

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

INTERPRETAÇÃO DE DADOS DE GPR COM BASE NA HIERARQUIZAÇÃO DE SUPERFÍCIES LIMITANTES E NA ADAPTAÇÃO DE CRITÉRIOS SISMOESTRATIGRÁFICOS

Autor:

Peryclys Raynyere de Oliveira Andrade

Orientador:

Prof. Dr. Walter Eugênio de Medeiros

Dissertação N° 44 /PPGG

Natal, 29 de Maio de 2005.



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



PROGRAMA DE RECURSOS HUMANOS DA ANP PARA O SETOR PETRÓLEO GÁS

PRH 22-ANP/MME/MCT



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

INTERPRETAÇÃO DE DADOS DE GPR COM BASE NA HIERARQUIZAÇÃO DE SUPERFÍCIES LIMITANTES E NA ADAPTAÇÃO DE CRITÉRIOS SISMOESTRATIGRÁFICOS

Autor:

Peryclys Raynyere de Oliveira Andrade

Dissertação Apresentada à
Universidade Federal do Rio
Grande do Norte como
requisito à obtenção do grau
de MESTRE em Geofísica.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Walter Eugênio de Medeiros (Orientador / DFTE/PPGG – UFRN)

Profa. Dra. Valéria Centurion Córdoba (Examinador Interno – DG/PPGG – UFRN)

Dr. Paulo Johann (Examinador Externo – PETROBRAS)

Natal, 29 de Maio de 2005.

RESUMO

O Radar Penetrante no Solo (*Ground Penetrating Radar* – GPR) tem sido utilizado para mapear em detalhe depósitos sedimentares, devido à sua alta resolução. Pelo fato de que os métodos GPR e Sísmico têm princípios de formação de imagens muito semelhantes, o modelo clássico de interpretação sísmica, baseado na sismoestratigrafia, tem sido tentativamente utilizado para interpretar dados de GPR. Não obstante os grandes avanços já realizados em contextos particulares, as adaptações propostas das ferramentas e conceitos da sismoestratigrafia, para o GPR, ainda são inadequadas; isto acontece basicamente porque as interpretações atribuídas aos padrões de terminação, extraídos da sismoestratigrafia convencional, não representam o registro geológico na escala de operação do GPR. O problema conceitual reside, pois, em propor um método de interpretação que permita não só relacionar produto e processo sedimentar, na escala do GPR, mas também identificar ou propor ambientes deposicionais e correlacionar estes resultados com os blocos construtores da Estratigrafia de Seqüências. O objetivo desse trabalho é propor uma metodologia de interpretação de dados de GPR capaz de realizar esta tarefa, pelo menos no contexto de depósitos siliciclásticos. Para este fim, propõe-se uma interpretação de dados de GPR, baseada na adaptação de termos e conceitos herdados da sismoestratigrafia, em conjunto com uma metodologia de hierarquização de superfícies limitantes (*bounding surfaces*), a exemplo da metodologia proposta por Miall (1988). Como consequência direta desta combinação, a interpretação dos dados de GPR pode ser associada às fácies sedimentares, dentro de um contexto genético, possibilitando assim: (i) individualizar as radarfácies e correlacioná-las às fácies sedimentares, com base em modelos de fácies sedimentares; (ii) caracterizar um determinado sistema deposicional e, principalmente, (iii) determinar seu arcabouço estratigráfico, mostrando como ele evoluiu no tempo geológico. Para exemplificar a utilização desta metodologia de interpretação foram utilizados os dados de GPR adquiridos na área de Galos, que faz parte do *spit* de Galinhos, localizado no Estado do Rio Grande do Norte. Este *spit* apresenta grande variedade lateral de fácies sedimentares e contém registros sedimentares que são sensíveis às variações de frequência mais alta do nível relativo do mar (ciclos de 4^a a 6^a ordens). O processo de interpretação constou das seguintes fases: (i) estabelecimento de uma sucessão

vertical de fácies, (ii) caracterização dos produtos sedimentares (radarfácies), (ii) atribuição de processos sedimentares dentro de um cunho genético, e finalmente (iv) estabelecimento de um modelo evolutivo para o *spit* de Galinhos. O modelo propõe que este *spit* constitui um sistema do tipo Ilhas Barreiras que é materializado, da base para o topo, por fácies de estreito de maré (*tidal inlet*), fácies de planície de maré, fácies de praia e fácies eólica (dunas). A fácies de estreito de maré, na base, é representada por barras de acreção lateral que preencheram os estreitos de maré. Estes depósitos são truncados lateralmente pela fácies de planície de maré. Na zona de intermaré antiga, a fácies de intermaré encontra-se sobreposta pela fácies de praia, marcando assim um avanço relativo da linha de costa. Por fim, no topo da coluna estratigráfica, estão depositadas dunas eólicas, denotando o recuo da linha de costa e conseqüente exposição aérea.

Palavras chaves: GPR, radarfácies, fácies sedimentares, sismoestratigrafia, superfícies limitantes, estratigrafia de seqüências.

ABSTRACT

Due to its high resolution, Ground Penetrating Radar (GPR) has been used to image subsurface sedimentary deposits. Because GPR and Seismic methods share some principles of image construction, the classic seismostratigraphic interpretation method has been also applied as an attempt to interpret GPR data. Nonetheless some advances in few particular contexts, the adaptations from seismic to GPR of seismostratigraphic tools and concepts unsuitable because the meaning given to the termination criteria in seismic stratigraphy do not represent the adequate geologic record in the GPR scale. Essentially, the open question relies in proposing a interpretation method for GPR data which allow not only relating product and sedimentary process – in the GPR scale – but also identifying or proposing depositional environments and correlating these results with the well known Sequence Stratigraphy cornerstones. The goal of this dissertation is to propose an interpretation methodology of GPR data able to perform this task at least for siliciclastic deposits. In order to do so, the proposed GPR interpretation method is based both on seismostratigraphic concepts and on the bounding surface hierarchy tool from Miall (1988). As consequence of this joint use, the results of GPR interpretation can be associated to the sedimentary facies in a genetic context, so that it is possible to: (i) individualize radar facies and correlate them to the sedimentary facies by using depositional models; (ii) characterize a given depositional system, and (iii) determine its stratigraphic framework highlighting how it evolved through geologic time. To illustrate its use the proposed methodology was applied in a GPR data set from Galos area which is part of the Galinhos spit, located in Rio Grande do Norte state, Northeastern Brazil. This spit presents high lateral sedimentary facies variation, containing in its sedimentary record from 4th to 6th cycles caused by high frequency sea level oscillation. The interpretation process was done throughout the following phases: (i) identification of a vertical facies succession, (ii) characterization of radar facies and its associated sedimentary products, (iii) recognition of the associated sedimentary process in a genetic context, and finally (iv) proposal of an evolutionay model for the Galinhos spit. This model proposes that the Galinhos spit is a barrier island constituted, from base to top, of the following sedimentary facies: tidal channel facies, tidal flat facies, shore facies, and aeolic facies (dunes). The tidal channel facies, in the base, is constituted of lateral accretion bars and filling deposits of

the channels. The base facies is laterally truncated by the tidal flat facies. In the foreshore zone, the tidal flat facies is covered by the shore facies which is the register of a sea transgression. Finally, on the top of the stratigraphic column, aeolic dunes are deposited due to areal exposition caused by a sea regression.

Keywords: GPR, radar facies, sedimentary facies, bounding surfaces, sismostratigraphy, sequence stratigraphy.

DEDICATÓRIA

*Aos meus familiares: pais, filhos e,
principalmente, a minha esposa
por todo apoio e paciência.*

AGRADECIMENTOS

Expresso aqui os meus profundos agradecimentos a todos os meus familiares, e em especial: aos meus pais, Raimundo Andrade Sobrinho e Auxiliadora Maria de Oliveira Andrade, que “seguraram a barra” e tornaram possível a conclusão desse trabalho; a minha esposa – Kalina Alessandra – simplesmente por existir e por fazer parte de minha vida como se fosse um pedaço de mim; e claro, aos meus filhos (Lucas e Larissa) que são a minha fonte de inspiração, de força, e o norte das minhas decisões.

Ao Professor e amigo Dr. Walter Eugênio de Medeiros pela orientação, assim como por toda atenção, dedicação profissional, e pioneirismo por ter acreditado no autor deste trabalho, desde os tempos de Graduação. Sempre “elogiando” veementemente a “persistência” do seu orientando, algumas vezes chamado de teimoso (injustamente, claro!). Mas, como você sempre diz professor: “*Nem tudo está perdido*”! E lembre-se: “*O orientando é o espelho do orientador*”!

Ao Geofísico e amigo, Pedro Xavier Neto pelo apoio na aquisição, processamento e interpretação de dados de GPR. Espero não ter contribuído muito para a sua calvície.

Ao colega Josibel Gomes de Oliveira Junior pela herança dos dados de GPR adquiridos em Galos.

À ANP também pelo apóio financeiro e pela concessão da bolsa de MsC, paga durante dois anos, sem a qual este pobre aluno não estaria aqui.

À Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG) pela estrutura disponibilizada e alta qualidade dos cursos oferecidos.

ÍNDICE

RESUMO	III
ABSTRACT	V
DEDICATÓRIA	VII
AGRADECIMENTOS	VIII
ÍNDICE	IX
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XIII
CAPÍTULO I – CONTEXTOS GEOGRÁFICO E GEOLÓGICO DA ÁREA DE TRABALHO	14
1.1 – INTRODUÇÃO	14
1.2 – OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS	14
1.3 – LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO	16
1.4 – GEOLOGIA REGIONAL: EMBASAMENTO E BACIA POTIGUAR	17
1.5 – O REGISTRO QUATERNÁRIO	20
1.6 – CONTEXTO GEOLÓGICO LOCAL: O <i>SPIT</i> DE GALINHOS	23
1.7 – AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS DE GPR	26
CAPÍTULO II - INTERPRETAÇÃO DE DADOS DE GPR COM BASE NA HIERARQUIZAÇÃO DE SUPERFÍCIES LIMITANTES E NA ADAPTAÇÃO DE CRITÉRIOS SISMOESTRATIGRÁFICOS	31
2.1 – APRESENTAÇÃO	31
2.2 – INTERPRETAÇÃO DE DADOS DE GPR COM BASE NA HIERARQUIZAÇÃO DE SUPERFÍCIES LIMITANTES E NA ADAPTAÇÃO DE CRITÉRIOS SISMOESTRATIGRÁFICOS	32
2.3 – RESUMO	33
2.4 – INTRODUÇÃO	34
2.5 – CONTEXTO GEOLÓGICO UTILIZADO PARA EXEMPLIFICAR A METODOLOGIA	35

2.6 – CONSTRUÇÃO DA METODOLOGIA DE INTERPRETAÇÃO: EXEMPLO DO	
 <i>SPIT</i> DE GALINHOS	37
2.6.1 – Critérios de Interpretação Propostos	38
2.6.2 – Tipos de Terminações dos Estratos e seus Significados	40
2.6.2.1 – Truncamentos Erosivos e Estrutural	41
2.6.2.2 – Terminações com o Limite Inferior	41
2.6.2.3 – Terminações com o Limite Superior	42
2.6.3 – Radarfácies e suas Principais Configurações	42
2.6.4 – <i>Offlaps</i> , Convergência Interna e Truncamentos Aparentes	43
2.7 – HIERARQUIA DAS REFLEXÕES	43
2.8 – CARACTERIZAÇÃO E CORRELAÇÃO DAS RADARFÁCIES ÀS FÁCIES	
 SEDIMENTARES	47
2.9 – CONCLUSÕES E DISCUSSÕES	48
2.9.1 – Da Metodologia	48
2.9.2 – Dos resultados obtidos em Galos	49
2.9.3 – Das sugestões de utilização	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1 – Mapa de localização e acesso da área de estudo (Compilado de Lima, 2004).* 17
- Figura 1.2 – Arcabouço tectônico da Província Borborema (Simplificado de Jardim de Sá, 1994).* 18
- Figura 1.3 – Mapa de localização da Bacia Potiguar (Soares, 2000).* 19
- Figura 1.4 – Carta Estratigráfica da Bacia Potiguar segundo Araripe e Feijó (1994). (in Soares, 2000).* 21
- Figura 1.5 – Fotografia destacando a atuação dos ventos de E para W e de ENE para WSW, formando marcas onduladas assimétricas (migração de barras de cristas sinuosas). A ponta da colher de pedreiro indica o Norte (Andrade, 2003).* 24
- Figura 1.6 – Fotografias aéreas realizadas de ultraleve mostrando a predominância da maré vazante, interpretado a partir da geometria das barras de maré destacadas nas fotos acima (Adaptado de Lima 2004).* 25
- Figura 1.7 – Diagrama que mostra geração de correntes de deriva litorânea devido à aproximação das ondas (Andrade, 2003).* 26
- Figura 1.8 – Localização e disposição das seções de GPR. (a) Foto aérea do spit de Galinhos-RN, na qual está destacada a área de estudo. Em (b), localização e disposição das seções GPR (malhas de aquisição).* 27
- Figura 2.1 – Mapa Geológico do spit de Galinhos (NE – Basil), onde está situada a área de trabalho de Galos (simplificado de Lima, 2004).* 51
- Figura 2.2 – Em (a), foto aérea de 1988 do spit de Galinhos-RN, na qual está destacada a área de estudo. Em (b), ampliação com disposição da malha de aquisição das seções GPR.* 52
- Figura 2.3 – Resumo dos principais padrões de terminação de estratos utilizados na Sismoestratigrafia. Em cada figura está mostrado um recorte real de uma seção de GPR adquirida em Galos, juntamente com um esquema interpretativo. Dentro dos parênteses, abaixo de cada padrão de reflexão, está indicada a linha de GPR onde ele foi observado.* 53
- Figura 2.4 – Exemplos de terminações de estratos (truncamento erosivo, downlap, onlap e toplap) e suas relações com as superfícies de truncamento aparente, bem como exemplos de padrões de convergência Interna e padrões em offlaps. A superfície de truncamento aparente está marcada pela linha de cor amarela. Note as terminações em downlap na base e em toplap no topo (linhas laranja). Em azul, destacam-se os refletores que mostram convergência interna. As superfícies em verde destacam os padrões de truncamento erosivo. As superfícies em vermelho destacam os padrões de terminação em onlap e, as superfícies em marrom, o padrão em offlap.* 54
- Figura 2.5 – Modelo de hierarquização das superfícies limitantes com base num sistema deposicional fluvial (Adaptado de Miall, 1996).* 55
- Figura 2.6 – Exemplos de superfícies limitantes de 5ª ordem. Note como as superfícies de 5ª ordem, em geral, se mostram como reflexões contínuas e bem marcadas, embora possam exibir trechos onde a amplitude do sinal é menor, dificultando sua identificação. É possível identificá-las em função dos padrões de terminação em downlap (A), toplap (B) ou truncamentos (C), dos estratos sobre as mesmas, como mostrados nas áreas indicadas pelas elipses vermelhas. Observe também que as reflexões das superfícies limitantes, neste caso, diferenciam-se da reflexão causada pelo nível freático porque esta última trunca indistintamente todas as demais, como mostrado nas áreas destacadas pelas elipses em amarelo.* 56

Figura 2.7 – Exemplos de superfícies limitantes de 4ª ordem. Aumentando o nível de detalhe da figura 2.6, nota-se que, dentro dos conjuntos de reflexão separados por superfícies de 5ª ordem, existem subconjuntos de reflexões. Dentre estes, destaque para as relações de truncamento entre as calhas dos canais de maré, sugerindo um processo de avulsão (migração lateral de canais) desses canais. Nas fácies de praia e de planície de maré também podem ser identificadas superfícies limitantes de 4ª ordem. No primeiro caso elas estão relacionadas a processos de progradação das fácies de praia (zona de estirâncio), associada com o recuo da linha de costa, e, no segundo caso, com a instalação do canal de maré atual. Note como os conjuntos de superfícies de 4ª ordem estão invariavelmente limitados pelas superfícies de 5ª ordem, em geral, por uma relação de truncamento, como destacado no retângulo amarelo.

57

Figura 2.8 – Exemplos de superfícies limitantes de 3ª ordem. Aumentando o nível de detalhe da figura 2.7, nota-se que, dentro dos conjuntos de reflexão separados por superfícies de 4ª ordem, existem subconjuntos de reflexões. A associação da fácies de estreitos de maré está relacionada às barras de acreção lateral, indicando um processo de migração individual dos estreitos de E para W. Destacam-se também, como limites de 3ª ordem, as superfícies de preenchimento dos estreitos de maré (complexo ou divergente), geradas pelo abandono de suas calhas e posterior comatação. Na fácies de planície de maré, a deposição provavelmente se deu num regime de fluxo mais calmo, e, por isso, as reflexões tendem a ter um padrão mais acamadado. Nas fácies de praia, as superfícies de 3ª ordem são laminações de baixo ângulo ($<15^\circ$), relacionadas às estratificações cruzadas de praia, geradas por processos de deposição das ondas. Elas mostram uma tendência de acreção de material sedimentar à linha de costa. Na fácies eólica, as superfícies de 3ª ordem estão relacionadas às superfícies de reativação das dunas, separando-as em gerações.

58

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Correlação esquemática entre a magnitude das superfícies limitantes, definidas por Miall (1985, 1988 e 1996), e os ciclos da Estratigrafia de Seqüência, exibidos na mesma escala de tempo. Também são descritos alguns processos sedimentares condizentes com a magnitude da escala de tempo no qual eles ocorrem, correspondentes às colunas A, B e C, que foram simplificados de Miall (1996). Foram adicionadas, de forma esquemática a esta tabela, as colunas D, E e F, que correspondem, respectivamente, à limites de resolução da sísmica de reflexão (D), do GPR (E) e de dados de afloramentos (F). Note que o GPR pode funcionar como elo de transição entre as escalas da sísmica e dos dados de afloramento ou de poços.

61

CAPÍTULO I – CONTEXTOS GEOGRÁFICO E GEOLÓGICO DA ÁREA DE TRABALHO

1.1 – INTRODUÇÃO

A eficiência do radar penetrante no solo (GPR, sigla em inglês para *Ground Penetrating Radar*) para imagear o subsolo, com alta resolução, para profundidades rasas, tem sido utilizada numa enorme variedade de aplicações desde a década de 80 (Olhoeft, 2000). Dentre estas, destaca-se a utilização, cada vez mais freqüente, do GPR no mapeamento geológico de depósitos sedimentares. Pelo fato de que os métodos GPR e Sísmico têm produtos de imagens muito semelhantes, o modelo clássico de interpretação sísmica tem sido constantemente utilizado como base para interpretar dados de GPR, a exemplo de Weimer, *et al.* (1982), Huggenberger (1993), Gawthoper *et al.* (1993), Bristow (1995), Van Overmeeren (1998) e Daniels (2000). Não obstante o grande avanço já realizado, as tentativas de adaptar as ferramentas e conceitos da sismoestratigrafia para a escala do GPR ainda carecem de uma sistematização que precisa ser baseada na relação entre produto e processo sedimentar e deve ser correlacionável à Estratigrafia de Seqüências. Em geral, os métodos de interpretação propostos e os resultados obtidos possuem validade geográfica restrita e não aprofundam a discussão dos processos genéticos da sedimentação e sua respectiva resposta no registro do sinal de GPR. A princípio, isto se deve ao fato de que, por uma questão de escala, as interpretações atribuídas aos padrões de terminação extraídos da sismoestratigrafia convencional não representam o registro geológico na escala de operação do GPR e, também, devido à utilização de seções pobres em processamento ou até mesmo não processadas.

1.2 – OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

O objetivo desse trabalho é contribuir com a metodologia de interpretação de dados de GPR, propondo e discutindo critérios de interpretação capazes de evidenciar, através dos dados de GPR, as relações entre produto e processo sedimentar, identificar os sistemas deposicionais e, quando possível, correlacioná-los aos blocos construtores da Estratigrafia de Seqüências. Para este fim, propomos basear os

critérios de interpretação dos dados de GPR na adaptação de termos e conceitos herdados da sismoestratigrafia (Mitchum *et al.*, 1977 a,b,c), combinados com a hierarquização das Superfícies Limitantes (*bounding surfaces*), a exemplo da metodologia proposta por Miall (1985, 1988, 1991, 1996). Como consequência direta desta combinação, a interpretação dos dados de GPR pode ser associada às fácies sedimentares dentro de um contexto genético, ou seja, aplicando a Lei de Walther ou Lei da Correlação Lateral de Fácies, segundo Walker e James (1992). Finalmente, com base nessa associação de critérios de interpretação, espera-se tornar possível: (i) individualizar as radarfácies e correlacioná-las às fácies sedimentares com base em modelos para estas fácies; (ii) caracterizar um dado sistema deposicional e, principalmente, determinar seu arcabouço estratigráfico, mostrando como ele evoluiu no tempo geológico.

A utilização, neste trabalho, da ordem de classificação das superfícies limitantes proposta por Miall (1996), deve-se, em primeiro lugar, à larga utilização desta, por parte do meio acadêmico e da indústria petrolífera, para caracterizar os sistemas deposicionais fluviais desde a escala de afloramento até a de reservatório. Adicionalmente, por sua fácil correlação com os elementos arquiteturais e, conseqüentemente, aos blocos construtores da Estratigrafia de Seqüências idealizada por Van Wagoner *et al.* (1990).

Dentro do contexto metodológico acima descrito, a escolha da área de Galos, na região de Galinhos-RN, para exemplificar/validar a utilização desta metodologia, se deve aos seguintes fatos: (i) a área foi submetida a um processo de formação e soterramento de paleocanais ou estreitos de maré (Andrade, 2003), inseridos no contexto de um sistema deposicional do tipo ilhas barreiras (Davis, 1994; McCubbin, 1982 e Hoyt e Henry, 1967); (ii) o sistema deposicional tipo ilhas barreiras ser constituído por diversos subsistemas e, por isso, exibir uma boa variedade de fácies sedimentares, possibilitando a correlação lateral destas em termos de uma abordagem genética (Andrade, 2003); (iii) a área estar situada numa zona transicional e estar exposta às variações do nível de menor amplitude do mar, facilitando, assim, o registro de ciclos de frequência mais alta (4ª, 5ª e 6ª ordens). Adicionalmente, sistemas de ilhas barreiras e similares podem ser reservatórios prolíficos de hidrocarbonetos e, por conseguinte, alvos importantes para a indústria de petróleo.

O estudo detalhado da paleogeografia e do arcabouço interno desses corpos arenosos pode trazer informações valiosas para o estudo e simulação de reservatórios

em ambientes antigos semelhantes. Este conceito de arquitetura transicional possibilita a caracterização da passagem entre sistemas de ambientes continental e marinho. Em adição, o modelamento de fácies sedimentares geneticamente relacionadas, através da sísmica de reflexão, é problemático devido ao grande comprimento de onda da ondícula padrão (*wavelet*) gerado na aquisição sísmica, cuja frequência pode variar entre 10 a 60 Hz. Dessa forma, em termos de resolução, uma camada com menos de 30 m de espessura pode não gerar uma reflexão sísmica (Yilmaz, 2001) e, portanto, esta não seria registrada na seção sísmica. No contexto da Estratigrafia de Seqüências, este fato tem implicações diretas na caracterização do contexto geológico e, conseqüentemente, na parametrização dos seus respectivos reservatórios, caso existam. Isto porque, em geral, a sísmica consegue indicar, com sucesso, os limites de seqüências e/ou de paraseqüências que definam ciclos de até 4^a ordem, não tendo resolução para definir os ciclos de mais alta frequência, como os de 5^a e 6^a ordens. Diante deste fato, é possível utilizar a alta resolução oferecida pelo GPR para auxiliar no mapeamento da arquitetura destes depósitos quaternários, com destaque para caracterização e arranjo espacial das fácies sedimentares geneticamente relacionadas e suas respectivas propriedades petrofísicas (porosidade, permeabilidade, etc.).

Embora a apresentação nesta dissertação utilize apenas um exemplo, a abordagem metodológica proposta já foi testada em vários outros tipos de ambiente siliciclástico e, pelo menos para este ambiente, ela tem validade geral.

1.3 – LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

A área estudada está situada no Distrito de Galos e é parte do Município de Galinhos-RN, localizado no Litoral Setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, a uma distância de aproximadamente 174 km da Capital do Estado (Natal-RN). O acesso pode ser feito pela BR-406, de Natal até Guamaré e, em seguida, por uma estrada secundária que dá acesso ao local da travessia, através de barcos, do Município de Guamaré para o Município de Galinhos (figura 1.1).

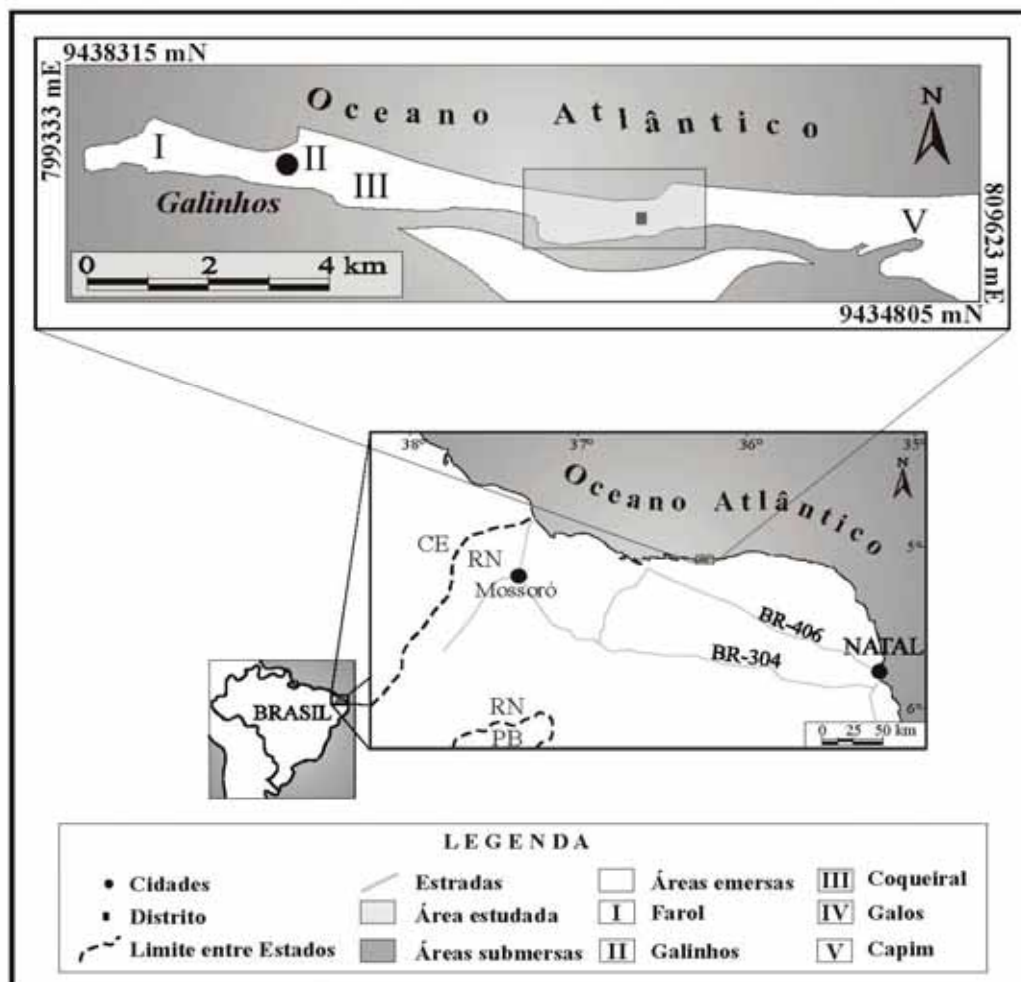


Figura 1.1 – Mapa de localização e acesso da área de estudo (Compilado de Lima, 2004).

1.4 – GEOLOGIA REGIONAL: EMBASAMENTO E BACIA POTIGUAR

Regionalmente, o substrato que compõe o embasamento da Bacia Potiguar é formado pelas unidades geotectônicas da Província Borborema, principalmente os Maciços e os Sistemas de Dobramento, agrupadas em um mosaico de blocos crustais de Idade Arqueana (complexos gnáissicos-migmatíticos) e Proterozóica (rochas supracrustais e metavulcanossedimentares), com evoluções geodinâmicas distintas (Almeida *et al.*, 1977; Brito Neves, 1983; Jardim de Sá, 1984a,b, e Jardim de Sá, 1994). No Rio Grande do Norte, o embasamento é representado por gnáisses-migmatíticos recobertos por metassedimentos do Grupo Seridó (Hackspacher & Sá, 1984). A figura 1.2 mostra o arcabouço tectônico da Província Borborema.

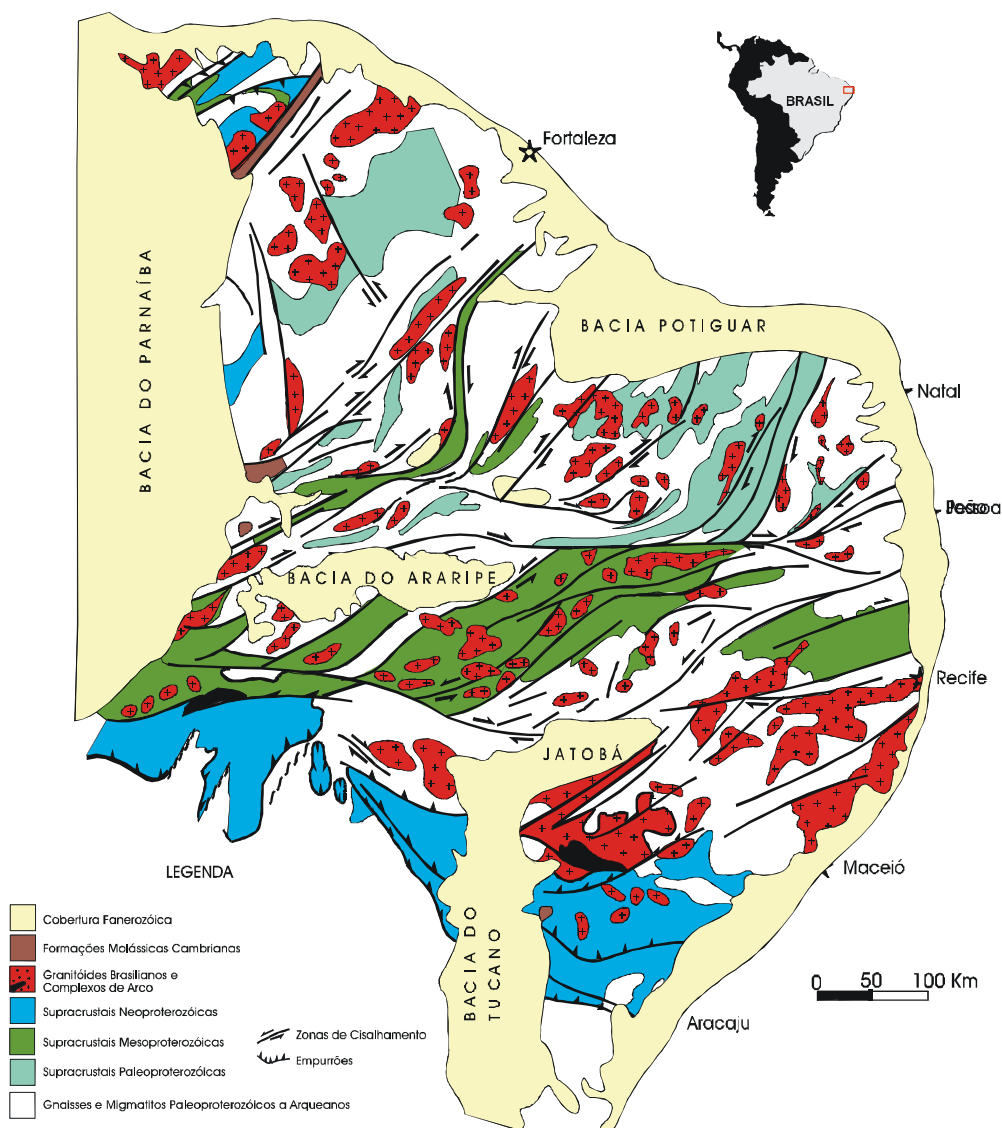


Figura 1.2 – Arcabouço tectônico da Província Borborema (Simplificado de Jardim de Sá, 1994).

Localizada na porção norte do Estado do Rio Grande do Norte, a Bacia Potiguar (figura 1.3) é limitada, a noroeste, pelo alto de Fortaleza, a sudeste, pelo Alto de Touros, e a oeste e a sul, com o embasamento cristalino. Em vários locais, a Bacia pode estar recoberta por sedimentos mais jovens.

De acordo com Matos (1992), o *rifte* Potiguar foi implantado durante o Cretáceo Inferior, aproveitando a direção predominante NE-SW herdada do embasamento, com destaque para o sistema de Falha de Carnaubais. Matos (1992) considera também que as falhas de direção NW-SE podem ser interpretadas como falhas de transferência, durante a fase rifte inicial, sendo posteriormente a principal direção de falhamentos na porção submersa da bacia, durante o estágio final de rifteamento, todos associados ao início da separação continental Brasil-África (fragmentação do *Gondwana*).

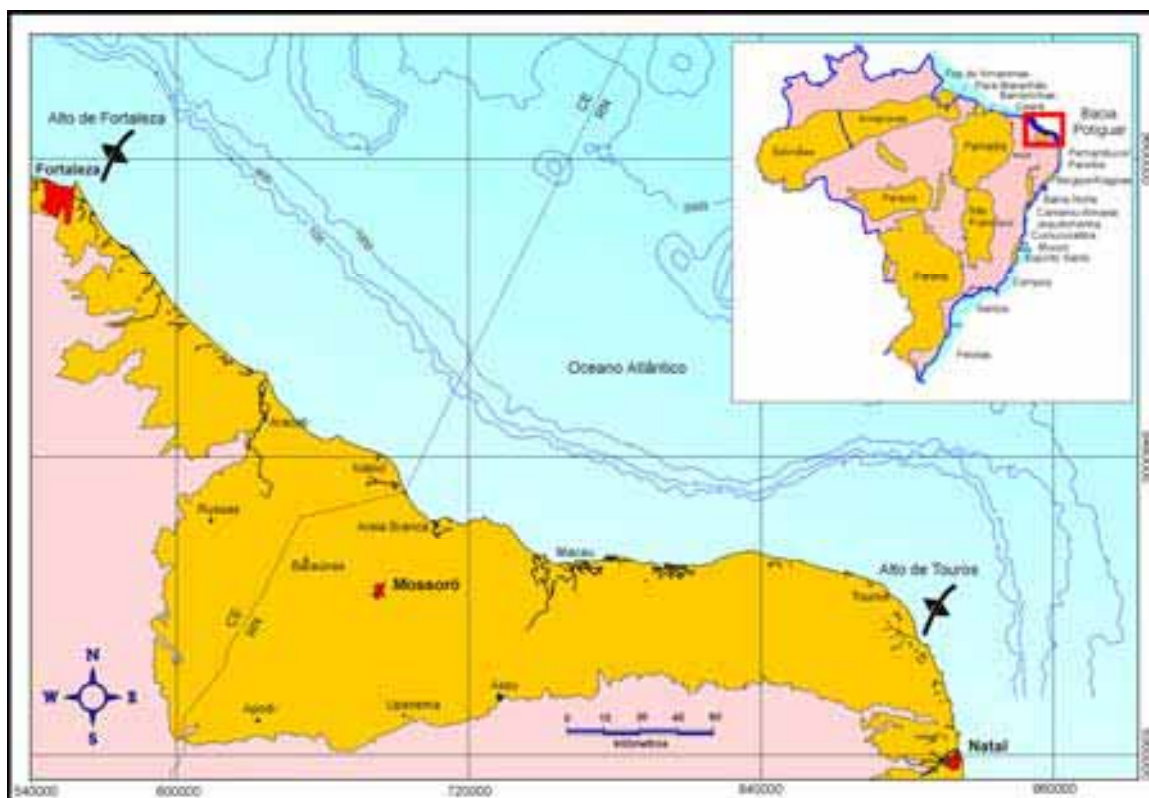


Figura 1.3 – Mapa de localização da Bacia Potiguar (Soares, 2000).

Em termos de sedimentação, o registro da fase rife é marcado por uma seqüência continental, essencialmente clástica, pertence à Formação Pendência (Figura 1.4), cuja interpretação paleoambiental aponta para leques aluviais associados aos falhamentos e sistemas flúvio-deltáicos, progradando sobre pelitos lacustres intercalados por frentes turbidíticas (Della Fávera *et al.*, 1992). Ainda dentro deste contexto geológico, ocorre a deposição da Formação Pescada, caracterizada por arenitos brancos e médios a arenitos cinza e finos, com intercalações de folhelhos e siltitos cinzentos. O sistema deposicional responsável pela deposição da Formação Pescada são leques aluviais coalescentes, em associação com um sistema fluvio-deltáico com pelitos lacustres entremeados por turbiditos, em pacotes mais uniformes e espessos que na formação Pendências (Araripe e Feijó, 1994). No estágio transicional, a subsidência termal da crosta continental, seguida de variações do nível do mar, provoca a deposição de uma megasseqüência transicional representada pela Formação Alagamar.

O Grupo Apodi, segundo Araripe e Feijó (1994), até então constituído pelas Formações Açú e Jandaíra, foi ampliado por estes autores para conter também as Formações Quebradas e Ponta do Mel, inicialmente descritas por Souza (1982). Dentre estas, a Formação Açú, interdigita-se lateralmente com as Formações Ponta do Mel e

Quebradas, constituindo a porção continental relacionada a sistemas deposicionais fluviais, seguidos por uma plataforma carbonática da seqüência transgressiva, marcando o afogamento dos sistemas fluviais da Formação Açu (Araripe e Feijó, 1994). O registro sedimentar desta seqüência transgressiva é constituído por rochas de uma grande plataforma carbonática que recobriu toda porção emersa da bacia denominada de Formação Jandaíra (Monteiro e Faria, 1988).

A transição entre o Mesozóico e o Cenozóico, na Bacia Potiguar, foi marcada por uma erosão generalizada e evidenciada pela discordância erosiva campaniana sobre a Formação Jandaíra e Ubarana (essencialmente pelítica), seguida pela deposição de uma seqüência regressiva (figura 1.4). Esta seqüência está depositada sob condições de mar aberto e é constituída por três formações: Formação Tibau, correspondente a arenitos costeiros; Formação Guamaré, caracterizada por rochas carbonáticas de plataforma e talude, que se interdigita lateralmente com a primeira formação citada; e, por fim, a Formação Ubarana, constituída por folhelhos marinhos rasos a profundos, intercalados a turbiditos (figura 1.4).

De acordo com Menezes (1999), a partir do Mioceno uma sedimentação clástica continental, “Grupo Barreiras” (Formação Serra dos Martins), foi depositada ainda em caráter regressivo, não só na Bacia Potiguar, mas na maior parte das bacias do litoral sudeste e norte-nordeste brasileiro, relacionada, a nível global, ao desenvolvimento da cadeia Andina.

1.5 – O REGISTRO QUATERNÁRIO

A sedimentação quaternária reúne sedimentos de praias e aluviões, de ambiente costeiro (estuarino, praias e eólico) a continental (fluvial). São depósitos inconsolidados, com espessuras de até 70 m (Menezes, 1999). No restante da Bacia Potiguar, importantes depósitos quaternários ocorrem, principalmente no rio Açu, onde atingem espessuras maiores que 50 m, e nos vales dos rios do Carmo, Upanema, Mossoró-Apodi e Jaguaribe. Na plataforma continental, do mesmo modo que a Formação Barreiras, os depósitos mencionados acima são unidades indivisas da Formação Tibau (Menezes, 1999).

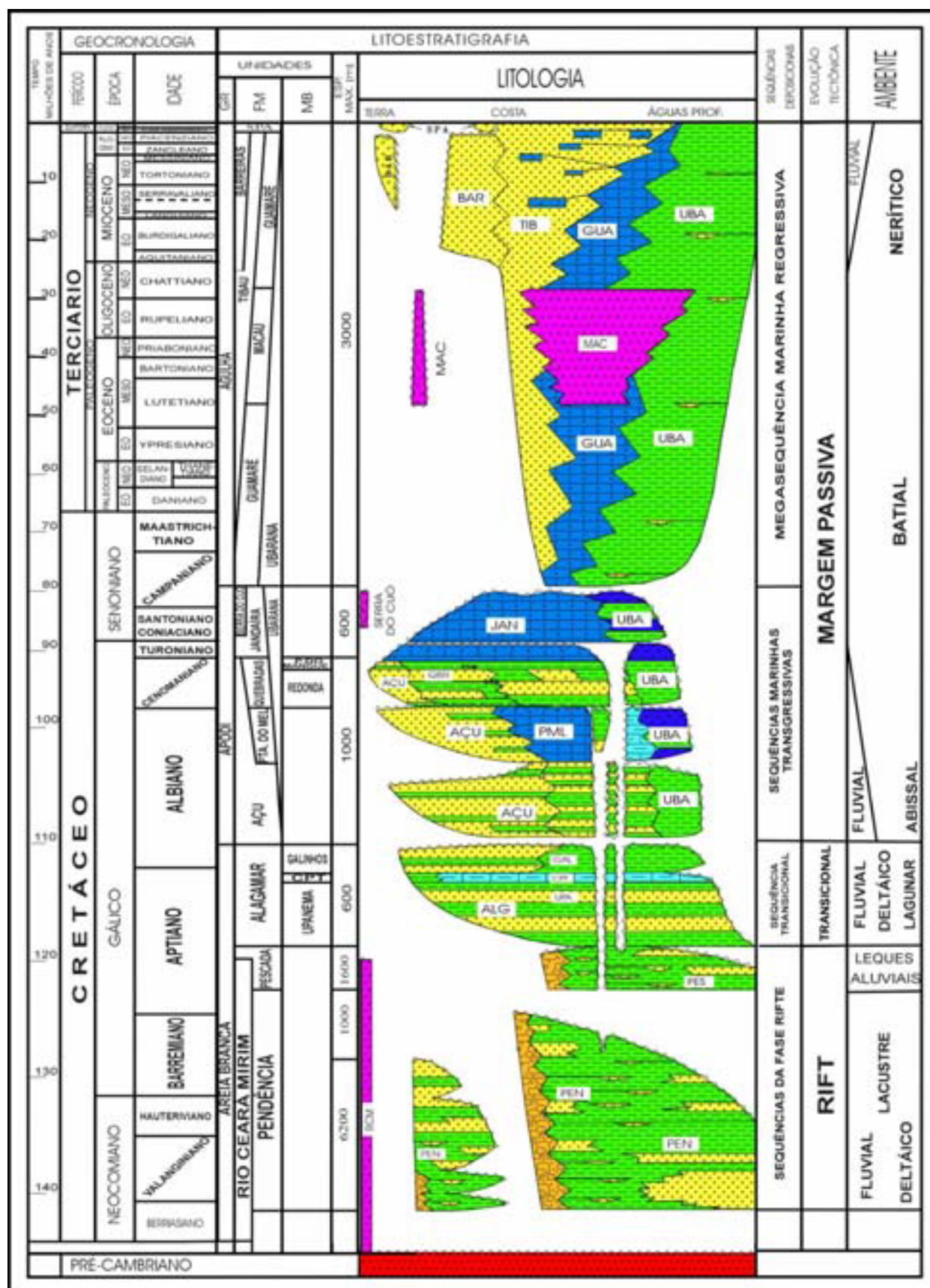


Figura 1.4 – Carta Estratigráfica da Bacia Potiguar segundo Araripe e Feijó (1994). (in Soares, 2000).

Um recuo do mar está marcado por dunas vermelhas, mais antigas, do Pleistoceno Inferior, que estão preservadas no interior, sobrepostas por dunas brancas, mais novas, do Pleistoceno Médio, situadas na costa. As dunas estão hoje truncadas por um nível de mar alto, resultante da transgressão holocênica (*Tricart*), que as estão destruindo e remobilizando-as. Este avanço do mar, segundo Davis (1994), pode ser correlacionado, de forma diacrônica, em vários locais do globo terrestre, ao longo dos últimos 15.000 anos, como decorrência do degelo da última grande glaciação. No litoral potiguar, a exemplo de outras regiões do mundo, esta subida do nível do mar represou a foz dos rios, formando largos estuários afogados, nos quais os mangues se desenvolvem, favorecendo localmente a implantação de sistemas de ilhas barreiras. Atualmente os processos costeiros retrabalham sedimentos do Pleistoceno, enquanto sedimentos carbonáticos são depositados em locais mais afastados da costa. Paleolinhas de praia, de cerca de 8 mil anos, são vistas em imagens de satélite na região de Touros, numa faixa de 25 km, hoje encobertas pelo mar (Vianna e Solewicz, 1988; e Vianna *et al.* 1993).

Segundo Vilaça *et al.* (1991), os sedimentos arenosos (quartzosos) com pouca argila e grânulos de limonita de coloração avermelhada (mais escuros em direção ao litoral) são denominados de Formação Potengi. O seu posicionamento estratigráfico é delimitado, no topo, pelos sedimentos dunares e, abaixo, pelos sedimentos e rochas sedimentares da Formação Barreiras.

Vital *et al.* (2002 a,b) mostraram que as feições oceanográficas e geomorfológicas, bem como a evolução costeira e contexto tectônico da costa norte do Estado do Rio Grande do Norte, podem explicar o padrão de distribuição sedimentar encontrado neste litoral. Campos de dunas de areias, lagoas, mangues e esporões arenosos caracterizam a região costeira. Pelo menos quatro linhas de arenitos de praia são encontradas na região costeira e na plataforma. Na região costeira, este tipo de arenito ocorre, em geral, ao longo da praia atual, nas zonas de intermaré e supramaré. Alguns deles foram datados por Caldas *et al.* (2001), através do método ^{14}C AMS, fornecendo idades principalmente holocênicas (2.200 a 6.500 anos AP), mas também pleistocênicas (30.000 a 40.000 anos AP). Na plataforma, eles ocorrem a profundidades entre 10 e 20 metros e poderiam representar diferentes períodos de nível do mar estacionário (*stillstand*), durante a última transgressão pós-pleistocênica. Na plataforma continental interna, observa-se um cinturão de areias litoclásticas, próximo à costa, na região da deriva litorânea, seguido por uma zona intermediária de

areias litobioclásticas a biolitolásticas, enquanto cascalhos bioclásticos são encontrados principalmente a partir da isóbata de 15 metros. Sedimentos lamosos ocorrem próximos à desembocadura e em “*canyons*” de rios. O conteúdo biogênico é representado, principalmente, por algas coralíneas e foraminíferos bentônicos, embora ostracóides, gastrópodes e bivalvíos possam ser encontrados em menor quantidade.

1.6 – CONTEXTO GEOLÓGICO LOCAL: O SPIT DE GALINHOS

Segundo Lima (2004), os depósitos holocênicos da região de Galinhos são representados pelos depósitos praias, eólicos, marinhos e estuarinos. A constante erosão e retrabalhamento da zona costeira deram origem às areias praias mal selecionadas, na linha de praia, assim como a areias praias e eólicas na zona de supramaré, e, ainda, várzeas arenosas orgânicas e/ou argilo-arenosas orgânicas, encontradas entre o estuário e o mar. Estas são, em geral, formadas por sedimentos finos associados a argilas orgânicas e silte (sedimentos de mangues).

Andrade (2003) caracterizou as associações de fácies e o sistema deposicional atuante na área de Galos, utilizando como subsídio imagens de satélite (processadas por Lima *et al.* 2001), mapeamento geológico de superfície e dados de GPR. Neste contexto, a análise das imagens de satélite e das fotografias aéreas, realizadas por Lima *et al.* (2001), possibilitou a identificação e realce dos processos sedimentares atuantes no *spit* de Galinhos, ao longo das últimas décadas, fornecendo uma visão macroscópica destes processos, que controlaram a evolução da linha de costa. De acordo com a análise dos dados de sensoriamento remoto e observações de campo (Lima, 2004), o vento, na maior parte do tempo, é o processo de sedimentação dominante na zona de supramaré. Ele age essencialmente na formação de dunas costeiras, a partir do retrabalhamento dos sedimentos depositados pelas ondas, durante os períodos de ressaca, e pelas correntes litorâneas atuantes em maré baixa. A ação da água consiste, principalmente, em reunir esses sedimentos e acumulá-los na praia, em forma de berma, as quais, depois de secas, são removidas pelo vento, variando em função dos períodos de acreção (engorda) e erosão (emagrecimento) da praia. Em especial, nos corredores interdunares, observa-se com frequência o desenvolvimento de marcas onduladas, que denunciam a direção preferencial de atuação dos ventos de *E* para *W* e de *ENE* para *WSW* (figura 1.5).



Figura 1.5 – Fotografia destacando a atuação dos ventos de *E* para *W* e de *ENE* para *WSW*, formando marcas onduladas assimétricas (migração de barras de cristas sinuosas). A ponta da colher de pedreiro indica o Norte (Andrade, 2003).

Outro processo sedimentar marcante na área de Galos é a atuação das correntes de maré. De acordo com Lima (2004), estes processos ocorrem com mais intensidade na porção sul, isto é, na porção dominada pelo canal de maré, no qual é possível observar a predominância da maré vazante como mecanismo de transporte e sedimentação, como mostra a figura 1.6. Esta mesma figura também registra o processo de atuação das ondas que removem os sedimentos do fundo colocando-os em suspensão.

Segundo Lima (2004), as ondas chegam à costa, em geral, com ângulo oblíquo, e atingem as águas rasas, de modo que uma parcela da energia faz a água se mover paralelamente à costa, sendo assim denominada de corrente de deriva litorânea (figura 1.7).

Por fim, Andrade (2003) determinou, através do mapeamento geológico e conseqüente associação lateral das fácies, a existência das fácies de ante-praia ou zona de estirâncio (intermaré), supamaré (supamaré), dunas e superfícies de deflação, planície de intermaré (*intertidal flats*) e mangues.



Figura 1.6 – Fotografias aéreas realizadas de ultraleve mostrando a predominância da maré vazante, interpretado a partir da geometria das barras de maré destacadas nas fotos acima (Adaptado de Lima 2004).

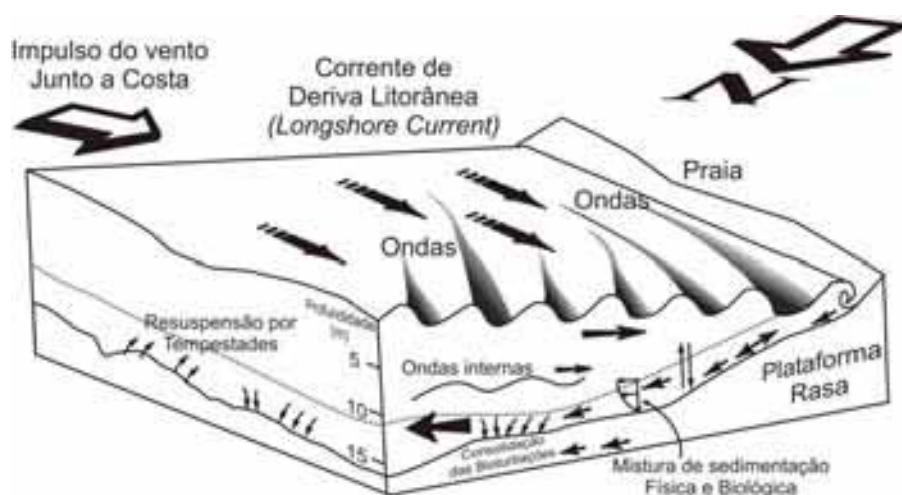


Figura 1.7 – Diagrama que mostra geração de correntes de deriva litorânea devido à aproximação das ondas (Andrade, 2003).

1.7 – AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS DE GPR

A aquisição dos dados de GPR foi realizada em duas etapas (figura 1.8): na primeira (maio de 2000), foi adquirida uma malha com 11 seções de GPR, espaçadas de 50 m, sendo 2 perfis transversais à direção estimada do paleocanal (LP-1 e LP-2), com aproximadamente 350 m de extensão e direção N150°E, e 9 perfis longitudinais, de 150 m e direção N60°E (LT-1 a 8), como objetivo de localizar precisamente o paleocanal. Na segunda etapa (dezembro de 2002), foram também levantados 5 perfis auxiliares, de dimensões e espaçamentos variados, com direção N150°E (AX entre 01 e 08) e um perfil orientado à N260°E (LB-1). Um total de 3.804 metros lineares de seções de GPR foram assim levantados nas duas etapas (figura 1.8). Foi utilizado o GPR de modelo GSSI SIR@SYSTEM – 2, tendo como principais parâmetros de aquisição: range de 300 ns e frequência central de 200 MHz, cujo limite de resolução vertical está em torno de 10 cm. Na escolha dos parâmetros acima definidos para aquisição dos dados de GPR foram seguidas as recomendações de Annan (2001) [ver resumo das recomendações em Oliveira Jr. (2001)].

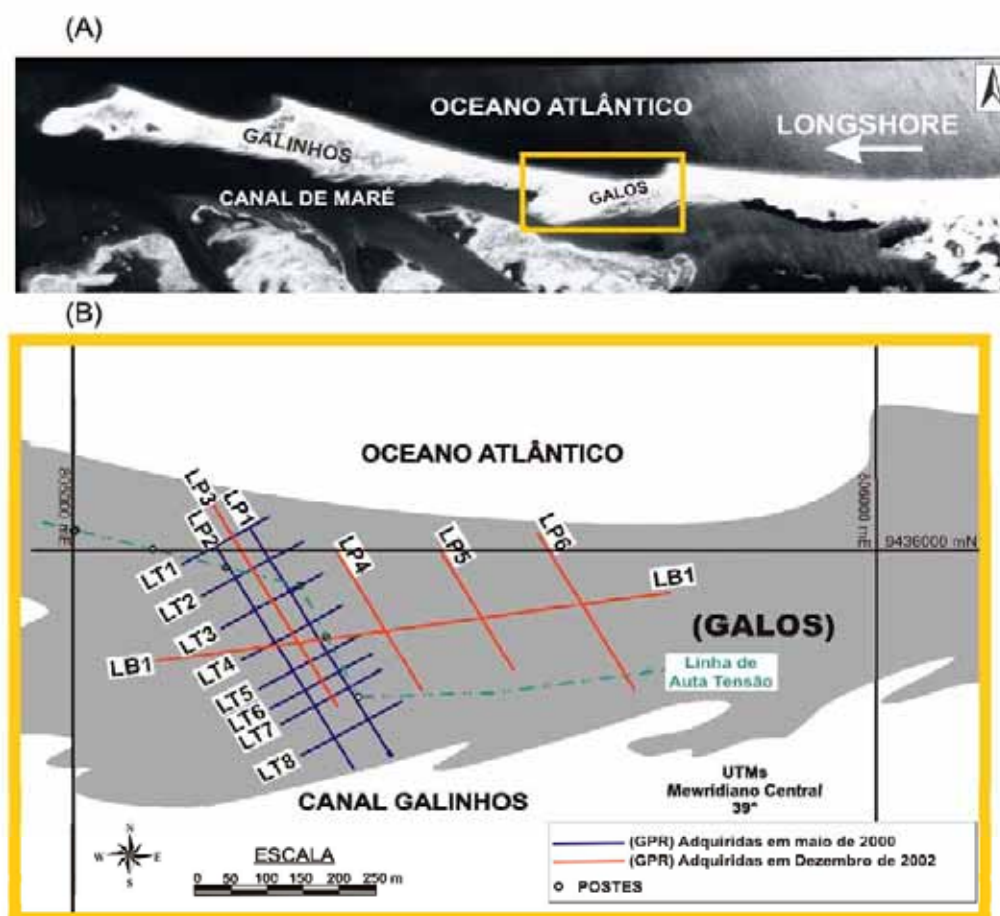


Figura 1.8 – Localização e disposição das seções de GPR. (a) Foto aérea do *spit* de Galinhos-RN, na qual está destacada a área de estudo. Em (b), localização e disposição das seções GPR (malhas de aquisição).

Os dados de GPR utilizados neste trabalho formam submetidos a uma rotina de processamento, desenvolvida no âmbito do PPGG/UFRN pelo doutorando Pedro Xavier Neto. O processamento visa à obtenção de uma seção de reflexão livre de ruídos, em que seja realçado o registro sedimentar. Dentro deste contexto, é fundamental ressaltar que a utilização de seções de GPR não processadas (ou mal processadas), implica um risco muito grande para a interpretação, acarretando uma série de dúvidas e possibilidades de interpretação ou até mesmo inviabilizando-a. Da mesma maneira que na aquisição, o processamento deve estar inserido num contexto, devendo ser orientado em função dos objetivos do trabalho e da realidade local (ruídos de superfície, o ambiente geológico em questão, etc.), mantendo o compromisso de ressaltar as feições geológicas existentes sem gerar artifícios de processamento. O processamento das seções de GPR é assim uma atividade interativa, na qual o geofísico tem a possibilidade de testar várias opções de filtragens até que se

estabeleça a melhor seqüência de processamento (melhor parametrização e seqüência dos filtros).

O processamento seguiu uma rotina semelhante a da sísmica de reflexão, já consagrada na literatura (Yilmaz, 2001), que foi adaptada aos princípios físicos (onda eletromagnética) do GPR, com base nas proposições de Xavier Neto *et al.* (2001). O *software* utilizado foi o **Reflex** (Sandmeir, 2002).

O primeiro passo, logo após a aquisição, é o **pré-processamento**. Para o GPR, isso corresponde à conversão dos dados para o formato lido pelo *software* de processamento e preparação do dado para o processamento. Segundo Yilmaz (2001), o sucesso do processamento depende em grande parte não somente da escolha dos parâmetros pertinentes a cada passo isolado do processamento, mas também do pré-processamento. Um dado, tanto sísmico quanto de GPR, mal preparado pode até passar sem que seja notado às primeiras etapas do processamento, mas não passa impune aos filtros mais complexos, como o balanceamento espectral para o GPR, assim como o dado sísmico não passaria pela deconvolução.

O fluxo de processamento utilizado (Xavier Neto *et al.*, 2001), fundamenta-se na premissa de que se tem conhecimento *a priori* dos seguintes elementos:

- do método,
- do meio,
- do alvo,
- dos efeitos de propagação,
- dos ruídos.

As etapas de processamento utilizadas neste trabalho foram:

- correção *zero-offset/drifte DC*,
- dessaturação,
- correção dos efeitos de propagação,
- migração,
- filtro de frequências,
- AGC para *Display* (opcional).

Segue-se abaixo, um breve comentário das principais etapas de processamento utilizadas nas seções de GPR adquiridas em Galos-RN.

O primeiro passo é a correção para *zero-offset*, que visa compensar o afastamento fonte-receptor. Esta correção é baseada na velocidade da onda direta pelo solo. Logo após, é feita a correção de *drifte DC*, que visa atenuar erros na razão de amostragem do instrumento, que possam vir a ocorrer em virtude das variações de temperatura, desvios dos cabos, etc.

Em seguida, é feita a dessaturação (De-WOW), que objetiva corrigir a interferência resultante do acoplamento entre o pulso emitido e as reflexões de frequências muito baixas (denominado de efeito WOW). Outro efeito comum aos dados de GPR é a indução eletromagnética existente entre as antenas, que se sobrepõe ao sinal nas camadas mais rasas, e pode ser corrigido através da remoção da média entre traços (*subtracting average*). Esta operação também é utilizada para remover múltiplas, desde que estas ocorram horizontalizadas.

Dando continuidade ao processamento, a correção dos efeitos de propagação é feita através da *Spherical and Exponential Correction* (SEC) e do balanceamento espectral. A SEC atua através da aplicação de uma função de ganho linear, para corrigir o efeito de diminuição de energia com o afastamento da fonte (espalhamento geométrico), e de uma função de ganho exponencial, que atua compensando o efeito da perda de energia por absorção. O balanceamento espectral corrige os efeitos da atenuação de forma seletiva, por faixas de frequências, e promove uma “deconvolução” parcial nos dados, sem promover grandes alterações na fase do sinal, recompondo as amplitudes e deslocando o espectro de frequências para os valores da frequência central do levantamento. O resultado do balanceamento espectral é o aumento da resolução temporal. A etapa de balanceamento espectral deve ser precedida por uma etapa auxiliar de análise espectral.

Na sequência, é realizada a migração, que atua reposicionando os refletores inclinados em sua posição real na seção e promove a reconcentração de energia espalhada por focos difratores. É necessário ressaltar que a etapa de migração deve ser precedida de uma etapa auxiliar de análise de velocidades.

A seguir, filtros de frequência são utilizados para “limpar” as frequências transientes da seção, ressaltando o sinal de interesse.

Finalmente, os efeitos da topografia são corrigidos em função dos dados oriundos do nivelamento topográfico.

Neste trabalho não foram aplicados ganhos equalizadores, como o AGC, visando preservar ao máximo possível as relações de amplitude entre os eventos. O AGC só é utilizado com o propósito de melhorar a visualização da seção como um todo, e não é incorporado ao *header* do traço.

Em termos de ferramentas de interpretação 2-D, a utilização de paletas de cores diferentes e de filtros de visualização, associados à alta resolução oferecida pelo GPR, possibilitam uma boa caracterização das radarfácies. Dentre estas ferramentas,

destacam-se: (i) a utilização de diferentes escalas de visualização (compressão das linhas), as quais facilitam a identificação de refletores mais contínuos, assim como ressaltam as relações de truncamento; (ii) o uso de paletas de cores diferentes, nas quais é possível modificar a distribuição das cores, ressaltando ou ofuscando determinados intervalos de amplitude (histograma de cores), o que ajuda na identificação das radarfácies; (iii) os padrões de exibição *wiggle* e área variável (VA), que facilitam a identificação das terminações das reflexões, como *donwlaps* e *onlaps*, e dos padrões das reflexões, como os sigmoidais.

É necessário registrar que existe uma grande dificuldade de reproduzir em papel a qualidade visual obtida na tela das estações de trabalho. Em geral, ocorre uma perda considerável de resolução visual na passagem dos dados, quer seja sísmico, quer seja de GPR, da tela do computador para papel impresso. Este fato prejudica consideravelmente a apresentação e visualização dos horizontes interpretados.

CAPÍTULO II - INTERPRETAÇÃO DE DADOS DE GPR COM BASE NA HIERARQUIZAÇÃO DE SUPERFÍCIES LIMITANTES E NA ADAPTAÇÃO DE CRITÉRIOS SISMOESTRATIGRÁFICOS

2.1 – APRESENTAÇÃO

Este Capítulo será apresentado na forma de um manuscrito, em português, intitulado por: **Interpretação de Dados de GPR com Base na Hierarquização de Superfícies Limitantes e na Adaptação de Critérios Sismoestratigráficos**. Este capítulo será traduzido para o Inglês, de modo a constituir um manuscrito que será submetido à revista **GEOPHYSICS**, editada pela **SEG (Society of Exploration Geophysicists)**. O manuscrito tem como objetivo contribuir com a metodologia de interpretação de dados de GPR, obtendo/apresentando critérios de interpretação mais universais, validos pelo menos para depósitos siliciclásticos.

Este manuscrito compõe o corpo central desta Dissertação de Mestrado, apresentando praticamente todo o trabalho desenvolvido (a única exceção é o processamento dos dados de GPR, sucintamente apresentado no capítulo introdutório).

2.2 – INTERPRETAÇÃO DE DADOS DE GPR COM BASE NA HIERARQUIZAÇÃO DE SUPERFÍCIES LIMITANTES E NA ADAPTAÇÃO DE CRITÉRIOS SISMOESTRATIGRÁFICOS

Título curto: Metodologia de interpretação de GPR

AUTORES

Perclyls Raynyere de Oliveira Andrade+, Walter Eugenio de Medeiros+*, Pedro Xavier Neto#,

+ Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica

#PETROBRAS – UN-RNCE

*Departamento de Física Teórica e Experimental – UFRN

59072-970, Natal, RN, Brazil

Phone/FAX: 55 84 3215 3831

* Correspondent author

E-mails: perclylsandrade@yahoo.com.br, walter@dfte.ufrn.br*

pedroxavier@petrobras.com.br

2.3 – RESUMO

O Radar Penetrante no Solo (*Ground Penetrating Radar* – GPR) tem sido utilizado para mapear em detalhe depósitos sedimentares, devido à sua alta resolução. Pelo fato de que os métodos GPR e Sísmico têm princípios de formação de imagens muito semelhantes, o modelo clássico de interpretação sísmica, baseado na sismoestratigrafia, tem sido tentativamente utilizado para interpretar dados de GPR. Não obstante os grandes avanços já realizados em contextos particulares, as adaptações propostas das ferramentas e conceitos da sismoestratigrafia para o GPR ainda são inadequadas. Isto acontece basicamente porque as interpretações atribuídas aos padrões de terminação, extraídos da sismoestratigrafia convencional, não representam o registro geológico na escala de operação do GPR. O problema conceitual reside, pois, em propor um método de interpretação que permita não só relacionar produto e processo sedimentar, na escala do GPR, mas também identificar ou propor ambientes deposicionais e correlacionar estes resultados com os blocos construtores da Estratigrafia de Seqüências. O objetivo desse trabalho é propor uma metodologia de interpretação de dados de GPR capaz de realizar esta tarefa, pelo menos no contexto de depósitos siliciclásticos. Para este fim, propõe-se uma interpretação de dados de GPR baseada na adaptação de termos e conceitos herdados da sismoestratigrafia, em conjunto com uma metodologia de hierarquização de superfícies limitantes (*bounding surfaces*), a exemplo da metodologia proposta por Miall (1988). Como consequência direta combinação, a interpretação dos dados de GPR pode ser associada às fácies sedimentares, dentro de um contexto genético, possibilitando assim: (i) individualizar as radarfácies e correlacioná-las às fácies sedimentares, com base em modelos para estas fácies; (ii) caracterizar um determinado sistema deposicional e, principalmente, (iii) determinar seu arcabouço estratigráfico, mostrando como ele evoluiu no tempo geológico. Para exemplificar a utilização desta metodologia de Interpretação foram utilizados os dados de GPR adquiridos na área de Galos, que faz parte do *spit* de Galinhos, localizado no Estado do Rio Grande do Norte. Este *spit* apresenta grande variedade lateral de fácies sedimentares e contém registros sedimentares que são sensíveis às variações de frequência mais alta do nível relativo do mar (ciclos de 4ª a 6ª ordens). O processo de interpretação constou das seguintes fases: (i) estabelecimento de uma sucessão vertical de fácies, (ii) caracterização dos produtos sedimentares (radarfácies), (ii)

atribuição de processos sedimentares dentro de um cunho genético, e finalmente (iv) estabelecimento de um modelo evolutivo para o *spit* de Galinhos. O modelo propõe que este *spit* constitui um sistema do tipo Ilhas Barreiras que é materializado, da base para o topo, por fácies de estreito de maré (*tidal inlet*), fácies de planície de maré, fácies de praia e fácies eólica (dunas). A fácies de estreito de maré, na base, é constituída por barras de acreção lateral e feições de preenchimento desses canais. Esta fácies está truncada lateralmente pela fácies de planície de maré. Na zona de intermaré, a fácies planície de maré está sobreposta pela fácies de praia, marcando assim um avanço relativo da linha de costa. Por fim, no topo da coluna estratigráfica, estão depositadas dunas eólicas, denotando o recuo da linha de costa e conseqüente exposição aérea.

Palavras chaves: GPR, radarfácies, fácies sedimentares, sismoestratigrafia, superfícies limitantes, estratigrafia de seqüências.

2.4 – INTRODUÇÃO

Segundo Brown e Fisher (1980), as sismofácies, na sismoestratigrafia, correspondem a um conjunto de reflexões que apresentam características ou padrões próprios, diferentes daqueles dos conjuntos adjacentes, dentro de uma sismo-seqüência. Raciocínio semelhante foi utilizado por Weimer, *et al.* (1982), Huggenberger, (1993), Gawthoper *et al.* (1993), Bristow (1995), Van Overmeeren (1998), Daniels (2000) e Corbeanu *et al.* (2001) para definir o termo radarfácies e os seus significados estratigráficos. Não obstante o grande avanço já realizado, as tentativas de adaptar as ferramentas e conceitos da sismoestratigrafia para a escala do GPR ainda carecem de uma sistematização. Em geral, os resultados obtidos possuem validade geográfica restrita e não aprofundam a discussão dos processos genéticos da sedimentação e sua respectiva resposta no registro do sinal de GPR. A princípio, isto se deve ao fato de que, por uma questão de escala, as interpretações atribuídas aos padrões de terminação extraídos da sismoestratigrafia convencional não representam o registro geológico na escala de operação do GPR, e também, devido à utilização de seções pobres em processamento, ou até mesmo não processadas.

O objetivo desse trabalho é contribuir com a metodologia de interpretação de dados de GPR, obtendo/apresentando critérios de interpretação baseados na distinção dos padrões de terminação das reflexões e conseqüente hierarquização destas

superfícies limitantes. Com isso espera-se possibilitar a caracterização/interpretação dos produtos sedimentares (registro geológico, com destaque para as estruturas sedimentares), a partir dos quais são atribuídos os processos sedimentares. Na prática, a metodologia se baseia na adaptação de termos e conceitos herdados da sismoestratigrafia (Mitchum *et al.*, 1977a, b,c), combinados com a hierarquização das Superfícies Limitantes (*bounding surfaces*), a exemplo das metodologia proposta por Miall (1985, 1988, 1991, 1996). Como consequência direta desta combinação, a interpretação dos dados de GPR pode ser associada as fácies sedimentares dentro de um contexto genético, ou seja, aplicando a Lei de Walther ou Lei da Correlação Lateral de Fácies, segundo Walker e James (1992). Finalmente, com base nessa associação de critérios de interpretação, torna-se possível: (i) individualizar as radarfácies e correlacioná-las as fácies sedimentares com base em modelos de fácies sedimentares; (ii) caracterizar os sistemas deposicionais e, principalmente, determinar o arcabouço estratigráfico, mostrando a evolução dos sistemas deposicionais.

Este manuscrito evoluirá da seguinte maneira: inicialmente será apresentada a área utilizada para construir a metodologia proposta, que é caracterizada por sedimentos arenosos siliciclásticos, inserido num ambiente costeiro atual. Utilizando como motivação este contexto, em seguida será discutido como foi feita a adaptação das terminações dos refletores, da escala da sismoestratigrafia para a escala de GPR, mostrando como correlacionar cada tipo de terminação, segundo a classificação proposta por Miall (1996) para as superfícies limitantes. Por fim, serão definidas as radarfácies, bem como a sua correlação com as fácies sedimentares.

Embora a apresentação utilize apenas um exemplo, a abordagem metodológica proposta já foi testada em vários tipos de ambientes siliciclásticos e, pelo menos para este ambiente, ela tem validade geral.

2.5 – CONTEXTO GEOLÓGICO UTILIZADO PARA EXEMPLIFICAR A METODOLOGIA

A costa setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, no extremo nordeste da margem equatorial brasileira, constitui uma paisagem costeira recente que é caracterizada pela complexidade de suas feições geomorfológicas, representadas por praias, recifes, estuários, mangues, lagoas, dunas e estreitos de maré, como mostra o mapa geológico simplificado da figura 2.1. Segundo Lima (2004), a região de Galinhos

– RN foi desenvolvida sob um regime de ondas de alta energia, associadas a intensas correntes de deriva litorânea que atuam de *E* para *W*, paralelamente à linha de costa, e que são responsáveis pela geração do *spit* de Galinhos. Estudos realizados por Lima *et al.* (2001), através da análise de imagens de satélite e fotografias aéreas, permitiram identificar a correlação entre alinhamentos de feições geológicas recentes de áreas emersas (campos de dunas, trechos de canais atuais) e áreas submersas (ondas de areia – “*sandwaves*”) no litoral setentrional do Rio Grande do Norte. Este fato levou aqueles autores a sugerir a existência de antigos estreitos de maré nesta área, levantando a hipótese de que antigos sistemas de ilhas barreira (Davis, 1994; McCubbin, 1982) teriam evoluído para o atual *spit* de Galinhos (Lima, 2004).

Com base no questionamento sobre a existência de paleocanais soterrados na região de Galinhos-RN, em especial no distrito de Galos, um levantamento de Radar Penetrante no Solo (GPR) foi ali realizado, com o objetivo de verificar a hipótese da evolução do *spit* atual, através de antigos sistemas de ilhas barreiras. O levantamento e as posteriores etapas de processamento e interpretação foram voltadas para a identificação e localização desse(s) paleocanal(is), bem como para o reconhecimento da estruturação interna do *spit*.

Foram adquiridas 11 seções de GPR (figura 2.2), espaçadas de 50 m (linhas em azul), e 5 linhas com espaçamento maior (linhas em vermelho), totalizando 3.840 metros lineares de seções de GPR, adquiridas em maio de 2000 e dezembro de 2002, respectivamente. Foi utilizado um equipamento GPR, modelo GSSI SIR@SYSTEM – 2, tendo, como principais parâmetros de aquisição, *range* de 300 ns e frequência central de 200 MHz, cujo limite de resolução está em torno de 5 cm.

A interpretação preliminar destes dados de GPR (Andrade, 2003) possibilitou a caracterização, em escala de detalhe, das fácies sedimentares preservadas no subsolo com quatro contextos sedimentares distintos: uma associação de fácies de canal na base, sobreposta por fácies de praia relacionadas à zona de estirâncio, na face voltada para o oceano, e associação de fácies de planícies de maré, na face voltada para o continente (estreito de maré atual) e, por fim, uma associação de fácies de dunas, no topo (ver figura 2.1). Conseqüentemente, o empilhamento vertical e a correlação lateral destas associações de fácies, dentro de um contexto genético, permitiu esboçar a evolução costeira da área. Assim, a interpretação preliminar das seções de GPR sugere que, inicialmente, existia condição de sedimentação possivelmente relacionada a planícies de maré estuarinas, indicada pela abertura de estreitos de maré, formando

ilhas barreiras paralelas à costa. Em seguida, estes canais foram obstruídos de leste para oeste, possivelmente por correntes de deriva litorânea, atuantes de *E* para *W*, que provocaram a migração do canal principal neste mesmo sentido, seguido de abandono e posterior preenchimento por sedimentos (Andrade, 2003). Posteriormente, esses antigos estreitos de maré foram erodidos pelo avanço relativo da linha de costa e a nova sedimentação originou a presença de depósito praias (intermaré). Por fim, uma possível descida relativa do nível do mar e/ou um provável aumento na taxa de aporte sedimentar proporcionou o recuo da linha de costa e uma conseqüente deposição na zona de supramaré, marcada pela deposição eólica. Assim, com base neste contexto foi possível confirmar a hipótese da existência de paleoestreitos de maré, o que nos levou à interpretação de que o *spit* de Galinhos foi um antigo sistema de Ilhas Barreiras (Andrade, 2003).

2.6 – CONSTRUÇÃO DA METODOLOGIA DE INTERPRETAÇÃO: EXEMPLO DO *SPIT* DE GALINHOS

O princípio de formação das seções de GPR é bastante semelhante ao da sísmica de reflexão (Davis e Annan, 1989; Annan, 1992; Xavier Neto *et al.*, 2001) e, portanto, têm padrões de reflexão semelhantes. Contudo, eles medem propriedades diferentes em escalas diferentes. Na sísmica de reflexão, os refletores são individualizados em função do contraste de impedância acústica das litofácies, numa escala de bacia ou de reservatório (entre quilômetros e dezenas de metros). Por sua vez, no GPR, as reflexões são causadas por contrastes na impedância eletromagnética, numa escala semelhante à escala de afloramento (entre centímetros e dezenas de metros). Desse modo, uma seção inteira de GPR pode usualmente corresponder a apenas um único pulso sísmico. Tendo sempre em mente esta diferença de escala, serão propostos, a seguir, critérios de interpretação a serem utilizados na interpretação de seções de GPR, tendo por base a identificação e hierarquização da terminação dos refletores (estratos). Para construir/exemplificar a metodologia proposta, utilizou-se os dados de GPR coletados no *spit* de Galinhos, ou mais especificamente, no distrito de Galos.

2.6.1 – Critérios de Interpretação Propostos

A metodologia de interpretação de seções de GPR (proposta neste trabalho) recomenda iniciar a abordagem das seções partindo do geral para o detalhe. Ou seja, deve-se identificar primeiro as interfaces de maior continuidade lateral e, em seguida, as de menor, obedecendo à hierarquia das superfícies limitantes e, quando possível, correlacionando-os aos blocos construtores da Estratigrafia de Seqüências. Neste processo de interpretação/identificação, são usados os atributos físicos mais facilmente observados, como amplitude, fase, geometria externa dos padrões das reflexões, e tipos de terminação dos refletores. A continuidade das reflexões está intimamente associada à continuidade e espessura dos estratos, sugerindo camadas ou lâminas amplamente distribuídas e uniformemente estratificadas. A depender de frequência, a amplitude em geral descreve o aspecto textural da radarfácies, que pode estar relacionada às variações espaciais de velocidade e contrastes de permissividade dielétrica, refletindo, por exemplo, variações granulométricas e/ou litológicas, diferentes grau de empacotamento e presença de fluidos, em especial, da água.

No processo de interpretação, usamos também a chamada técnica ABC (*Above, Below, Configuration*), comumente utilizada pelos intérpretes sísmicos, para identificar sismofácies. Esta técnica consiste em identificar as reflexões mais contínuas e mais extensas presentes nas seções, em função das relações de terminação dos estratos acima e/ou abaixo do respectivo evento. O objetivo central é separar os conjuntos de reflexões limitados por esses eventos mais contínuos, assim como suas relações de terminação. Neste contexto, a utilização correta de paletas coloridas e diferentes relações de escalas podem facilitar a identificação desses limites. Em geral, linhas comprimidas no eixo X (distância) auxiliam na identificação dos refletores mais contínuos, assim como acentuam as relações angulares entre os refletores, facilitando a sua visualização. O uso de *loopings* também é recomendado para checar a correlação e extensão lateral dos refletores.

Após identificar os refletores de maior extensão e continuidade, o segundo passo é caracterizar a geometria externa e o arranjo interno das reflexões de cada conjunto, ou seja, sua configuração estratal. Neste estágio da interpretação, é necessário descrever e classificar os conjuntos de reflexões, em função da combinação da forma externa com a configuração estratal (arranjo interno) de cada conjunto, e, se possível, do padrão de paleocorrente (geralmente disponível em dados 3D),

relacionando-os a uma escala, ou seja, espessura e extensão lateral. É a partir dessa combinação de fatores (descrição dos produtos sedimentares) que interpretamos o processo sedimentar.

A abordagem acima descrita para um tipo de superfície limitante é repetida para as superfícies de menor ordem, caso o dado ofereça uma resolução capaz de identificar e hierarquizar subconjuntos de reflexões contínuas, padrões de terminação e configurações estratais cada vez menores. Registre-se que, neste estágio da interpretação, a hierarquização das terminações torna-se imprescindível. Assim, a técnica ABC deve ser utilizada como ferramenta para balizar os critérios de interpretação, padrões de terminação e configurações estratais, em diversas escalas.

A idéia de interpretar dados de GPR, utilizando critérios sismoestratigráficos não é inédita. Autores como Gawthoper *et al.* (1993), Bristow (1995) e Van Overmeeren (1998), embora em contextos distintos, utilizaram os padrões de terminação sismoestratigráficos para caracterizar as radarfácies e o seu significado em termos de registro sedimentar. Gawthorpe *et al.* (1993) definem o termo *radar sequence* como uma unidade estratigráfica fundamental dos dados de GPR, equivalente aos limites dos conjuntos de camadas ou de parasseqüências, como estabelecido por Van Wagoner *et al.* (1990). Neste mesmo contexto, Gawthoper *et al.*, (1993) também definem o termo radarfácies como um pacote de reflexões com configuração similar e defendem a utilização dos conceitos sismoestratigráficos estabelecidos por Mitchum *et al.* (1977c) e Brown e Fisher (1980) para classificar as radarfácies de forma semelhante às sismofácies.

De forma semelhante, vamos utilizar uma metodologia baseada na combinação e adaptação de termos e conceitos herdados da sismoestratigrafia (Mitchum *et al.*, 1977a,b,c; Payton, 1977; Sangree e Widmier, 1977; Vail *et al.*, 1977; Vail e Mitchum, 1977; Brown e Fisher, 1980; e Posamentier *et al.*, 1988; por exemplo), associada à hierarquização das Superfícies Limitantes (*bounding surfaces*) de Miall (1985, 1988, 1991, 1996), como base para a interpretação de dados de GPR.

O critério unificador de interpretação entre Sísmica e GPR, que se repete em diversas escalas, são os padrões geométricos das terminações dos estratos, seja contra um plano de falha e/ou contra outro estrato. Segundo Mitchum *et al.* (1977a,b,c), os padrões de reflexão encontrados na sísmica de reflexão são caracterizados pelas relações geométricas entre as reflexões e a superfície sísmica contra a qual ela

termina, a partir das quais são interpretados os processos atribuídos ao registro sedimentar.

Na escala de operação do GPR, os tipos de terminação são similares aos observados na sismoestratigrafia e, em termos de geometria, refletem o registro sedimentar em subsuperfície. Contudo, a diferença de escala impacta diretamente a interpretação. Isto é, enquanto a sísmica mapeia normalmente registros (processos ou ciclos) deposicionais de magnitudes de 3ª a 2ª ordem, o GPR caracteriza o registro sedimentar (processos ou ciclos deposicionais) de mais alta frequência e, portanto de menor ordem (tipicamente entre 4ª e 6ª ordem). Dessa forma, o GPR registra a sedimentação na escala de afloramento e, portanto, mais próxima da sedimentação marcada por conjunto de lâminas, *foresets* e/ou camadas.

Numa seção de GPR, os tipos de terminação podem estar relacionados ou definir desde a forma de uma única estrutura sedimentar ou uma forma de leito individual (no caso de um levantamento 3D), até a forma externa das unidades maiores como uma seqüência de fácies. Por outro lado, a sísmica separa limites de seqüências tipicamente entre 2ª e 3ª ordens, e quando possível, limites de parasseqüências (4ª ordem).

A seguir, vamos detalhar isoladamente os principais aspectos do método de interpretação, reforçando mais uma vez que estes elementos/ferramentas de interpretação são utilizados concomitantemente.

2.6.2 – Tipos de Terminações dos Estratos e seus Significados

A premissa sobre a qual a sismoestratigrafia foi desenvolvida propõe que a origem das reflexões se deve aos contrastes de impedância acústica que, contrariamente ao senso comum, não coincidem com os contatos litológicos e sim com as linhas de tempo síncronas à deposição dos estratos. A origem das reflexões está associada às superfícies estratais (paleo-superfícies de deposição) ou discordâncias (superfícies de erosão e/ou não-deposição) que possuem importante significado cronoestratigráfico (Vail *et al.*, 1977). Na escala do GPR, são os limites de camadas, de fácies e associações de fácies e dos elementos arquiteturais de um sistema deposicional que podem ser correlacionados às linhas de tempo.

Semelhantemente à sismoestratigrafia, a caracterização desses elementos se dá em função das relações de terminação dos refletores, dentre as quais o tipo de

relação discordante é o melhor indicador para distinguir entre uma discordância resultante de um processo erosivo ou de não deposição. Adicionalmente, para o GPR, o arranjo interno dos refletores, em geral, revela a geometria das estruturas sedimentares, que possibilitam a inferência de um processo sedimentar para sua origem dentro de um contexto genético.

Os principais tipos de terminação, tanto para a sismoestratigrafia como para o GPR, são as terminações que definem o afinamento lateral de um refletor, até seu desaparecimento, ou a terminação de um refletor no seu acunhamento deposicional, que são denominadas de *lapout*. Dentre estes tipos, destacam-se: a terminação com o limite inferior, *baselap*, que se subdivide em *downlap* e *onlap*; e a terminação com o limite superior, que é o *toplap* (Mitchum *et al.*, 1977a,b,c). A figura 2.3 ilustra os principais tipos de terminação lateral entre os estratos que são comumente utilizados na sismoestratigrafia, comparados aos padrões de terminação retirados das seções de GPR utilizadas neste trabalho.

2.6.2.1 – Truncamentos Erosivos e Estrutural

Truncamento é a terminação lateral abrupta de um estrato contra uma discordância erosiva ou resultante de processos estruturais, como por exemplo, falhamentos e dobramentos (Mitchum *et al.*, 1977c). Exemplos de truncamentos erosivos podem ser observados nas seções de GPR adquiridas em Galos-RN, na figura 2.3. Outros exemplos de truncamento erosivo, dentro do contexto de uma seção de GPR, estão ilustrados na figura 2.4 pelos horizontes de cor verde. O segundo tipo de truncamento corresponde aos truncamentos estruturais, que são muito comuns em seções sísmicas. Eles se referem aos truncamentos abruptos e refletores provocados por falhas, dobras, feições de deslizamento e fluxo gravitacional (Ojeda, 1991). Na escala do GPR, esse tipo de terminação é, em geral, marcado pela presença de falhas e/ou fraturas, as quais podem ser identificadas pelo deslocamento entre os refletores e/ou como um novo refletor que trunca o acumamento sedimentar, impondo um deslocamento a essas superfícies. Truncamentos estruturais não foram encontrados nos sedimentos costeiros da área estudada neste trabalho.

2.6.2.2 – Terminações com o Limite Inferior

Segundo Mitchum *et al.* (1977c), as terminações basais das reflexões são denominadas de *baselap* que podem ser, subdividas em *downlap* e *onlap* (figura 2.3).

As terminações em *onlap* caracterizam recobrimentos progressivos de um refletor mais expressivo que representa uma superfície deposicional, originalmente inclinada, por terminações de refletores horizontais mergulho acima (Mitchum *et al.*, 1977c; Ojeda, 1991). Um exemplo de *onlap* numa seção de GPR está ilustrado na figura 2.4 pelas terminações basais dos horizontes de cor vermelha. Por sua vez, os *downlaps* são definidos por recobrimentos progressivos de refletores mais expressivos que representam uma superfície deposicional, originalmente horizontal ou inclinada, por terminações mergulho abaixo e assintóticas de refletores inicialmente mais inclinados (Mitchum *et al.*, 1977c; Ojeda, 1991). Um exemplo de *downlap* numa seção de GPR está ilustrado na figura 2.4 pelas terminações basais dos horizontes de cor laranja.

2.6.2.3 – Terminações com o Limite Superior

Na sismoestratigrafia, as terminações em *toplap* representam as terminações tangenciais dos refletores contra o limite superior da sismossequência, em geral evidenciando um hiato não-deposicional que ocorre quando o nível de base se encontra muito rebaixado, impedindo a continuidade da deposição (Mitchum *et al.*, 1977c; Ojeda, 1991). Várias terminações em *toplap* (figura 2.3) podem ser visualizadas em algumas seções obtidas em Galos, como também mostra a figura 2.4 (terminação superior dos horizontes laranja). Os *toplaps* indicam a exposição de superfícies de *by-pass* na sismoestratigrafia. Nestes locais onde ocorrem os *toplaps*, pode-se encontrar terminações que se assemelham, na sua forma, às superfícies de *by-pass* (ver figuras 2.8 e 2.9). Esta configuração indica uma sedimentação com lâmina d'água muito rasa sobre as margens dos estreitos de maré. Isso sugere que o lado do canal onde ocorrem as barras de acreção lateral tornou-se um local de não-deposição que, sob condições de lâmina d'água rasa ou como uma zona de transpasse sedimentar, favoreceu a migração das barras de acreção.

2.6.3 – Radarfácies e suas Principais Configurações

Os conjuntos de reflexões podem ser agrupados e individualizados em função das suas configurações internas, ou seja, em função dos seus padrões de reflexão externos e internos. Em termos geométricos, eles se assemelham aos padrões geométricos das sismofácies (Gawthoper *et al.*, 1993), dentre os quais se destacam os padrões internos dos tipos plano-paralelo, oblíquo paralelo, subparalelos, lenticulares, divergentes, sigmoidais, caóticos e transparentes (figura 2.3). Semelhantemente, a

forma externa tridimensional que engloba cada conjunto de reflexões também pode ser classificada com base nas definições adotadas pela sismoestratigrafia. Assim, as principais formas tridimensionais identificadas na sismoestratigrafia por Mitchum *et al.* (1977a,b,c) também podem ser associadas à forma externa dos conjuntos de reflexões.

Adicionalmente, é necessário ressaltar que a interpretação atribuída às formas tridimensionais deve ser adequada à escala de tempo dos processos sedimentares que originaram os estratos mapeados com GPR. Tanto na sísmica quanto no GPR, cada refletor deve ser interpretado como uma linha de tempo.

2.6.4 – Offlaps, Convergência Interna e Truncamentos Aparentes

Além das relações de terminação sismoestratigráfica anteriormente descritas, também são encontrados padrões em *offlap*, em convergência interna e truncamento aparente, como mostrado na figura 2.4. Os *offlaps* em geral refletem um padrão não-sistemático do arranjo interno das terminações em *onlap/downlap*, associados ao padrão progracional das parasseqüências e conjuntos de parasseqüências dentro de uma bacia (Mitchum *et al.*, 1977a,b,c; Ojeda, 1991). Na escala do GPR, a utilização do termo *offlap* é atribuída às reflexões inclinada e não sistemáticas dos refletores, que neste caso refletem os *foresets* das estruturas internas das dunas, como mostra os horizontes em marrom na figura 2.4.

A convergência interna (linhas verde na figura 2.4) ocorre quando os refletores tendem a se adelgaçar entre os demais refletores, ficando abaixo do limite de resolução e sumindo entre dois outros refletores (Mitchum *et al.*, 1977c; Ojeda, 1991).

Os truncamentos aparentes (linha amarela na figura 2.4) ocorrem quando as reflexões terminam abaixo de um refletor pouco inclinado, ou seja, referem-se às terminações em baixo ângulo entre os estratos, de modo que o limite real entre ambos esteja abaixo do limite de resolução (Mitchum *et al.*, 1977c; Ojeda, 1991). A interpretação atribuída aos padrões de terminação pode variar em função do contexto no qual o dado de GPR foi adquirido.

2.7 – HIERARQUIA DAS REFLEXÕES

Miall (1985, 1988, 1991, 1996) propôs que as superfícies limitantes em sistemas fluviais fossem hierarquizadas em seis ordens de grandezas diferentes (figura

2.5), associando a elas um processo sedimentar numa escala de tempo apropriada, como sugere a tabela 2.1.

Normalmente, as superfícies limitantes de 6ª ordem estão associadas a processos de migração do cinturão de fácies que limitam vários de canais ou paleovales. São unidades estratigráficas que separam temporalmente as seqüências deposicionais, como por exemplo, um complexo fluvial de extensão regional. As superfícies de 6ª ordem podem ser correlacionadas aos ciclos ou limites de paraseqüências de 5ª ordem da Estratigrafia de Seqüência (tabela 2.1). Uma superfície limitante de sexta (6ª) ordem não é comumente registrada numa seção de GPR e, no caso de Galos, elas não ocorrem nas seções de GPR.

A superfície limitante de quinta (5ª) ordem corresponde ao limite entre dois conjuntos de fácies diferentes, mas geneticamente correlacionadas. Assim, estas superfícies atuam como linhas de tempo que separam intervalos cronoestratigráficos relacionados aos episódios de deposição das fácies sedimentares (horizontes azul-escuros na figura 2.6). Segundo Miall (1996), estes intervalos variam entre 1.000 e 10.000 anos. Dentro do contexto de Galos, foram identificados pelo menos dois limites de 5ª ordem, como mostra a figura 2.6. O primeiro pode ser observado na porção NW da linha LP1; da base para o topo, a disposição das fácies separadas por superfícies limitantes de 5ª ordem (truncamentos) é a seguinte: na base, ocorre fácies representativas de estreito de maré (*tidal inlet*) sobrepostas pelas fácies de praia que, por sua vez, estão sobrepostas pela associação de fácies eólicas (campos de dunas). O segundo limite de 5ª ordem imageado em Galos encontra-se na porção SE da linha LP1, e separa, da base para o topo, a associação de fácies de estreito de maré em relação a fácies e associação de fácies de planície de maré, que está imediatamente sobreposta pela associação de fácies eólica (figura 2.6). Note que as superfícies de 5ª ordem, neste segundo caso, estão relacionadas às mudanças no sistema deposicional em função da mudança dos processos sedimentares, ou seja, fluxos de maré nas fácies de canal, ondas nas fácies de praia e vento nas fácies de duna.

As superfícies limitantes de quarta (4ª) ordem funcionam como envelopes mais complexos dos elementos arquiteturais, separando as unidades deposicionais individuais internas aos conjuntos de 5ª ordem. Como primeira aproximação pode-se dizer que as superfícies de 4ª ordem normalmente são marcadas por ciclos deposicionais que oscilam entre 100 e 1.000 anos e são relativos à formação de um único depósito sedimentar, que é materializado numa radarfácies. Por isso são comuns

as relações de truncamento e reativação dentro de uma mesma fácies sedimentar. Já as superfícies limitantes de terceira (3ª) ordem correspondem aos envelopes em larga escala das macroformas (Miall, 1996), isto é, elas são superfícies de reativação relacionadas a incrementos na migração das macroformas (arranjo dos refletores dentro das superfícies de 4ª ordem). Segundo Miall (1996), as superfícies de 3ª ordem limitam ciclos que oscilam entre 1 a 10 anos.

Normalmente, a distinção entre as superfícies de 3ª e 4ª ordens é complexa, mas pode ser obtida em função dos contrastes entre os padrões de terminação e da forma como elas ocorrem numa sucessão vertical. Um exemplo da distinção entre superfícies de 3ª e 4ª ordens pode ser vista nos dados obtidos em Galos, nos quais as seções de GPR permitem identificar uma maior variabilidade de fácies. A figura 2.7 ilustra as superfícies limitantes de 4ª ordem, relacionadas ao processo de reativação da deposição de fácies sedimentares de um mesmo sistema deposicional, com destaque para: (i) a relação de truncamento entre as calhas dos canais (marcados por linhas de cor vermelhas), que demonstram um processo de reativação, incluindo mudanças de posição no espaço e no tempo, configurando assim um processo de avulsão (migração lateral de canais); (ii) o processo de progradação das fácies de intermaré (horizontes de cor verde escuro), que demonstra ter havido um processo de acreção de material arenoso, provocando o recuo da linha de costa.

Nas seções de GPR de Galos, as superfícies de 3ª ordem caracterizam, da base para o topo, a associação de fácies de estreito de maré, a associação de fácies de praia (estirâncio) e a associação de fácies eólicas (figura 2.8).

No intervalo relativo a associação de fácies que individualiza os estreitos de maré a distribuição das superfícies limitantes de 3ª ordem é mais complexa. Entretanto, pode-se individualizar pelo menos três grupos de superfícies limitantes de 3ª ordem, com base nos seus respectivos padrões de terminações (rever figura 2.3), associados a uma contextualização genética. Os dois primeiros grupos a serem destacados são os padrões de preenchimento de canal, que podem ocorrer com uma configuração complexa (ressaltados por linhas de cor amarela escura), ou divergente (marcado por linhas de cor laranja claro), ambas nas figuras 2.8 e 2.9. A interpretação atribuída aos padrões de preenchimento dos estreitos de maré está relacionada ao processo de abandono e posterior comatação dos mesmos. Os outros dois grupos de superfícies de 3ª ordem correspondem aos padrões sigmoidais das barras de acreção lateral. Estas exibem padrões de terminações ora em *downlap* e *toplap* (linhas de cor magenta, nas

figuras 2.8 e 2.9), ora *downlap* e truncamento no topo (linhas de cor rosa claro, nas mesmas figuras).

Nas associação de fácies *de praia* (zona de intermaré), imediatamente acima da associação de fácies de estreitos de maré, na porção NW da linha LP1, as superfícies de 3ª ordem são identificadas a partir de superfícies planares que mergulham em baixo ângulo (tipo *shingled*, normalmente $< 5^\circ$). Elas separam conjuntos de refletores que foram interpretados como camadas com estratificação cruzada de praia (laminações com formato em cunha) como mostram os horizontes de cor verde musgo nas figuras 2.8 e 2.9.

Finalmente na associação de fácies *eólicas* (*dunas*), ocorrem no topo da coluna estratigráfica, os campos de dunas, cujo interior é marcado por superfícies limitantes de 3ª ordem, associadas a processos de reativação, como mostram as linhas em amarelo na figura 2.8 e 2.9.

Na associação da fácies de *planície de maré* (*tidal flat*), na porção SE da linha LP1 (figura 2.8), ocorrem refletores paralelos e levemente ondulados, que terminam em *onlap* sobre as superfícies de truncamento (superfície limitante de 5ª ordem). De modo geral, a relação de contato entre a fácies de canal e a fácies de planície de maré é caracterizada por uma relação de truncamento, evidenciada pela diferença angular entre seus refletores (figura 2.8). Já as relações de contato entre a planície de maré e as fácies eólicas (dunas) é complexa. Na linha LP1 (figura 2.8), ocorrem pequenas dunas sobre a fácies de planície de maré. Entretanto, estas duas fácies (eólica e planície de maré) coexistem atualmente (são aflorantes). Na fácies de planícies de maré, o padrão dos refletores é paralelo e levemente ondulado (destacado pelos horizontes de cor púrpura) e, às vezes, transparente, devido ao conteúdo de água salinizada presente.

As superfícies limitantes de segunda (2ª) e primeira (1ª) ordens assumem, em linhas gerais, um contexto mais genético em relação às fácies, cujos limites são geralmente erosionais e interpretadas com resultantes das variações no gradiente de energia ou na direção do fluxo (Miall, 1996). Segundo Miall (1996), elas representam em geral uma sedimentação contínua de um tipo de acamamento similar, sendo interpretadas como resultado da migração de uma forma de leito submetido a um regime de fluxo constante, como, por exemplo, em estratificações relacionadas num mesmo conjunto de *ripples*, em pequena ou até mesmo em macro-escala, como as estratificações de uma duna eólica. Nas seções de GPR, a distinção entre superfícies

de 1ª e 2ª ordens não é trivial e só será possível distinguir uma da outra se ambas estiverem dentro do limite de resolução da antena utilizada.

Nos dados adquiridos em Galos, as superfícies de 1ª e 2ª ordens foram agrupadas numa mesma dimensão, devido ao limite de resolução imposto pela antena de 200 MHz, utilizada na aquisição. Entretanto, é possível correlacionar uma simples reflexão contínua aos *foresets* das estruturas sedimentares ou formas de leito, devido às mudanças nas propriedades entre os *foresets* (porosidade, conteúdo de água, etc.). Por exemplo, na figura 2.9, as superfícies limitantes de 1ª e/ou 2ª ordem estão representadas por estruturas sedimentares que caracterizam reativações do fluxo sedimentar, como: os *foresets* das dunas (estratificações cruzadas), destacados pelas linhas em amarelo claro, e estratificações tipo espinha de peixe (*herring-boner*) que indicam fluxo bidirecional, ressaltadas pelos retângulos em azul (figura 2.9).

2.8 – CARACTERIZAÇÃO E CORRELAÇÃO DAS RADARFÁCIES ÀS FÁCIES SEDIMENTARES

A caracterização das radarfácies e sua correlação às fácies sedimentares está diretamente ligada à atribuição de um sentido geológico aos atributos físicos observados nas seções. Dessa forma, pode-se afirmar que os padrões de reflexão nas seções de GPR expressam os produtos sedimentares em subsuperfície que, em geral, são representados por elementos como a geometria externa dos corpos, as estruturas sedimentares, assim como pelas variações de textura/granulometria, espessura e padrões de paleocorrente - quando presentes. Partindo desta premissa, propõe-se correlacionar a definição de radarfácies à definição de fácies sedimentar, desde que seja possível atribuir ou interpretar os processos sedimentares capazes de explicá-las em termos genéticos. Em outras palavras, a correlação entre fácies sedimentares e radarfácies deve ser feita em função da relação produto *versus* processo sedimentar. Por esse motivo, se faz necessário contextualizar a interpretação com os modelos preditivos de sistemas deposicionais, caracterizados por Walker e James (1992) e Galloway e Hobday (1996), ao mesmo tempo em que averiguamos sua validade em diferentes escalas. Dentro deste contexto, a hierarquização das superfícies limitantes é imperativa para que se possa correlacionar corretamente os limites dos blocos construtores da Estratigrafia de Seqüências: lâmina, conjunto de lâminas, camadas,

conjunto de camadas e, quando possível, limite de parasseqüência (Van Wagoner *et al.*, 1990) a estas superfícies (tabela 2.1). Por isso, é desaconselhável a atribuição direta de interpretações somente em função das configurações geométricas das radarfácies. Da mesma forma que uma fácies ou estrutura sedimentar pode ocorrer em vários sistemas deposicionais distintos, as configurações geométricas das radarfácies também poderão estar relacionadas a contextos geológicos diferentes. Assim, a construção de atlas interpretativos, a exemplo do que foi realizado por Van Overmeeren (1998) para depósitos sedimentares na Holanda, é pouco eficiente do ponto de vista interpretativo.

Os resultados na área de Galos, obtidos com a utilização da metodologia de interpretação proposta neste trabalho, permitiu estabelecer uma sucessão vertical de fácies, a partir da qual foram caracterizados os produtos sedimentares (radarfácies), aos quais, por sua vez, foram atribuídos/interpretados processos sedimentares dentro de um cunho genético. Esta interpretação permitiu estabelecer um modelo evolutivo para o *spit* de Galinhos (figura 2.10), na área de Galos. Neste modelo, foi caracterizado um sistema deposicional do tipo Ilhas Barreiras, formado por: a) fácies de estreito de maré (*tidal inlet*), na base, com barras de acreção lateral, e feições de preenchimento desses canais, truncados lateralmente pelas fácies de planície de maré; b) fácies de praia (zona de intermaré), sobrepostas aos estreitos de maré, marcando um avanço relativo da linha de costa (afogamento das fácies de canal); e por fim no topo da coluna estratigráfica, c) dunas eólicas, denotando o recuo da linha de costa e conseqüente exposição aérea. Desse modo, foi comprovada a existência de um sistema de Ilhas Barreiras atuante no passado geológico e sua evolução para o *spit* atual.

2.9 – CONCLUSÕES E DISCUSSÕES

2.9.1 – Da Metodologia

A alta resolução oferecida pelo GPR pode e deve ser utilizada como ferramenta, principalmente em contextos siliciclásticos, para auxiliar na visualização e mapeamento do substrato sedimentar. Entretanto, a caracterização cronoestratigráfica das superfícies limitantes deve obedecer: (i) aos critérios e conceitos herdados da sismoestratigrafia, sobretudo à correlação aos padrões de terminação dos estratos; e (ii) a uma hierarquização dessas superfícies limitantes. Do ponto de vista de estudos estratigráficos, a vantagem de utilizar a metodologia de interpretação proposta neste

trabalho é que ela se baseia em conceitos, modelos e ferramentas de mapeamento e/ou interpretação já amplamente difundidos. Da mesma forma, a focalização das interpretações nos processos sedimentares com base nos produtos, expressos em subsuperfície pelas radarfácies, permite a materialização dos sistemas deposicionais. Conseqüentemente, obtém-se a construção de modelos evolutivos mais realistas e mais facilmente correlacionáveis aos blocos construtores da estratigrafia de seqüências. Por esse motivo, esta metodologia, embora tenha sido proposta a partir de apenas um caso de estudo, possui validade geral, pelo menos para contextos de sedimentação siliciclástica.

Deve-se ressaltar que fatores relacionados à aquisição (razão sinal/ruído), limites de resolução e processamento dos dados de GPR podem dificultar ou até mesmo impossibilitar a utilização dessa metodologia. Seções de GPR com baixa razão sinal/ruído, como seções obtidas em locais com alto conteúdo de argila ou água salgada, podem comprometer os resultados da interpretação. A discussão acerca dos limites de resolução vertical e lateral está ligada aos objetivos de um levantamento e à relação custo benefício do mesmo. Em termos de processamento dos dados de GPR, é fundamental ressaltar que toda correlação e construção de metodologia de interpretação aqui proposta é baseada nos mecanismos de análise e interpretação de produtos e processos sedimentares a partir de dados de GPR. Isso só tem sentido se as seções de GPR tiverem sido, necessariamente, processadas de forma a realçar o registro geológico em subsuperfície. Neste contexto, a utilização de sessões não-processadas tende a anular a possibilidade de uma interpretação coerente com os processos sedimentares. Neste trabalho, o compromisso do processamento foi ressaltar o registro sedimentar em diferentes contextos, tentando identificar as relações de truncamento ou gradação entre estruturas sedimentares, conteúdos litológicos distintos, variações granulométricas, etc.

2.9.2 – Dos resultados obtidos em Galos

A sucessão vertical de fácies encontrada em Galos-RN permite cogitar algumas discussões do ponto de vista de evolução estratigráfica. Tomando por base os modelos e conceitos de Estratigrafia de Seqüência em escala de afloramento, propostos por Van Wagoner *et al.* (1990), é possível levantar as seguintes questões: (i) *existe um ciclo de raseamento para o topo?* (ii) *se existir este ciclo, trata-se de um limite de parasseqüência?* Com base nos dados de GPR pode-se dizer que, pelo

menos o limite superior de uma parasseqüência, marcada pela exposição aérea com os campos de dunas eólicas atuais, parece existir de fato. Entretanto, o limite inferior, um provável inframaré e/ou *offshore*, estaria mais abaixo, fora do alcance de penetração do radar.

2.9.3 – Das sugestões de utilização

Em termos de resolução, o GPR pode ser usado para preencher, mesmo que parcialmente, a lacuna existente entre os limites de resolução da sísmica e dos dados de poços e/ou de afloramento. Em outras palavras, a alta resolução oferecida pelo GPR e a sua similaridade com a sísmica de reflexão podem e devem ser usadas para estabelecer, quando possível, um vínculo de ligação entre a escala de trabalho da sísmica de reflexão e de dados de poços e afloramento. Um bom exemplo dessa possibilidade é a utilização de dados de GPR para obter parâmetros de reservatórios a partir do estudo de análogos. Ou ainda, utilizar o GPR como ferramenta para unir ciclos estratigráficos de mais alta frequência, normalmente não resolvidos pela sísmica, mas presentes em afloramentos ou poços, aos ciclos estratigráficos de maior magnitude sísmicamente resolvidos, sobretudo, dentro do contexto da estratigrafia de seqüências. Entretanto, esta correlação não deve ser feita de forma desordenada ou apenas em função dos padrões geométricos retirados diretamente da seção; ela necessita de critérios de correlação que possam ser utilizados nestas diversas escalas, sem causar danos às informações geológicas, respeitando as limitações de cada método. Uma possibilidade seria a correlação através das superfícies limites e os limites de parasseqüência, o que demandaria um volume expressivo de dados de GPR em termos lineares ou em área de um 3D de GPR. Quanto maior o volume de dados maior será a variação e correlação lateral de fácies, além de uma seção vertical representativa para caracterizar os limites de parasseqüência, a exemplo do que foi feito neste trabalho. Este é um dos principais desafios da mudança de escala exigida para correlacionar dados de GPR a dados sísmicos. Dentro dessas condições, o GPR pode contribuir de uma forma mais eficiente como ferramenta de mapeamento em subsuperfície, podendo ser utilizado para compreender ciclos sedimentares de maior frequência, principalmente junto à linha de costa (local mais sensível às variações de alta frequência, com ciclos de 6ª a 4ª ordem), por exemplo.

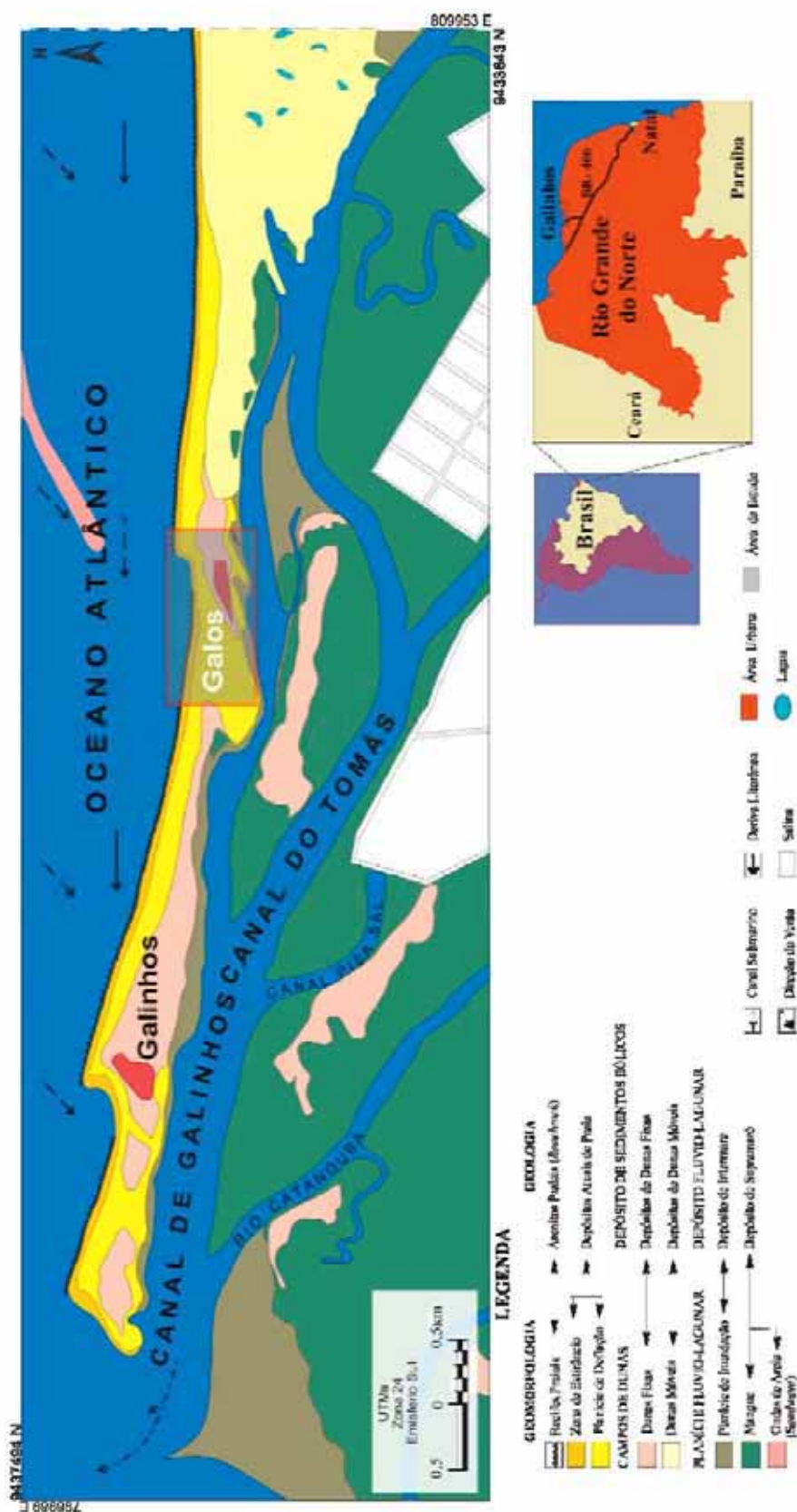


Figura 2.1 – Mapa Geológico do *spit* de Galinhos (NE – Brasil), onde está situada a área de trabalho de Galos (simplificado de Lima, 2004).

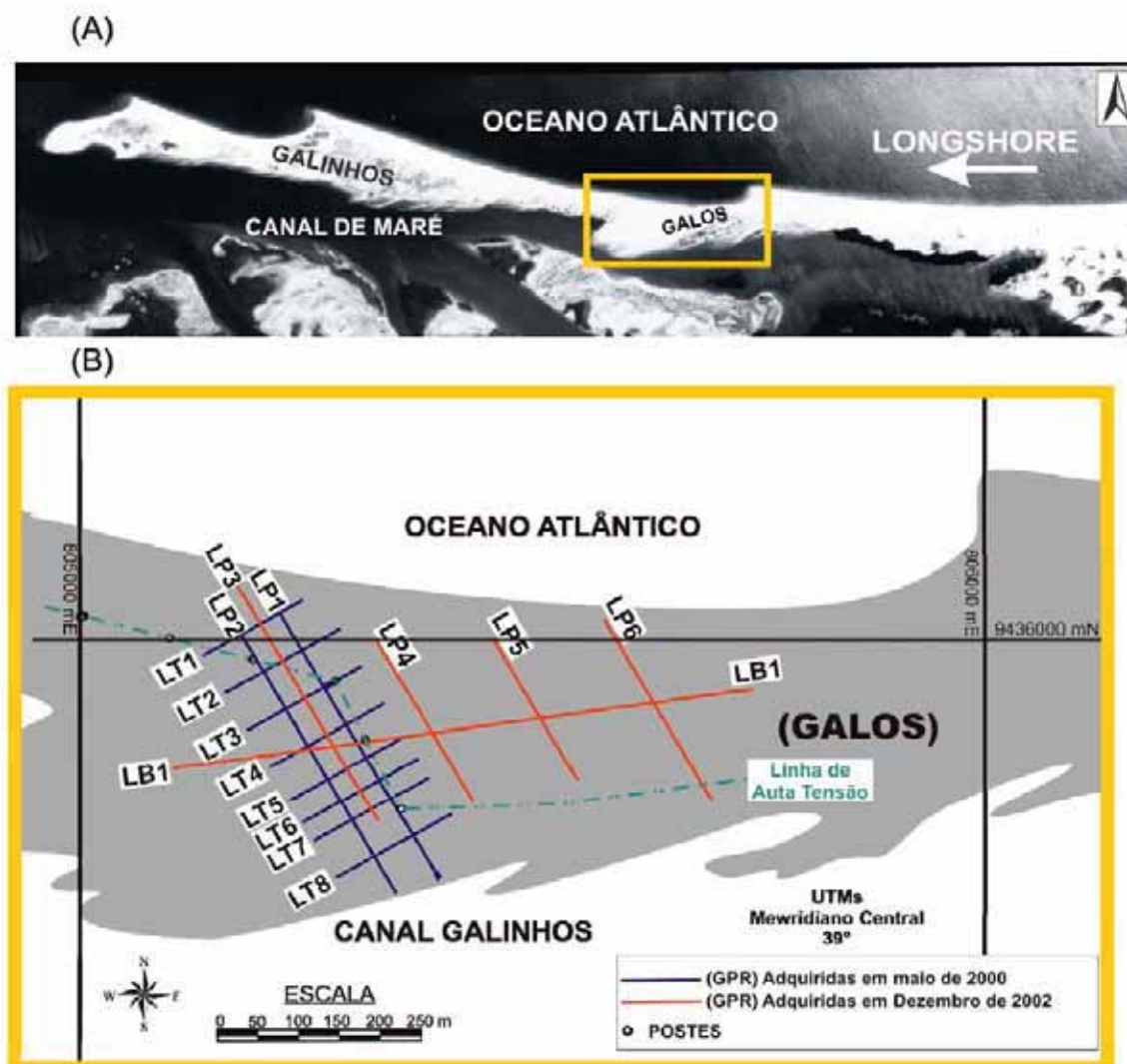


Figura 2.2 – Em (a), foto aérea de 1988 do *spit* de Galinhos-RN, na qual está destacada a área de estudo. Em (b), ampliação com disposição da malha de aquisição das seções GPR.

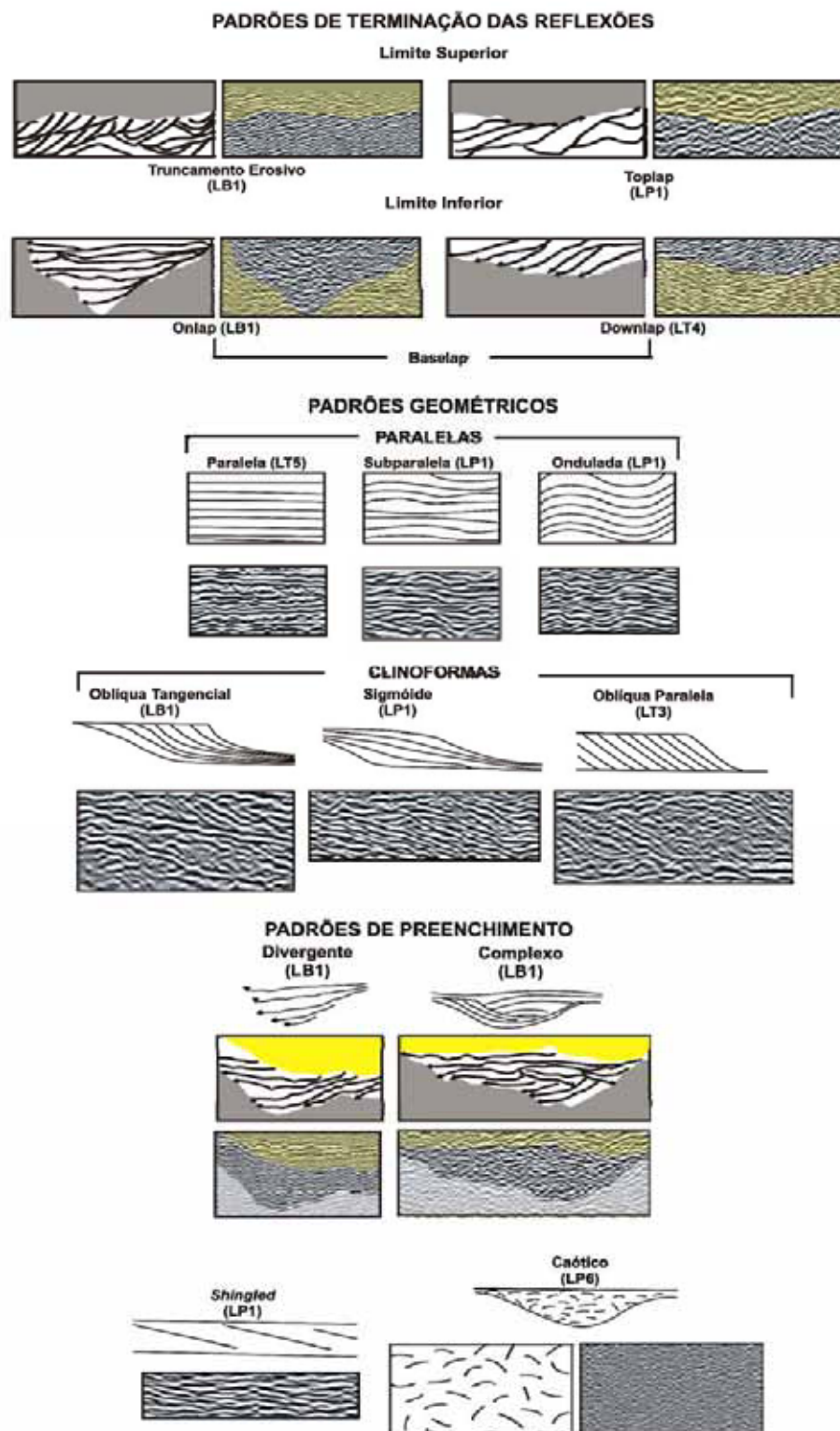


Figura 2.3 – Resumo dos principais padrões de terminação de estratos utilizados na Sismoestratigrafia. Em cada figura está mostrado um recorte real de uma seção de GPR adquirida em Galos, juntamente com um esquema interpretativo. Dentro dos parênteses, abaixo de cada padrão de reflexão, está indicada a linha de GPR onde ele foi observado.

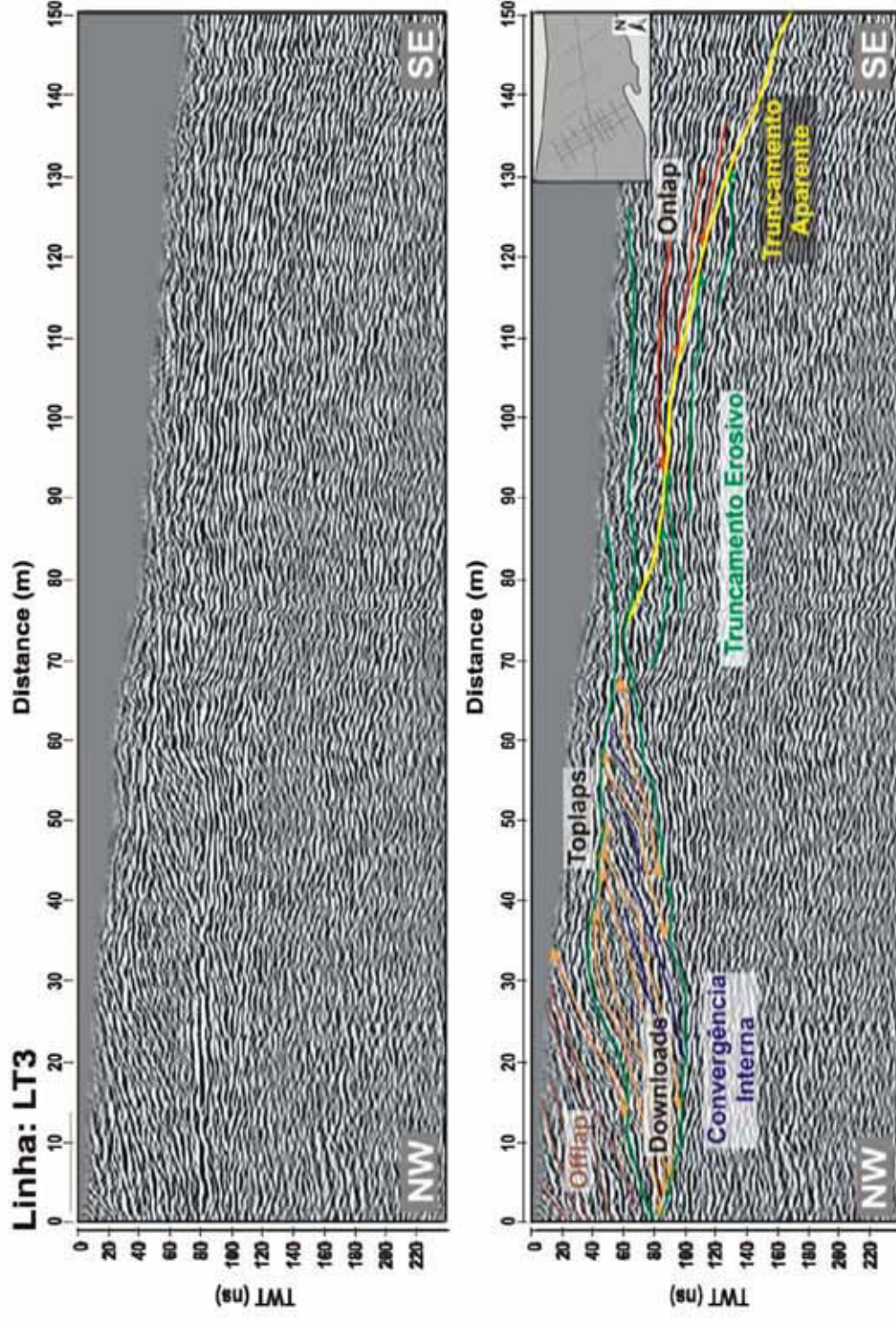


Figura 2.4 – Exemplos de terminações de estratos (truncamento erosivo, *downlap*, *onlap* e *toplap*) e suas relações com as superfícies de truncamento aparente, bem como exemplos de padrões de convergência interna e padrões em *offlaps*. A superfície de truncamento aparente está marcada pela linha de cor amarela. Note as terminações em *downlap* na base e em *toplap* no topo (linhas laranja). Em azul, destacam-se os refletores que mostram convergência interna. As superfícies em verde destacam os padrões de truncamento erosivo. As superfícies em marrom, o padrão em *offlap*.

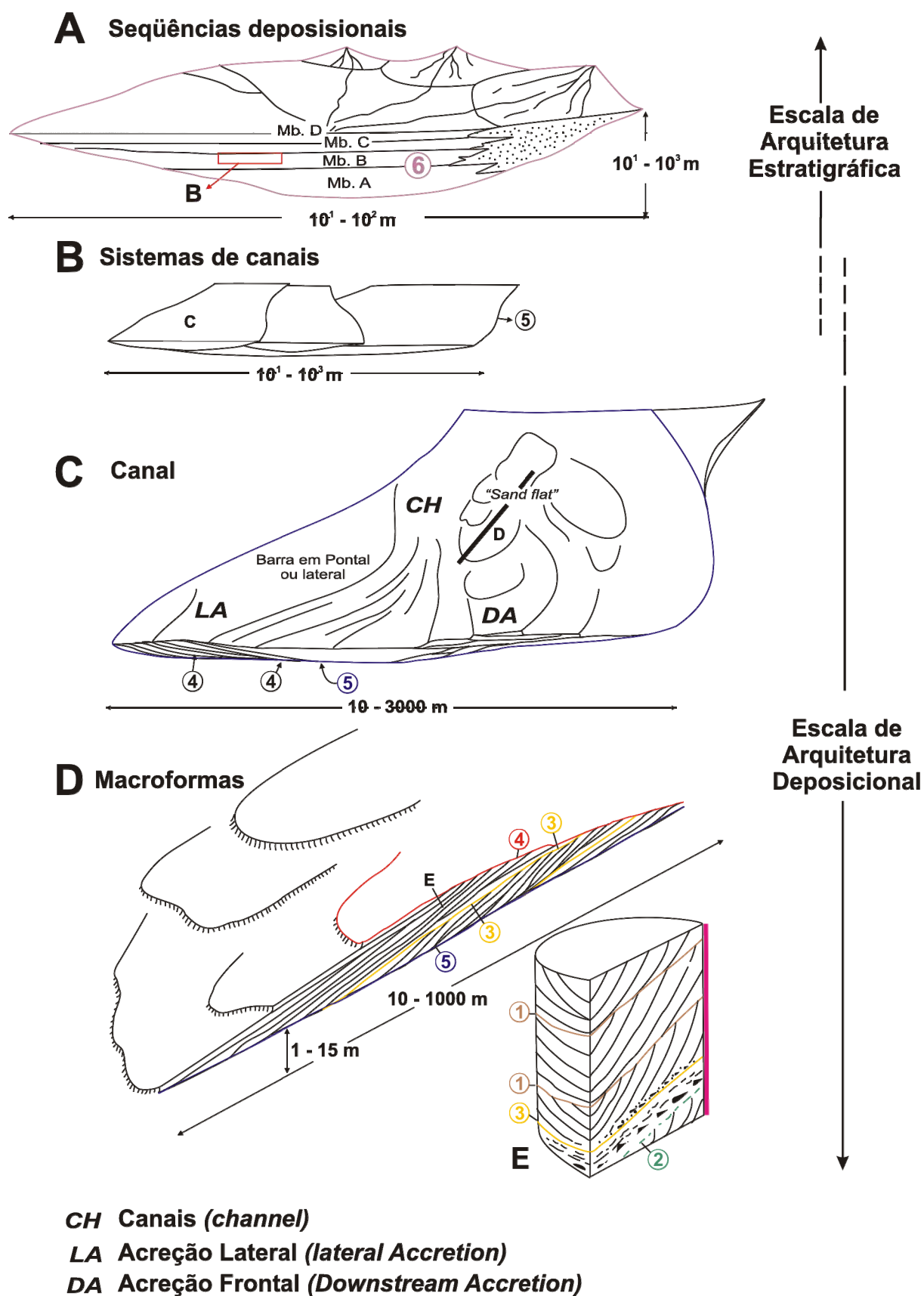


Figura 2.5 – Modelo de hierarquização das superfícies limitantes com base num sistema deposicional fluvial (Adaptado de Miall, 1996).

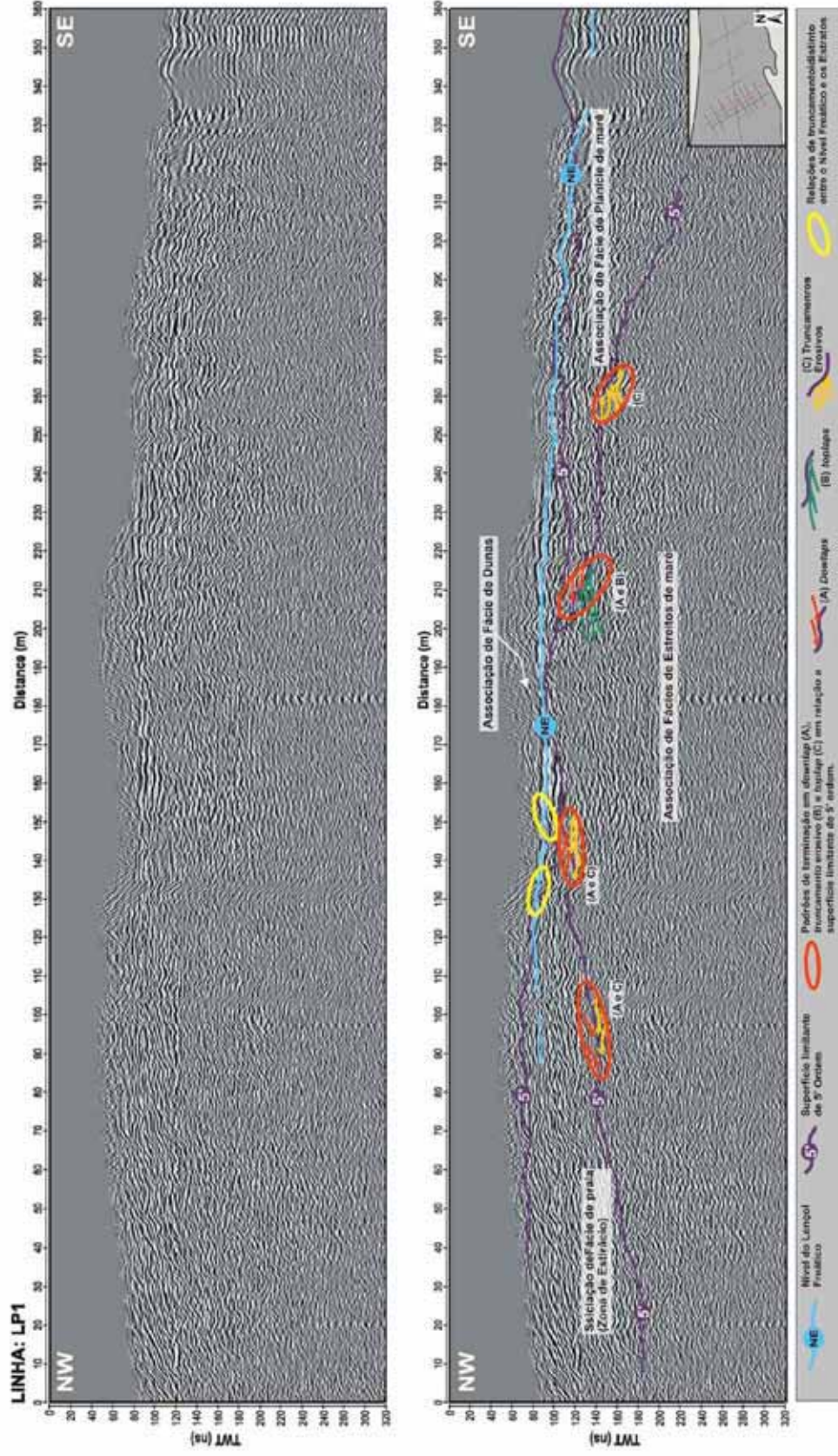


Figura 2.6 – Exemplos de superfícies limitantes de 5ª ordem. Note como as superfícies de 5ª ordem, em geral, se mostram como reflexões contínuas e bem marcadas, embora possam exibir trechos onde a amplitude do sinal é menor, dificultando sua identificação. É possível identificá-las em função dos padrões de terminação em downlap (A), toplap (B) ou truncamentos (C), dos estratos sobre as mesmas, como mostrados nas áreas indicadas pelas elipses vermelhas. Observe também que as reflexões das superfícies limitantes, neste caso, diferenciam-se da reflexão causada pelo nível freático porque esta última trunca indistintamente todas as demais, como mostrado nas áreas destacadas pelas elipses em amarelo.

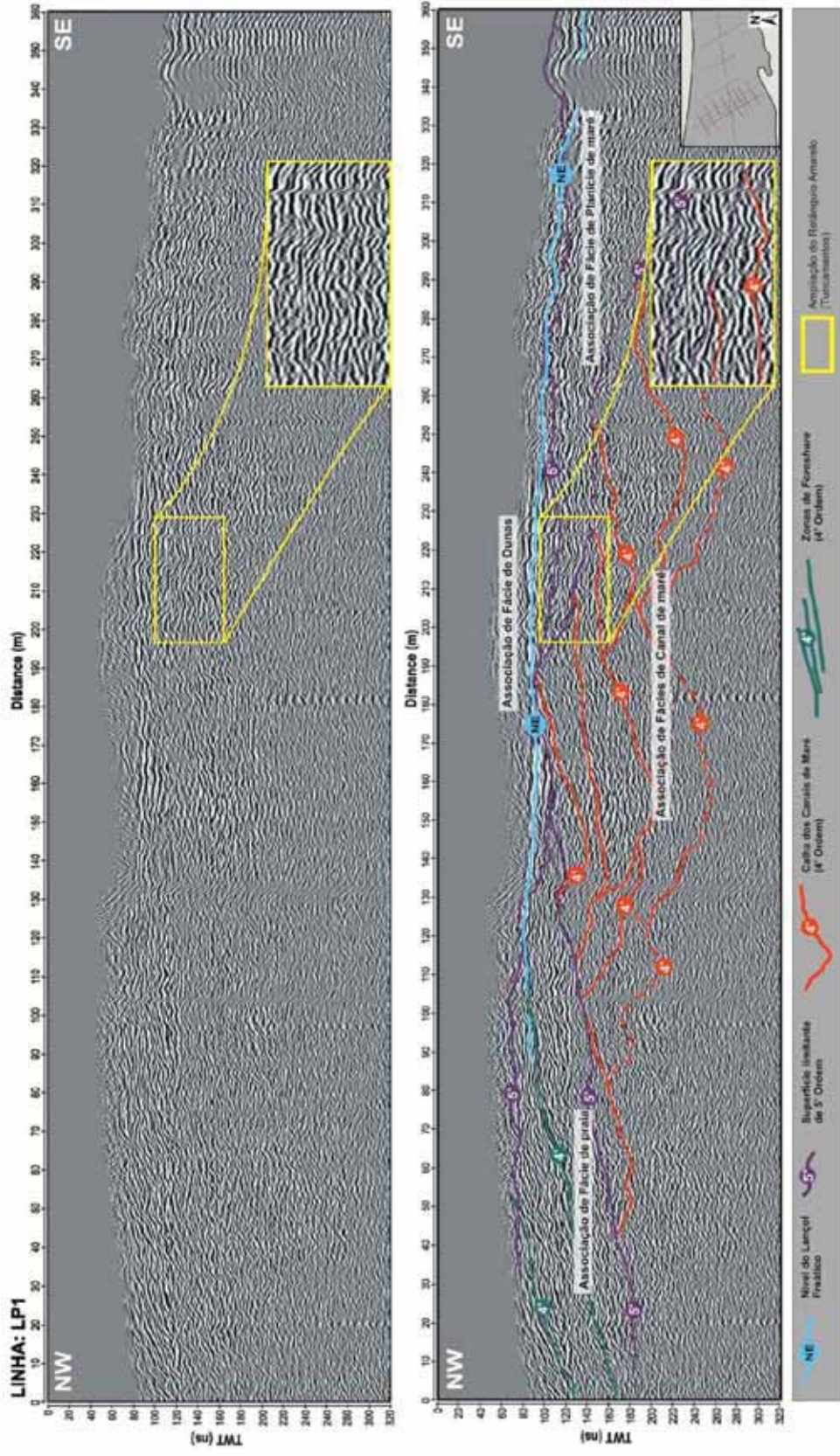


Figura 2.7 – Exemplos de superfícies limitantes de 4º ordem. Aumentando o nível de detalhe da figura 2.6, nota-se que, dentro dos conjuntos de reflexão separados por superfícies de 5º ordem, existem subconjuntos de reflexões. Dentro estes, destaque para as relações de truncamento entre as calhas dos canais de maré, sugerindo um processo de avulsão (migração lateral de canais) desses canais. Nas fácies de praia e de planície de maré também podem ser identificadas superfícies limitantes de 4º ordem. No primeiro caso elas estão relacionadas a processos de progradação das fácies de praia (zona de estiramento), associada com o recuo da linha de costa, e, no segundo caso, com a instalação do canal de maré atual. Note como os conjuntos de superfícies de 4º ordem estão invariavelmente limitados pelas superfícies de 5º ordem, em geral, por uma relação de truncamento, como destacado no retângulo amarelo.



Figura 2.8 – Exemplos de superfícies limitantes de 3^o ordem. Aumentando o nível de detalhe da figura 2.7, nota-se que, dentro dos conjuntos de reflexão separados por superfícies de 4^o ordem, existem subconjuntos de reflexões. A associação das fácies de estreitos de maré está relacionada às barras de acreção lateral, indicando um processo de migração individual dos estreitos de E para W. Destacam-se também, como limites de 3^o ordem, as superfícies de preenchimento dos estreitos de maré (complexo ou divergente), geradas pelo abandono de suas calhas e posterior comatção. Na fácies de planície de maré, a deposição provavelmente se deu num regime de fluxo mais calmo, e, por isso, as reflexões tendem a ter um padrão mais acamado. Nas fácies de praia, as superfícies de 3^o ordem são laminações de baixo ângulo (<15°), relacionadas às estratificações cruzadas de praia, geradas por processos de deposição das ondas. Elas mostram uma tendência de acreção de material sedimentar à linha de costa. Na fácies eólica, as superfícies de 3^o ordem estão relacionadas às superfícies de realivação das dunas, separando-as em gerações.

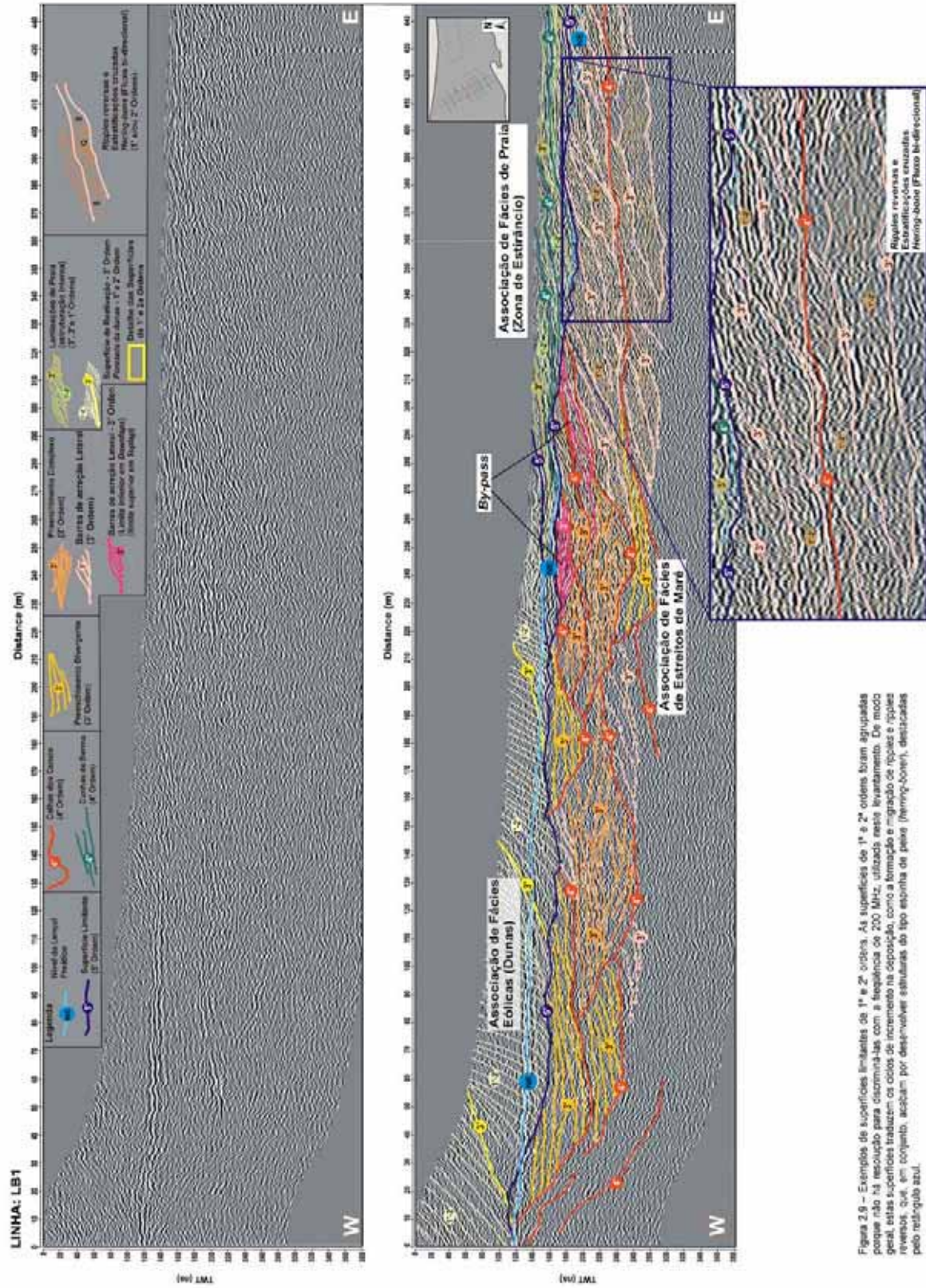


Figura 2.9 – Exemplos de superfícies limitantes de 1^o e 2^o ordens. As superfícies de 1^o e 2^o ordens foram agrupadas porque não há resolução para discriminá-las com a frequência de 200 MHz, utilizada neste levantamento. De modo geral, estas superfícies traduzem os ciclos de incremento na deposição, como a formação e migração de ripples e ripples reversos. Qd, em conjunto, acobrem por desenvolver estruturas do tipo espinha de peixe (herring-bone), destacadas pelo retângulo azul.

Modelo Evolutivo Proposto para a Área de Galos (Galinhos-RN)

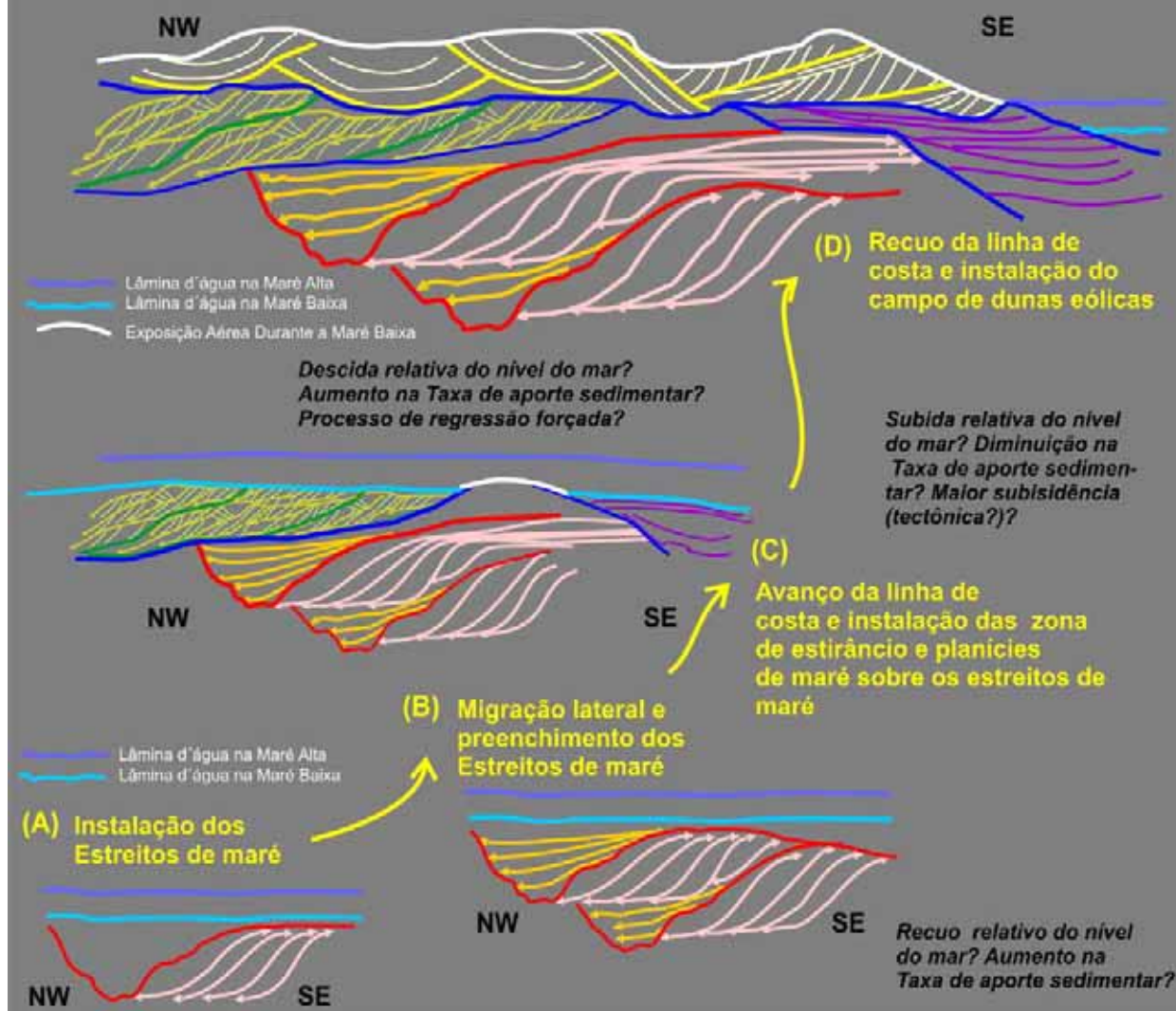


Figura 2.10 – Modelo evolutivo proposto para a região de Galinhos-RN, estabelecido com base na extrapolação para todo o *spit* da interpretação das seções de GPR da área de Galos.

Miall (1996).			Neste trabalho		
A	B	C	D	E	F
Escala de Tempo do processo (anos)	Ordem dos Ciclos para a Estratigrafia de Seqüência e Exemplos dos Processos	Hierarquia e Características das Superfícies Limitantes e exemplos dos processos	Resolução da Sísmica	Resolução do GPR	Afloramento
10^6	Burst-sweep cycles	0 ordem Superfícies de laminação			
10^{-5} a 10^{-4}	Migração de Formas de Leito	1° ordem reativação de <i>foresets</i> , <i>Formação de ripples</i>			
10^{-3}	Migração de Formas de Leito, Ciclo diurno de maré	1° ordem reativação de <i>foresets</i> , <i>Formação de ripples</i>			
10^{-2} a 10^{-1}	Migração de formas de leito, Ciclos de marés de sizígia e quadratura	2° ordem Incremento de crescimento nas dunas, formação de <i>tidal bundles</i> , <i>seqüência de bundles de maré</i>			
10^0 a 10^1	Eventos sazonais, inundações periódicas (10 anos)	3° ordem Reativações de Dunas, Ciclos Anuais, Sand Waves, Depósitos de tempestade			
10^2 a 10^3	Inundações periódicas (100 anos), Canais, Migração de Barras	4° ordem Desenvolvimento de pequenos canais, Barras em pontal (acresção lateral), leque de lavagem, campo de Sand Waves			
10^3 a 10^4	Processos geomorfológicos como avulsão de canais	5° ordem Canais (fluviais e de maré), lobos deltáicos, Complexo de Ilhas Bareiras, <i>Sand-ridge</i>			
10^4 a 10^3	Ciclos de 5° Ordem Ciclos de Milankovitch, resposta a pulsos de reativação de falhas	6° ordem Complexos de canais, planícies regionalmente extensas (base de vales incisos)			
10^5 a 10^6	Ciclos de 4° Ordem Ciclos de Milankovitch, resposta a pulsos, de reativação de falhas	"7° ordem" Limite de Seqüência e/ou Paraseqüências; Leques aluviais, Planícies de extensão regional, ou base para vales incisos (Sistemas Depositionais)			
10^6 a 10^7	Ciclos de 3° Ordem Processos tectônicos e variações eustáticas	"8° ordem" Disconformidades Regionais, Complexo de Preechimento de Bacia, Planícies Costeiras			
10^7 a 10^8	Ciclos de 2° Ordem Ciclos de Wilson				

Tabela 2.1 – Correlação esquemática entre a magnitude das superfícies limitantes, definidas por Miall (1985, 1988 e 1996), e os ciclos da Estratigrafia de Seqüência, exibidos na mesma escala de tempo. Também são descritos alguns processos sedimentares condizentes com a magnitude da escala de tempo no qual eles ocorrem, correspondentes às colunas A, B e C, que foram simplificados de Miall (1996). Foram adicionadas, de forma esquemática a esta tabela, as colunas D, E e F, que correspondem, respectivamente, à limites de resolução da sísmica de reflexão (D), do GPR (E) e de dados de afloramentos (F). Note que o GPR pode funcionar como elo de transição entre as escalas da sísmica e dos dados de afloramento ou de poços.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, F.F.M. de, Hasui, Y., Brito Neves, B.B., Fuck, R.A., 1977, Províncias Estruturais Brasileiras. *In*: SBG, Atas do VIII Simpósio de Geologia do Nordeste, 363-391. Campina Grande/PB.
- Andrade, P.R. de O., 2003, Mapeamento de detalhe em sub-superfície com GPR: associação de fácies e evolução quaternária do sistema costeiro de Galinhos-RN. Relatório de Graduação N° 189, UFRN, Departamento de Geologia.
- Annan, A.P., 1992. Ground Penetrating Radar – Workshop Notes. Sensors and Software, Incorporated, Mississauga, Ontário.
- Annan, A.P., 1996. Transmission Dispersion and GPR. JEEG, v.0(n° 2): 125 – 136.
- Annan, A.P., 2001. Ground Penetration Radar – Workshop notes. Sensor e Software Inc. Mississauga, Ontário, Canadá. 192 p.
- Araripe, P.T. e Feijó, F.J., 1994, Bacia Potiguar. Boletim de Geociências da PETROBRÁS, pp. 127-142.
- Bristow, C.S., 1995, Internal geometry of ancient tidal bedforms revealed using Ground Penetrating radar. *In*: Flemming, B. W. and Bartholomä, A. (Eds), 1995, Tidal Signatures in modern and ancient sediments. Special Publication N° 24 of the Intern. Assoc. of Sedimentologists. Ed. Blackwell Science. pp. 313-328.
- Brito Neves, B.B., 1983. O Mapa Geológico do Nordeste Oriental do Brasil, escala 1:1.000.000. Instituto de Geociências, USP, São Paulo. Tese de Livre Docência. 177p.
- Brown, L.F. and Fisher, W.L., 1980. Seismic stratigraphic interpretation and petroleum exploration, Austin, AAPG Continuing Education Course Note Series 16, 125p.
- Caldas, L.H.O., Stattegger, K., Vital, H., 2001. North coastal zone of the Rio Grande do Norte State, NE Brazil and its associated continental shelf: an overview. *In*: Roth S. and Rügberg A (Eds), 2001, Margins Meeting International Conference and Annual Meeting of Deutsche Geologische Gesellschaft (DGG) and Geologische Vereinigung (GV). Kiel Germany. 10/2001. p.37-38.
- Corbeanu, R.M., Soegaard, C., Szerbiak, R.B, Thurmond, J. B., McMechan, G.A., Wang D., Snelgrove, S., Forster, C. B., and Menitove, A., 2001, Detailed internal architecture of a fluvial channel sandstone determined from outcrop, cores, and 3-D

- Ground Penetrating Radar: Examples from the middle Cretaceous Ferron Sandstone, east-central Utah. *AAPG Bulletin*, 85(9): 1583-1608.
- Daniels, J., 2000, 3D GPR Interpretation step-by-step. Unpublished document.
- Davis Jr., R.A., 1994, *Geology Holocene Barrier Island Systems*. Ed. Springer-Verlag/New York.
- Davis, J.L. and Annan, A.P., 1989. Ground Penetrating Radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, 37: 531-551.
- Della Fávera, J.C., Castro, J.C., Soares, U.M., Rossetti, E.L., Matsuda, N., Hashimoto, A.T., Gusso, J., Rodrigues, R., Azambuja, N.C. e Alves, D.B., 1992. Estratigrafia de Seqüências da Formação Pendência, Bacia Potiguar. Rio de Janeiro, PETROBRAS/DEPEX/CENPES. Relatório interno.
- Galloway, W.E. and Hobday, D.K., 1996. *Terrigenous Clastic Depositional Systems. Application to fossil fuel and groundwater resources*. Ed. Springer-Verlag/Berlin.
- Gawthoper, R. L., Collier, R.E.L., Alexander, J., Leeder, M., and Bridge, J.S., 1993, Ground Penetrating Radar: application to sandbody geometry and heterogeneity studies. *In*: North, C.P. and Prosser, D.J. (Eds.), *Characterization of Fluvial and Aeolian Reservoirs: Spec. Publ. Geol. Soc.* 73, 421-432.
- Hackspacher, P.C. e Sá, J.M., 1984. Critério Lito-Estrutural para Diferenciar do embasamento Caicó do Grupo Seridó, RN-Brasil. *In*: SBG, Atas do XI Simpósio de Geologia do Nordeste. Natal – RN. pp. 263-277.
- Hoyt, J.H. and Henry, J.V., 1967, Influence of inlet migration on barrier island sedimentation. *Geological Society of American Bulletin*, 78: 77-86.
- Huggenberger, P., 1993, Radar Facies: recognition of facies patterns and heterogeneities within Pleistocene Rhine gavels, NE Switzerland, *Braided Rivers: Geol. Soc. Spec. Publ.*, 75: 163-176.
- Jardim de Sá, E.F., 1984(a), A Evolução Proterozóica da Província Borborema. Atas do XI Simp. de Geol. do Nordeste. Natal, pp. 297 a 316.
- Jardim de Sá, E.F., 1984(b), Geologia da Região do Seridó: Reavaliação de Dados. Atas do XI Simp. de Geol. do Nordeste. Natal, pp. 278 a 285.
- Jardim de Sá, E.F., 1994, A Faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e seu significado geodinâmico na cadeia Brasileira/Pan-africana. Instituto de Geociências, UNB, Brasília. Tese de Doutorado. 803p.
- Jardim de Sá, E.F. e Hackspacher. P.C., 1982, Revisão Sobre Análise Estrutural. Parte I: Conceituação Básica e Métodos. *Revista Ciências da Terra*, N° 5.

- Lima, Z. M.C., 2004, Caracterização da Dinâmica Ambiental da Região Costeira do Município de Galinhos, litoral setentrional do Rio Grande do Norte. PPGG/UFRN, Natal-RN. Tese de Doutorado, 139 pp.
- Lima, Z.M.C., Alves, A.L., Amaro, V.E. e Vital. H., 2001, Evolução do esporão de alinhos (NE do Brasil) utilizando fotografias aéreas e imagens Landsat TM. Pesquisas em Geociências (Ed. UFRS-RS.), 28(2): 497-57.
- Matos, R.M.D., 1992, Deep Seismic Profiling, Basin Geometry and Tectonic Evolution of Intracontinental rift Basins in Brazil: The Northeast Brazilian *rift system*. Cornell University. Ph.D Thesis.
- McCubbin, D.G., 1982, Barrier-Island and Strand-Plain Facies. *In*: Sholler, P.A. and Spearing, D. (Eds). – Memoir-31/AAPG. pp. 247-279.
- Menezes, M.R.F., 1999, Estudos sedimentológicos e caracterização estrutural da Formação Serra do Martins nos Platôs de Portalegre, Martins e Santana, RN. PPGG/UFRN, Natal-RN, Dissertação de Mestrado, 165 pp.
- Miall, A.D., 1985, Architectural-element analysis: A new method of facies analysis applied to fluvial deposits. *Earth-Science Reviews*, 22: 261-308.
- Miall, A.D., 1988, Reservoir Heterogeneity in Fluvial Sandstone: Lessons from outcrop studies. *AAPG Bull.*, 6: 682-297.
- Miall, A.D., 1991, Hierarchies of architectural units in terrigenous clastics rocks, and their relationship to sedimentation rate. *In*: Miall, A. D, and Tyler, N. (Eds.), Three-dimensional facies Architecture of Terrigenous Clastic sediments, and its Implications of Hydrocarbon Discovery and Recovery: Concepts in Sedimentology and Paleontology (SEPM), pp 6-12.
- Miall, A.D., 1996, Geology of Fluvial Deposits. Sedimentary facies, Basin Analysis and Petroleum Geology. Springer-Verlag.
- Mitchum Jr. R.M., Vail, P.R., Thompson III, S., 1977(a). Seismic Stratigraphy and Global Changes of Seal Level, Parte 2: The depositional sequence as a basic unit for stratigraphy analysis. *In*: Payton, C. E., eds., Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon. AAPG Memoir 26: 53-62.
- Mitchum Jr. R.M.; Vail, P.R.; Thompson III, S, 1977(b), Seismic Stratigraphy and Global Changes of Seal Level, Parte 3: Relative Changes of Sea Level from Coastal Onlap. *In*: Payton, C. E., (Eds.), Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon. AAPG Memoir 26: 63-81.

- Mitchum Jr. R.M., Vail, P.R., and Sangree, J.B., 1977(c), Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Parte 6: Stratigraphy Interpretation of Seismic Reflection Patterns in Depositinal Sequences. *In*: Payton, C. E., (Eds.), Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon. AAPG Memoir 26.
- Monteiro, M.C. e Farias, R.T., 1988, Planície de Maré no poço 9-MO-13-RN, Formação Jandaíra – um exemplo do passado. Rio de Janeiro, PETROBRAS. Rel. Interno.
- Ojeda, H. A., 1991, Curso de Sismoestratigrafia (Notas preliminares). 4ª versão. PETROBRAS/SEMPES. Rio de Janeiro - Brasil. (Curso interno).
- Olhoeft, G.R., 2000, Maximizing the information return from ground penetrating radar: J. Appl. Geophys., 43(2-4): 175-187.
- Olhoeft, G.R., Ground penetrating Radar. <http://www.g-p-r.com>.
- Oliveira Jr., J.G., 2001, Dois Testes de Imageamento com GPR em Problemas de Controle Ambiental em Regiões Tropicais: Migração de Dunas e Localização de Dutos de Óleo Enterrados. PPGG/UFRN, Natal-RN. Dissertação de Mestrado.
- Payton, C.E., (Ed.), 1977, Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon. AAPG Memoir 26.
- Posamentier, H.W., Jervey, M.T., and Vail, P.R., 1988, Eustatic Control on Clastic Depositional I – Conceptual framework. *In*: Wilgus, C.K., Hastings, B.S.; Kendall, C.G.S.; Posamentier, H.W.; Ross, C.A.; Van Wagoner, J.C., (Eds.), Sea-level Changes – an Integrated Approach: SEPM, 42, 109-124.
- Sandmeier, K. J., 2002, ReflexW Software for GPR and Seismic Processing – Manual.
- Sangree, J. B. and Widmier, J.M., 1977, Seismic Stratigraphy and Global changes of sea level. Parte 9: Seismic Interpretation of Clastic Depositional Facies. *In*: Payton, C. E., (Ed.), Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon: Am. Assoc. Petrol. Geol.(AAPG), Memoir 26, 165-184.
- Soares, U.M., 2000, As Relações Entre Tectonismo e Sequências Depositionais no Rife Potiguar – Porção SW do Graben de Umbuzeiro, Bacia Potiguar Emersa. PPGG/UFRN, Natal-RN, Dissertação de Mestrado, 128 pp.
- Souza, S.M., 1982, Atualização da litoestratigrafia da Bacia Potiguar. Anais do XXXII Congresso Brasileiro de Geologia, Salvador/BA. Vol. 5: 2392-2406.
- Vail, P.R. and Mitchum Jr. R.M., 1977. Seismic Stratigraphy and Global changes of Sea Level Parte 1: Overview. *In*: Payton, C. E. (Eds.), Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon. AAPG Memoir 26: 51-52.

- Vail, P.R., Tood, R.G., and Sangree, J.B., 1977, Seismic Stratigraphy and global Changes of Seal Level. Part 5: Cronostratigraphy Significance of Seismic Reflection. *In*: Payton, C. E. (Eds.), Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon. AAPG Memoir 26: 99-116.
- Van Overmeeren, R.A., 1998, Radar facies unconsolidated sediments in the Netherlands: A radar stratigraphy interpretation method for hydrogeology: *Journal of Applied Geophysics*, 40: 1-18.
- Van Wagoner, J. C., Mitchum Jr, R.M., Campion, K.M., and Rahmanian, V.D., 1990, Siliciclastic Sequence Stratigraphy in Well Logs, Cores, and Outcrops: Concepts for Hight-Resolution Correlation of Time and Facies: AAPG Methods in Exploration Series, N° 7.
- Vianna, M.L. e Solewicz, R., 1988, Feições Fisiográficas submarinas da Plataforma Continental do RN visíveis por Imagens de Satélite. *Simpósio de Sensoriamento Remoto, Natal/RN. Vol. 03: 581-581.*
- Vianna, M.L., Cabral, A.P., and Gherandi, D.M., 1993, TM-Landsat imagery to the study of the impact of global climate change on a tropical environment during the last Deglaciation. *International Journal of Remote Sensing*, 14: 2971-2983.
- Vilaça, J.C., Cunha, E.M.S., Silveira, I.M. da, 1991, Levantamento hidrogeológico do Município de Galinhos. 4º Congresso Nordeste de Ecologia, Recife/PE, p. 56-59.
- Vital, H., Amaro, V., Tabosa, W.F.T., Guedes, I.M.G., Stattegger, K., and Caldas, L.H.O., 2002(a), Pattern of sediment distribution in setentrional coast of RN State, NE Brazil. 2002 Ocean Sciences Meeting, American Geophysical Union, Honolulu-Hawai, CD-ROM.
- Vital, H., Amaro, V.E., Silveira, I.M., Stattegger, K., Alves, A.L., Caldas, L.H.O., Guedes, I.M.G., Tabosa, W.F.T. e Sousa, F.E., 2002(b), Distribuição de Sedimentos na Região Costeira e Plataforma Continental Setentrional do Estado do Rio Grande do Norte. 41º Congresso Brasileiro de Geologia. SBG. João Pessoa-PB
- Walker. R.G. e James, N.P. – 1992. Facies Models: Response Seal Level Change. Geological Association of Canada.
- Weimer, R.J., Howard, J. D., and Lindsay, D.R., 1982, Tidal flats and Associated Tidal Channels. AAPG Memoir 31.
- Xavier Neto, P., Oliveira Jr, J.G. e Medeiros, W.E., 2001. Processamento de dados de GPR como uma etapa imprescindível para obtenção de boas imagens sobre solos condutivos: um exemplo associado a localização de dutos. VII Congresso

Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, Salvador-Ba, Res. Exp. pp. 723-726.

Yilmaz, Öz, 2001, Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data. Vols I and II, SEG, 2nd Edition.