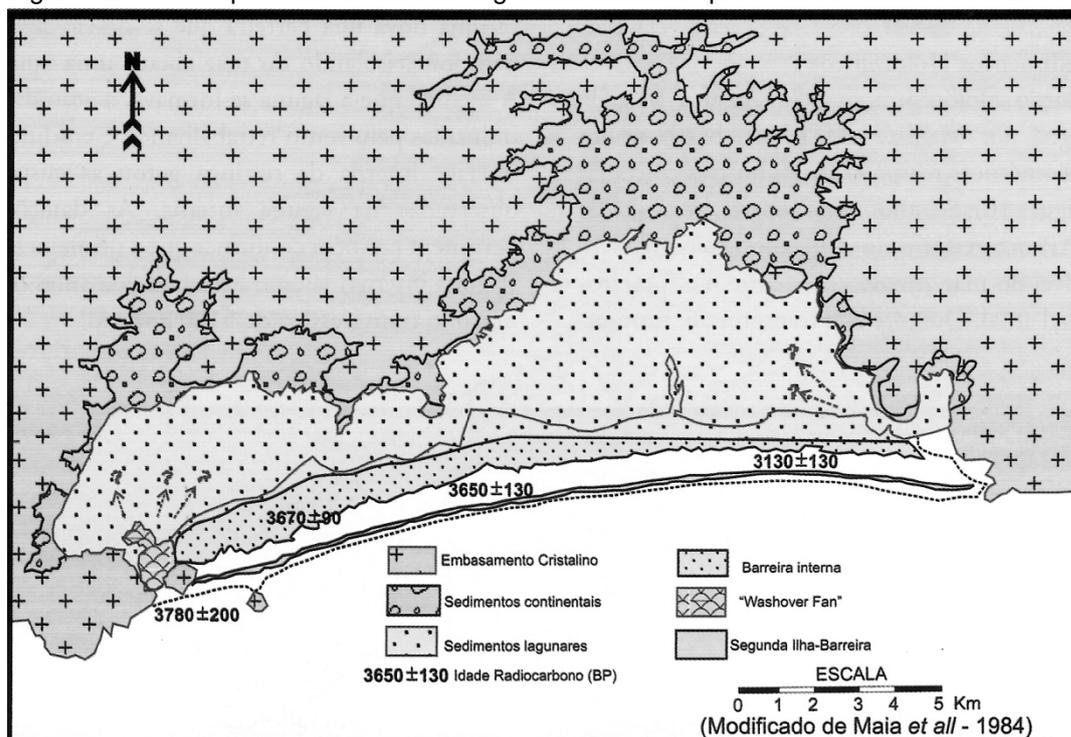


Figura 12 - Conseqüências da fase de regressão marinha que ocorreu entre 3600 e 2700 anos BP.



Fonte: Modificado de MAIA et al, 1984.

#### 4 FATORES E PROCESSOS ATUANDO EM FEIÇÕES COSTEIRAS DOMINADAS PELA AÇÃO DAS ONDAS.

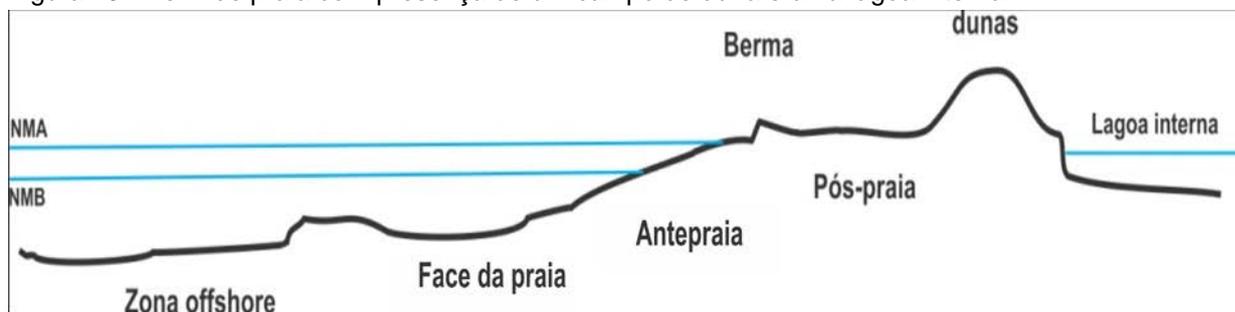
Variações do nível do mar e balanço local de aporte sedimentar são os fatores principais que controlam a formação e a evolução das planícies costeiras brasileiras. Estudar a dinâmica costeira local envolve a avaliação da repartição da energia das ondas ao longo da costa, o padrão de dispersão dos sedimentos, e como veremos nesse capítulo, o balanço sedimentar que pode ter grande variação em diferentes feições de uma costa.

##### 4.1 Perfil de praia

Suguio (1992) definiu as praias como a interface entre a terra e o mar, compostos por material não consolidado submetido à ação das ondas, das marés, das correntes costeiras e dos ventos. Esses agentes, como discutidos na introdução serão os responsáveis pela morfologia das mesmas.

As praias, dependendo das suas morfologias, podem ser divididas em quatro zonas principais: **Figura 13**

Figura 13 - Perfil de praia com presença de um campo de duna e uma lagoa interna.



Fonte: o autor.

- Pós-praia

Zona situada acima do limite máximo de maré, e por isso fora do limite da ação das ondas. Porém, a mesma pode ser atingida por ondas de tempestade. Seu limite superior pode ser marcado pela presença de dunas, falésia ou vegetação.

- Antepraia

Essa zona se situa entre o limite da ação das ondas de maré baixa e de maré alta.

- Face de praia

Corresponde à zona de fluxo hidrodinâmicos gerados pelas ondas. Seu limite será a profundidade máxima onde as ondas afetam os sedimentos do fundo marinho.

- Offshore

Esta zona situa se fora do limite de atuação das ondas sobre os fundos marinhos.

#### 4.2 Influência das variações do nível relativo do mar nos processos sedimentares costeiros: noção de perfil de equilíbrio.

Uma zona de costa arenosa tem um perfil de equilíbrio que vai depender da hidrodinâmica local (corrente de deriva litorânea, maré, regime de ondas e ondas de tempestades) e do tamanho dos sedimentos. Considerando a maré como fator hidrodinâmico, podemos pensar que esse perfil será constantemente destruído, mas considerando um intervalo de tempo maior, que seja, na escala de tempo geológico ou como nesse estudo numa escala de dezenas de milhares de anos, podemos

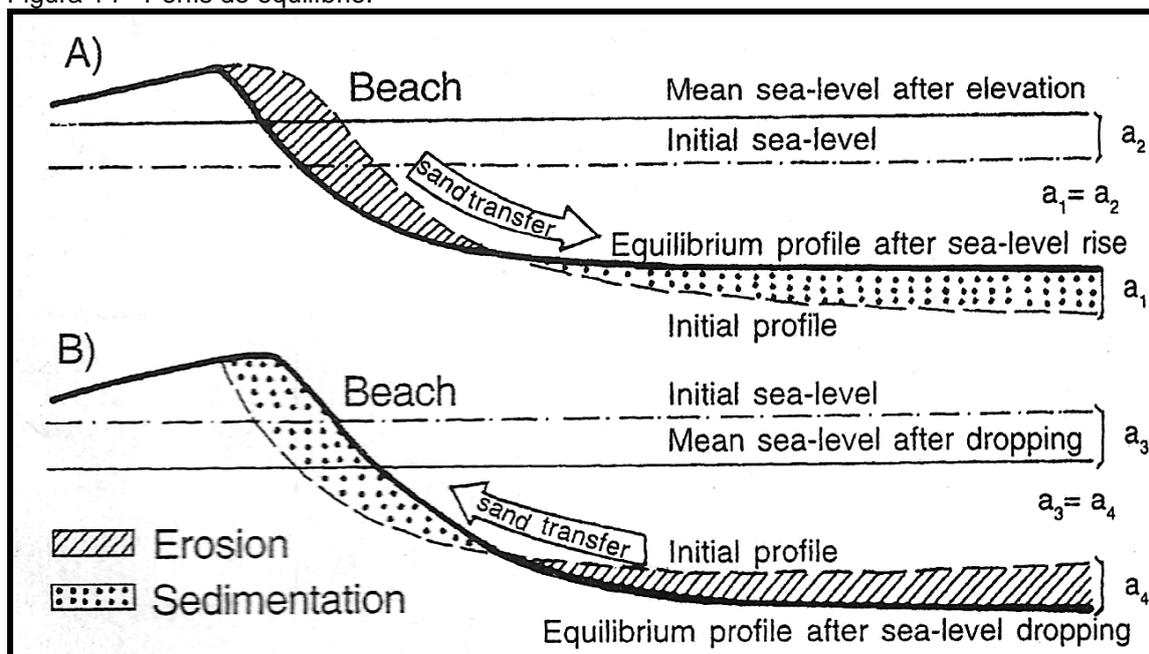
descartar um perfil de equilíbrio estável no tempo. Esse perfil será facilmente observável no perfil atual como no registro sedimentar.

Uma oscilação do nível marinho vai perturbar esse perfil de equilíbrio, que, segundo Bruum (1962) vai induzir uma migração desse perfil ao longo da plataforma para retornar nesse ponto de equilíbrio (**figura 14**).

Em consequência, o prisma de praia será erodido e o material será transportado e depositado na antepraia, provocando a elevação do seu assoalho na mesma amplitude sofrida pelo nível relativo do mar.

Segundo, Domingez (1982) a redução do nível marinho levará o perfil de equilíbrio em direção ao mar. O assoalho da antepraia será erodido e o material será transportado e depositado no prisma de praia, provocando uma progradação.

Figura 14 - Perfis de equilíbrio.



- A) Comportamento do perfil de equilíbrio costeiro em resposta a uma elevação do nível marinho  
 Fonte: BRUUM, 1962.  
 B) Comportamento desse perfil numa queda do nível marinho  
 Fonte: DOMINGEZ, 1982.

O processo de progradação de uma linha de costa durante fases regressivas depende diretamente da declividade da plataforma (ROY et al., 1994).

**Plataforma suave:** apresenta ampla zona de progradação formada por terraços marinhos arenosos. Permite que o sedimento depositado na antepraia seja retrabalhado pelas ondas, colocado em suspensão e depositado nas cristas de praia.

**Plataforma íngreme:** o crescimento rápido da profundidade no perfil costeiro não permite a suspensão do material sedimentar sobre grande distância. A quantidade depositada na crista de praia será pequena e a linha de costa não prograda muito. Oscilações relativas do nível do mar vão ser determinantes no estabelecimento da morfologia do litoral e na geometria dos depósitos. De fato, essas oscilações vão influir no controle do aporte sedimentar e na regulação da geometria dos depósitos, enquanto as correntes de deriva litorânea e suas direções vão influir sobre a redistribuição dos sedimentos e sua acumulação em feições particular do litoral.

#### 4.3 Balanço sedimentar

ROY et al. (1994) mostram como o balanço sedimentar tem uma influência preponderante na evolução de feições costeiras, seja a longo prazo como em escala menor (dezenas de anos). Esse balanço sedimentar, ou seja, o suprimento positivo ou negativo em sedimento não depende só da quantidade de sedimentos que chegam à bacia hidrográfica para a deposição, mas depende, sobretudo, das forças que vão retrabalhar esse sedimento quando os mesmos chegam à região costeira. Essas forças, cujo conjunto pode ser denominado de “dinâmica costeira” (regime de ondas, correntes de deriva litorânea, maré e tempestades), vão redistribuir os sedimentos ao longo da costa, podendo induzir um balanço positivo (deposição) ou negativo (erosão) do suprimento sedimentar em diferentes seções da costa. Assim, fatores climáticos como oceanográficos vão ser responsáveis pela direção, altura e período das ondas que vão retrabalhar o sedimento, e a amplitude das marés. Também vão definir a direção e a intensidade das correntes costeiras responsáveis pelo transporte dos sedimentos ao longo da costa.

MARTINHO et al. (2009), a partir da investigação da energia de ondas e do transporte longitudinal na costa do Rio Grande do Sul, identificaram a relação entre a intercalação de barreiras costeiras progradantes e retrogradantes, com a morfologia do litoral também intercalada em embaiamentos e projeções. Onde a costa assume a morfologia de concavidade, a mesma se assemelha a um embaiamento, a declividade da plataforma é mais suave. Isto levaria a uma maior dissipação da energia das ondas e menor transporte de sedimentos e, conseqüentemente, refletiria em condições locais de balanço sedimentar positivo, o

que explicaria a progradação da linha de costa nestes setores e a morfologia de barreiras progradantes.

Onde a costa apresenta-se de forma convexa, a declividade da plataforma é maior levando a uma maior energia de ondas e transporte de sedimentos. Neste caso, a costa tenderia a erosão e à morfologia de barreiras retrogradantes.

## **5 CLASSIFICAÇÃO ESTRATIGRÁFICA E MORFOLÓGICA DAS BARREIRAS COSTEIRAS.**

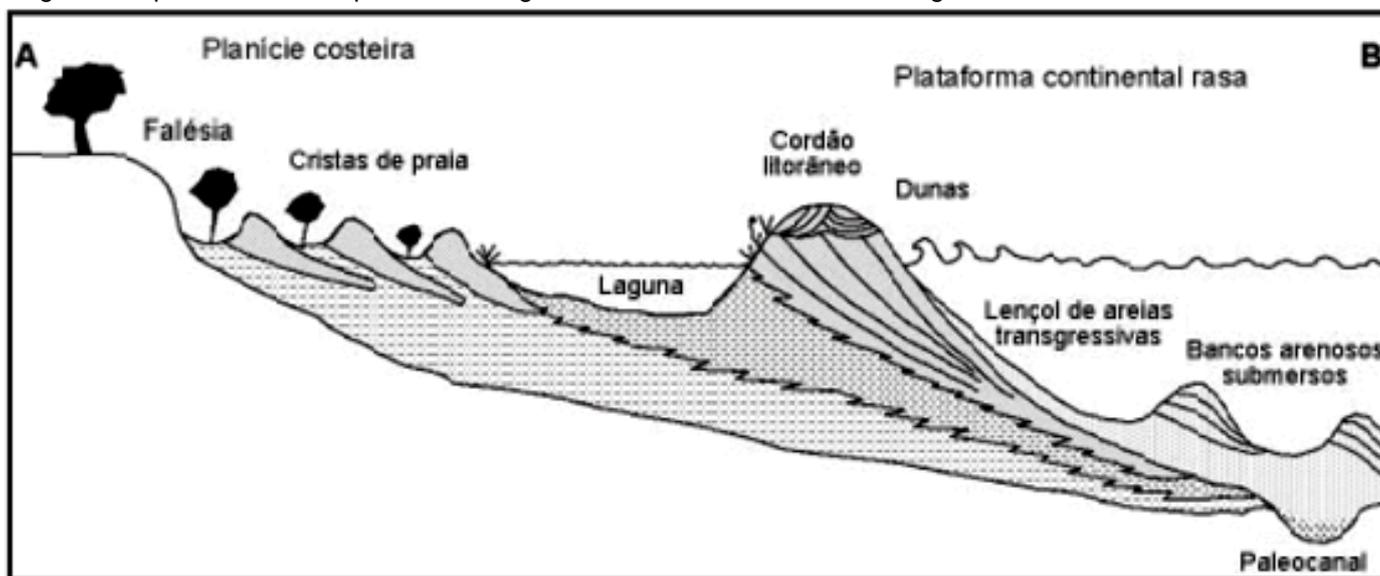
O conceito do termo “barreira costeira” foi primeiro aplicado às barreiras ou cúspides arenosas, paralelas à linha de costa, separando do meio marinho aberto uma laguna protegida. A terminologia foi depois refinada com numerosos elementos morfológicos presentes ou não nas feições costeiras.

Esses elementos morfológicos podem ser a presença de dunas frontais, a conexão parcial ou total da barreira com o continente, da estratigrafia interna e do comportamento da barreira em relação a linha de costa. De fato, a barreira pode ser progradante (barreira regressiva) ou retrogradante (barreira transgressiva) (Otvos, 2012).

### 5.1 Impacto estratigráfico das oscilações do nível do mar sobre as barreiras costeiras.

Em associação com os eventos de subida e descida do nível do mar, são reconhecidos, na planície costeira, dois principais arranjos estratigráficos, que correspondem respectivamente às sequências marinhas transgressivas e regressivas. Nas primeiras, a linha de costa é demarcada por cordões arenosos litorâneos (barreira) e/ou ilhas barreiras que, durante o curso transgressivo, migram em direção ao continente, superpondo-se aos sistemas lagunares e estuarinos (**Figura 15**). As sequências regressivas associam-se à linhas de costa progradantes, onde ocorrem sistemas, ou planícies de cristas de praia que progradam em direção ao oceano, recobrimdo lamas ou areias relíquias de plataforma.

Figura 15 - perfil de uma sequência estratigráfica em ambiente costeiro transgressivo.



Fonte: <http://www.scielo.br/>

Durante os eventos de transgressão marinha, estes sistemas litorâneos são também retrabalhados pelas ondas, correntes marinhas e correntes de maré, remanescendo como depósitos arenosos na plataforma continental. Nestas fases transgressivas, o deslocamento do cordão arenoso litorâneo em direção ao continente gera um lençol de areias transgressivas, cuja espessura diminui em direção à plataforma continental externa. A redistribuição das areias na plataforma pelas ondas e correntes marinhas

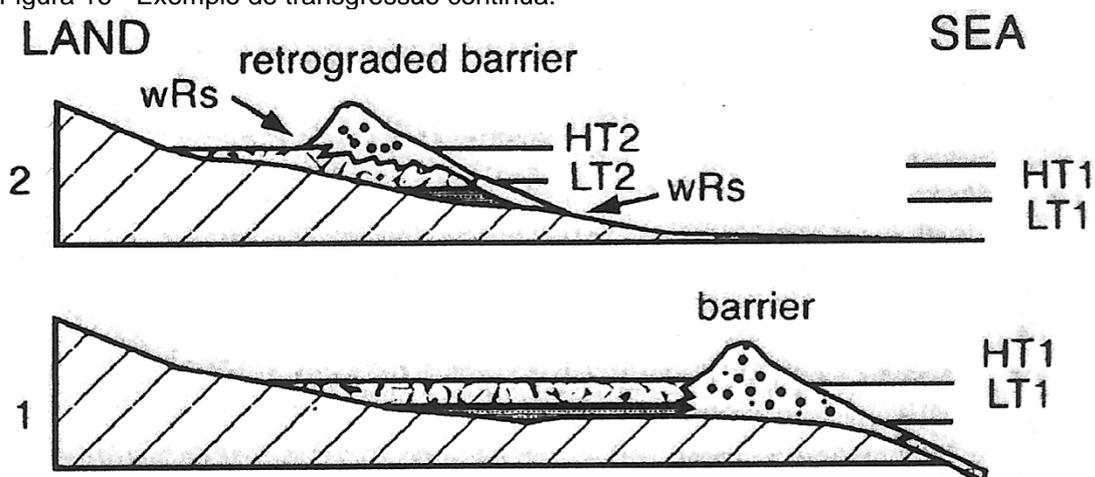
pode dar origem a cristas arenosas de grandes dimensões, que podem apresentar quilômetros de largura por dezenas de quilômetros de extensão e alturas variando entre 05 e 10 metros (Figueiredo, 1984). Sua composição varia de areias médias à finas com cascalhos nas depressões entre cristas. Elas são comuns em plataformas largas, de baixo gradiente, associadas à planícies costeiras amplas e em áreas de micro a meso marés.

## 5.2 Evolução estratigráfica de barreira costeira retrogradante.

Como mencionado acima, a inclinação da plataforma terá uma importância fundamental na fisionomia dos depósitos costeiros durante uma transgressão marinha.

No caso de uma plataforma íngreme, a migração da linha de costa em direção ao continente é relativamente lenta e vai permitir um retrabalhamento e uma deposição dos sedimentos erodidos na face de praia (**Figura 16**). Desse modo, a superfície de erosão devido à ação das ondas vai ser recoberta por depósitos transgressivos. Esse fenômeno pode se chamar de “transgressão contínua” (Cattaneo e Steel, 2003).

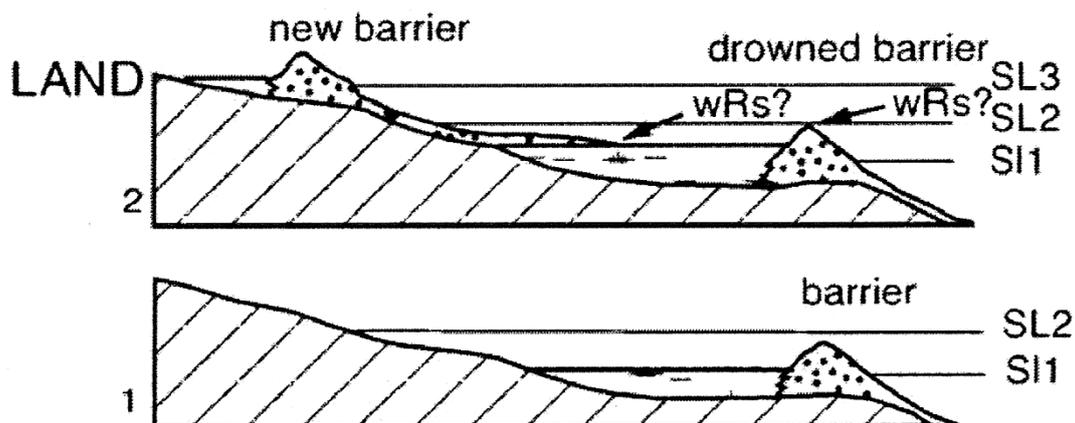
Figura 16 - Exemplo de transgressão contínua.



Fonte: SANDERS e KUMAR, (1975).

Em uma plataforma suave, com a mesma taxa de subida relativa do nível marinho, será possível observar uma migração muito mais rápida com depósitos transgressivos mais estendidos (**Figura 17**). Esses depósitos serão assim menos espessos e mais espalhados na área transgressiva. Nesse caso teremos o que pode se chamar de “transgressão pontuada”.

Figura 17 - Exemplo de transgressão pontuada, com barreira retrogradante.



Fonte: GILBERT, 1985.

No caso de um sistema barreira/laguna, a consequência da migração da barreira será o recobrimento dos depósitos lagunares por depósitos costeiros arenosos.

Na primeira fase, washover fans, ou overwash podem ser observados devido a ondas de tempestade atingindo o topo da barreira e depositando, assim, sedimentos arenosos em forma de leque de transposição ou arrombamentos atrás da barreira (NIEDORODA et al. 1985a). Esse fenômeno é representativo de feições costeiras de micromaré como observado em nossa área de estudo.

Outro fenômeno representativo de uma barreira retrogradante e a abertura de canais de maré, gerando uma dinâmica de maré e afogamento da lagoa por fluxo de água marinha e depósitos associados como deltas de maré.

A velocidade dessa transposição por migração da barreira e do perfil associado (lagoa, dunas etc...) vai depender da exposição da linha de costa, da morfologia da barreira, da força dos eventos de tempestade e da frequência dos mesmos.

### 5.3 Evolução estratigráfica de barreira progradante.

A barreira pode se chamar de progradante quando migra em direção ao oceano, devido a uma queda relativa do nível marinho ou balanço sedimentar positivo. No estudo estratigráfico dessas feições, pode ser observada uma sucessão de cristais de praia migrando direção ao mar, cada uma marcando uma posição antiga da linha de costa nesse processo de progradação.

Essas cristas de praia, associadas a cristas de dunas frontais, por sua progradação irão formar planícies costeiras amplas e bem desenvolvidas.

## 6 O MÉTODO GPR

O GPR é uma técnica geofísica não destrutiva que detecta descontinuidades elétricas na subsuperfície rasa (<50m) devido à geração, transmissão, propagação, reflexão e recepção de impulsos eletromagnéticos de alta frequência (Neal, 2004). Assim, a forma e a orientação das estruturas sedimentares serão registradas e representadas num perfil de reflexões. A qualidade das reflexões dependerá tanto do processamento dos dados quanto da capacidade de identificar e remover reflexões de origem não geológicas e ruídos associados ao levantamento das linhas. Durante a década passada, o GPR foi usado para estudos estratigráficos para reconstrução de ambientes deposicionais passados e na caracterização dos processos de sedimentação. Sua ampla utilização pela comunidade científica se deve à rapidez e facilidade de coleta dos dados e à qualidade das informações recolhidas em subsuperfície (**Figura 18**). Além disso, sua utilização não necessita de afloramento ou poço e as semelhanças das linhas GPR com as imagens sísmicas as tornam de fácil interpretação. Essa similitude se deve tanto à analogia da cinemática da propagação das ondas quanto às respostas (ou seja, a gravação das respostas) das reflexões e refrações em subsuperfície.

Além da generalização do uso do GPR em sedimentologia, vários problemas surgiram na sua aplicação em pesquisas devido aos numerosos métodos de processamento dos dados radar e das técnicas de interpretação variadas.

Um dos objetivos desse estudo será propor e desenvolver uma metodologia aplicada ao estudo da Baixada de Jacarepaguá, desde o levantamento das linhas pelo georadar até o processamento e a interpretação dos dados, bem como dar uma explicação básica sobre o método GPR, indispensável para o entendimento e a interpretação dos dados recolhidos.

Figura 18 - Uso do GPR no campo para levantamento de dados na Baixada de Jacarepaguá

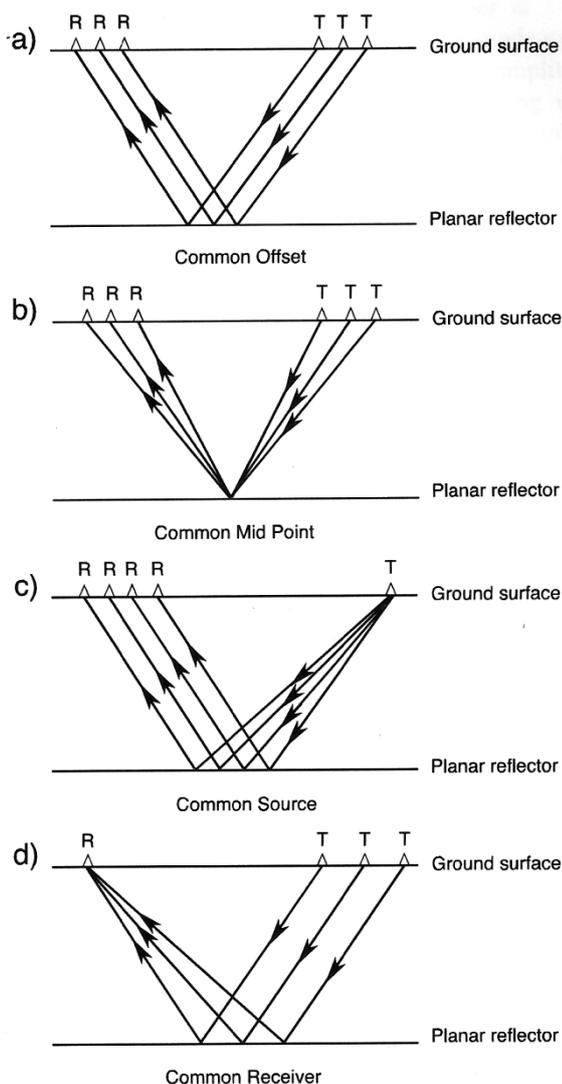


Fonte: o autor.

## 6.1 Levantamento dos dados

Existem quatro tipos de levantamentos possíveis. *Common offset*, *Common mid point*, *Common source* e *Common receiver*. (Figura 19)

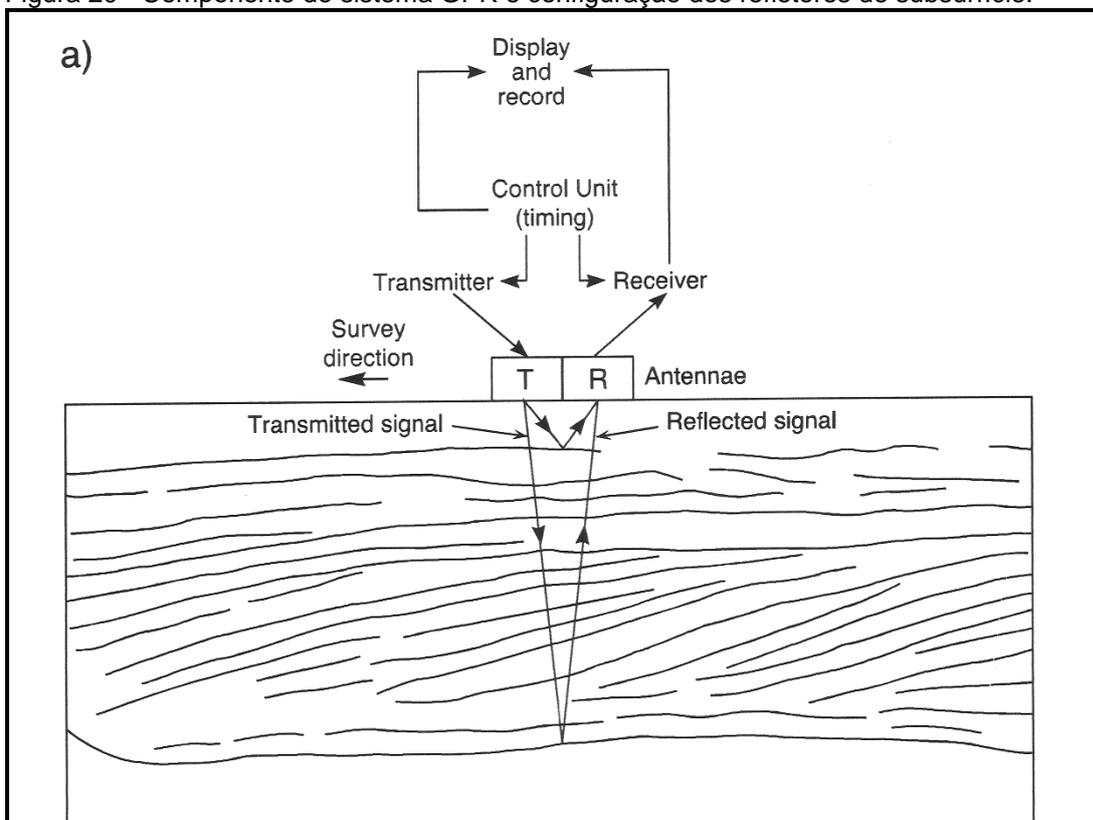
Figura 19 - Configurações possíveis para levantamento com antenas de GPR.



Fonte: NEAL, 2004

O *common offset* é o mais usado nos estudos com o GPR, e amplamente comercializado nessa configuração. É constituído por uma antena transmissora e outra antena receptora separada e posicionada de forma perpendicular à direção de levantamento da linha (Figura 20). Essa configuração pode também ser constituída por uma única antena com função de transmissor e receptor. A separação entre as antenas é fixa.

Figura 20 - Componente do sistema GPR e configuração dos refletores de subsúrfície.



Fonte: NEAL, 2004.

O GPR emite um impulso eletromagnético curto de alta frequência no solo. A velocidade dessa onda será alterada quando passar por materiais com propriedade elétrica diferente.

Se essa mudança de velocidade for abrupta, uma parte da energia do impulso será refletida de volta para a superfície. O sinal refletido é captado pela antena (o receptor), registrando assim uma reflexão no perfil do radar.

O tempo entre emissão, reflexão e recepção é referido como “*two-way travel time* (TWT)”, ou o tempo para ida e volta do sinal, medido em nanos segundos.

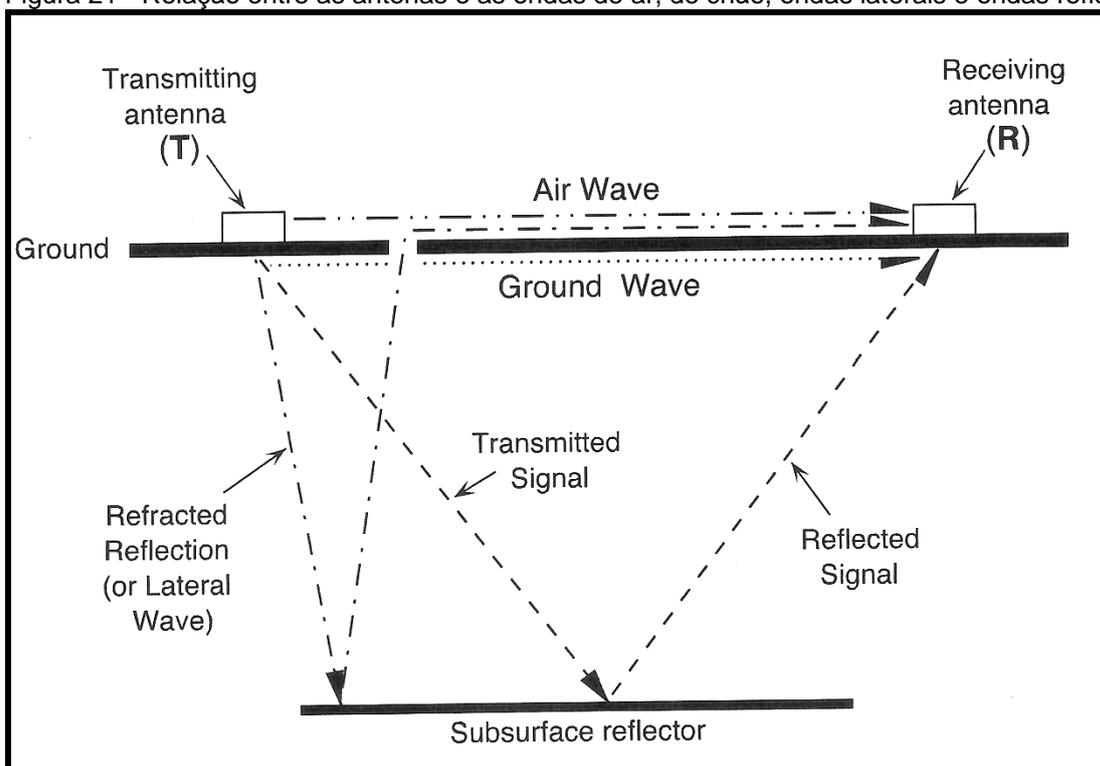
Esses refletores são dependentes da função da profundidade, do espaço entre as antenas e da velocidade média das ondas no material atravessado.

Descontinuidades em subsuperfície não são os únicos sinais registrados no perfil do radar. De fato, o primeiro impulso que chega ao receptor é chamado de onda de ar (*airwave*) vindo direto do transmissor na velocidade da luz (0,2998 m/ns).

O segundo impulso é chamado de onda de chão (*groundwave*), que passa direto pelo chão do transmissor até o receptor (**Figura 21**).

Essas duas primeiras ondas ocultam as primeiras reflexões no perfil.

Figura 21 - Relação entre as antenas e as ondas de ar, de chão, ondas laterais e ondas refletidas.



Fonte: NEAL, 2004.

## 6.2 Teoria e causas das reflexões em subsuperfície

Três componentes controlam o comportamento das ondas eletromagnéticas em um determinado material:

- A constante dielétrica ( $\epsilon$ ) é medida em unidade de capacidade elétrica (farads) por metros e representa a capacidade do material de armazenar cargas elétricas.
- A condutividade elétrica ( $\sigma$ ) representa a habilidade de transporte de cargas elétricas.
- A permeabilidade magnética ( $\mu$ ) mede a quantidade de energia magnética estocada ou perdida no interior de um material submetido a um campo magnético induzido. A **Tabela 1** mostra as propriedades de alguns materiais geológicos mais frequentemente encontrados em ambiente costeiro.

Tabela 1: Propriedades elétricas de alguns materiais geológicos.

Ambiente	Constante dielétrica ( $\epsilon_r$ )	Velocidade das ondas eletromagnéticas $m.ns^{-1}$	Condutividade $mS.m^{-1}$	Atenuação de sinal $dB.m^{-1}$
Ar	1	0,3	0	0
Água	80	0,03	0,5	0,1
Água salgada	80	0,01	30	1000
Areia saturada	20-31,6	0,05-0,08	0,1-1	0,03-0,5
Areia seca	2,55-7,5	0,1-0,2	0,01	0,01-0,14
Lama seca	2,5-5	0,09-0,12	2-20	0,28-300
Lama saturada	15-40	0,05-0,07	20-1000	0,28-300

Fonte: NEAL e ROBERTS, 2000.

### 6.3 Limitações dos dados GPR não processados.

- “Time-zero drift”

O deslocamento da primeira reflexão (onda de ar) ocorre quando o material está com temperatura muito diferente que o ambiente ao ar livre.

Pode-se observar um deslocamento dessa reflexão nas primeiras reflexões do perfil.

- Levantamento “Common-offset “

Apesar de ser o levantamento mais comum e fácil de realizar, o *common offset* apresenta algumas limitações.

Devido a um “*travel time*” maior os refletores aparecem mais profundos no perfil do que estão realmente, como mostrado na **Tabela 2**.

Tabela 2: Comparação entre profundidade e TWT (tempo de ida e volta) para *zero-offset* e *common offset* em um perfil de georadar, com separação das antenas variando de 0,5m ate 2m (Neal e Robert, 2000)

<i>Zero Offset</i>		<i>Common Offset</i>					
0m		0,5m (200 MHz)		1m (100 MHz)		2m (50 MHz)	
TWT (ns)	Profundidade (m)	TWT (ns)	Profundidade (m)	TWT (ns)	Profundidade (m)	TWT (ns)	Profundidade (m)
0	0	4,1	0,25	8,3	0,5	16,5	1,0
1,7	0,1	4,5	0,27	8,4	0,51	16,7	1,01
3,3	0,2	5,3	0,32	8,9	0,54	16,9	1,02
5,0	0,3	6,4	0,39	9,6	0,58	17,2	1,04
6,6	0,4	7,8	0,47	10,6	0,64	17,9	1,08
8,3	0,5	9,3	0,56	11,7	0,71	18,5	1,12
9,9	0,6	10,7	0,65	12,9	0,78	19,3	1,17
11,6	0,7	12,2	0,74	14,2	0,86	20,2	1,22
13,2	0,8	13,9	0,84	15,5	0,94	21,2	1,28
14,9	0,9	15,4	0,93	17,0	1,03	22,3	1,35
16,5	1,0	17,0	1,03	18,5	1,12	23,3	1,41
24,8	1,5	25,1	1,52	26,1	1,58	29,8	1,80
33,1	2,0	33,4	2,02	34,0	2,06	37,0	2,24
41,3	2,5	41,5	2,51	42,2	2,55	44,5	2,69
49,6	3,0	49,8	3,01	50,3	3,04	52,2	3,16
82,6	5,0	82,8	5,01	83,1	5,03	84,3	5,10
115,7	7,0	115,9	7,01	116,0	7,02	116,9	7,07

Fonte: NEAL e ROBERT, 2000.

- **Saturação do sinal.**

Devido a um intervalo de tempo muito curto entre os impulsos no levantamento, e no retorno da onda de ar (*air-wave*) e da onda de chão (*groundwave*), os receptores podem ficar saturados (FISHER et al., 1996).

Essa saturação deverá ser tratada no processamento das linhas.

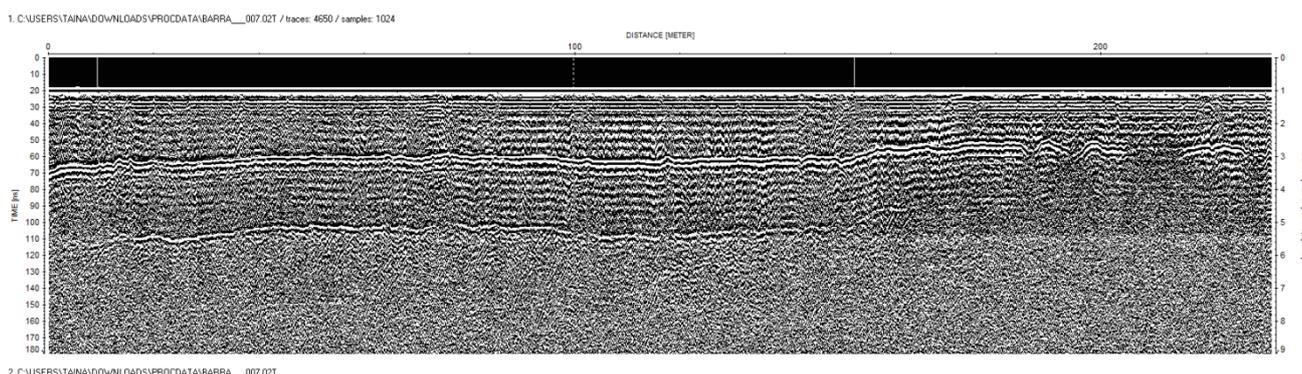
- **Profundidade de penetração**

Ondas eletromagnéticas sofrem perda de energia atravessando os materiais no subsolo. Essa perda de energia limita a profundidade de penetração, dependendo da frequência de emissão e do material atravessado. Davis e Annan (1989) definiram que quanto maior a frequência, menor será a profundidade de penetração.

- **Ruído eletromagnético**

O receptor do GPR é sensível a uma grande amplitude de frequência. O mesmo pode sofrer interferências com muitas fontes de emissão devido a atividade humana (**Figura 22**). Essas interferências podem vir de transmissores de TV, rádio *walk-talk*, celulares ou qualquer aparelho de comunicação de rádio.

Figura 22 - Exemplo de ruído eletromagnético devido a um material poluído por objetos de origem humana.



Fonte: Processado pelo autor através dos programas REFLEX e RADAM.

## 6.4 Processamento dos dados

As numerosas limitações citadas acima podem ser evitadas, em primeiro lugar, por ação direta no momento do levantamento, como deixar a antena tomar a temperatura ambiente, assegurar que ninguém use aparelhos que possam interferir

pela emissão de ondas eletromagnéticas, verificar constantemente se a antena fica colada ao chão e não passe acima de obstáculos, como pedaços de madeira ou vegetação. Outros numerosos fatores só podem ser removidos ou atenuados por processamento, com ajuda de *softwares*. Os *softwares* mais conhecidos são o RADAM e o REFLEX.

Esse processamento vai incluir vários tipos de filtros, ganho, retirada de múltiplas (quando um refletor se repete) por deconvolução, supressão de parte do espectro de frequência para remover ruído, devido a objetos metálicos ou matéria orgânica que pode interferir com a leitura dos refletores.

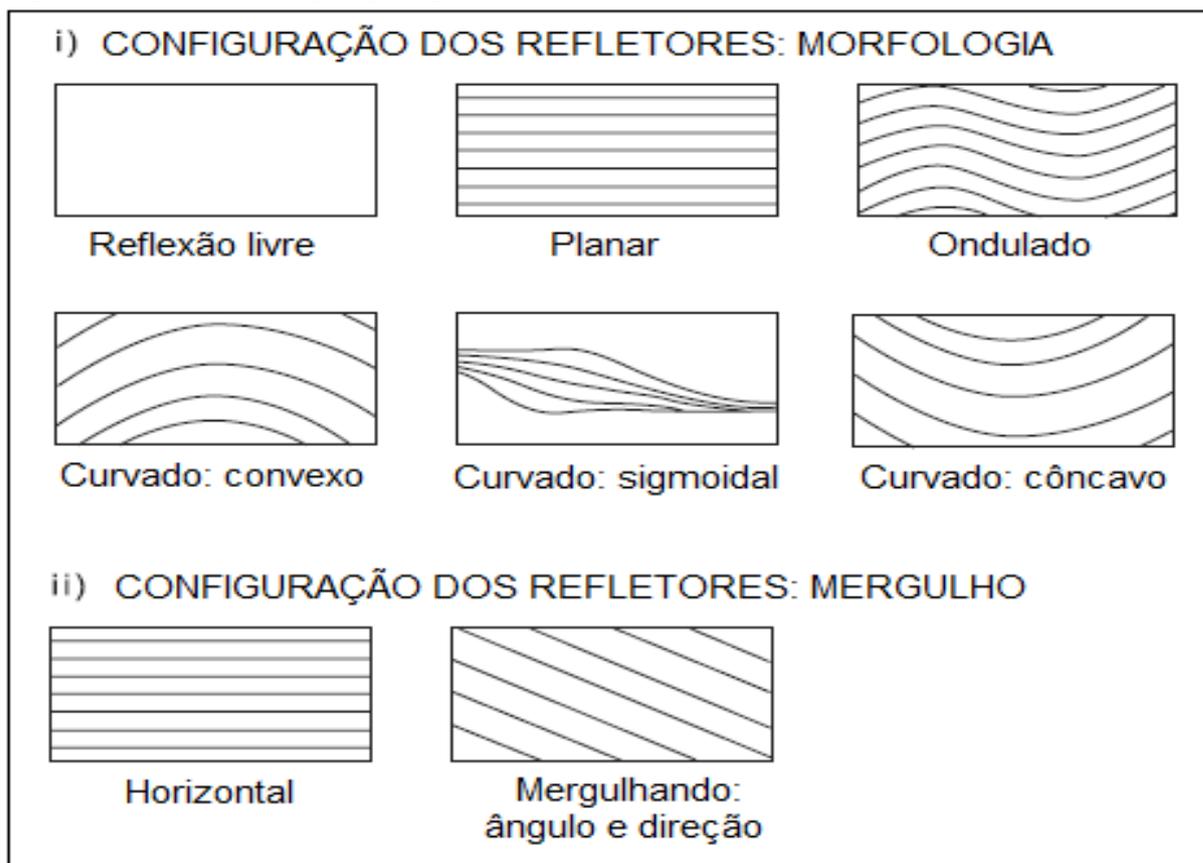
### 6.5 Interpretação das reflexões radar

Do mesmo modo que para a interpretação de dados sísmicos, a interpretação de dados GPR baseia-se na descrição dos refletores e na geometria dos mesmos no arcabouço estratigráfico (**Figura 23**)

A geometria de deposição mostra a relação dos refletores entre eles, e tem uma grande importância para deduzir qual o processo sedimentar e quais são os fatores exteriores que são responsáveis por aquela geometria.

Outro parâmetro importante na interpretação é o mergulho dos refletores, a continuidade e as terminações das radarfácies, que vão permitir ao interprete colocar os eventos em ordem cronológica.

Figura 23 - Tipos de configurações geométricas dos refletores.

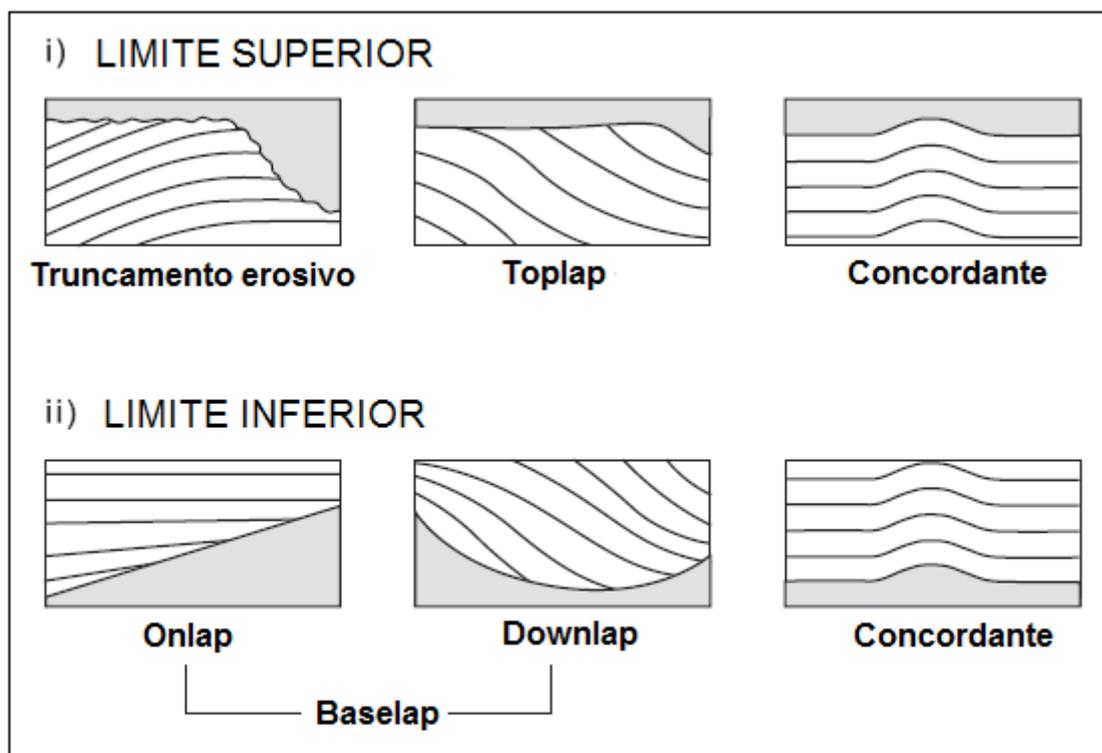


Fonte: Modificado MITCHUM et al. (1977).

O limite superior e inferior das radarfácies (**Figura 24**) é a base para qualquer trabalho de interpretação de dados sísmicos ou GPR. Transgressão e regressão marinha, erosão por exposição subaérea, progradação de uma unidade sedimentar e outros eventos sedimentares serão identificados usando o reconhecimento dos limites superior e inferior das radarfácies estudadas.

Todos esses parâmetros irão permitir destacar uma arquitetura sedimentar e, assim, permitir deduzir ambientes e processos deposicionais dentro de uma cronologia bem definida.

Figura 24 - Limite superior e inferior de refletores usados na interpretação de linhas sísmicas e GPR.



Fonte: Modificado MITCHUM et al. (1977).

## 6.6 Tipos de refletores

Conforme tratado acima, a interpretação global de uma linha de georadar baseia-se na habilidade em reconhecer o sentido de um refletor ou conjunto de refletores dentro do arcabouço estratigráfico da linha. Uma vez que um conjunto é interpretado como um elemento do perfil costeiro, é preciso procurar uma continuidade nesse perfil para validar a suposição. É claro que eventos erosivos (exposição sub-aérea, eventos de tempestade) podem deixar elementos do perfil normalmente distantes em discordância, o que pode induzir uma confusão. É preciso então reconhecer limites erosivos e incluí-los na evolução cronológica da feição estudada para explicar essa discordância.

A tabela seguinte mostra algumas configurações e geometrias encontradas nas linhas GPR desse estudo, com a interpretação delas.

Tabela 3: Ambiente de deposição interpretado a partir de refletores adquiridos com o método GPR.

	<b>Depósitos eólicos/dunas</b>
	<b>Barreira</b>
	<b>Barreira retrogradante</b>
	<b>Leques de arrombamento</b>
	<b>Face de praia</b>
	<b>Antepraia</b>

Fonte: Levantamento pelo autor de perfis GPR na Baixada de Jacarepaguá e processamento com os programas REFLEX e RADAM.