

## **1- INTRODUÇÃO**

Esta dissertação de mestrado, do programa de Pós-Graduação da Faculdade de Geologia da Universidade Estadual do Rio de Janeiro, tem como tema central o estudo sismoestratigráfico dos carbonatos Terciários da porção sul da bacia de Santos, com ênfase na elaboração de modelos deposicionais carbonáticos.

A estratigrafia de seqüências é largamente utilizada nas análises estratigráficas de intervalos sedimentares, individualizando seções estratigráficas preferencialmente por fatores relacionados à sua gênese e cronologia a fatores faciológicos. Esta técnica foi concebida em seções sedimentares predominantemente siliciclásticas marinhas (Vail *et. al.*, 1977).

A aplicação dos conceitos e metodologias da estratigrafia de seqüências, na análise de seções carbonáticas, tem sido debatida com ênfase. A discussão é pertinente, uma vez que, ao contrário do caráter alóctones dos depósitos siliciclásticos, os carbonatos são sedimentos autóctones, resultantes das condições reinantes na própria bacia de sedimentação.

Com base na aplicação dos pressupostos da estratigrafia de seqüências, facilitado pela excelente qualidade dos dados sísmicos, foi realizado um estudo sistemático para entender como se processou o desenvolvimento da sedimentação siliciclástica/carbonática da porção sul da Bacia de Santos, durante o Mioceno..

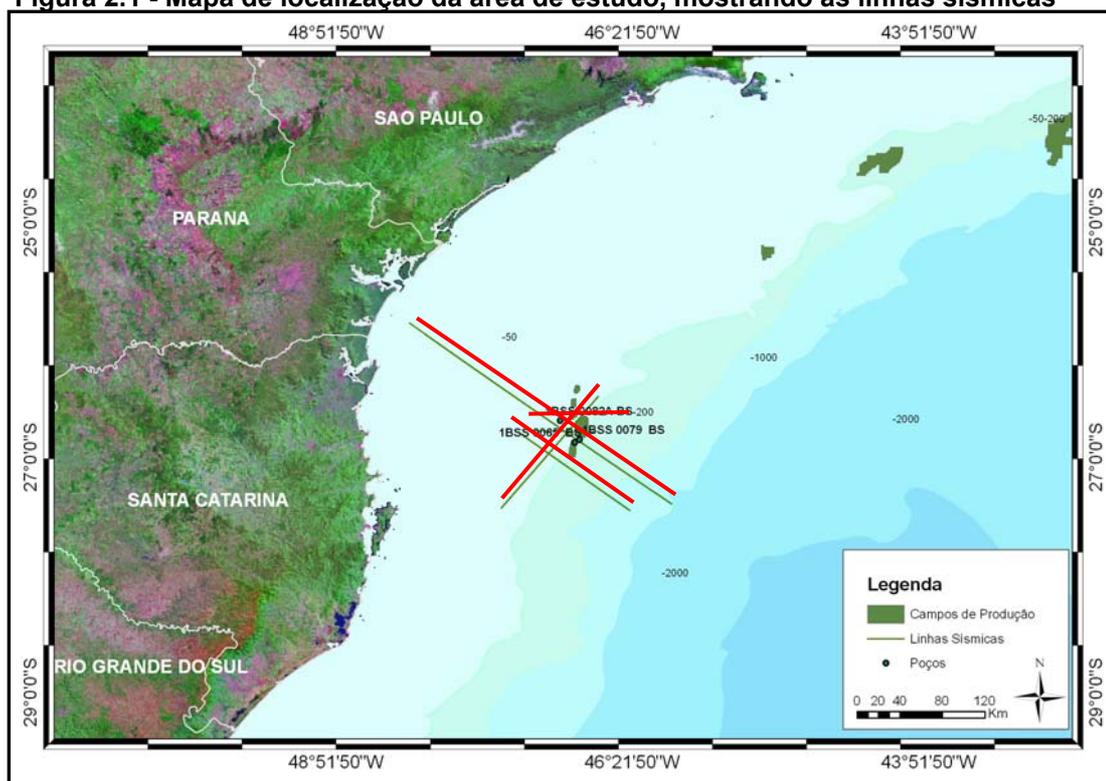
A plataforma carbonática Terciária está mais bem desenvolvida na porção sul da bacia de Santos. Em alguns locais, ela apresenta espessuras na ordem de 1.000 metros. Neste mesmo período, na região talude/bacia, ocorreu a deposição de espessas cunhas progradantes de sedimentos siliciclásticos (Severino, 2000). Este resultado indicou que, de alguma forma, esses sedimentos alcançaram as porções mais distais da área de estudo.

Para este estudo, foram utilizadas quatro linhas sísmicas e perfis geofísicos de três poços fornecidos pela Agência Nacional do Petróleo (ANP). Posteriormente, serão apresentados os dados utilizados neste trabalho, a metodologia utilizada, as limitações de cada método e a integração de todas as ferramentas, assim como a interpretação da evolução paleoambiental na área de estudo.

## 2 - ÁREA DE ESTUDO, DADOS UTILIZADOS E METODOLOGIA.

A área de estudo situa-se na porção sul da bacia de Santos, entre as zonas de transferência de Curitiba e de Florianópolis, no denominado embaiamento sul da bacia. Localizada quase totalmente na região da plataforma continental, a área abrange aproximadamente 5.000km<sup>2</sup>, em lâmina d'água variando de 100 a 500 metros (Figura 2.1).

**Figura 2.1 - Mapa de localização da área de estudo, mostrando as linhas sísmicas**



utilizadas.

Neste estudo, foi analisado o intervalo estratigráfico compreendido entre o início e o fim da sedimentação carbonática miocênica, amostrada sob a forma de seção condensada pelos poços BSS-065-BS, 1-BSS-079-BS e perfurada pelo poço 1-BSS-082A-BS. Nas linhas sísmicas utilizadas, a ênfase foi dada à seção em que as condições foram mais favoráveis ao desenvolvimento carbonático e permitiram a acumulação de aproximadamente 1.000 metros de rochas carbonáticas.

O banco de dados utilizado compreende uma malha sísmica (com quatro linhas) de reflexão multicanal, perfazendo aproximadamente 500 km

de amostragem linear, e dados de três poços, incluindo perfis geofísicos de raios gama e sônico (Figura 2.2).

Neste trabalho, o arcabouço estratigráfico será definido a partir da utilização integrada de diversas ferramentas de análise: sismoestratigrafia e análise de perfis geofísicos de raios gama e sônico.

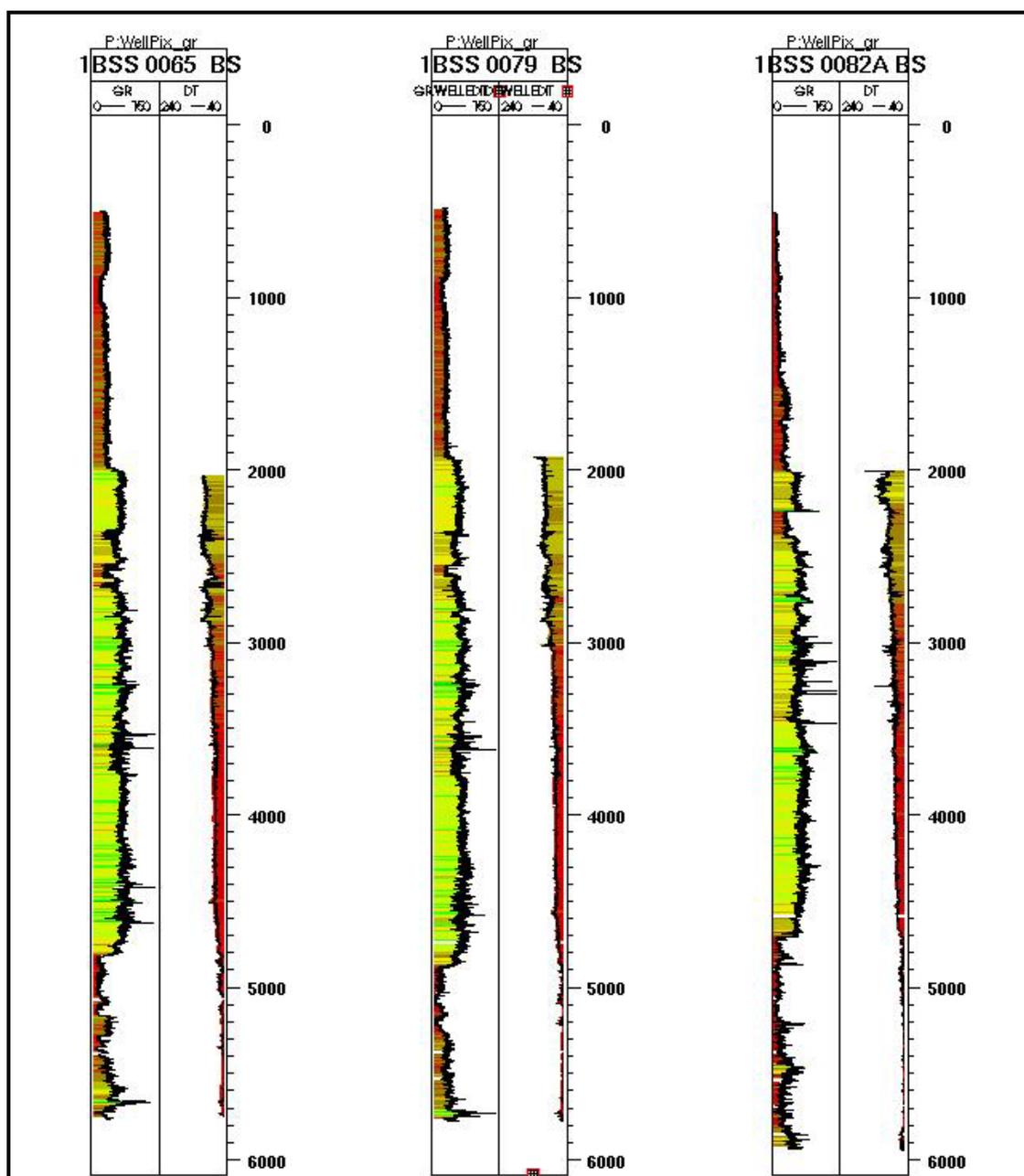


Figura 2.2 – Perfis geofísicos de raios gama e sônico dos poços.

A metodologia utilizada constituiu, primeiramente, de uma detalhada revisão bibliográfica, em referência a aspectos gerais da bacia de Santos,

assim como assuntos específicos da aplicabilidade da sismoestratigrafia em sistemas carbonáticos.

Para a interpretação e integração dos dados, a metodologia aplicada adotou-se, em linhas gerais, o procedimento proposto por Vail (1987):

- 1) análise das seqüências sísmicas;
- 2) análise das seqüências em perfis geofísicos;
- 3) correlação dos sismogramas sintéticos com os dados sísmicos e posicionamento temporal dos eventos observados;
- 4) análise das fácies sísmicas, buscando-se, neste momento, uma melhor definição;
- 5) interpretação das litofácies e ambientes deposicionais;
- 6) mapeamento e interpretação das seqüências.

A utilização de diversas ferramentas de análise estratigráfica possibilitou uma melhor caracterização e compreensão dos diversos fatores que influenciaram na deposição dos sedimentos, no intervalo estudado, tendo em vista as diversas escalas de resolução permitida por cada uma delas.

## **2.1 - Dados Sísmicos**

A malha sísmica utilizada compreende quatro linhas sísmicas de reflexão multicanal. A interpretação está concentrada no intervalo de 0 a 2.500 ms. As linhas foram nomeadas com o prefixo D-linhas *dip* (transversais) e S-linhas *strike* (longitudinais) e selecionadas de forma a compor perfis regionais, possibilitando uma visão espacial ampla da área de estudo (Figura 2.1).

A qualidade dos dados sísmicos disponíveis na área possibilita que os mesmos sejam utilizados como a ferramenta básica para a definição do arcabouço estratigráfico da seção estudada. A subdivisão do intervalo de estudo em seqüências sísmicas (Mitchum, 1977) foi realizada seguindo o procedimento padrão sugerido por Mitchum *et al.* (1977a).

A partir de uma análise inicial das linhas sísmicas, foram mapeadas as discordâncias regionais mais marcantes, definidas através de evidências de feições erosivas (truncamento erosional) e terminações em *downlap*, *onlap* e *toplap*. Posteriormente, partiu-se para a definição dos tratos de sistemas, também tendo como base as terminações de refletores, o seu posicionamento dentro da seqüência sísmica definida e a análise das fácies sísmicas.

A interpretação destes dados processou-se em duas escalas de trabalho: regional e de detalhe, conforme a qualidade permitida pelos dados. Inicialmente, procedeu-se uma interpretação em escala regional, utilizando seções em papel, com escala horizontal de 1:25.000 e vertical de 10cm / 1,0 s. Tal procedimento possibilitou a interpretação dos eventos regionais, limites de seqüência e de superfícies de inundação máxima, em toda a área de estudo bem como a subdivisão da seção estudada em seqüências deposicionais.

Com base na análise da configuração, amplitude e continuidade dos refletores buscou-se realizar uma caracterização das sismofácies que, integradas com os dados de poços, permitiram uma melhor compreensão da distribuição litofaciológica. Posteriormente, os dados foram carregados e interpretados em uma estação de trabalho para uma melhor visualização das terminações dos refletores, a fim de comprovar os limites preestabelecidos e possibilitar uma interpretação mais apurada em alguns intervalos estratigráficos.

## **2.2 - Dados de Poços**

Os dados de poços constam de perfis geofísicos de raios gama e sônico e das descrições das amostras de calha. Por tratar-se de uma seção

rasa e de pouco interesse para exploração de petróleo, tanto a amostragem litológica quanto a aquisição dos perfis geofísicos iniciou-se, em média, a partir dos 1000 metros, em geral dentro da seção estudada, mas não começando do início na seção. Isto dificultou a definição do término do desenvolvimento da deposição carbonática.

### 2.2.1 - Perfis de Raios Gama e Sônico

Os perfis de raios gama são importantes para a obtenção de informações quanto à variação faciológica, permitindo também, em outra escala de trabalho, definir as seqüências deposicionais e seus respectivos tratamentos de sistemas. Esta ferramenta mede a radiação natural emitida pelas rochas, refletida pelo conteúdo de potássio, urânio e tório, ou seja, reflete a argilidade contida nos poros das rochas. Em geral, os calcários apresentam valores baixos de raios gama; os arenitos, valores um pouco mais elevados; enquanto que margas, siltitos e folhelhos em ordem crescente, mostram os valores mais elevados de radioatividade.

De certa forma, os perfis de raios gama são de extrema importância para a definição das superfícies de inundação máxima (Anexo 1), variações faciológicas e a caracterização dos ciclos de raseamento (*shallowing-upward*), porque eles marcam a variação no conteúdo argiloso dos sedimentos.

O perfil sônico mede o tempo em que uma onda elástica compressional, emitida por uma fonte interna, leva para percorrer uma determinada distância da rocha sob investigação. A grandeza medida, denominada de tempo de trânsito, é inversamente proporcional à velocidade sísmica da rocha, geralmente expressa em microssegundos por pé.

Do perfil sônico podem-se obter informações quanto à litologia, uma vez que existem diferenças de velocidade (V) entre carbonatos (V mais alta), arenitos (V intermediária) e folhelhos (V baixa). Diferenças de porosidade e o tipo de fluido que preenchem os poros das rochas também causam

mudanças na velocidade sísmica. O perfil sônico é particularmente importante para a confecção de sismogramas sintéticos, que permitem integrar os dados de poços às seções sísmicas. Desta forma, podem-se correlacionar padrões de sismofácies com dados litológicos.

### 3 - GEOLOGIA REGIONAL

A bacia de Santos, totalmente imersa, está localizada na porção sudeste da margem continental brasileira, em frente aos estados do Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná e Santa Catarina, entre os paralelos 23°S e 28°S. Ela figura entre as maiores bacias sedimentares do Brasil. Ao norte, está limitada pelo Alto de Cabo Frio e, ao sul, pela Plataforma de Florianópolis / Dorsal de São Paulo, feições que a separam da bacia de Campos e da bacia de Pelotas, respectivamente (Figura 3.1). A área total da bacia é de 352.260 km<sup>2</sup>, dos quais 150.760 km<sup>2</sup>, 20.750 km<sup>2</sup> e 180.750 km<sup>2</sup> correspondem às áreas situadas entre as cotas batimétricas de 0-400m, 400-1000m e 1.000-3.000m, respectivamente (Severino, 2000).

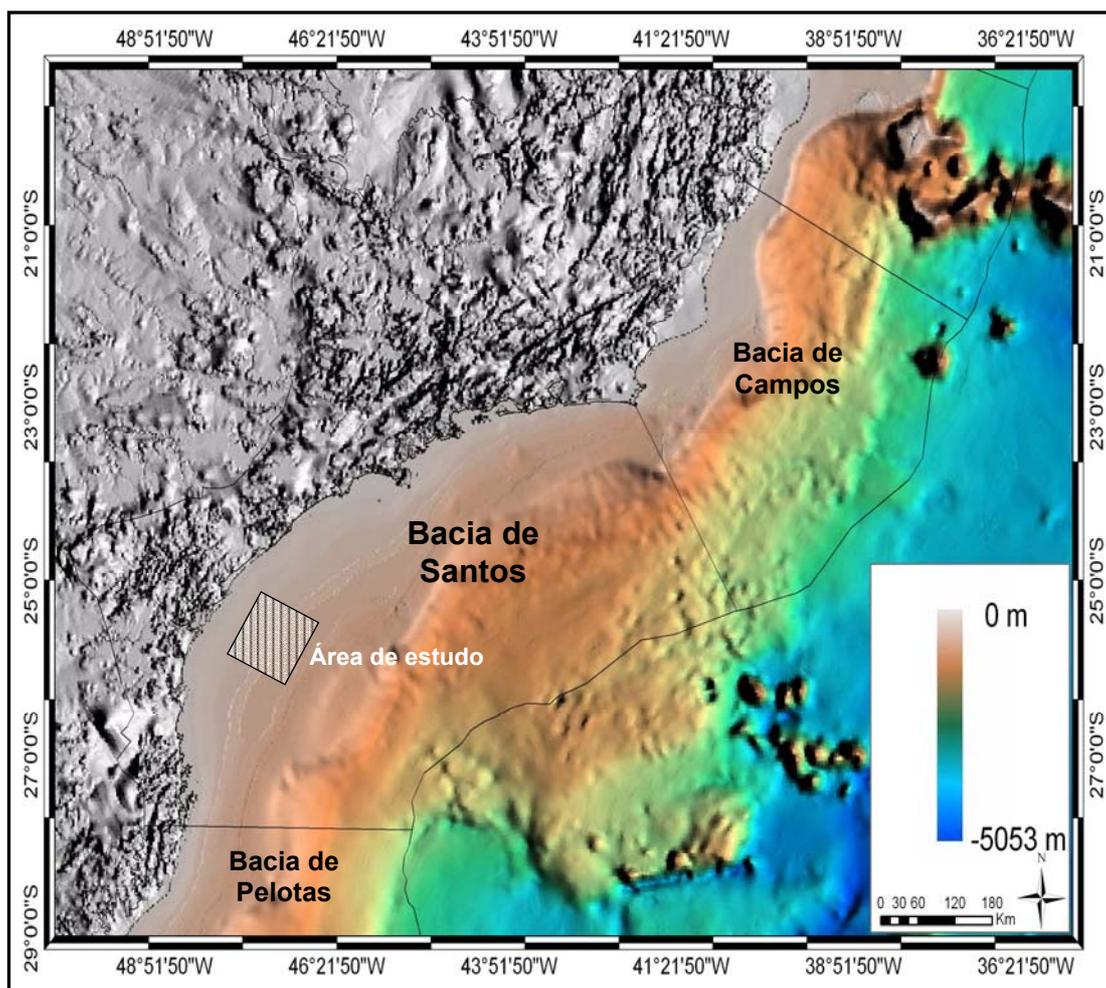


Figura 3.1 - Figura de localização da bacia de Santos (mapa batimétrico, Mohriak, 2004). Observa-se ao sul da bacia de Santos a área de estudo.

### 3.1 - Evolução Tectono-sedimentar

A bacia de Santos, da mesma forma que as demais bacias marginais brasileiras, tem sua origem ligada aos processos tectônicos que causaram a ruptura e a separação do Supercontinente Gondwana durante o Juro-Cretáceo.

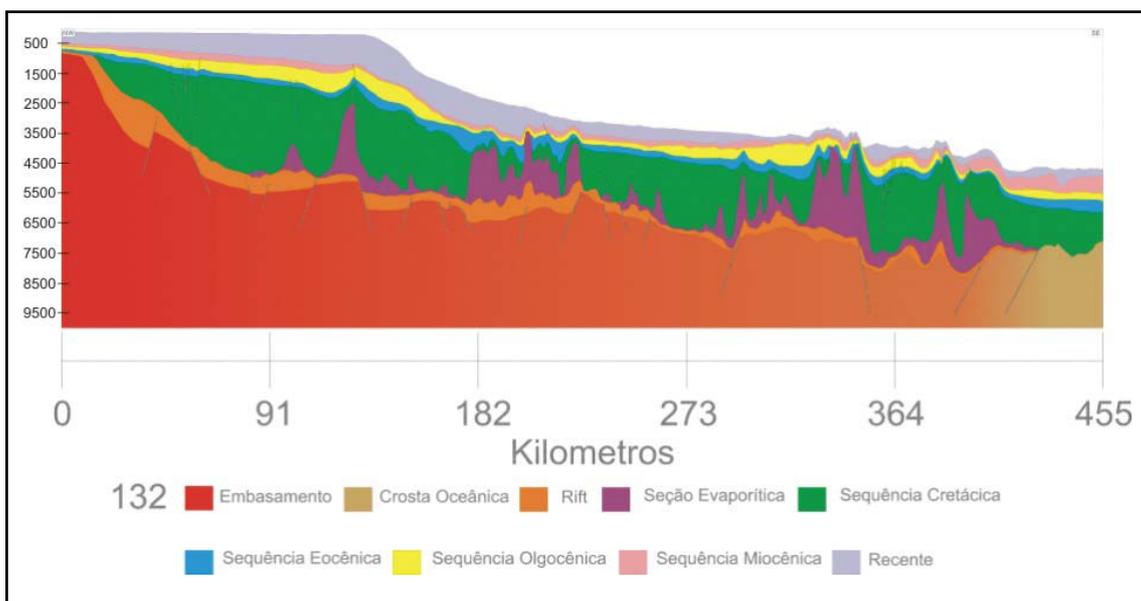
Em termos estruturais, a bacia apresenta dois estilos tectônicos distintos: o inferior, representado pela seqüência rifte, e o superior, referente às seqüências transicional e drifte. O primeiro estilo é caracterizado por uma sucessão de “*horsts*” e “*grabens*”, cujo padrão e litologias ainda são pouco conhecidos, à exceção de suas partes mais rasas proximais, onde a seqüência rifte foi perfurada. As recentes campanhas de aquisição sísmica obtiveram dados de boa resolução, principalmente abaixo da seção evaporítica, que contribuiu para a definição do comportamento da fase rifte nas partes mais distais da bacia. Uma importante feição estrutural é a Charneira de Santos, cujo traçado acompanha a configuração da linha de costa e que constitui o limite oeste da sedimentação cretácea na bacia, segundo Pereira *et al.* (1986).

O processo de rifteamento teve início durante o Jurássico, com uma intumescência termal na região sudeste brasileira, que causou expressivas mudanças na reologia da crosta nesta área, fazendo com que um maior volume dela se envolvesse no processo distensivo que se sucedeu. Esta anomalia termal justificaria a ocorrência de uma grande extensão de crosta continental totalmente estirada e intrudida por vulcanismo, conhecida como Platô de São Paulo (Macedo, 1990).

Após a separação efetiva dos continentes, com a formação da crosta oceânica, teve início a fase de subsidência termal na bacia, causando um basculamento generalizado da mesma. Durante o Albiano (113 Ma), uma inundação marinha ocorreu em toda a bacia, com o desenvolvimento de uma ampla rampa carbonática. Na porção proximal desta rampa carbonática, ocorrem depósitos de leques aluviais e deltaicos, organizados em um

cinturão ao longo da Charneira de Santos (Pereira *et al.*, 1986), que indicam pequenas movimentações tectônicas na região continental adjacente (Macedo, 1990).

Durante o período de deposição dos carbonatos da Formação Guarujá, começaram os processos de escorregamentos gravitacionais sobre o sal, dando início à halocinese na bacia (figura 3.2). Os altos formados pela halocinese condicionaram o desenvolvimento das plataformas albianas.



**Figura 3.2 - Seção geológica regional. Soares (2005).**

Durante o Cenomaniano e o Turoniano, a bacia passou por uma fase predominantemente fúmbria em resposta à subsidência tectônica e à elevação do nível do mar, culminando no Turoniano com uma grande invasão marinha. Ao final do Turoniano, as bordas da bacia foram soerguidas, esculpindo-se uma proeminente discordância e dando início a um grande aporte clástico (Gambôa *et al.*, 1994).

No Neocretáceo, quatro episódios fortemente regressivos preencheram a bacia, fazendo com que a linha de costa avançasse significativamente mar adentro (Pereira *et al.*, 1986; Pereira & Feijó, 1994). Estes fortes pulsos sedimentares estão associados a expressivas movimentações da área adjacente (Serra do Mar). Estas reativações fizeram

---

com que, enquanto ocorria uma tendência generalizada de subida relativa do nível do mar ao longo das bacias costeiras brasileiras, em Santos, o soerguimento da área fonte e o grande aporte sedimentar compensassem essa tendência de subida do nível do mar e mantivessem a bacia em um ambiente continental e de mar raso (Macedo, 1990).

Os sedimentos siliciclásticos depositados no Terciário da bacia de Santos são de granulometria bem mais fina do que os depositados no Cretáceo Superior. Segundo Macedo (1990), a sedimentação mais grossa teria sido capturada pela drenagem do Rio Paraíba do Sul que, até hoje, deságua na bacia de Campos. Esta seria a razão pela qual o Terciário da bacia de Campos é mais expressivo do que na bacia de Santos, ocorrendo situação inversa com o pacote do Cretáceo Superior. O desvio dos sedimentos mais grosseiros estaria relacionado à formação das bacias continentais terciárias de Taubaté e Resende, através da reativação de movimentos horizontais e verticais do Cinturão Ribeira. Existem evidências de vulcanismo básico, nesta época, na bacia de Campos (Lobo *et al.*, 1983 *apud* Macedo, 1990) e na bacia de Santos (Pereira *et al.*, 1986), que são correlacionáveis a pulsos distensivos na região e à formação de pequenas bacias terciárias. Em consequência destes grandes movimentos tectônicos na área continental, uma importante drenagem de direção NE encaixou-se no continente (atual Rio Paraíba do Sul), e foi responsável pelo desvio da sedimentação em direção à bacia de Campos.

Observa-se um maior detalhamento da carta estratigráfica para o Cretáceo devido aos estudos geológicos na bacia e, conseqüentemente, às investigações exploratórias que se iniciaram a partir da década de sessenta, refletindo, de certa maneira, o interesse exploratório (Figura 3.3).



Uma grande discordância regional marca o limite Paleoceno/ Eoceno. Esta discordância foi gerada por importantes eventos de queda do nível do mar no Neo-Paleoceno. Tratos de mar baixo marcam a parte inferior do Eoceno. Nas seções sísmicas, são evidentes progradações em tratos de mar alto e em tratos de mar baixo, estes últimos com *offlaps* de regressão forçada.

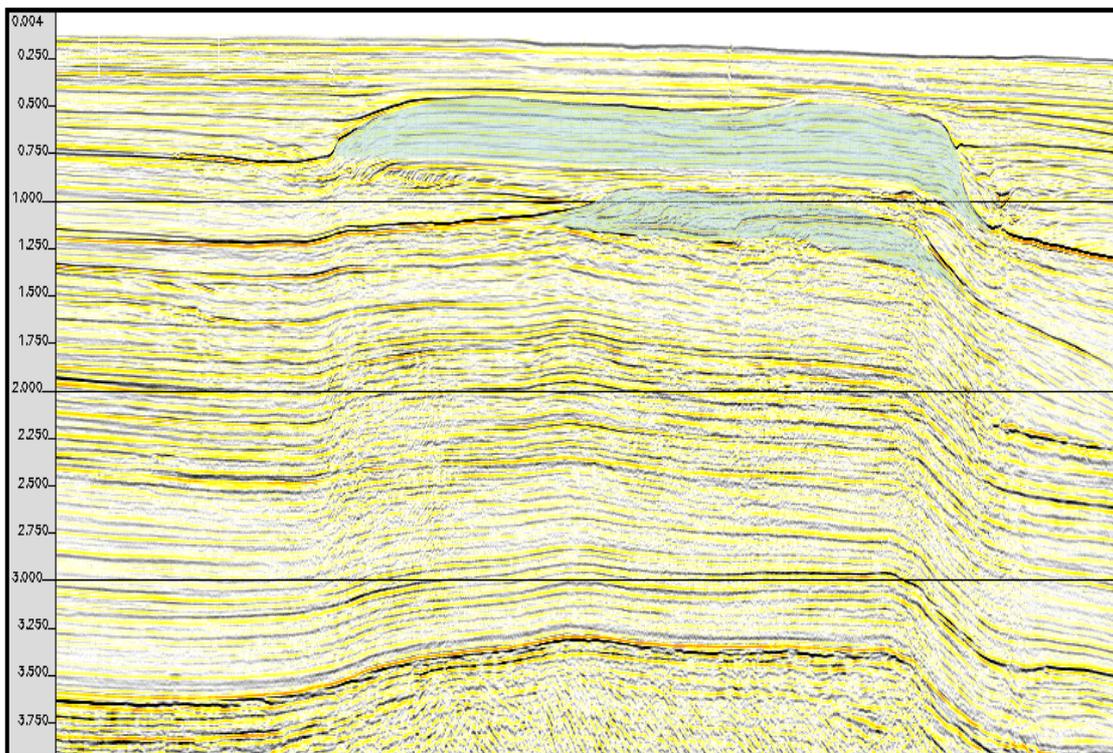
A partir do Oligoceno, nas partes centrais e sul da bacia de Santos, onde é pequeno o aporte de sedimentos terrígenos, plataformas carbonáticas desenvolveram-se em resposta às elevações do nível do mar e às condições oceanográficas vigentes (Gambôa *et al.*, 1994).

A seção estratigráfica do Oligoceno Inferior é transgressiva, com desenvolvimento de plataforma mista siliciclástica-carbonática. Trata-se de transgressão generalizada, havendo o recobrimento em *onlap* costeiro de áreas muito proximais da plataforma, com sobreposição direta sobre o embasamento Pré-Cambriano. Em alguns casos, o *onlap* é sobre superfície aplainada e em outros, sobre superfície aplainada com relevos residuais, tipo *inselbergs*.

Apesar de pequenos avanços e recuos dos sistemas deltaicos, a linha de costa permaneceu durante o intervalo de tempo Neo-Oligoceno/Eo-Mioceno, aproximadamente na posição da atual quebra da plataforma. A existência de padrões de terminação de estratos em *onlap* costeiro sobre a plataforma, durante a deposição da seqüência, indica que o nível relativo do mar continuou subindo.

O preenchimento, na bacia de Santos, é complexo por esta apresentar fisiografia de plataforma e talude, havendo recorrência de plataformas siliciclásticas (Formação Marambaia) e carbonáticas (Formação Iguape), resultado de flutuações climáticas e do nível do mar, decorrentes de ciclos globais de glaciação. As plataformas carbonáticas da Formação Iguape são bem desenvolvidas na parte sul da bacia, apresentando assinaturas características em seções sísmicas (figura 3.4). Construções recifais como

as que ocorrem próximas aos poços 1-BSS-065-BS, 1-BSS-079-BS e 1-BSS-082A-BS causam *pull up* dos refletores abaixo.



**Figura 3.4 - Seção mostrando as construções recifais e o efeito *pull-up* dos refletores abaixo.**

Os carbonatos foram formados, principalmente, nos períodos de clima mais quente e de nível do mar em elevação, quando o aporte terrígeno foi reduzido. Em períodos glaciais, o nível do mar em queda promoveu exposição das plataformas e passagem de terrígenos para além das margens externas das plataformas carbonáticas, que geraram sistemas turbidíticos no talude e sopé continental.

Sobre os depósitos turbidíticos de águas profundas progradaram deltas de tratos de sistemas de mar baixo, promotores de acentuada regressão marinha. Seus prodeltas são espessos e íngremes, freqüentemente sujeitos a escorregamentos e falhas lítricas com crescimento. Movimentos de massa produziram também fluxos de detritos e correntes de turbidez, gerando fácies produzidas por fluxos gravitacionais no prodelta. Foram os deltas de borda de plataforma que ocuparam espaço de

acomodação criado na frente das plataformas carbonáticas. Nas seções, são nítidas as terminações em *downlap* sobre o limite inferior das seqüências deposicionais e, em *onlap*, contra o edifício de rochas carbonáticas. A seqüência ocorre também em águas profundas, onde estratos neomiocênicos jazem subparalelamente, em discordância, sobre estratos de diferentes idades, freqüentemente deformados pela tectônica salífera.

Neste trabalho, procurou-se definir, com maior detalhe, como se processou o desenvolvimento da sedimentação carbonática-siliciclática da formação Marambaia, durante o intervalo miocênico.