



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIA  
FACULDADE DE GEOFÍSICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

THALES LUIZ PINHEIRO DE ALMEIDA

**ANÁLISE E IMAGEAMENTO DE SUBSUPERFÍCIE RASA DE DEPÓSITOS DA  
FORMAÇÃO BARREIRAS COM RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR),  
ILHA DO OUTEIRO, REGIÃO DE BELÉM (PA).**

**BELÉM-PARÁ  
2014**



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIA  
FACULDADE DE GEOFÍSICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

THALES LUIZ PINHEIRO DE ALMEIDA

**ANÁLISE E IMAGEAMENTO DE SUBSUPERFÍCIE RASA DE DEPÓSITOS DA  
FORMAÇÃO BARREIRAS COM RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR),  
ILHA DO OUTEIRO, REGIÃO DE BELÉM (PA).**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
à Faculdade de Geofísica do Instituto de  
Geociências da Universidade Federal do Pará  
- UFPA, em cumprimento às exigências para  
obtenção de Bacharel em Geofísica.  
Orientador: Afonso César Rodrigues  
Nogueira.

**BELÉM – PARÁ  
2014**

Dados Internacionais de Catalogação de Publicação (CIP)  
Biblioteca do Instituto de Geociências/UFPA

---

Almeida, Thales Luiz Pinheiro de, 1992-

Análise e imageamento de subsuperfície rasa de depósitos da formação barreiras com radar de penetração no solo (GPR), Ilha do Outeiro, região de Belém (PA) / Thales Luiz Pinheiro de Almeida. – 2014.

32 f : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Afonso César Rodrigues Nogueira

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Oceanografia, Belém, 2015.

1. Prospecção - Métodos geofísicos. 2. Radar de Penetração no Solo. 3. Neógeno. 4. Análise de fácies. I. Título.

CDD 22 ed. 622.15

---

THALES LUIZ PINHEIRO DE ALMEIDA

**ANÁLISE E IMAGEAMENTO DE SUBSUPERFÍCIE RASA DE DEPÓSITOS DA  
FORMAÇÃO BARREIRAS COM RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR),  
ILHA DO OUTEIRO, REGIÃO DE BELÉM (PA).**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Faculdade de Geofísica do Instituto de  
Geociências da Universidade Federal do Pará-  
UFPA, em cumprimento às exigências para  
obtenção de Bacharel em Geofísica.

Data de Aprovação:  
Conceito:  
Banca Examinadora

---

Prof. Afonso César Rodrigues Nogueira - Orientador  
Doutor em Geologia  
Universidade Federal do Pará

---

Prof. Dr. Hugo Richard Bertete Aguirre - Membro  
Doutor em Geofísica  
Universidade Federal do Pará

---

Prof. Dr. Arnaldo de Queiroz da Silva - Membro  
Doutor em Geologia  
Universidade Federal do Pará

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu Deus por todas as oportunidades concedidas;

Aos meus pais Luiz Serra e Maria da Conceição, por me ensinarem a valorizar o estudo;

Aos meus irmãos Thelson Almeida e Thiago Almeida, pelo apoio e compreensão;

Ao meu Orientador Dr. Afonso Nogueira pela amizade e dedicação ao ensinar;

Aos Professores Dr. José Bandeira, Dr. Joelson e Dr. Marcos Welby pela ajuda durante a aquisição e tratamento dos dados;

À Nilce Silva, por todo zelo e carinho;

Ao meu amigo Fabrício da Silva pelo companheirismo ao desenvolver este trabalho;

Aos Colegas e amigos de turma Aline, Caio, Desirré, Elen, Glauter, Thiago e Walber, que sempre estiveram comigo durante todos esses anos;

## RESUMO

A utilização do Radar de Penetração no Solo (GPR) para imagear depósitos siliciclásticos neógenos e quaternários na região costeira do Estado do Pará vem sendo cada vez mais empregada. O levantamento geofísico com base nessa ferramenta permitiu caracterizar os depósitos da Formação Barreiras e Pós-Barreiras em uma pequena porção da Zona Bragantina correspondente ao município de Outeiro, região metropolitana de Belém, Pará. A interpretação de padrões de reflexão eletromagnética de até 5m de profundidade, combinado com dados faciológicos prévios sobre estes depósitos, permitiram a identificação de paleocanais fluviais rasos (até 3m de profundidade) e suas estruturas sedimentares internas, como estratificação inclinada heterolítica (IHS) formados sobre influência de correntes de maré. Estes dados ampliam o conhecimento sobre os dados faciológicos referentes aos depósitos neógenos e quaternários expostos nas falésias costeiras do Nordeste do Pará, incluindo agora dados de subsuperfície rasa.

Palavra chave: Prospecção – Métodos geofísicos. Radar de Penetração no Solo. Neógeno. Análise de fácies.

## ABSTRACT

The ground penetrating radar (GPR) has been useful to obtain images of Neogene and Quaternary siliciclastic deposits from coastal zone of the State of Pará. The geophysical survey based on this tool allowed characterizes deposits of the Barreiras Formation and Pós-Barreiras Unit in the Bragantina Zone area in the Outeiro District, metropolitan area of Belém, State of Pará. The interpretation of 5m depth electromagnetic reflection patterns combined with previous facies data on these deposits, allowed the identification of fluvial shallow paleochannel (up to 3m depth) and its internal sedimentary structures such as inclined heterolithic stratification (IHS) formed under influence of tidal currents. These data extend the knowledge about the facies data relating to Neogene and Quaternary deposits exposed in coastal cliffs of Northeast Pará, now including shallow subsurface data.

Key word: Prospecting - Geophysical Methods. Ground Penetrating Radar. Neogene. Facies Analysis.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa da área de estudo com a localização da Ilha do Outeiro .....	10
Figura 2 - Radar utilizado para o levantamento .....	17
Figura 3 - Reconhecimento e elaboração do perfil estratigráfico na praia Brasília, ilha do Outeiro...	18
Figura 4 - Levantamento dos perfis de GPR na praia Brasília, ilha do Outeiro.....	18
Figura 5 - Foto de satélite, obtida pelo software Google Earth, da praia Brasília e a localização por GPS dos dois perfis de Radar .....	19
Figura 6 - Perfil litoestratigráfico da falésia da praia Brasília indicando granodecrescência ascendente.....	20
Figura 7 - Estratificação cruzada heterolítica (IHS) observada em afloramento .....	21
Figura 8 - Argilito com estratificação plano-paralela presente na base da falésia da Praia Brasília...	21
Figura 9 - Zona Mosqueada a qual separa os dois ciclos de paleocanais fluviais .....	22
Figura 10 - Camada argilo-arenosa abaixo da superfície arenosa, possivelmente o topo do paleocanal fluvial .....	22
Figura 11 - Seção referente ao segundo perfil de GPR .....	24
Figura 12 - Seção referente ao segundo perfil de GPR .....	24
Figura 13 - A) Primeira seção de GPR com orientação SE/NW e refletores delineados; B) Desenho sobre a seção ilustrando padrões de reflexão assinalados: Padrão paralelo (cor <i>verde</i> e letra <i>P</i> ), padrão ondulante (cor <i>amarela</i> e letra <i>O</i> ), padrão divergente (cor <i>amarela</i> e letra <i>D</i> ) e padrão caótico (rachurado de <i>preto</i> e <i>cinza</i> e letra <i>C</i> ). Ausência de reflexão representada pela cor <i>cinza</i> .....	25
Figura 14 - A) Segunda seção de GPR com orientação SE/NW e refletores delineados; B) Desenho sobre a seção ilustrando padrões de reflexão assinalados: Padrão paralelo (cor <i>verde</i> e letra <i>P</i> ), padrão ondulante (cor <i>amarela</i> e letra <i>O</i> ). Ausência de reflexão representada pela cor <i>cinza</i> . Truncamento erosivo (traço <i>laranja</i> inclinado).....	26

Figura 15 - Perfil estratigráfico contendo as informações do perfil litológico da falésia e das seções de GPR .....	29
---	----

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	10
<b>2 CONTEXTO GEOLÓGICO</b> .....	12
<b>2.1 Arcabouço Estrutural</b> .....	12
<b>2.2 Arcabouço Estratigráfico</b> .....	12
2.2.1 Formação Barreiras .....	12
2.2.2 Sedimentos Pós-Barreiras .....	13
<b>3 TRABALHOS PRÉVIOS</b> .....	15
<b>3.1 GPR na Ilha do Outeiro</b> .....	15
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	17
<b>4.1 Aquisição de Dados</b> .....	18
<b>5 RESULTADOS</b> .....	20
<b>5.1 Descrição dos Afloramentos</b> .....	20
<b>5.2 Análise das Seções de GPR</b> .....	23
5.2.1 Padrões de Interpretação .....	23
<b>5.3 Descrição da sucessão neógena</b> .....	27
<b>5.4 Interpretação Paleoambiental</b> .....	27
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	30
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	31

## 1 INTRODUÇÃO

No nordeste do estado do Pará e litoral do Maranhão há uma grande distribuição de depósitos cenozóicos. Apesar desta grande distribuição, estes depósitos ainda são insuficientemente documentados. Nas últimas décadas estudos pioneiros com a utilização do Radar de Penetração no Solo (GPR, Ground Penetrating Radar), promoveram um aprofundamento no conhecimento científico da região. Exemplo disto, são as tabelas de Rossetti e Góes (2001), Sauck et al. (1995a), que realizaram levantamento utilizando a mesma metodologia na região da Plataforma Bragantina.

A área de estudo corresponde a praia Brasília, localizada na ilha de Outeiro (Figura 1), a 18 km do centro de Belém, que está geologicamente situada na plataforma Bragantina em uma área de até 1,6 milhões de quilômetros quadrados, chamada de Sistema Graben do Marajó (AZEVEDO, 1991; GALVÃO, 1991; VILLEGAS, 1994). Sendo este, limitado ao Norte pela Bacia do Amazonas, ao Sul pela Bacia de São Luís do Grajaú, ao Leste pela Bacia Pará-Maranhão e ao Oeste pela Bacia Bragança-Viséu.

Figura 1 – Mapa da área de estudo com a localização da Ilha do Outeiro.



Fonte: Do autor.

O objetivo deste trabalho é a utilização dos Perfis de reflexão eletromagnética, adquiridos a partir do método GPR, realizados na praia Brasília, ilha do Outeiro, região metropolitana de Belém, Pará, para se investigar por imageamento os estratos neógenos em

subsuperfície, auxiliando a interpretação dos aspectos geométricos de uma análise faciológica. Além disso, pretendeu-se verificar estruturas tectônicas como falhas e dobras na Formação Barreiras e na Unidade Pós-Barreiras em subsuperfície.

## 2 CONTEXTO GEOLÓGICO

### 2.1 Arcabouço Estrutural

O Sistema Graben do Marajó é resultado do processo de abertura do Oceano Atlântico no início do Cretáceo, devido ao progressivo deslocamento da placa continental Sulamericana para o Oeste e ao esforço contrário produzido pela movimentação das placas do Caribe e do Pacífico. Apresenta um padrão de deformação estrutural complexo (ROSSETTI et al., 2008) muito importante para os eventos de reativação estrutural ocorridos no Terciário, que proporcionaram o surgimento de novos espaços de acomodação de sedimentos.

O conteúdo dos espaços de acomodação terciários consiste em depósitos sedimentares, recobrando discordantemente um embasamento composto por rochas do Pré-cambriano e Cretáceo (AZEVEDO, 1991; VILLEGAS, 1994), que na plataforma Bragantina e do Pará, correspondem a áreas do embasamento que permanecem tectonicamente estáveis entre as bacias sedimentares que compõem o Sistema Graben do Marajó.

### 2.2 Arcabouço Estratigráfico

Dentre as formações contidas no sistema Graben do Marajó, estão às Formações Barreiras (Meso/Neomioceno) e Pós-Barreiras (QUATERNÁRIO; ROSSETTI et al., 1989), comumente expostas em inúmeras falésias costeiras. Entretanto, a falta de estudos sistemáticos no norte do país, associado ao acentuado intemperismo, à natureza descontínua e a ausência de um conhecimento paleontológico, impossibilita uma melhor correlação estratigráfica do Cenozóico brasileiro.

#### 2.2.1 Formação Barreiras

A Formação Barreiras não possui um vasto conteúdo fossilífero, que é um importante elemento de datação. Logo, a idade desta Formação tem sido motivo de vários estudos. Contudo, a idade varia de Oligo-mioceno a Plioceno. Arai et al. (1988,1994) têm posicionado a parte inferior da Formação Barreiras no Mioceno inferior a médio e assumi a interdigitação desta com a Formação Pirabas, no Norte do Brasil.

Além de ser composta por uma sequência de sedimentos detríticos, siliciclásticos, de origem fluvial e marinha (ARAI, 2005), pouco ou não consolidados, a Formação Barreiras apresenta grãos mal selecionados, de cores variadas, variando de areias finas à grossas, predominando grãos angulosos, argilas cinza-avermelhadas, com matriz caulínica e com

ausência de estruturas sedimentares (MABESSONE; SILVA; BEURLIN, 1972; BIGARELLA, 1975; LIMA, 2002).

A Formação Barreiras consiste em grandes depósitos transgressivos, oriundos do intervalo Aquitaniano – Serravalliano (ARAI, 2005), sendo estes depósitos de ocorrência restrita devido ao evento erosivo do Tortonian (SHIMABUKURO; ARAI, 2000), um dos horizontes de correlação inter-regional. Esta formação distribui-se ao longo de uma estreita faixa na zona litorânea, desde o Amapá até o Rio de Janeiro, apresentando uma grande variação faciológica. No litoral norte do país comumente observa-se fácies argilosas com laminação plano-paralela, argilo-arenosa com estruturas wave e linsen, arenosas com estratificação de carácter sigmoidal e estratificação cruzada acanalada.

Góes e Truckenbrodt (1980), em estudos no estado do Pará, definem três fácies distintas para os sedimentos terciários continentais: fácies conglomerática, fácies argilo-arenosa e fácies arenosa, sendo estes depositados em ambientes que variam de leques aluviais à marinho transicional, dominado por maré, como canal de maré, planície de maré e mangue, com características estuarinas.

#### 2.2.2 Sedimentos Pós-Barreiras

A Formação Barreiras no nordeste do estado do Pará é recoberta discordantemente por uma variedade de estratos oxidados (Paleossolo laterítico), de coloração vermelha clara à amarela pálida, esta cobertura ferruginosa inicia-se a deposição de uma sucessão estratigráfica mais jovem (depósitos Pliocênicos), denominada informalmente de Sedimentos Pós-Barreiras (Rossetti et al. 1989).

Como mencionado anteriormente, estudos a cerca destes depósitos são, ainda, insuficientemente documentados, isto se deve, em parte, ao longo período em que estes estratos foram considerados resultados de manto intempérico sobre rochas cretáceas e terciárias. Esta visão vem sendo gradativamente quebrada, graças ao reconhecimento da discordância de estratos oxidados em sua base.

Os sedimentos Pós-Barreiras apresentam, pelo menos, dois episódios de sedimentação, classificados por Rossetti e Góes (2001) como Pós-Barreiras Inferior e Pós-Barreiras Superior. Estes foram confirmados através da utilização de métodos geofísicos de investigação rasa.

Os Sedimentos Pós-Barreiras Inferior consiste em um pacote sedimentar de cerca de 10 metros de espessura, composto, predominantemente, por areias maciças de coloração vermelho-clara a alaranjada, apresentando bioturbações. Com relação aos grãos, são bem selecionados, com granulometria fina à média. Entretanto, apresenta localmente conglomerados e granulometria grossa.

Após uma superfície de descontinuidade de carácter erosivo, têm-se os Sedimentos Pós-Barreiras Superior, caracterizado pela presença de um pacote de areias finas a muito finas, bem selecionadas, de uma espessura variando de 2 à 5 metros de um acamamento maciço, em geral.

O ambiente deposicional referente aos Sedimentos Pós-Barreiras é ainda impreciso, mesmo sabendo-se que, em parte, são depósitos formados por processos eólicos. Segundo Rossetti et al. (2008), o principal motivo é o fato desses estratos terem sido considerados, por muito tempo, como resultado de manto intempérico sobre rochas cretáceas e terciárias. Entretanto, nas últimas décadas, com a identificação da superfície discordante em sua base, esta visão tem mudado.

### 3 TRABALHOS PRÉVIOS

A utilização do Radar de Penetração no Solo (GPR) na região norte do país, para estudos de fácies sedimentares e análises estratigráficas consiste em uma excelente ferramenta.

Mesmo se destacando nos estudos na região, alguns cuidados e considerações devem ser feitos para promover a melhor utilização do método geofísico, como evitar o exagero em escalas, ter o cuidado de se identificar claramente padrões estruturais com base nas reflexões, realizar o levantamento em áreas aonde a condutividade não venha a atenuar o sinal ao ponto de prejudicar visualizações do alvo, além de escolher uma antena, janela de amostragem e escala vertical adequada ao levantamento.

#### 3.1 GPR na Ilha do Outeiro

Sauck et al. (1995a) foram pioneiros na utilização desta metodologia no Norte do Brasil, conseguindo atingir profundidades de investigação de 12 à 14 metros utilizando uma antena de 100 MHz. Entretanto, Sauck et al. (1995b) ao realizar um estudo de mapeamento de estruturas cenozoicas em Belém e municípios vizinhos, foi observado que a resposta a esta aplicação foi muito pequena, mesmo com o solo Amazônico apresentando uma condutividade aceitável para investigação.

Na região da ilha de Outeiro, Sauck et al. (1995a) realizou 5 perfis em uma escala de profundidade de 400 nsec, possibilitando a visualização de paleocanal e um lençol freático raso. Entretanto, é preciso destacar que para uma visualização como esta é necessário um grande contraste de propriedades físicas, como o contraste de permissividade dielétrica ( $\epsilon$ ) da água para a areia.

O uso do GPR nesta localidade possibilitou a delimitação do lençol freático em detrimento da grande zona transicional de um meio de condutividade não saturada para um saturado, proporcionado pela argila e silte. Além de indica-lo como um possível aquífero a ser utilizado domesticamente.

Rossetti e Góes (2001) realizaram estudos semelhantes, tanto na ilha de Outeiro quanto em Salinópolis. Nestes trabalhos, também se notou que o solo da região apresenta um ótimo desempenho, ao atingirem profundidades de cerca de 12 metros, em relação à profundidade de penetração do método GPR.

Rossetti e Góes (2001) descreveram várias fácies sedimentares com base nas suas estruturas identificadas nos eventos de reflexão, além de realizar a correlação dos dados com as falésias costeiras. Mesmo sendo de difícil visualização identificar estruturas de interior de camada referentes a ondulações, devido não haver tanto clareza neste padrão, este tipo de estrutura de camada foi identificada. De forma geral, o padrão de reflexão que dominava os perfis era o das camadas plano-horizontais associadas à fácies paralelas discordantes.

O GPR funciona com a propagação de ondas eletromagnéticas de alta frequência (10-2500 MHz) emitidas diretamente no local de investigação, através de uma antena, para obter um padrão de reflexões a partir do contraste de propriedades físicas (permissividade dielétrica, susceptibilidade magnética e condutividade elétrica) dos corpos em subsuperfície. A teoria básica do GPR é discutida por vários autores, como por exemplo, Moffat e Puskar (1976).

#### 4 METODOLOGIA

O sistema utilizado neste trabalho é o Inc. Modelo SIR-2 (Figura 2), com antena monostática blindada de 200 MHz de frequência e com velocidade de passo lento. O sistema é alimentado por uma bateria de 12 V, e foi executado em gravação contínua, com um intervalo de medição média de 100 ns. A calibragem foi obtida em afloramento, sendo a resolução vertical dependente da profundidade de investigação, que está ligado à frequência da antena, além dos fatores atenuantes. Durante a aquisição, o controle de superfície horizontal foi feito utilizando marcadores a cada 10 m. Foram feitas correções topográficas apenas para superfícies com relevo ondulado, enquanto em superfícies planas esta correção não foi aplicada. Foi utilizado o software REFLEX com o objetivo de melhorar a qualidade da imagem dos perfis de GPR, aplicando a correção estática, filtro de ganho de amplitude e filtros 1D, conseqüentemente, proporcionando uma melhoria do sinal em relação ao ruído.

Figura 2 – Radar utilizado para o levantamento.



Fonte: Do autor

Os distúrbios mais acentuados das reflexões (Hipérboles) são produzidos por desvios e difrações causadas, possivelmente, por objetos acima do solo, bem como objetos enterrados, e até mesmo devido a diferenças de umidade (BANO et al., 2000).

#### 4.1 Aquisição de Dados

O trabalho de campo se deu primeiramente com reconhecimento da área, momento em que foram observadas as falésias junto à praia para a elaboração do perfil estratigráfico (Figura 3), e por último ao levantamento dos dois perfis de Radar (Figura 4).

Figura 3 – Reconhecimento e elaboração do perfil estratigráfico na praia Brasília, ilha do Outeiro.



Fonte: Do autor.

Figura 4 – Levantamento dos perfis de GPR na praia Brasília, ilha do Outeiro.



Fonte: Do autor.

Para o primeiro perfil de GPR foi estipulado um comprimento de 160 metros e para o segundo, 190 metros, no intuito de se verificar estruturas sedimentares de uma forma mais visível.

As litologias e estruturas sedimentares observadas na sucessão neógena-quadernária da Ilha do Outeiro foram usadas como base para a interpretação dos perfis de GPR (Figura 5). Assim, a principal ferramenta utilizada é a correlação entre o perfil estratigráfico confeccionado e a seção de GPR.

Figura 5 – Foto de satélite, obtida pelo aplicativo Google Earth, da praia Brasília e a localização por GPS dos dois perfis de Radar.



Fonte: Do autor.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Descrição dos Afloramentos

Analisando as falésias da praia Brasília, foi possível avaliar a presença de pelo menos dois ciclos de sedimentação interpretados como paleocanais fluviais, apresentando clastos em sua base e sofrendo uma granodecrescência ascendente, passando por camadas argilo-arenosas em sua parte intermediária até camadas predominantemente argilosas em seu topo. A partir deste afloramento foi elaborado um perfil litológico (Figura 6), representando a falésia.

Figura 6 – Perfil litoestratigráfico da falésia da praia Brasília indicando granodecrescência ascendente.



Fonte: Do autor

Cada ciclo possui conglomerados de matriz fina na base com coloração vermelho escuro, variando a lilás e amarelo, associado à base do paleocanal, sofrendo uma variação vertical na granulometria para um arenito-argiloso com coloração vermelho claro, apresentando estratificação cruzada do tipo IHS (*Inclined Heterolithic Stratification*), observada na Figura 7. Entretanto Este tipo de estratificação, não pode ser observado no ciclo superior devido estar posicionado em uma altura de aproximadamente 8 metros. Finalizando os ciclos referentes à sedimentação observada na falésia, podemos observar camadas plano-paralelas (Figura 8) predominantemente argilosas, marcando o topo do registro do paleocanal.

Além destas estruturas sedimentares, é possível notar uma zona mosqueada (Figura 9), onde se pode identificar arenitos-argilosos gradando rapidamente para uma litologia

predominantemente argilosa no topo. Esta zona mosqueada apresenta uma coloração amarelo esbranquiçado e separa os dois ciclos de sedimentação de possíveis paleocanais fluviais.

Figura 7 – Estratificação cruzada heterolítica (IHS) observada em afloramento.



Fonte: Do autor.

Figura 8 – Argilito com estratificação plano-paralela presente na base da falésia da Praia Brasília.



Fonte: Do autor.

Figura 9 - Zona Mosqueada a qual separa os dois ciclos de paleocanais fluviais.



Fonte: Do autor.

Ainda é possível se verificar nos afloramentos da praia de Brasília uma camada argilo-arenosa (Figura 10) abaixo da superfície arenosa por onde foi passado o GPR. Possibilitando a interpretação de que esta camada de caracter mais argilo, possivelmente corresponde ao topo de um ciclo de sedimentação mais antigo do que os dois primeiros, expostos na falésia.

Figura 10 – Camada argilo-arenosa abaixo da superfície arenosa, possivelmente o topo do paleocanal fluvial.



Fonte: Do autor.

## 5.2 Análise das Seções de GPR

Decorrente a limitação do método, o levantamento na praia Brasília não alcançou mais de 3 metros em nenhum dos perfis, mesmo ajustando na janela do tempo para um melhor desempenho a partir de uma antena de 200 MHz, além de uma ótima análise de velocidade por ajuste hiperbólico. No entanto, a profundidade de investigação foi suficiente para se identificar fácies sedimentares e estruturas que possibilitam uma satisfatória interpretação de paleoambiente.

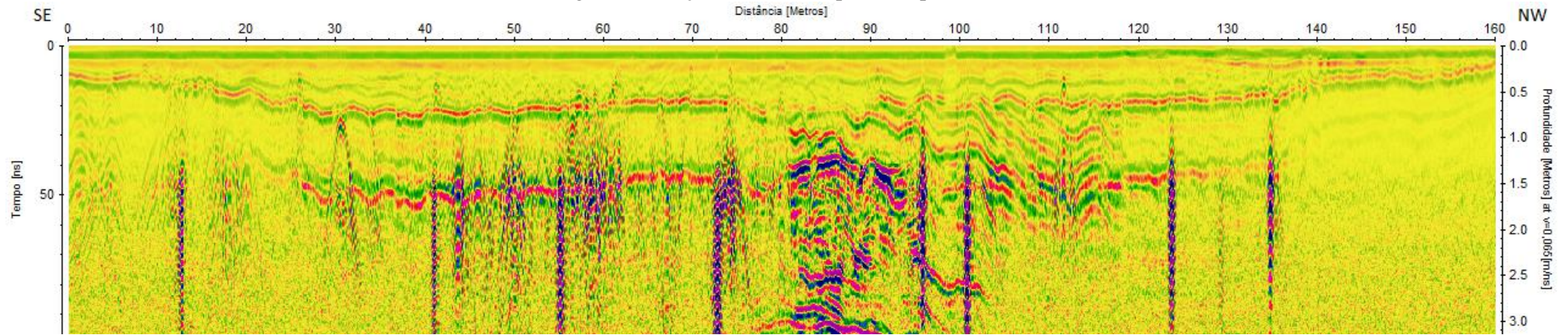
Após a etapa do processamento do dado foi realizada a interpretação dos perfis de GPR e a elaboração de uma seção referente ao primeiro perfil (Figura 11) e uma seção referente ao segundo perfil (Figura 12). A partir dessas seções, foi possível identificar as reflexões mais importantes e subdividi-las de acordo com o seu padrão geométrico da seguinte forma: Padrão caótico, hiperbólico, subparalelo, ondulante e divergente.

A partir destes padrões de interpretação foi possível traçar várias superfícies nas seções de GPR, as quais correspondem as interfaces das camadas. Com base na seção com eventos traçados foi elaborada uma seção esquemática para o primeiro perfil de GPR (Figura 13) e outra seção para o segundo perfil de GPR (Figura 14).

### 5.2.1 Padrões de Interpretação

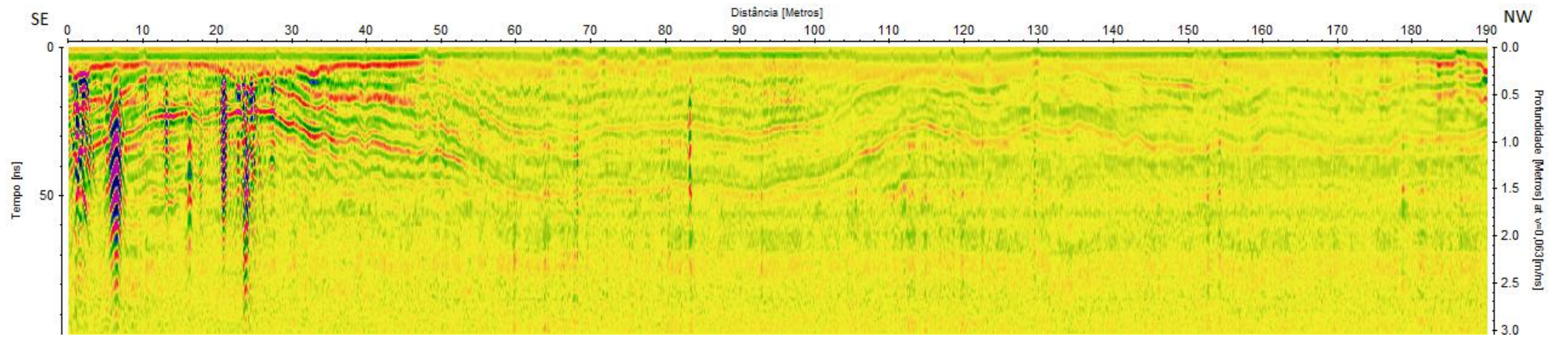
O padrão caótico refere-se à área da seção em que o ruído predomina sobre o sinal. As reflexões hiperbólicas são causadas por corpos em superfície ou mesmo enterrados a pequenas profundidades. Subparalelo é representado por camadas depositadas horizontalmente apresentando pequenas irregularidades. Ondulante é o padrão associado às camadas que apresentam uma curvatura significativa em forma de onda, apresentando cristas e vales, mesmo que lateralmente possam apresentar características referentes a outros padrões de reflexão. O padrão de reflexão divergente é caracterizado por camadas que apresentam uma inclinação inferior a  $30^\circ$  terminando em *onlap* ou *downlap* contra reflexões subjacentes, mesmo que lateralmente apresentem características semelhantes a outros padrões de reflexão, assim como o padrão ondulante.

Figura 11 - Seção referente ao primeiro perfil de GPR.



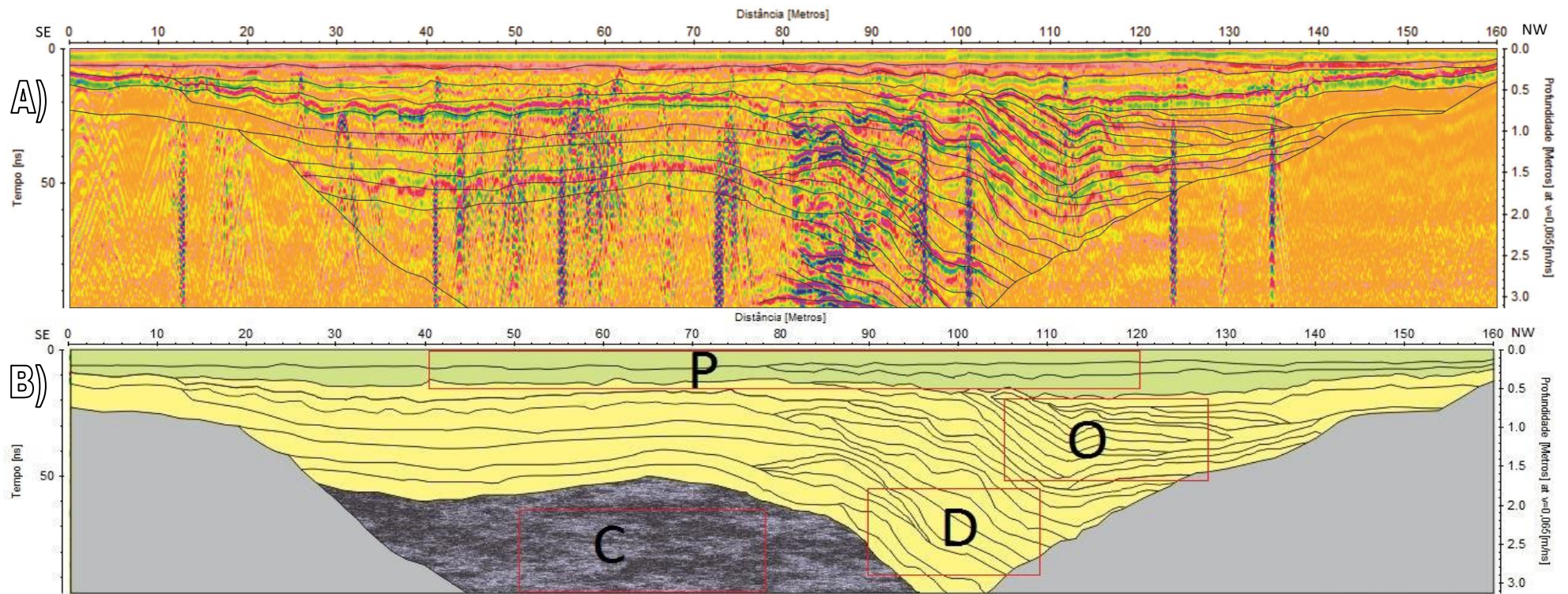
Fonte: Do autor.

Figura 12 - Seção referente ao segundo perfil de GPR.



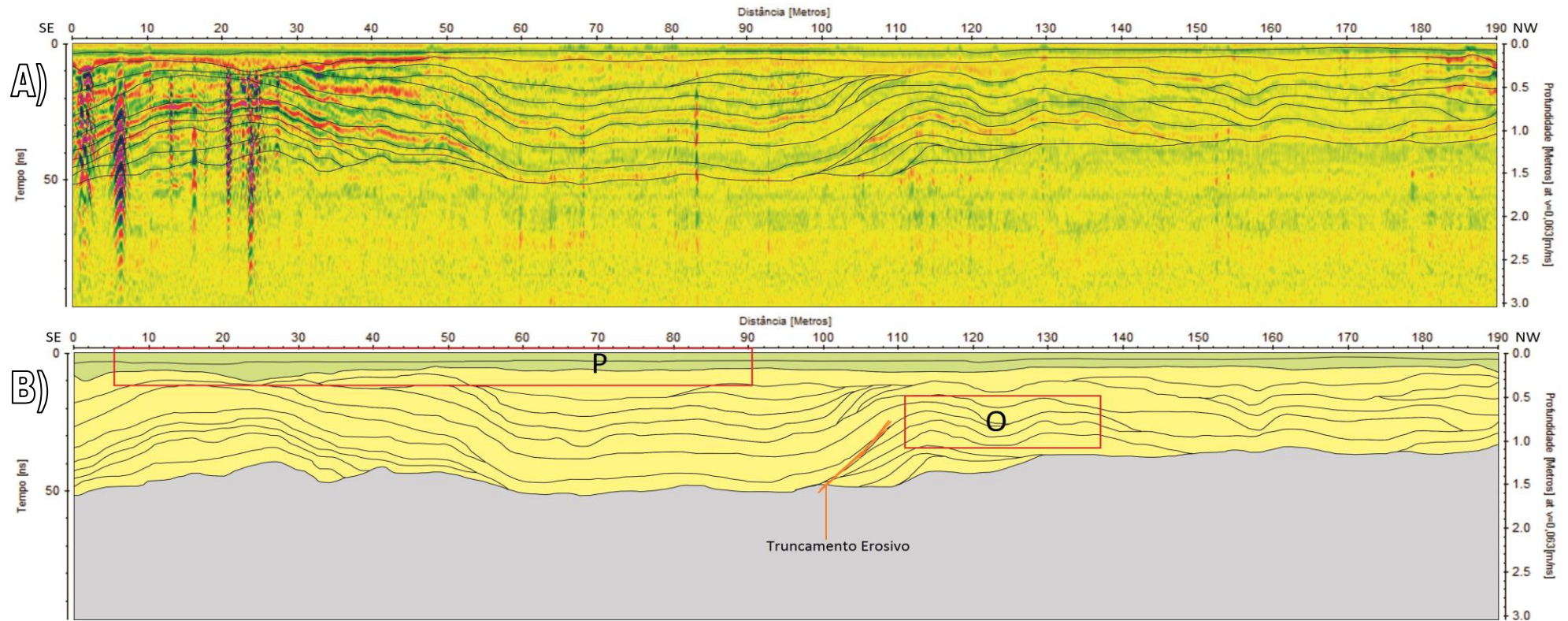
Fonte: Do autor.

Figura 13 – A) Primeira seção de GPR com orientação SE/NW e refletores delineados; B) Desenho sobre a seção ilustrando padrões de reflexão assinalados: Padrão paralelo (cor *verde* e letra *P*), padrão ondulante (cor *amarela* e letra *O*), padrão divergente (cor *amarela* e letra *D*) e padrão caótico (rachurado de *preto* e *cinza* e letra *C*). Ausência de reflexão representada pela cor *cinza*.



Fonte: Do autor.

Figura 14 - A) Segunda seção de GPR com orientação SE/NW e refletores delineados; B) Desenho sobre a seção ilustrando padrões de reflexão assinalados: Padrão paralelo (cor *verde* e letra *P*), padrão ondulante (cor *amarela* e letra *O*). Ausência de reflexão representada pela cor *cinza*. Truncamento erosivo (traço *laranja* inclinado) típico de canal.



Fonte: Do autor.

### 5.3 Descrição da sucessão neógena

As relações dos padrões de reflexão possibilitam a interpretação de ambos os perfis como seções de preenchimento de canal fluvial abandonado com influência de maré. Sendo que todas as reflexões terminam-se, lateralmente, em uma interface que converge para o centro da estrutura sedimentar, tanto na esquerda quanto na direita. Outra observação que válida esta interpretação é a atenuação do sinal na parte exterior desta interface (região identificada pela cor *cinza*), mesmo a uma menor profundidade, como nas periferias de qualquer um dos perfis, possibilitando a interpretação de um substrato mais argiloso (atenuante do sinal do GPR) em que os sedimentos de característica mais siliciclástica, típicos de um canal fluvial, se depositaram discordantemente, gerando a interface tida como a base do canal.

A reflexão subparalela, localizada ao longo do topo de todos os dois perfis, foi interpretada como um acamamento plano-paralelo (Ilustrado no primeiro e segundo perfil de GPR pela cor *verde* e assinalado pela letra *P*) que cobre toda a extensão da estrutura. Sendo o topo dos perfis de GPR referentes à base do perfil estratigráfico elaborado a partir da falésia, associou-se essa estrutura sedimentar plano-paralela a uma camada argilosa que viria a encerrar um ciclo de granodecrescência ascendente que se repete nas camadas mais superiores presentes em afloramento.

No primeiro perfil de GPR, a região rachurada de *preto e cinza e assinalado pela letra C* corresponde ao padrão caótico, típico de uma região onde há o predomínio do ruído e assim, impossibilitando a identificação de qualquer estrutura sedimentar.

### 5.4 Interpretação Paleoambiental

As reflexões de padrão ondulante e divergente (Ilustradas no primeiro e segundo perfil de GPR pela cor *amarela* e assinaladas, respectivamente, pelas letras *O* e *D*) foram associadas a estruturas de preenchimento e interpretadas como uma estratificação cruzada devido ao baixo ângulo (menor de 30°) em que as camadas estão dispostas. A interpretação é bem apropriada devida essa estrutura sedimentar apresentar um aspecto complexo resultando de mudanças rápidas da direção do agente de transporte e por serem comuns em rochas siliciclásticas, em concordância com a interpretação de uma paleocanal fluvial com influência de maré.

Entretanto, devido à configuração da estratificação cruzada, que apresenta um comportamento irregular em relação a sua inclinação na parte mais inferior do primeiro perfil (**D**), podemos defini-la melhor como uma estratificação cruzada heterolítica (*Inclined Heterolithic Stratification - IHS*). As IHS são estruturas sedimentares típicas de um ambiente onde há influência de maré, sustentando a interpretação paleoambiental. Além de serem estruturas sedimentares presentes na análise de fácies do perfil da falésia, servindo como um importante indício para se propor uma ciclicidade de eventos deposicionais. Tendo em vista que as mesmas estruturas que encontramos nos perfis de GPR podem ser encontradas no perfil da falésia.

No primeiro perfil (Figura 13) temos uma deposição de sedimentos significativamente mais assimétrica que no segundo perfil, caracterizando dois tipos de canais influenciados por forças de agente de transporte bem diferentes. Tanto que, a profundidade do canal presente no segundo perfil é bem menor que a do primeiro perfil.

O primeiro perfil apresenta um preenchimento de canal com o predomínio de estratificação cruzada a cruzada heterolítica, associado a uma grande ação do agente de transporte e sua mudança de direção ocasionada pela presença da maré. Acarretando em estruturas sedimentares com alta amplitude no sinal GPR. Trata-se de um paleocanal com cerca de 3 metros de profundidade e uma extensão de mais de 160 metros.

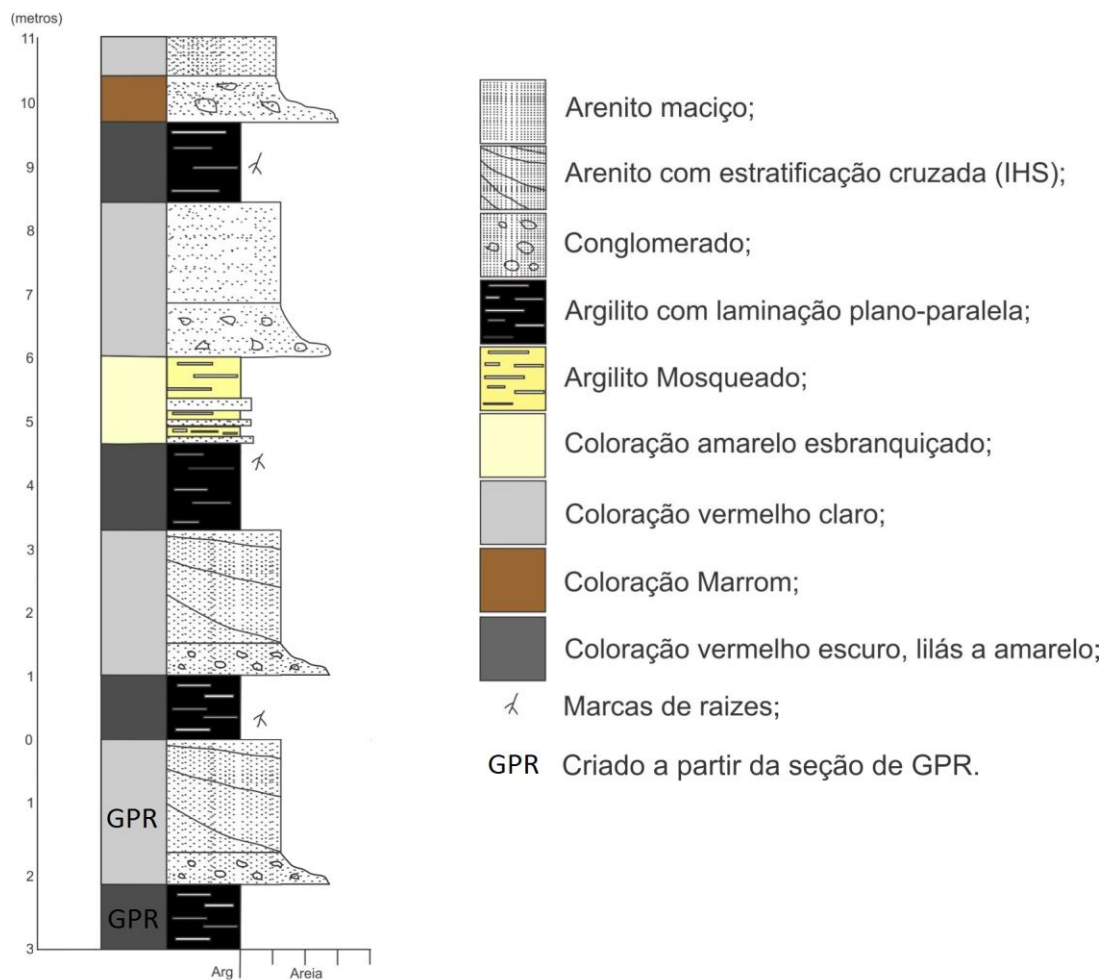
O segundo perfil apresenta o predomínio de estratificação plano-paralela com uma leve ondulação e estratificação em menor escala com uma pequena amplitude de cerca 0,5 metros. Estratos arenosos com forma tabular são geralmente oriundos de fluxos fluviais efêmeros, mostrando que se trata de um canal fluvial raso. Bem mais raso que o presente no primeiro perfil, cerca de 1,5 metro de profundidade, mas com uma extensão lateral significativamente maior, sendo aproximadamente 190 metros. Outro indício disso é a presença de um truncamento erosivo na base do canal (Figura 14 B; assinalado de *laranja*), sugerindo que os sedimentos arenosos transportados pelo rio se depositaram de forma discordante sobre os estratos subjacentes, característico de um canal fluvial.

Os paleocanais estudados apresentam como característica como a pequena profundidade e a grande extensão lateral, padrão observado em ambientes estuarinos. Assim, a interpretação deste ambiente sedimentar é de um ambiente estuarino, onde se pode encontrar um canal fluvial sofrendo influência da maré.

A investigação com o Radar imageou a Formação Barreiras e os Sedimentos Pós-Barreiras que se deposita sobre a primeira, como se observa no topo da falésia, no intervalo delimitado pela crosta laterítica (Assinalado no perfil da falésia pela coloração *Marrom*) depositada discordantemente sobre a Formação Barreiras, até o alto do afloramento. Entretanto, a utilização deste método nesta localidade não possibilitou a distinção entre a Formação Barreiras e os Sedimentos Pós-Barreiras, imageando as duas unidades simultaneamente.

Com base nas duas seções de GPR, na interpretação paleoambiental adquirida a partir delas e no perfil litológico obtido dos afloramentos, foi possível elaborar um novo perfil (Figura 15) o qual juntou as informações tanto da análise dos afloramentos quanto das seções de GPR.

Figura 15 – Perfil estratigráfico contendo as informações do perfil litológico da falésia e das seções de GPR.



Fonte: Do autor.

## 6 CONCLUSÃO

O uso do Radar, segundo publicações recentes, para estudos estratigráficos e para análises de fácies sedimentares tem sido muito útil principalmente no entendimento da geometria, contribuindo no sequenciamento da história sedimentar. O estudo desenvolvido na ilha do Outeiro demonstrou que as camadas são geralmente subhorizontais e eventualmente exibem canais rasos, não tendo sido constatado a presença de estruturas tectógenas.

Embora a maioria dos projetos e publicações com base no GPR seja focada para o âmbito da geofísica ambiental ou geotecnia e o mesmo seja um método geofísico capaz de identificar estruturas tectônicas, neste trabalho não foi possível verificar tais estruturas. Mesmo realizando uma etapa de processamento eficiente e com todo um conjunto de informações, a cerca da região de estudo, retirada dos trabalhos de outros pesquisadores, se mostrou inadequada à interpretação de falhas ou dobras estruturais, propostas pela teoria da neotectônica na ilha do Outeiro, em qualquer perfil de Radar adquirido neste trabalho.

O uso do método GPR para investigação de camadas em subsuperfície, como os depósitos oligo-miocenos, é de grande valor, pois o mesmo gera uma seção estratigráfica com padrões de reflexão ótimos para a interpretação de paleoambientes. Entretanto, é necessário o conhecimento das propriedades físicas dos materiais que venham a ser investigado para averiguar a viabilidade do levantamento. Logo, a escolha da região de pesquisa em Outeiro se traduz numa área excelente para a aquisição de dados de GPR, corroborando com os estudos prévios naquela região.

## REFERÊNCIAS

- ARAI, M. et al. Considerações sobre a idade do Grupo Barreiras no Nordeste do estado do Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35, 1988, Belém, Pará. *Anais...* Belém, Pará: SBG, 1988. v. 2, p. 738-752.
- ARAI, M. et al. Novos dados sobre estratigrafia e ambiente deposicional dos sedimentos Barreiras, NE do Pará. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 4., 1994, Belém. *Resumos expandidos*. Belém: SBG, 1994. p. 185-187.
- ARAI, M. A grande elevação eustática do Mioceno: a verdadeira origem do Grupo Barreiras. In: CONGRESSO DA ABEQUA, 10., 2005, Guarapi (ES). *Resumos Expandidos*. Guarapi (ES): Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, 2005. p. 6,
- AZEVEDO, R. P. *Tectonic evolution of Brazilian Equatorial Continental Margin Basins*. 1991.412f. Tese (Doutoramento) - University of London, London, 1991.
- BANO, M. et al. Investigating alluvial and tectonic features with ground-penetrating radar and analyzing diffractions pattern. *J Applied Geophysics*, v. 43, p. 33-41. 2000.
- BIGARELLA, J. J. 1975. The Barreiras Group in Northeastern Brazil. *An. Acad. Bras. Ci.*, v. 47, p. 366 - 392. 1975.
- GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT, W. Caracterização faciológica e interpretação ambiental dos sedimentos Barreiras na região bragantina, nordeste do Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Camburiu. *Anais...* Camburiu, 1980, v. 2, p. 766 - 771. 1980.
- LIMA, C. C. U. *Caracterização sedimentológica e aspectos neotectônicos do Grupo Barreiras no litoral sul do Estado da Bahia*. 2002. 141 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2002.
- MABESSONE, J. M., A. C. SILVA, A.C. ; BEURLIN, K. Estratigrafia e origem do grupo Barreiras em Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. *Brazilian Journal of Geology* , v. 2, n.3, p 173 - 188. 1972.
- MOFFAT, D. L.; PUSKAR, R. J. A subsurface electromagnetic pulse radar. *Geophysics*, v. 41, p. 506-518. 1976.
- ROSSETTI, D. F.; TRUCKENBRODT, W.; GÓES, A. M. Estudo paleoambiental e estratigráfico dos Sedimentos Barreiras e Pós-Barreiras na região Bragantina, Nordeste do Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências da Terra*, v. 1, p. 25-74. 1989.
- ROSSETTI, D. F. Influence of low amplitude/high frequency relative sea-level changes in a wave-dominated estuary (Miocene), São Luís Basin, northern Brazil. *Sedimentary Geology*, v. 133, p. 295-324. 2000.
- ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M. Imaging upper tertiary to quaternary deposits from Northern Brazil applying ground penetrating radar. *Rev Bras Geoc*, v. 31, p. 195-202. 2001.
- ROSSETTI, D. F. et al. Datação de sedimentos pós-barreiras no Norte do Brasil: Implicações paleogeográficas. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 38, p. 514-524. 2008.

SAUCK, W. A.; OLIVEIRA, J. A.; CARVALHO, J. S. Ground penetrating radar in the Middle Amazon Basin, Amazonas State, Brazil. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 4., 1995, Rio de Janeiro. *Resumos expandidos...* Rio de Janeiro: SBGF, 1995. p. 972-973.

SAUCK, W. A.; ALVES, J. G. V.; LUIZ, J. G. Successful applications of GPR in the Lower Amazon Region, Belém, Pará, Brazil. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 4., 1995, Rio de Janeiro. *Resumos expandidos...* Rio de Janeiro: SBGF, 1995. p. 974-975.

SHIMABUKURO, S.; ARAI, M. *The Tortonian unconformity: its relation to the stratigraphic framework of the Barreiras Group (Brazilian coastal Cenozoic deposits)*. In: 31th International Geological Congress - Rio de Janeiro, Brazil, 2000.

VILLEGAS, J. M. C. *Geologia estrutural da Bacia do Marajó*. 1994. 119f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Pará, Belém, 1994.