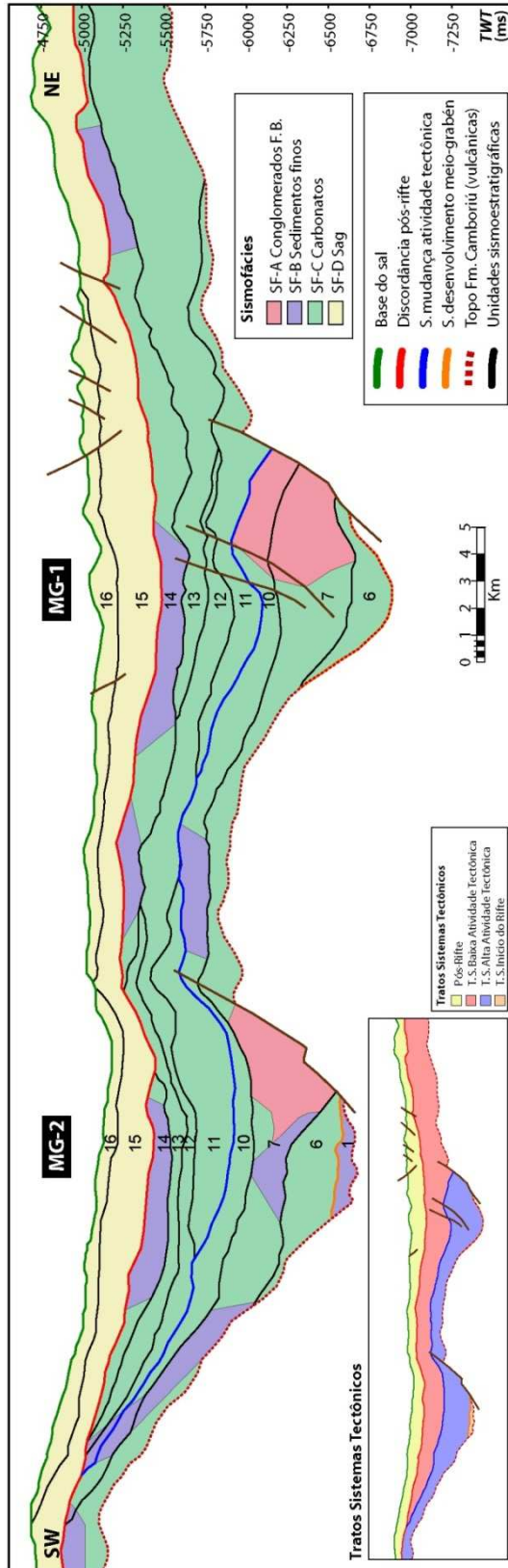


Figura 8. Linha sísmica 2. **A.** Interpretação das unidades sísmoestratigráficas, sismofácies e tratos de sistemas tectônicos. **B.** Carta cronoestratigráfica de eventos detalhada para o MG-2.

A. UNIDADES SISMOESTRATIGRÁFICAS, SISMOFÁCIES E TRATOS SISTEMAS TECTÔNICOS - LINHA 3



B. CARTA CRONOESTRATIGRÁFICA

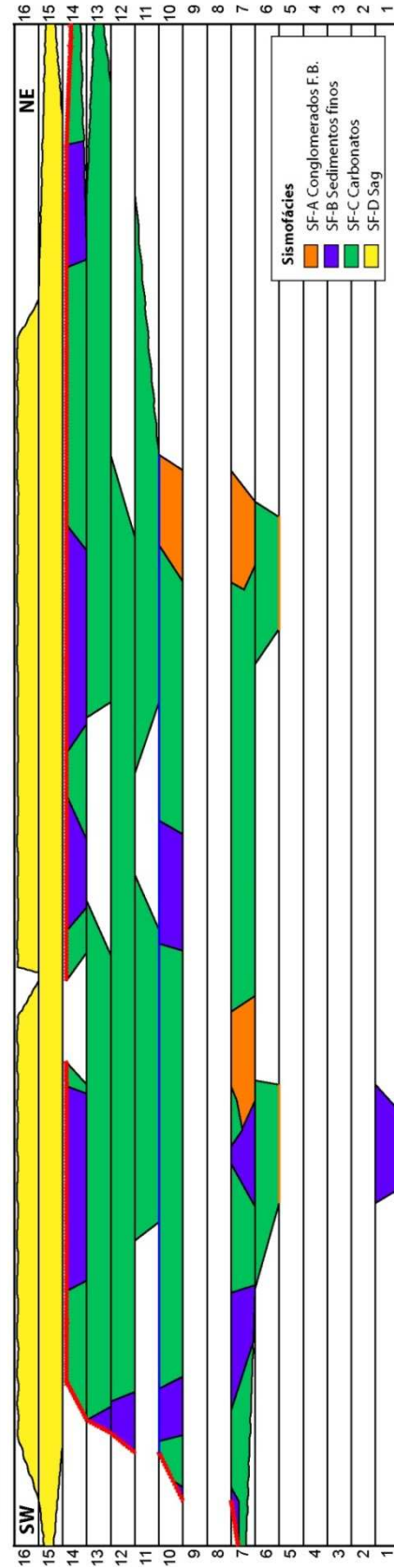


Figura 9. Linha sísmica 3. **A.** Interpretação das unidades sísmoestratigráficas, sismofácies e tratos de sistemas tectônicos. **B.** Carta cronoestratigráfica de eventos para o MG-1 e MG-2.

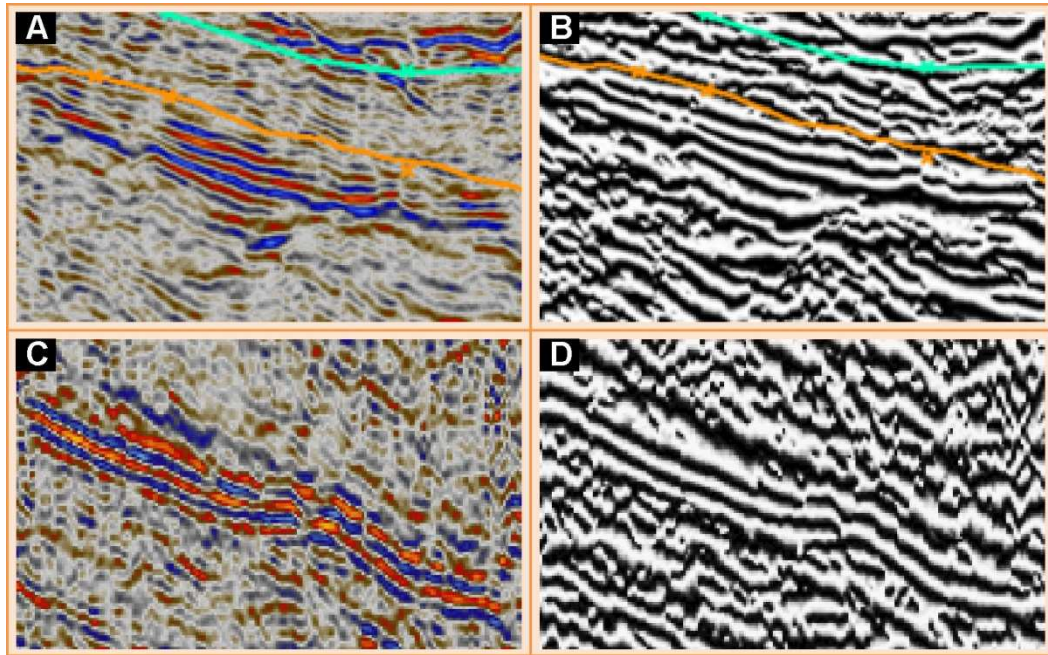


Figura 10. Comparação da SF-C nas bacias de Campos e Santos, usando atributos sísmicos. **A.** Expressão dos corpos carbonáticos na fase sísmica normal, Bacia de Campos. **B.** Expressão dos corpos carbonáticos no *Cosine phase*, Bacia de Campos. **C.** Expressão dos corpos carbonáticos na fase sísmica normal, Bacia de Santos. **D.** Expressão dos corpos carbonáticos no *Cosine phase*, Bacia de Santos.

4.5 SUPERFÍCIES ESTRATIGRÁFICAS E TRATOS DE SISTEMAS TECTÔNICOS

Embora a caracterização das unidades sismoestratigráficas permita a definição dos sucessivos eventos deposicionais que ocorreram nos meio-grábens analisados, o preenchimento destas unidades sismoestratigráficas não apresentou um padrão de empilhamento bem definido. O padrão de empilhamento progradante, retrogradante ou agradacional, *sensu* Van Wagoner *et al.*, (1988), é baseado na relação proximal/distal dos sistemas deposicionais, e suas gradações laterais preditas em um sentido *dip* – paralelo ao eixo deposicional principal. Como a sismoestratigrafia SF-A representa depósitos relacionados à falha de borda, o seu avanço ou recuo pode ser relacionado a maiores ou menores descargas de material clástico associado à falha, o que é um reflexo direto do influxo sedimentar + clima e atividade tectônica (Bohacs *et al.* 2000). Já a relação entre as SF-B e SF-C não apresenta uma relação clara de proximalidade ou distalidade (Figuras 7A, 8A e 9A), o que pode

sugerir que os carbonatos caracterizados na SF-C possa ser depósitos ressedimentados na seção mais profunda do lago, enquanto que a SF-B pode representar os sedimentos de fundo lacustre (*background*). Esta hipótese sustenta é consistente com a grande quantidade de eventos erosivos observados nas margens flexurais dos meio-grábens analisados.

Sem a definição de padrões de empilhamento na seção estudada, os modelos de Prosser (1993) e Kuchle & Scherer (2010) não puderam ser usados, o que derivou em uma adaptação dos modelos supracitados, mantendo a denominação de tratos de sistemas tectônicos, mas sem um padrão de empilhamento determinável para cada trato. O resultado foi a identificação de um trato de sistemas de início do rifte, um trato de sistemas de alta atividade tectônica, e um trato de sistemas de baixa atividade tectônica.

O Trato de Sistemas de Início de Rifte é limitado na base pela superfície basal do meio-gráben, que na Bacia de Santos corresponde ao topo da Formação Camboriú, e no topo pela superfície de desenvolvimento do meio-gráben. Na Linha 2, o trato de sistemas do início de rifte segue a US 1, e esta unidade apresenta predominantemente a sismofácies SF-C, com algumas pequenas porções de sedimentos finos – SF-B (Figura 8A). Na Linha 1 não ocorre este trato (Figura 7A), e neste caso a superfície limite do meio-gráben coincide com a superfície de desenvolvimento do meio-gráben. A Linha 3 tem o registro das duas situações descritas acima: o trato de sistemas de início de rifte na área oeste, composta pela US 1 (dominada pela sismofácies SF-C), enquanto que na área leste a superfície do limite do meio-gráben coincide com a superfície de desenvolvimento de meio-gráben (Figura 9A).

O Trato de Sistemas de Alta Atividade Tectônica é delimitado pela superfície de desenvolvimento de meio-gráben na base, e pela superfície de mudança tectônica no topo. O trato é definido por uma alta atividade tectônica, gerando a disposição inclinada das unidades sismoestratigráficas, a erosão de algumas unidades na margem flexural, e a ocorrência dos conglomerados associados com a falha de borda na margem flexural (Figuras 7-9). Na Linha 1, o trato de alta atividade tectônica é composto pelas US 6, US 7, US 8, US 9, US10, onde a sismofácies SF-B predomina; a área central apresenta algumas ocorrências de carbonatos da SF-C, e como consequência

da intensa atividade tectônica, são observados os depósitos associados à falha de borda – SF-A (Figura 7A). No caso da Linha 2, dentro deste trato se encontram as unidades sismoestratigráficas US 2 até US 7, as US 8 e 9 não são depositadas neste intervalo, e no final do trato é depositada a US 10; a sismo fácies que domina é a SF-B, composta por depósitos de sedimentos finos, mas também são encontradas ocorrências isoladas de carbonatos da SF-C, e são observados os conglomerados associados à movimentação da falha de borda (SF-A). Estes aparecem na US 6 e alcançam a US 10 (Figura 8A). Em relação à Linha 3, o trato corresponde às US 6, US 7 e US 10, as US 8 e 9 não foram depositadas, e em geral os depósitos de sedimentos finos são dominantes (SF-B), porém são encontradas ocorrências de carbonatos da SF-C com maior frequência na zona oeste. Com relação aos conglomerados da falha de borda, o maior desenvolvimento se encontra na área leste, com os depósitos de conglomerados começando na US 7 e indo até US 10; na área oeste os depósitos de conglomerado terminam na US 10 (Figura 9A).

O Trato de Sistemas de Baixa Atividade Tectônica é delimitado na base pela superfície de mudança de atividade tectônica, e no topo pela discordância pós-rifte. Este trato é marcado por uma diminuição na atividade tectônica, com desaparecimento dos conglomerados gerados pela falha de borda (SF-A) e unidades sismoestratigráficas mais contínuas ao longo do meio-gráben. Na Linha 1, o trato corresponde às US 11, 12, 13 e 14; os depósitos dominantes são os sedimentos finos (SF-B), mas também se encontram faixas mais contínuas de carbonatos (SF-C), enquanto os conglomerados associado a falha de borda (SF-A) só são observados na US 11 (Figura 7A). No caso da Linha 2, o trato contém as US 11, 12, 13 e 14; este trato é dominado pelos depósitos de sedimentos finos (SF-B), porém são encontrados carbonatos (SF-C) isolados em toda a US 14, e pequenas acumulações dos conglomerados da falha de borda (Figura 8A). A Linha 3 apresenta a mesma situação das outras duas: o trato está representado pelas US 11, 12, 13 e 14, onde dominam os depósitos de sedimentos finos. Neste caso os carbonatos estão restritos a faixas dentro da US 14 ao longo da estrutura, e o conglomerado é observado numa pequena zona na área leste (Figura 9A).

Por fim, o pós-rifte para a análise realizada obedece à sismo fácies D (sag). Este está delimitado na base pela discordância pós-rifte, e no topo pela base do sal. No estágio pós-rifte se

observa continuidade ao longo dos meio-grábens estudados. Na Linha 1, o pós-rifte corresponde às unidades sismoestratigráficas 15 e 16, situação similar nas Linhas 2 e 3 (Figuras 7, 8 e 9).

5 MODELO EVOLUTIVO DO RIFTEAMENTO

Com a definição das superfícies chave e dos tratos de sistemas tectônicos a partir dos resultados obtidos da interpretação dos refletores, unidades sismoestratigráficas e sismofácies de cada uma das linhas sísmicas trabalhadas, foi elaborada uma análise dos tratos de sistemas tectônicos, baseado na relação de dois fatores controladores das bacias lacustres: a mudanças da atividade tectônica (criação do espaço da acomodação), e aporte sedimentar + água (função da umidade climática), segundo as premissas de Bohacs *et al.* 2000:

- Os lagos contêm volumes menores de sedimento e água comparado com um sistema de deposição marinha; por isso, o sistema lacustre é mais sensível a mudanças no espaço de acomodação e no clima.
- O nível do lago e o aporte sedimentar estão diretamente ligados ao sistema do lago (variações na descarga fluvial). A influência do clima nas variações do nível de base é mais pronunciada em bacias lacustres equilibradas e fechadas, onde o suprimento de água é periodicamente negativo (Keighley *et al.* 2003).
- A natureza e existência do lago são fundamentalmente controladas pela taxa relativa entre potencial de acomodação e aporte sedimentar; clima e tectônica, que exercem controles equivalentes sobre a natureza e distribuição dos tratos de sistemas tectônicos.

A Figura 11 apresenta a interpretação dos tratos de sistemas tectônicos definidos neste trabalho para a Bacia de Santos em relação aos modelos de bacias lacustres definidos por Bohacs *et al.* (2000).

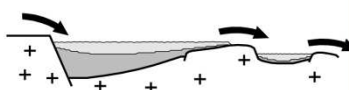
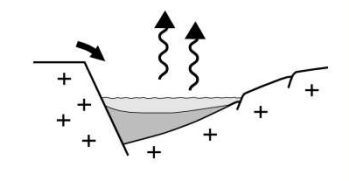

US	Trato Sistema Tectônico	Modelo Evolutivo (Bohacs et al 2000)	
16 15	Sag	Não Analisado	
14 13 12 11	Trato Sistema Baja Atividade Tectônica	Superpreenchido (Overfilled)	
10 9 8 7 6 5 4 3 2	Trato Sistema Alta Atividade Tectônica	Subpreenchido (Underfilled)	
1	Trato Sistema Início do Rifte	Balanceado (Balanced-Fill)	

Figura 11. Análise dos tratos de sistema tectônicos definidos para a Bacia de Santos em relação aos fatores controladores numa bacia lacustre: atividade tectônica, aporte sedimentar e clima (segundo Bohacs *et al.*, 2000).

No trato de sistemas de início do meio-gráben, que corresponde a US 1, a taxa do aporte sedimentar e o espaço de acomodação estão balanceados (*Balanced-fill*). Este estágio apresenta uma tectônica incipiente associada ao estiramento crustal da fase rifte, gerando pequenas bacias isoladas que são preenchidas pelo aporte de sedimento ligado ao nível do lago, e ao aporte fluvial variável em um sistema hidrológico intermitentemente aberto, próprio de cada lago. O influxo de água é suficiente para encher periodicamente o espaço disponível, acompanhando as flutuações do nível do lago devido ao clima. Nestas fases iniciais, o baixo aporte sedimentar decorre também de áreas de drenagem pequenas e fragmentadas, e o fornecimento de sedimentos axiais é limitado (Keighley *et al.* 2003).

No trato de sistemas de alta atividade tectônica, correspondente a US 2 até US 10, o espaço de acomodação gerado pela intensa atividade tectônica da bacia, associada ao desenvolvimento da falha de borda, é muito maior que o aporte sedimentar. Ou seja, não há quantidade de sedimentos suficiente para preencher o espaço gerado (*Underfilled*). Esta fase apresenta mínimo aporte sedimentar fluvial e

ciclos de alta frequência úmido – seco. Por isso é comum observar a disposição inclinada das unidades sismoestratigráficas, erosão e não deposição de algumas unidades neste trato.

No trato de sistemas de baixa atividade tectônica, compreendendo as US 11 até 14, o a bacia se encontra sobrecarregada (*Overfilled*). Neste caso, a taxa de aporte sedimentar consistentemente excede o potencial de acomodação em função da diminuição da subsidência. A geometria deposicional neste estágio reflete as mudanças do fluxo dos sedimentos, onde apresenta um maior aporte fluvial e flutuações no nível da bacia impulsionado pelo clima. Na interpretação das linhas sísmicas é possível observar algumas unidades sismoestratigráficas que se estendem ao longo dos dois meio-grábens, como no caso da Linha 3, que durante determinado intervalo se comportou como uma única bacia ou lago.

6 CONCLUSÕES

Atualmente a Bacia de Santos é uma das mais prolíficas áreas produtoras de hidrocarbonetos no Brasil, e por consequência, têm sido amplamente estudada. Contudo, sua seção rifte, devido a grande profundidade e limitações tecnológicas, tem apresentado pouco interesse científico. O presente trabalho, desenvolvido na seção rifte da Bacia de Santos, teve por objetivo unir a assinatura sismoestratigráfica com modelos que tem ênfase na evolução tectono-estratigráfica de bacias rifte, e chamar a atenção para a seção rifte como uma nova fronteira exploratória. Desta maneira, podem-se apontar como principais resultados e conclusões do presente estudo:

- A utilização dos atributos sísmicos *Cosine Phase*, *Sweetness*, *Relative Accoustic Impedance (RAI)*, *RMS Amplitude* a partir da sísmica em *normal phase* para na interpretação sismoestratigráfica apresentou bons resultados.
- Realizou-se a interpretação sismoestratigráfica de três linhas sísmicas de boa qualidade, onde foram definidos refletores sísmicos, terminações dos refletores, unidades sismoestratigráficas e sismofácies.

- Foram definidas 16 unidades sismoestratigráficas, baseadas nas terminações dos refletores. Estas possuem um significado temporal e proporcionam a compreensão do desenvolvimento e evolução dos meio-grábens caracterizados.
- Baseado nos parâmetros sísmicos, geometria da reflexão, continuidade, amplitude, frequência, e intervalo de velocidade, foram caracterizadas quatro sismofácies: a) SF-A, depósitos associados à falha de borda; b) SF-B, depósitos de sedimentos finos; c) SF-C, depósitos carbonáticos e d) SF-D, depósitos do sag (fora do intervalo de estudo).
- Pela similaridade com interpretações sísmicas de seções na Bacia de Campos, e devido à resposta sísmica particular dos refletores com alta amplitude, alta frequência, maior continuidade, a SF-C foi interpretada como compreendendo carbonatos lacustres.
- Com a integração da informação de terminações dos refletores, unidades sismoestratigráficas, e sismofácies, foram construídas as cartas cronoestratigráficas de eventos para cada um dos meio-grábens interpretados.
- Foi adaptado o modelo de Prosser (1993) e Kuchle & Scherer (2010) na proposição de um modelo de evolução da seção rifte da Bacia dos Santos.
- O Trato de Sistemas de Início de Rifte é limitado na base pela superfície basal do meio gráben e no topo pela superfície de desenvolvimento do meio-gráben, e representa depósitos clásticos relacionados à fase inicial do rifteamento, onde a bacia não apresenta uma falha de borda bem definida e sua geometria é sinformal.
- O Trato de Sistemas de Alta Atividade Tectônica é delimitado pela superfície de desenvolvimento de meio-gráben na base e pela superfície de mudança tectônica no topo, e representa depósitos relacionados à fase de intensa atividade tectônica, caracterizada por uma geometria de meio-gráben bem definida, com depósitos de falha de borda e refletores divergentes, resultado de atividade tectônica sindeposicional.
- O Trato de Sistemas de Baixa Atividade Tectônica é delimitado na base pela superfície de mudança de atividade tectônica e no topo pela discordância pós-rifte, E representa depósitos relacionados a uma fase de diminuição da atividade tectônica, onde o meio-gráben é extravasado e

os refletores apresentam suaves divergências e dominante paralelismo, o que indica uma baixa atividade tectônica relativa.

- A análise dos tratos tectônicos definidos neste trabalho com relação aos fatores controladores das bacias lacustres (Bohacs *et al.* 2000) sugere que o trato de sistemas de início de rifte parte de uma bacia onde a atividade tectônica e o aporte sedimentar são balanceados. No trato de sistemas de alta atividade tectônica ocorre a geração de uma grande quantidade de espaço que não é preenchido, e por fim no trato de sistemas de baixa atividade tectônica a taxa de aporte sedimentar é muito maior que o espaço de acomodação devido à diminuição da subsidência tectônica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abraham, D. and Warme, J.E., 1990, Lacustrine and associated deposits in a rifted continental margin – Lower Cretaceous Lagoa Feia Formation, Campos basin, Offshore Brazil, p. 287-305. In Katz, B. J. (ed.). *Lacustrine Basin Exploration – Case Studies and Modern Analogs*. American Association of Petroleum Geologists Memoir 50, 340 p.

Bohacs, K. M., A. R. Crikk, J. E. Neal, P. J. Mankiewicz, 2000. Lake-basin type, source potential, and hydrocarbon character: an integrated-sequence-stratigraphic-geochemical framework. In E. H. Gierlowski – Kordesch and K. R. Kelts, (eds.). *Lake basins through space and time*. AAPG Studies in Geology 46, p. 3-34.

Chang, H. K., Assine, M. L., Corrêa F. S., Tinen J. S., Vidal, A. C., Koike, L., 2008. Sistemas petrolíferos e modelos de acumulação de hidrocarbonetos na Bacia de Santos. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 38(2), p. 29-46.

Contreras J., Zühlke, R., Bowman, S., Bechstädt, T., 2010. Seismic stratigraphy and subsidence analysis of the southern Brazilian margin (Campos, Santos and Pelotas basins). *Marine and Petroleum Geology*, v.27, p. 1952-1980.

Keighley D., Flint, S., Howell, J., Moscariello, A., 2003. Sequence stratigraphy in lacustrine basins: a model for part of the Green River Formation (Eocene), southwest Uinta Basin, Utah, USA. *Journal of Sedimentary Research*, v. 73, n. 6, p. 987-1006.

Kuchle J., Scherer C.M.S., 2010. Sismoestratigrafia de bacias rifte: técnicas, métodos e sua aplicação na Bacia de Recôncavo. *Boletim de geociências da Petrobras*, v. 18, n.2, p. 33-60.

L. F. Brown Jr., W. L. Fisher, 1977. Seismic-Stratigraphic Interpretation of Depositional Systems: Examples from Brazilian Rift and Pull-Apart Basins: Section 2. Application of Seismic Reflection Configuration to Stratigraphic Interpretation. *Seismic stratigraphy – Applications to hydrocarbon exploration*, vol. 26. AAPG, p 213-248

Macedo, J. M., 1990. Evolução tectônica da Bacia de Santos e áreas continentais adjacentes. In Guilherme Pederneras Raja Gabaglia e Edison José Milani. (eds.). *Origem e Evolução de Bacias Sedimentares*. PETROBRAS, Rio de Janeiro. p. 361-376.

Milani E. J., Brandão, J. A. S. L., Zalán, P. V., Gamboa, L. A. P., 2000. Petróleo na margem continental brasileira: Geologia, exploração, resultados e perspectivas. *Revista Brasileira de Geociências*, v.18(3).

Milani, E. J., Thomaz Filho, A., 2000. Sedimentary basins of South America in Cordani U. G., Milani, E. J., Thomaz Filho, A., Campos, D. A., Tectonic evolution of South America. In 31st INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, p. 389-449.

Mitchum Jr R.M., Vail P.R., Sangree J.B. 1977. Interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. *Seismic stratigraphy – Applications to hydrocarbon exploration*, vol. 26. AAPG, p. 117-133.

Prosser, S., 1993. Rift-related linked depositional systems and their seismic expression. In Williams, G. F. & Dobb, A. (eds.), 1993. *Tectonics and Seismic Sequence Stratigraphy*. Geological Society Special Publication No. 71, p. 35-66.

Rangel H. D., and M. Carminatti, 2000. Rift lake stratigraphy of the Lagoa Feia Formation, Campos Basin, Brazil. In E. H. Gierlowski – Kordesch and K. R. Kelts, (eds.). *Lake basins through space and time*. AAPG Studies in Geology 46, p. 225-244.

Schroeder W. Fred., 2011. An Introduction to the Hunt For Oil for Geoscientists not within Industry. *Unit 13: Seismic Attributes*. AAPG, Slide Resources. Disponível em: <http://archives.aapg.org/slide_resources/schroeder/13/index.cfm>

Vail, P. R., R. M. Mitchum, and S. Thompson III, 1977, Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 3: Relative changes of sea level from coastal onlap. In C. W. Payton, (ed.). *Seismic stratigraphy applications to hydrocarbon exploration*. AAPG Memoir 26, p. 63 - 97

Wheeler, H.E., 1958, Time-stratigraphy: *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, v. 42, no.5, p. 1045-1063

6. ANÁLISE INTEGRADORA

Ao final deste estudo, na seção rifte da Bacia de Santos foram identificados dois meio-grábens por médio da interpretação sísmica de três linhas 2D. Nestes se identificaram 16 unidades sismoestratigráficas, através das terminações dos refletores, dando um sentido temporal à evolução dos meio-grábens.

Quatro sismofácies foram caracterizadas com a interpretação dos parâmetros sísmicos (geometria da reflexão, continuidade, amplitude, frequência, e intervalo de velocidade). Estas sismofácies (SF) correspondem a: SF-A, depósitos associados a falha de borda; SF-B, depósitos de sedimentos finos; SF-C, interpretada como carbonatos, apresentam similaridade na interpretação das reflexões sísmicas (alta amplitude, alta frequência e maior continuidade) com os carbonatos lacustres identificados na Bacia de Santos; e por fim, a SF-D, sag, que está fora do intervalo de estudo.

Foram construídas as cartas cronoestratigráficas de eventos para cada um dos meio-grábens interpretados, com a integração da informação das unidades sismoestratigráficas e sismofácies, onde foram identificadas as respectivas superfícies que delimitam os tratos de sistemas tectônicos e os mesmos analisados segundo o modelo de bacias lacustres de Bohacs *et al.* (2000).

O Trato de Sistema de Início de Rifte inclui depósitos clásticos relacionados à fase inicial do rifteamento, onde a bacia não apresenta uma falha de borda bem definida e sua geometria é sinformal. Observou-se que neste trato a atividade tectônica e o aporte sedimentar estão balanceados, isto é, o influxo de água e sedimento é suficiente para preencher o espaço de acomodação gerado.

O Trato de Sistema de Alta Atividade Tectônica inclui depósitos relacionados à fase de intensa atividade tectônica, caracterizada por uma geometria de meio-gráben bem definida, com depósitos de falha de borda. Este trato corresponde a um lago subpreenchido devido a alta atividade tectônica, que gera uma grande quantidade de espaço que não é preenchido, devido ao aporte sedimentar insuficiente.

Finalmente, o Trato de Sistema de Baixa Atividade Tectônica engloba depósitos relacionados a uma fase de diminuição da atividade tectônica, onde o meio-gráben é

extravasado. Neste caso, a taxa de aporte sedimentar é muito maior que o espaço de acomodação, relacionado à diminuição da subsidência tectônica, correspondendo a um lago/bacia superpreenchido.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bohacs, K. M., A. R. Crrikk, J. E. Neal, P. J. Mankiewicz, 2000. Lake-basin type, source potential, and hydrocarbon character: an integrated-sequence-stratigraphic-geochemical framework, in E. H Gierlowski – Kordesch and K. R. Kelts, eds., Lake basins through space and time: AAPG Studies in Geology 46, p. 3-34.
- Chang, H. K., Assine, M. L., Corrêa F. S., Tinen J. S., Vidal, A. C., Koike, L., 2008. Sistemas petrolíferos e modelos de acumulação de hidrocarbonetos na Bacia de Santos. Revista Brasileira de Geociências, v. 38(2), p. 29-46.
- Contreras J., Zühlke, R., Bowman, S., Bechstädt, T., 2010. Seismic stratigraphy and subsidence analysis of the southern Brazilian margin (Campos, Santos and Pelotas basins). Marine and Petroleum Geology, v.27, p. 1952-1980.
- Keighley D., Flint, S., Howell, J., Moscariello, A., 2003. Sequence stratigraphy in lacustrine basins: a model for part of the Green River Formation (Eocene), southwest Uinta Basin, Utah, USA. Journal of Sedimentary Research, v. 73, n. 6, p. 987-1006.
- Kuchle J., Scherer C.M.S., 2010. Sismoestratigrafia de bacias rifte: técnicas, métodos e sua aplicação na Bacia de Recôncavo. Boletim de geociências da Petrobras, v. 18, n.2, p. 33-60.
- L. F. Brown Jr., W. L. Fisher, 1977. Seismic-Stratigraphic Interpretation of Depositional Systems: Examples from Brazilian Rift and Pull-Apart Basins: Section 2. Application of Seismic Reflection Configuration to Stratigraphic Interpretation. Seismic stratigraphy – Applications to hydrocarbon exploration, vol. 26. AAPG, p 213-248
- Macedo, J. M., 1990. Evolução tectônica da Bacia de Santos e áreas continentais adjacentes, in Guilherme Pederneiras Raja Gabaglia e Edison José Milani. Origem e Evolução de Bacias Sedimentares. PETROBRAS, Rio de Janeiro. p. 361-376.

- Milani E. J., Brandão, J. A. S. L., Zalán, P. V., Gamboa, L. A. P., 2000. Petróleo na margem continental brasileira: Geologia, exploração, resultados e perspectivas. *Revista Brasileira de Geociências*, v.18(3).
- Milani, E. J., Thomaz Filho, A., 2000. Sedimentary basins of South America in Cordani U. G., Milani, E. J., Thomaz Filho, A., Campos, D. A., Tectonic evolution of South America, 31st International Geological Congress, p. 389-449.
- Mitchum Jr R.M., Vail P.R., Sangree J.B. 1977. Interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. *Seismic stratigraphy – Applications to hydrocarbon exploration*, vol. 26. AAPG, p. 117-133.
- Pereira, M.J., Feijó, F.J. 1994. Bacia de Santos. *Boletim de Geociências da PETROBRAS*, 8(1):219-234 in L. A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R. M. Vidotti e J. H. Gonçalves (eds.) , 2003. *Bacias Sedimentares da Margem Continental Brasileira. Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. Parte I*, cap. 3, CPRM.
- Pereira, M.J., Macedo, J.M. 1990. A Bacia de Santos: perspectivas de uma nova província petrolífera na plataforma continental sudeste brasileira. *Boletim de Geociências da PETROBRAS*, 4(1):3-11. in L. A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R. M. Vidotti e J. H. Gonçalves (eds.) , 2003. *Bacias Sedimentares da Margem Continental Brasileira. Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. Parte I*, cap. 3, CPRM.
- Pereira, M.J., Barbosa, C.M., Agra, J., Gomes, J.B., Aranha, L.G.F., Saito, M., Ramos, M.A., Carvalho, M.D., Stamato, M., Bagni, O. 1986. Estratigrafia da Bacia de Santos: análise das seqüências, sistemas deposicionais e revisão litoestratigráfica. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 34, Goiânia, Anais, 1:65-79.
- Prosser, S., 1993. Rift-related linked depositional systems and their seismic expression. In Williams, G. F. & Dobb, A. (eds), 1993. *Tectonics and Seismic Sequence Stratigraphy*. Geological Society Special Publication No. 71, p. 35-66.
- Schroeder W. Fred., 2011. An Introduction to the Hunt For Oil for Geoscientists not within Industry. Unit 13: Seismic Attributes. AAPG, Slide Resources.

Vail, P. R., R. M. Mitchum, and S. Thompson III, 1977, Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 3: Relative changes of sea level from coastal onlap, in C. W. Payton, ed., Seismic stratigraphy applications to hydrocarbon exploration: AAPG Memoir 26, p. 63 - 97

Wheeler, H.E., 1958, Time-stratigraphy: Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists, v. 42, no.5, p. 1045-1063.