



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Geologia

Guilherme Zequini Gomes

**Uso de atributos GPR para interpretação estratigráfica: um estudo de caso  
utilizando dados de alta resolução com frequências de 200 MHz na região  
costeira de Grumari, RJ**

Rio de Janeiro

2022

Guilherme Zequini Gomes

**Uso de atributos GPR para interpretação estratigráfica: um estudo de caso utilizando dados de alta resolução com frequências de 200 MHz na região costeira de Grumari, RJ**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Geociências, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geofísica Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. Paulo de Tarso Luiz Menezes

Coorientador: Prof. Dr. Saulo Siqueira Martins

Rio de Janeiro

2022

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/C

G633 Gomes, Guilherme Zequini.  
Uso de atributos GPR para interpretação estratigráfica: um estudo de caso utilizando dados de alta resolução com frequências de 200 MHz na região costeira de Grumari, RJ / Guilherme Zequini Gomes. – 2022.

55 f. : il.

Orientador: Paulo de Tarso Luiz Menezes.

Coorientador: Saulo Siqueira Martins.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Geologia.

1. Geofísica - atributos – Teses. 2. Mapeamento geológico – Grumari, RJ - Teses. 3. Geologia estratigráfica - Teses. I. Menezes, Paulo de Tarso Luiz. II. Martins, Saulo Siqueira. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Geologia. IV. Título.

CDU: 551(815.3)

Bibliotecária Responsável: Priscila Freitas Araujo/ CRB-7: 6390

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Guilherme Zequini Gomes

**Uso de atributos GPR para interpretação estratigráfica: um estudo de caso utilizando dados de alta resolução com frequência de 200 MHz na região costeira de Grumari, RJ**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Geociências, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geofísica Aplicada.

Aprovada em 31 de Maio de 2022.

Orientador (a) (es): Prof. Dr. Paulo de Tarso Luiz Menezes

Faculdade de Geologia - UERJ

Coorientador (a) (es): Prof. Dr. Saulo Siqueira Martins

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. João Andrade dos Reis Júnior

Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA

---

Prof. Dr. André L. A. dos Reis

Faculdade de Geologia - UERJ

---

Prof. Dr. Emanuelle La Terra

Observatório Nacional – MCT-ON

Rio de Janeiro

2022

## **DEDICATÓRIA**

Para minha querida avó, Suely Bueno Gomes.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer em primeiro lugar a Deus, por me permitir vir a este mundo.

Eu não poderia começar a escrever este texto sem antes agradecer à pessoa que me fez seguir em frente até o final, minha avó Suely Bueno Gomes, que sempre me inspirou o sonho de ser professor. Lamento que a senhora não possa ter visto a conclusão deste trabalho ainda em vida, mas tenho certeza de que se alegrou com a nossa conquista de onde você estiver olhando por mim. Que eu possa herdar o seu espírito de nunca perder a essência independente do que aconteça. Eu te amo, minha vó.

Em seguida, gostaria de agradecer aos meus pais, Carlos Maurício e Cândida Zequini, que me proporcionaram todo o suporte e acesso à educação necessários para eu chegar até aqui. Muito obrigado e essa é mais uma conquista nossa.

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo de Tarso, agradeço o acolhimento na UERJ e por ter se tornado parte fundamental da minha formação como cientista e pessoa. Muito obrigado pelas aulas reveladoras de EM, e por me passar os conceitos de Feynman para estudar, principalmente o de “Keep it Simple...”.

Agradeço ao meu amigo e Coorientador Prof. Dr. Saulo Martins por ter me ajudado academicamente desde o TCC até a conclusão deste trabalho. Sou grato também por todos os conselhos recebidos.

Agradeço aos amigos que compartilham essa caminhada comigo. Ao Arthur por ser um amigo que fiz quando sai de casa pela primeira vez, e o conheci no jardim de infância. Ao Matheus por sempre me motivar me fazendo acreditar em mim e por ser capaz de iluminar o que há de melhor nas pessoas. Ao fenômeno da natureza, Lucas que além de amigo é parte da minha família. Para o Leozão que desempenha excelência em tudo que faz e é um grande exemplo de dedicação. Ao Geólogo e Mestre Guilherme Brügger que na verdade não é um grande amigo, mas pagou a metade do aluguel, desta forma possuindo grande importância monetária para a realização deste trabalho. E a todos os outros grandes amigos e amigas que eu poderia citar pessoa-por-pessoa aqui, porém já estou com todos os meus prazos atrasados, por isso espero que me entendam.

Dedico um agradecimento muito especial para Juliana Nascimento, que esteve ao meu lado quando eu mais precisei e desempenhou um papel muito mais importante do que eu jamais conseguiria desempenhar neste trabalho.

Agradeço a UERJ e toda a equipe da pós-graduação que me forneceu todo o suporte e infraestrutura para a realização deste trabalho. Por fim, mas não menos importante, agradeço a CAPES pela bolsa de estudo fornecida e pelo incentivo ao avanço da ciência no Brasil.

O maior inimigo do conhecimento não é a ignorância, é a ilusão do conhecimento.

*Stephen Hawking*

## RESUMO

GOMES, Guilherme Zequini. *Uso de atributos GPR para interpretação estratigráfica: um estudo de caso utilizando dados de alta resolução com frequência de 200 MHz na região costeira de Grumari, RJ.* 2022. 55 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

A interpretação de dados GPR concentra-se frequentemente no estudo do atributo de amplitude do traço. Assim, os intérpretes tentam identificar os principais horizontes estratigráficos com base em avaliações subjetivas. Por outro lado, os atributos do traço fornecem parâmetros descritivos e quantitativos na mesma escala que os dados originais de GPR, que podem ser mostrados de maneira muito semelhante à amplitude do traço. No presente trabalho, demonstramos as vantagens do uso de atributos para interpretar dados GPR de *fixed-offset* de alta resolução de 200 MHz adquiridos na região costeira de Grumari. A utilização de três atributos selecionados permitiu o reconhecimento de feições mascaradas nas seções base de GPR e contribuiu para evidenciar a continuidade dos refletores facilitando o mapeamento das feições estratigráficas de ordem superior. Identificamos feições estratigráficas associadas com mudanças no nível do mar relacionadas a evolução estratigráfica da planície de cordão na região costeira de Grumari.

Palavras-chave: GPR; atributos; geologia.

## ABSTRACT

GOMES, Guilherme Zequini. *On the use of GPR attributes for stratigraphic interpretation: a study case on the high-resolution 200 MHz dataset of Grumari coastal region*. 2022. 55 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

The interpretation of GPR data frequently focuses on studying the trace amplitude attribute. Accordingly, interpreter attempt to indentify the main stratigraphic horizons based on subjective assessments. On the other hand, trace attributes give descriptive and quantitative parameters on the same scale as the original GPR data, which can be shown Much like the trace amplitude. In the present paper, we demonstrate the advantages of using attributes to interpret high-resolution 200 MHz GPR fixed-offset data acquired in the Grumari coastal region. The use of three selected atributes allowed the recognition of masked features in original GPR data and contributed to highlighting the reflections continuity and thus making it easier to map the high-order stratigraphic features. We indentified main stratigraphic horizons associated with the sea-level changes of the strandplain stratigraphic Evolution of Grumari coastal plain.

Keywords: GPR; atributes; geology.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Mapa de Localização da Região de Grumari.....	17
Figura 2 –	Representação da Província Mantiqueira.....	19
Figura 3 –	Gráben da Guanabara.....	21
Figura 4 –	Fotografia da Região de Grumari na década de 60.....	22
Figura 5 –	Levantamento de Ground Penetrating Radar (GPR).....	27
Figura 6 –	Análise de Modelo de Velocidade com dado CMP.....	29
Figura 7 –	Seção A com diferentes tipos de Atributos GPR selecionados.....	31
Figura 8 –	Seção B com diferentes tipos de Atributos GPR selecionados.....	32
Figura 9 –	Modelo de interpretação Geológica da Seção A.....	34
Figura 10 –	Modelo de interpretação Geológica da Seção B.....	35

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CMP	Common Mid-point
DGPS	<i>Differential Global Positioning System</i>
EM	Eletro-magnético
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Fc	Frequência Central
GHz	Giga Hertz
GPR	Ground Penetrating Radar
MHz	Mega Hertz

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\nabla$	Operador Nabla
$\times$	Produto Vetorial
$\cdot$	Produto Escalar
$\vec{E}$	Força do Campo Elétrico
$\vec{B}$	Densidade do Campo Magnético
$\vec{H}$	Intensidade do Campo Magnético
$\vec{D}$	Deslocamento elétrico
$\vec{j}$	Densidade da Corrente Elétrica
$q$	Carga elétrica
$t$	Tempo
$\partial$	Operador diferencial
$\vec{\sigma}$	Condutividade Elétrica
$\vec{\epsilon}$	Permissividade Dielétrica
$\vec{\mu}$	Permeabilidade Magnética

## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	15
1	<b>OBJETIVOS</b> .....	18
1.1	<b>Objetivos Gerais</b> .....	18
1.2	<b>Objetivos Específicos</b> .....	18
2	<b>AREA DE ESTUDO</b> .....	19
2.1	<b>Geologia Regional</b> .....	19
2.2	<b>Geologia Local</b> .....	22
3	<b>REVISÃO TEMÁTICA</b> .....	23
3.1	<b>Ground Penetrating Radar</b> .....	23
3.2	<b>Atributos GPR</b> .....	25
4	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	26
4.1	<b>Aquisição</b> .....	26
4.2	<b>Processamento</b> .....	26
4.3	<b>Interpretação</b> .....	29
5	<b>RESULTADO E DISCUSSÕES</b> .....	31
	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	37
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	38
	<b>APÊNDICE A - Artigo Científico</b> .....	40

## INTRODUÇÃO

Na região metropolitana do Rio de Janeiro, duas principais áreas costeiras foram estudadas desde a década de 1940: A Restinga da Marambaia, isolada do continente pela Baía de Sepetiba, e a planície de Jacarepaguá, caracterizada como um sistema de duas ilhas barreiras. Entre elas se encontra a Planície de Grumarí (Figura 1), uma planície costeira secundária formada por sedimentos quaternários e cercada pela encosta composta por rochas cristalinas. A região foi antropologicamente modificada na década 1960, para fins de urbanização. Os afloramentos e demais feições geológicas foram destruídas e a região foi aterrada para a realização de construções civis devido a área se tratar de importante ponto turístico do Rio de Janeiro. Conforme a região se tornou parte do Parque nacional da Pedra branca, a urbanização foi cessando e deu-se início a um processo de reflorestamento. Esta ação foi fundamental para a preservação do ecossistema da região e permitiu a retomada dos estudos geológicos e geofísicos na área.

A evolução sedimentar da área ainda é uma questão de debate, se a mesma se desenvolveu a partir de um sistema de ilhas barreiras ou uma planície de cordões litorâneos. **Pereira et al., (2012)** levantou a hipótese de a área ser um antigo sistema de ilhas barreiras, assim como as regiões costeiras adjacentes, controlada pelo equilíbrio entre o aporte sedimentar e a geração de espaço deposicional. Recentemente, **Mira et al., (2021)** em um estudo utilizando o método de Ground Penetrating Radar (GPR), com antenas de 100 MHz de frequência central, concluiu, com base nos dados obtidos, que a região evoluiu como uma planície de cordão por meio da formação de cordões litorâneos progradantes e a expansão de zonas intercordão.

Com um aumento pela busca do entendimento da geologia do Quaternário, e principalmente das regiões costeiras, os métodos geofísicos ou indiretos se provaram ferramentas importantes para investigar os processos sedimentares, tectônicos e eustáticos que influenciam na dinâmica costeira. As regiões litorâneas são em sua maioria áreas de grande interesse turístico, tornando-se assim objetos de atenção para a preservação, proteção e manutenção do ecossistema, provendo desta forma o uso e acesso destas regiões de forma consciente e sustentável.

Uma forma de se realizar pesquisas de caráter geológico nessas áreas, preservando o ecossistema e as feições superficiais é por meio dos métodos geofísicos não destrutivos, que

não demandam a investigação por meio da alteração da superfície com furos, escavações, aplainamentos e destruição de afloramentos.

O GPR é um método geofísico fundamentado na propagação em ondas eletromagnéticas (EM) que são propagadas em um intervalo de alta frequência, variando de 10 MHz a 1 GHz (**Annan, 2002**). Um pulso EM é enviado ao subsolo por uma antena transmissora. Os pulsos são refletidos e refratados ao atravessarem interfaces que separam materiais com diferentes propriedades dielétricas e são finalmente registrados por uma antena receptora. O GPR pode fornecer imagens com alta resolução da subsuperfície terrestre contanto que o solo possua baixa condutividade elétrica, e as perdas por dispersão sejam negligenciadas. Sob condições ideais, um equipamento de GPR operando dentro de um intervalo de frequência específico para alvos geológicos pode atingir uma resolução vertical de até alguns decímetros e alcançar profundidades de penetração de até algumas dezenas de metros.

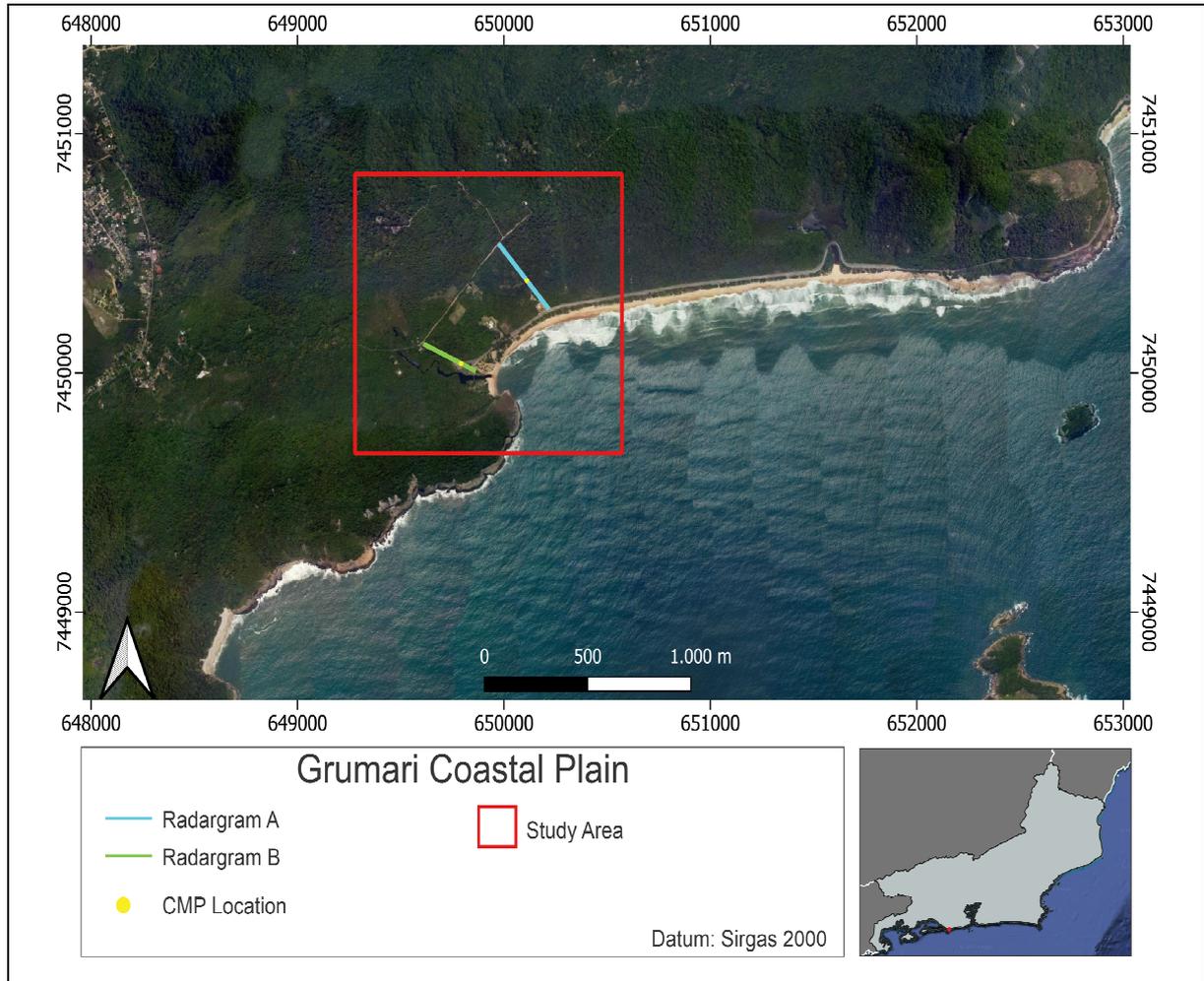
Consequentemente o método GPR pode fornecer imagens de alta resolução de corpos superficiais de pequena escala, similar ao método sísmico, que oferece imagens de larga escala de características geológicas de grandes profundidades. Os usos mais convencionais do GPR envolvem sua utilização no imageamento e estudo de *Permafrost* (**Dallimore & Davis, 1987**), exploração hidrogeológica em sedimentos (**Van Overmeeren, 1994**), e rochas cristalinas (**De Menezes Travassos & Menezes, 2004**), estudos de solos (**Aranha et al., 1994**). Com maior importância para nosso propósito, o método também tem sido extensamente utilizado em análises estratigráficas (e.x, **Magalhães et al., 2017**; **Cyples et al., 2020**; **Menezes, 2021**; **Taioli et al., 2021**).

A interpretação de Radar é em sua maioria baseada em parâmetros qualitativos, que dependem diretamente da experiência profissional do intérprete (**Forte et al., 2012**). Uma metodologia que fornece uma abordagem quantitativa, baseada em medidas específicas de características cinemáticas, geométricas, estatísticas e dinâmicas para a interpretação de radar é a análise de atributos (**Chen & Sidney, 1997**). A análise de atributos foi desenvolvida para dados sísmicos, e uma de suas aplicações foi a localização de *Bright Spots* (Zonas de forte amplitude). A técnica pode ser aplicada para GPR, porque apesar das diferenças dos parâmetros medidos, escala e a resolução entre os métodos sísmico e GPR, ambos são fundamentados na Teoria das Ondas.

O presente estudo interpreta um conjunto de dados de alta resolução com frequência de 200 MHz para avançar na evolução estratigráfica da Planície de Grumari, por meio da adição do uso de atributos matemáticos como suporte a interpretação radarestratigráfica de

estruturas geológicas presentes nos radargramas. Nosso resultado corrobora com a hipótese de a região ter sido formada a partir de um cordão litorâneo, conforme proposto por **Mira *et al.*, (2021)**.

Figura 1 – Mapa de Localização da Região de Grumari.



Legenda: Mapa apresentando a Região Costeira de Grumari, com a área de estudo marcada de Vermelho e as seções de GPR coletadas representadas pelas linhas azul e verde, com os CMPs sendo os pontos amarelos.

Fonte: O Autor, 2022.

## 1 OBJETIVOS

### 1.1 Objetivos Gerais

Esta pesquisa tem como principal objetivo analisar a efetividade na aplicação de diferentes tipos de atributos GPR em seções de Radar obtidas utilizando uma antena com frequência de 200 MHz. Portanto com a combinação da análise de atributos, com dados de maior resolução espera-se que seja possível uma melhor análise de feições estratigráficas de pequeno porte. Foram utilizados os dados obtidos por **Mira *et al* (2021)** e **Pereira *et al* (2012)** para fins de comparação com os dados obtidos nesse trabalho.

### 1.2 Objetivos Específicos

Consistem em objetivos específicos esperados deste trabalho os itens a seguir:

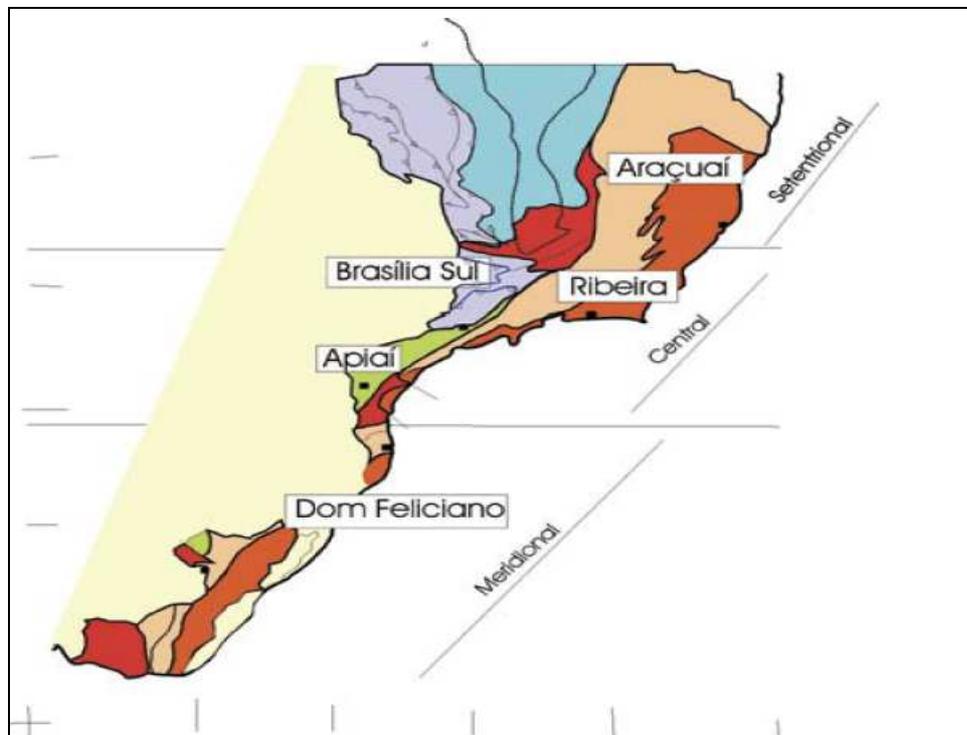
- a) Aquisição e processamento de Linhas GPR utilizando antenas com frequência de 200 MHz;
- b) Aplicação de diferentes atributos GPR, com base nos principais tipos utilizados na bibliografia;
- c) Interpretar possíveis feições estratigráficas presentes nas seções de radar.
- d) Comparar as feições observadas e identificadas com feições presentes em outros trabalhos.

## 2 ÁREA DE ESTUDO

### 2.1 Geologia Regional

A área de estudo está inserida no contexto tectônico da Província Mantiqueira, definido inicialmente por **Almeida *et al.* (1977)**. A província está localizada ao longo da costa atlântica, a sul do paralelo 15° até o limite da fronteira com o Uruguai, sendo limitada a leste pelas bacias costeiras e margem continental. Já a oeste, é limitada pelas províncias São Francisco, Tocantins e Paraná. (**Almeida *et al.*, 1977**). A Província Mantiqueira (**Figura 2**) desenvolveu-se durante a orogenia Brasiliana, no Neoproterozoico, e engloba os orógenos Araçuaí, Ribeira, Brasília Meridional, Dom Feliciano e São Gabriel (**Heilbron *et al.*, 2004**). Grumari está localizada especificamente no Terreno Oriental da Faixa Ribeira, definido por **Heilbron *et al.*, (2004)**.

Figura 2 – Representação da Província Mantiqueira



Legenda: Subdivisão da Província Mantiqueira em setentrional, meridional, central e os seus Orógenos.

Fonte: Heilbron *et al.*, 2004.

O Orógeno Ribeira, apresenta um *trend* estrutural NE-SW, sendo resultante da interação entre o Cráton São Francisco e placas, microplacas e arco de ilhas, localizada a sudeste deste Cráton, assim como a porção SW do Cráton do Congo (**Heilbron et al., 2004**). A Faixa Ribeira pode ser subdividida em cinco terrenos tectono-estratigráficos denominados Terrenos Ocidental, Paraíba do Sul, Embu Oriental e Cabo Frio. Estes são separados ora por falhas de empurrão e ora por zonas de cisalhamento obliquas transpressivas (**Heilbron et al., 2004**).

A Serra do Mar, segundo **Almeida e Carneiro (1998)**, surgiu como resultado de abatimentos do Planalto Atlântico na Falha de Santos, durante um grande evento tectônico iniciado no Paleoceno. Na mesma ocasião formou-se no interior do Planalto Atlântico o Gráben da Guanabara, elevando-se também junto a Falha de Santos (**Almeida & Carneiro, 1998**). Segundo **Villwock et al., (2005)**, a Serra do Mar, consiste em um conjunto de terras altas com embasamento cristalino, com escarpas que forma promontórios rochosos de costões que chegam até o oceano, alternando-se com reentrâncias quase sempre tectonicamente controladas.

O Gráben da Guanabara foi inicialmente descrito como Rifte da Guanabara e abrange cerca de 200 km, localizado entre as regiões de Barra de São João e a Baía de Sepetiba (**Almeida et al., 1976**). **Zalán e Oliveira (2005)** definiram que grábens de idades cenozoicas que ocorrem no sudeste do Brasil, do norte do Rio de Janeiro até o Paraná, seriam denominados Sistemas de Riftes Cenozóicos do Sudeste do Brasil (SRCSB). Segundo **Zalán e Oliveira (2005)** o Gráben da Guanabara faz parte do SRCSB, e foi subdividido em sub-grábens separados pela Zona de Transferência Tinguá-Tijuca e pela Zona de Acomodação de Ilha Grande-Sepetiba. Estes são denominados sub-grábens da Baía, Paraty e Guandu-Sepetiba (**Figura 3**) (**Zalán e Oliveira, 2005**). A Planície Litorânea de Grumari, está localizada no sub-gráben Guandu-Sepetiba, mais precisamente na borda sul do mesmo.

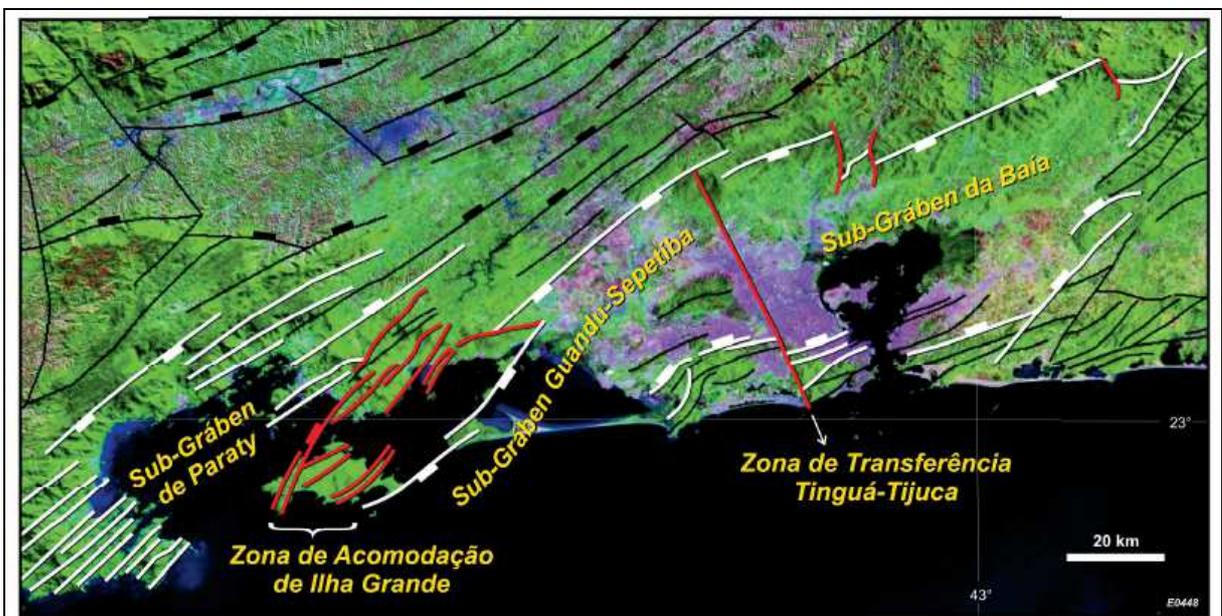
A evolução geomorfológica da margem continental da América do Sul, está relacionada com os eventos tectônicos iniciados no Jurássico (130 Milhões de Anos), que resultaram na ruptura do supercontinente Gondwana e conseqüentemente na abertura do Oceano Atlântico Sul. Esta ruptura evoluiu principalmente por um sistema de fraturas do tipo rifte, que atualmente é marcada pela dorsal meso-atlântica (**Villwock et al., 2005**). Através de diversas fases de reativação tectônica, ocorreram basculamentos, flexuras e soerguimentos, dando origem a fossas e muralhas tectônicas, vales de afundamento, com alguns acompanhados de vulcanismo alcalino. Estes eventos causaram a mudança do sentido do

curso dos rios, que passando a fluir para o interior do continente, reduziram parte do aporte sedimentar para a Planície Costeira (Villwock *et al.*, 2005).

A região costeira também é condicionada por outros fatores como variações climáticas, que alteram a taxa de intemperismo, erosão e transporte. Nos últimos dois milhões de anos, ocorreram alternâncias cíclicas que produziram estágios glaciais e interglaciais, que por sua vez, modificaram o nível do mar, causando as grandes regressões e transgressões marinhas. Além dos processos climáticos e paleo-climáticos, a própria dinâmica costeira, como a ação de ondas e do vento tem sido fatores importantes na construção da geomorfologia da região costeira do sudeste brasileiro (Villwock *et al.*, 2005).

A planície litorânea de Grumari está localizada na Costa Sudeste do Brasil, segundo a classificação de Silveira (1964). Esta que está entre o Cabo Frio e o Cabo de Santa Marta, sendo marcada pela presença da Serra do Mar. Esta costa é composta por sistemas de laguna barreira, ou cordões litorâneos regressivos parcialmente retrabalhados pelo vento, de idades Pleistocênicas e Holocênicas (Villwock *et al.*, 2005).

Figura 3 – Gráben da Guanabara



Legenda: Subdivisões do Gráben da Guanabara nos Sub-Grábens Guandu-Sepetiba, Da Baía e Paraty.

Fonte: Zalán; Oliveira, 2005

## 2.2 Geologia Local

A região de Grumari pode ser dividida em uma planície litorânea, formada por depósitos quaternários flúvio-marinhos e um sistema de encostas, composto pelo Granito Pedra Branca e os ortognaisses neoproterozoicos do Complexo Rio Negro (**Heilbron M ; Eirado, 2016**).

Uma intensa antropização que ocorreu na Região nas décadas de 50 e 60 (**Figura 4**), onde para a realização de loteamento e construção de estradas, foi removida a cobertura vegetal (**Albuquerque, 2010**). Devido a esta antropização, tal como a falta de afloramentos, o registro geomorfológico local foi apagado, restando apenas alguns ecossistemas preservados, como a restinga nas áreas de baixada, Mata Atlântica nas encostas, brejos, áreas alagadiças e resquícios de manguezal, os quais se tornam fundamentais para o entendimento da dinâmica costeira e dos processos de sedimentação atuante na região. Segundo **Pereira et al (2012)** a região da planície litorânea de Gruamari consiste em um antigo sistema de barreiras e lagunas, tal qual a baixada de Jacarepaguá e a restinga da Marambaia.

Figura 4 – Fotografia da Região de Grumari na década de 60



Legenda: Fotografia da região costeira e da praia de Grumari no ano de 1968.

Fonte: Acervo fotográfico do IBGE.

### 3. REVISÃO TEMÁTICA

#### 3.1 Ground Penetrating Radar (GPR)

O *Ground Penetrating Radar* (GPR) é um método de sondagem não destrutiva que utiliza ondas de rádio para imagear o subsolo, através das diferenças dielétricas dos materiais (Reynolds, 2011). Sua base está fundamenta na física das ondas eletromagnéticas (EM), que podem ser definidas pelas equações de Maxwell (Equações 1; 2; 3; 4) (JOL, 2008).

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = q \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

Onde,  $\nabla$  é um operador diferencial chamado nabla, E é a força do campo elétrico, B é a densidade do campo magnético, t é tempo, H é a intensidade do campo magnético, J é densidade da corrente elétrica, D é o deslocamento elétrico e q é a carga elétrica.

Além das Equações de Maxwell que definem as propriedades físicas das ondas EM, o método também leva em consideração as equações constitutivas do meio (Equações 5; 6; 7). Estes definem as propriedades físicas dos materiais no qual as ondas eletromagnéticas se propagam. Estas equações relacionam três propriedades que são: A Condutividade Elétrica ( $\vec{\sigma}$ ) que caracteriza a capacidade de criação de corrente elétrica quando há a presença de um campo elétrico. A Permissividade Dielétrica ( $\vec{\epsilon}$ ) que pode ser explicada como o deslocamento da carga restrita em um material na presença de um campo elétrico. E a Permeabilidade Magnética ( $\vec{\mu}$ ) que descreve como momentos magnéticos moleculares respondem a um campo magnético (Jol, 2008).

$$\vec{J} = \vec{\sigma} \vec{E} \quad (5)$$

$$\vec{D} = \vec{\epsilon} \vec{E} \quad (6)$$

$$\vec{B} = \vec{\mu} \vec{H} \quad (7)$$

Ao combinarmos as propriedades constitutivas do meio, com as propriedades físicas das ondas eletromagnéticas, descritas pelas equações de Maxwell, temos a base teórica para o método GPR.

O método foi criado na década de 60, e uma de suas primeiras utilizações foi para eco-sondagens de camadas de gelo, com as principais pesquisas se desenvolvendo na área da glaciologia (e.x Watts *et al.*, (1975); Wright *et al.*, (1990); Arcone (1996)). Com o desenvolvimento tecnológico e avanços na metodologia, o GPR se tornou muito popular para investigações em diversas outras áreas das geociências e engenharias (**Bristow & Jol, 2003**).

Um equipamento de *Ground Penetrating Radar* (GPR) consiste em uma antena transmissora de sinal (Tx), uma antena receptora de sinal (Rx) e um console (computador) para controlar a emissão de pulsos, gravar os sinais e visualizar os resultados prévios em campo. Enquanto alguns consoles permitem apenas a aquisição do dado bruto, outros fornecem a opção de realizar um pré-processamento dos dados em campo, por meio da adição de alguns tipos específicos de ganhos na imagem, permitindo uma melhor visualização e avaliação de qualidade dos dados ainda *in loco*.

As antenas podem ser utilizadas tanto em modo monoestático quanto biestático. Onde no primeiro uma mesma antena age como transmissora (Tx) e receptora (Rx) do sinal, e no segundo modo, mais comumente utilizado, usam-se duas antenas separadas, uma como receptora e outra como transmissora. A frequência central emitida pela antena do equipamento de GPR irá implicar na profundidade de investigação e na resolução vertical do dado obtido. Onde maiores valores de Frequência Central ( $F_c$ ) implicam em um aumento da resolução vertical, porém diminuído a profundidade de investigação devido a uma maior atenuação do sinal.

O arranjo geométrico e a forma como são dispostas e movimentadas as antenas também implicam em resultados diferentes para as seções de radar. Existem três principais arranjos que são comumente utilizados para a aquisição de dados GPR, que fornecem informações específicas para diferentes objetivos no levantamento geofísico. São eles: O tipo Afastamento Comum, também chamado de *Fixed-offset*, onde se movimentam as antenas mantendo um espaçamento (*offset*) fixo entre Tx e Rx com o objetivo de se gerar um radargrama apresentando as reflexões em subsuperfícies versus posição espacial. Outro arranjo é o tipo Ponto Médio Comum ou *Common midpoint* (CMP) que tem como princípio o afastamento das antenas em sentidos opostos mantendo um ponto central comum e a mesma proporção de afastamento. Este modo tem como objetivo calcular a variação da velocidade do meio em subsuperfície. O terceiro arranjo consiste no método de Transiluminação, onde as

antenas são posicionadas em lados opostos do meio sob investigação, sendo geralmente utilizados em poços e minas (**Reynolds, 2011**).

### 3.2 Atributos GPR

Geralmente a interpretação de dados GPR se concentra no atributo amplitude do traço. Consequentemente, intérpretes tentam reconhecer e mapear os principais horizontes estratigráficos baseados em julgamentos pessoais relacionados a sua respectiva observação de seções de radar em busca de eventos que denotam padrões de deposição, continuidade lateral dos refletores, frequência e intensidade da amplitude do sinal (**Menezes *et al.*, 2016**).

Por outro lado, os atributos do traço fornecem parâmetros descritivos e quantitativos na mesma escala que os dados originais GPR, que podem ser mostrados de maneira muito semelhante à amplitude do traço. A análise de atributos tornou-se um instrumento padrão disponível para o intérprete, ajudando a enfatizar informações geológicas fracas ou ocultas e permitir que características adequadas sejam extraídas para interpretação estrutural e/ou estratigráfica (**Chopra & Manfurt, 2005**).

Apesar de aplicados no método GPR os atributos foram primeiramente utilizados na sísmica. A interpretação de dados muitas vezes é profundamente dependente da formulação de hipóteses geológicas a partir do conhecimento prévio do intérprete (**Chopra & Manfurt, 2005**). Desta forma, cientistas menos experientes muitas vezes enfrentam dificuldades para analisar e interpretar seções de dados geofísicos, sejam de sísmica ou radar. Os atributos sísmicos ou GPR por sua vez buscam uma forma de aplicar modelos e conceitos matemáticos na tentativa de quantificar características morfológicas e de amplitude apresentadas na respectiva seção.

Muitos intérpretes têm utilizado atributos estatísticos e geométricos do traço para interpretação de dados GPR. Por exemplo, **McClymont *et al.* (2008)** empregam o atributo de coerência para ressaltar falhas e fraturas em dados GPR. **Forte *et al.*, (2012)** forneceram uma análise sobre o uso de atributos de traço para dados GPR e demonstraram sua utilidade empregando os atributos de traço e instantâneos volumétricos para a descrição de horizontes e unidades geológicas.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Aquisição

Foram realizadas aquisições na região de Grumari (**Figura 5**), utilizando um equipamento de *Ground Penetrating Radar* com diferentes antenas para a obtenção de dados de *Fixed-offset* e CMP.

Quase todos os dados de GPR foram coletados mantendo a antena transmissora (Tx) e receptora (Rx) em uma configuração de offset-fixa. Uma seção de GPR compreende diversos traços coletados ao longo de um perfil, desta forma permitindo o observador a localizar alvos. Cada novo traço é adquirido enquanto o conjunto de antenas é arrastado ao longo do perfil. As *wavelets* refletidas de um alvo aparecem nos traços plotados com uma função conhecida como tempo duplo (TWT), na qual representa o tempo que leva para o pulso ser emitido, ser refletido e registrado no receptor. O Tempo Duplo pode ser convertido em profundidade quando a velocidade das ondas de radar na subsuperfície é conhecida. Uma velocidade estimada pode ser alcançada por meio da análise de seções de ponto-médio-comum (CMP).

Neste trabalho, utilizamos um equipamento da GSSI GPR, blindado com antena de 200 MHz para adquirir os dados de *Fixed-offset*. Nós coletamos traços com uma amostragem espacial de aproximadamente 0.1 m ao longo de dois perfis mostrados na **FIGURA 1**. Para obter o posicionamento correto do traço foi realizado, simultaneamente com a aquisição GPR, um levantamento de dados geográficos com um DGPS (*Differential Global Positioning System*). O equipamento utilizado foi um DGPS do modelo *Topcon Hyper GGD*, acoplado ao equipamento GPR, coletando informações geográficas ao longo das linhas em intervalos de 1 segundo.

Os dados de CMP foram coletados com um equipamento GPR modelo GSSI SIR 3000, não blindado, com antena de 100 MHz, distribuído ao longo de uma configuração perpendicular. A separação inicial de 1m, alcançando um *offset* máximo de 20 m. Dois perfis CMP foram coletados em cada linha de *fixed-offset*; pode-se observar suas localizações na **Figura 1**. A janela de tempo total nas duas aquisições foi de até 500 ns, valor suficiente para alcançar profundidades na faixa de 15 a 20 m.

Figura 5 – Levantamento de Ground Penetrating Radar (GPR).



Legenda: Aquisição de dados GPR realizados na planície costeira de Grumari.  
Fonte: O Autor, 2022.

## 4.2 Processamento

Os dados de DGPS foram importados para o *software Topcon Tools*, onde para ser realizada a correção dos dados da estação móvel, foi utilizada a base de dados do IBGE, localizada no Observatório Nacional.

Após processados no *Topcon*, os dados de DGPS foram interpolados no *software MatLAB* utilizando um interpolador cúbico denominado *Spline* (Boor *et al.*, 1978), pois as seções de GPR e DGPS possuíam números diferentes de pontos.

Um fluxo de processamento padrão foi aplicado aos dados GPR de *fixed-offset* utilizando o *software Reflex Win* versão 8.5.7, utilizando uma suíte comercial. O Fluxo de processamento consistiu dos seguintes passos: i) Remove Header Gain; ii) Dewow Filter; iii) AGC Gain; iv) Bandpass Filter; v) Trace Equalizer Gain vi) Meanfilter; vii) 2D Migration.

A Janela de tempo utilizada durante a aquisição foi cortada em 300 ns no estágio de processamento.

Os dados de CMP foram processados utilizando os filtros e ganhos *Remove Header Gain*, *Static correction* e *Dewow*. Antes de realizar a análise de velocidade, uma janela de tempo final de 400 ns foi utilizada.

A Velocidade de propagação de ondas de radar ( $V_r$ ) é uma função da constante dielétrica da subsuperfície. A Constante Dielétrica, por sua vez, é influenciada pelo conteúdo em água. Medidas de CMP podem determinar a velocidade de propagação. A partir de uma seção CMP, é possível inferir a velocidade das ondas diretas (onda aéreas e terrestres), a velocidade de ondas refletidas e refratadas.

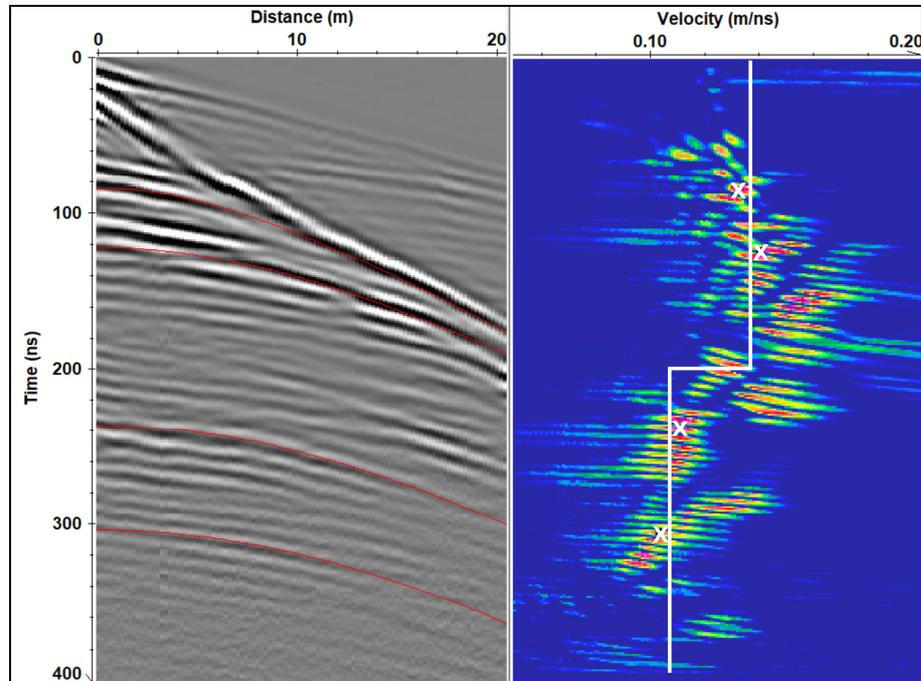
As reflexões das interfaces entre camadas com constantes dielétricas distintas ocorrem como hipérbolas em seções CMP (**Figura 6**). Essa forma típica é baseada na premissa que o tempo de chegada de sinais de camadas varia hiperbolicamente com a divisão entre o transmissor e o receptor. Essa premissa só é válida contanto que as camadas tenham baixo mergulho. A curvatura da hipérbole depende da velocidade das ondas de radar. Conseqüentemente, a análise de velocidade de uma determinada hipérbole vai fornecer uma média da velocidade para a profundidade do refletor analisado.

A análise de velocidade utiliza o empilhamento (*Stack*) de velocidades em velocidades constantes (**Yilmaz, 1987**). Traços CMP são compensados para um deslocamento normal, adotando uma equação hiperbólica de velocidade constante. Os traços então são empilhados. Um intervalo de velocidade de 0.05 a 0.20 m/ns foi coberto com incrementos de 0.001 m/ns (**Figura 6**). Uma reflexão vai ser empilhada coerentemente quando uma dada velocidade naquele intervalo combinar com a velocidade de deslocamento normal, resultando em *Stacks* de maior amplitude (**Figura 6**). Por outro lado, os traços se somam incoerentemente quando uma dada velocidade não coincide com a da reflexão, resultando em amplitudes menores. A análise de Velocidade usando o perfil CMP gerou um modelo de velocidade de duas camadas de 0.105 e 0.135 m/ns. Esse modelo foi utilizado para o propósito da migração 2D e conversões de tempo-profundidade.

Após processados, os radargramas foram exportados do *Reflexw* no formato *.sgy* para serem posteriormente importadas em um software de pós processamento e interpretação. Devido a mudança na extensão do arquivo, os dados de GPR podem ser abertos em *softwares* de sísmica, como o *Petrel* e o *OpendTect* por exemplo. Para este trabalho foi selecionado o *OpendTect*, e uma licença gratuita, onde os dados foram importados e escaneados para criar um ambiente de trabalho. Após criado o ambiente os dados foram carregados como linhas 2-D. Com o auxílio das ferramentas presentes no *software*, foi utilizada a função de análise de

atributos, onde foram testados diversos tipos de atributos diferentes e posteriormente selecionados alguns atributos específicos para ser realizada a interpretação.

Figura 6 – Análise de Modelo de Velocidade com dado CMP.



Legenda: Análise de velocidade realizada em dado de CMP de 100 MHz.  
 Nota: No painel esquerdo: Análise CMP. No painel direito: Semblance.  
 Fonte: O Autor, 2022.

### 4.3 Interpretação

No presente trabalho, interpretamos os dados de GPR aplicando três atributos de textura para auxiliar na interpretação estratigráfica, sendo eles: Amplitude Instantânea, também chamada de Reflection Strength, é um atributo que é calculado traço por traço e representa variações instantâneas do envelope do traço (Taner & Sheriff, 1977). Aplicada em dados de GPR, é utilizado para ressaltar contrastes dielétricos (Forte *et al.*, 2012).

O Cosseno da Fase é também chamado de amplitude normalizada, e é continuamente suavizado. Ao fornecer a descontinuidade de +/- 180 graus que ocorre com a fase instantânea, o cosseno da fase pode ser processado posteriormente (por exemplo, filtrado e empilhado) usando ferramentas de processamento convencionais (Taner & Sheriff, 1977). As cristas e vales de amplitude mantêm sua posição, mas agora exibem forças iguais para eventos fortes e

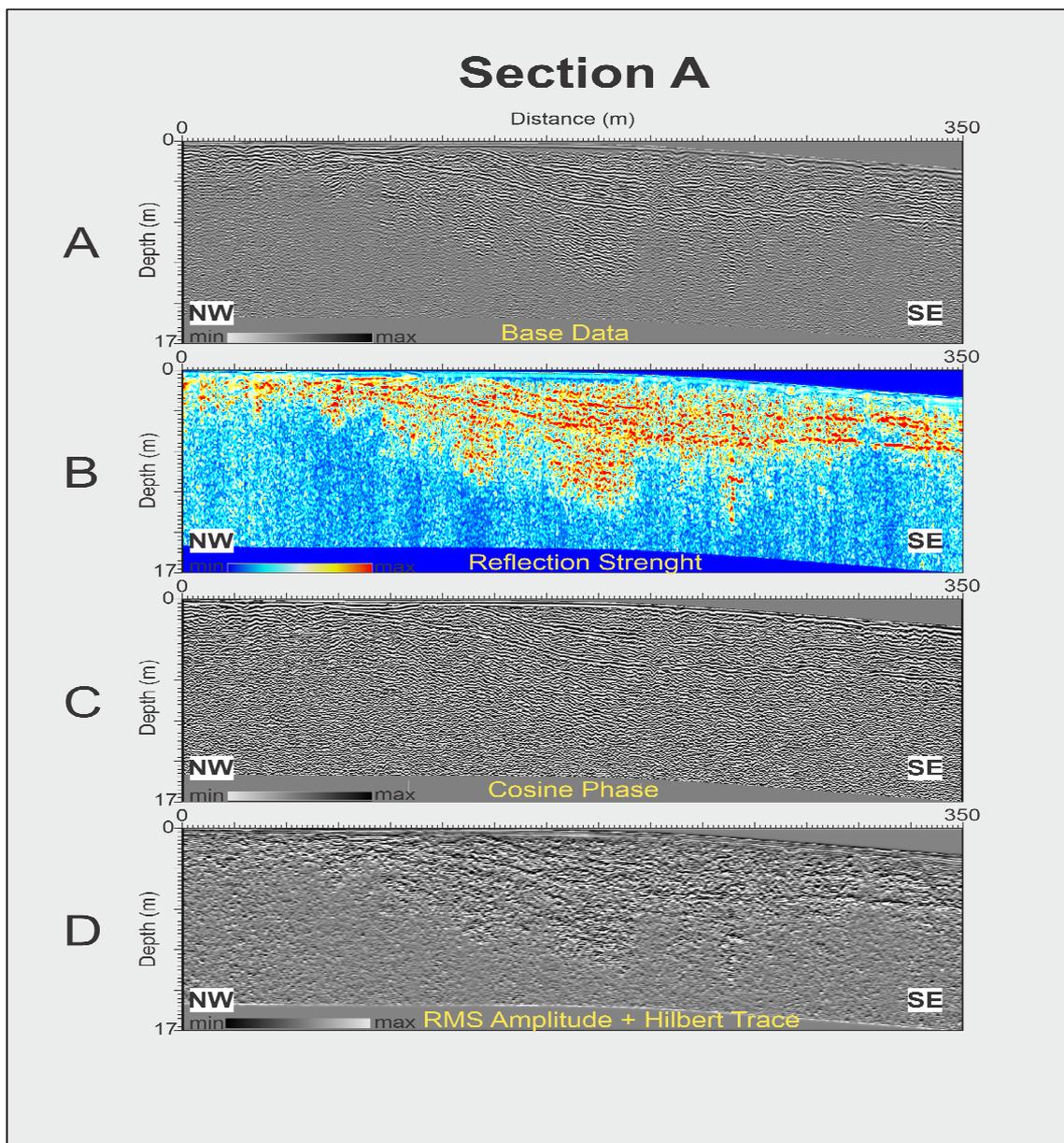
fracos. Seu uso principal é tornar eventos fortes mais claros e destacar descontinuidades de refletores, falhas, *pinch-outs*, angularidades e interfaces acamadadas.

A Técnica de Volume de Amplitude (TecVA), desenvolvida por **Bulhões 1999**, converte a amplitude do traço em um atributo de pseudo-relevo, permitindo ao intérprete visualizar e mapear horizontes e falhas. Quando representado com uma escala de cores preto e branco adequada, o TecVA pode fornecer imagens que potencializam características estruturais e estratigráficas nos dados de GPR, como incoformidades, falhas, fraturas e diferentes fácies. As fraturas subverticais aparecem como interrupções na continuidade das reflexões horizontais ou de mergulho relativamente suave nesse contexto. O atributo TecVA com rotação de fase  $-90^\circ$  trabalha seções de amplitude padrão para se assemelharem a planos verticais de afloramento.

## 5. RESULTADO E DISCUSSÕES

As **Figuras 7 e 8** mostram os radargramas com diferentes atributos aplicados para as Seções A e B, respectivamente. Ambos os perfis foram coletados perpendicularmente a linha de costa (mergulho na direção NW-SE), permitindo uma melhor investigação das variações do nível do mar na zona costeira.

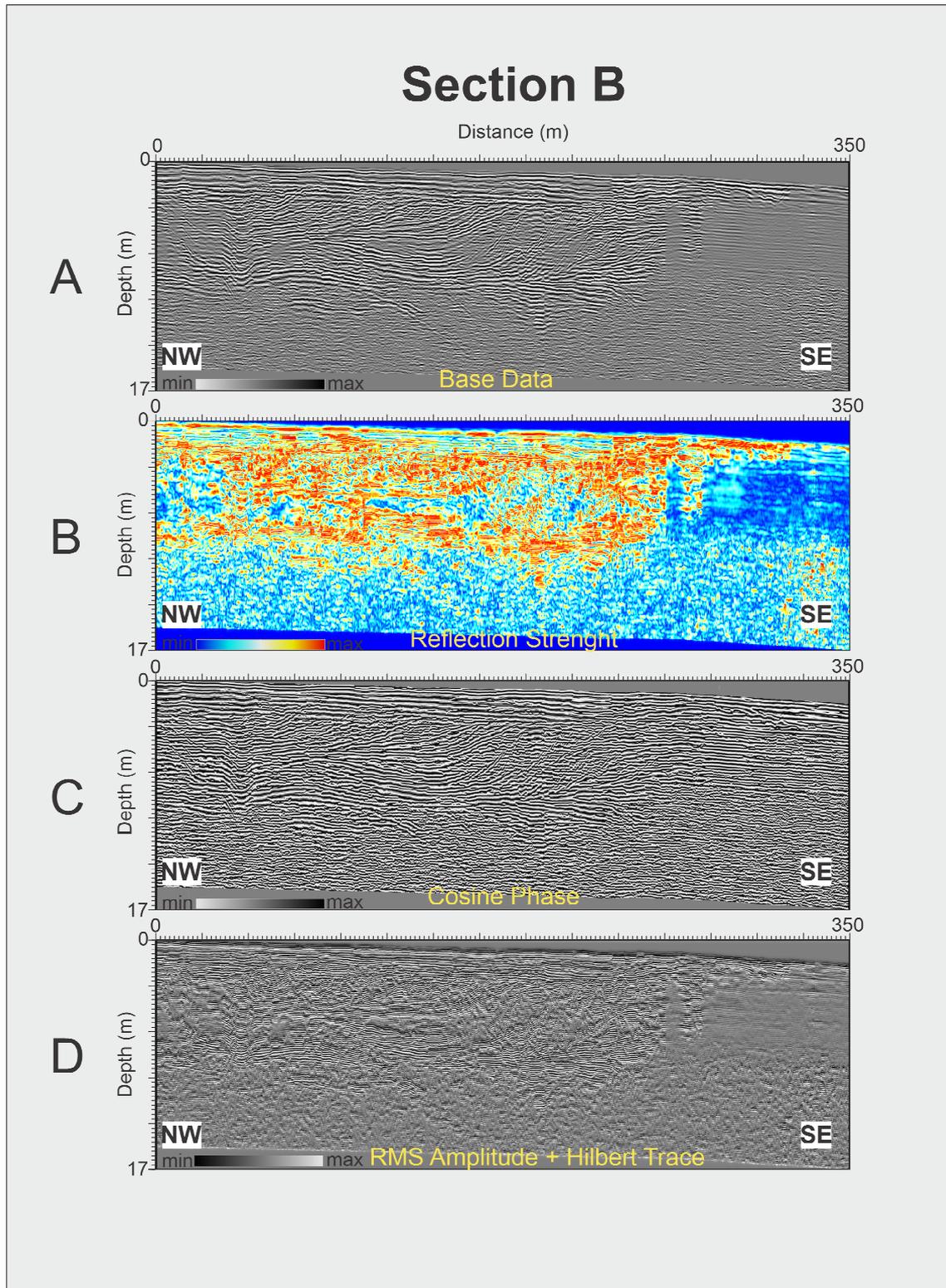
Figura 7 – Seção A com diferentes tipos de Atributos GPR selecionados.



Legenda: Seção A, com 350 m de comprimento, localizada na área centra de Grumari. Atributos Selecionados: A – Atributo Amplitude; B – Amplitude Instantânea ou *Reflection Strenght*; C – Cosseno da Fase; D – TecVa.

Fonte: O Autor, 2022.

Figura 8 – Seção B com diferentes tipos de Atributos GPR selecionados



Legenda: Seção B, com 350 m de comprimento, localizada na área centra de Grumari. Atributos Selecionados: A – Atributo Amplitude; B – Amplitude Instantânea ou *Reflection Strength*; C – Cosseno da Fase; D – TecVa.

Fonte: O Autor, 2022.

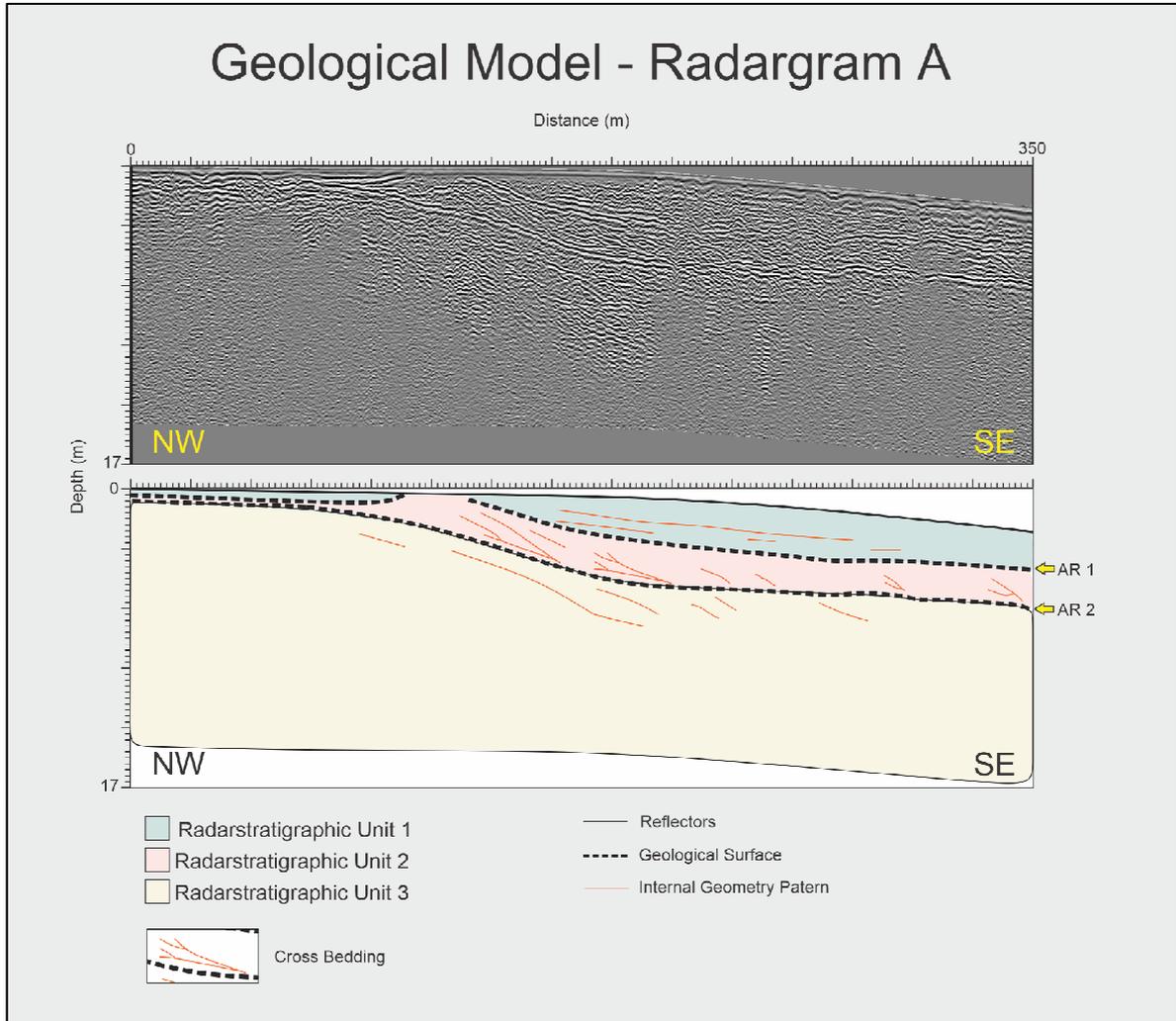
No presente trabalho, nós utilizamos a classificação radar-estratigráfica proposta por **Moysey et al. (2006)** para interpretar nossos dados. Para propósitos de interpretação, nos desenhamos apenas as principais reflexões que bordeiam as principais unidades estratigráficas sobre o atributo amplitude (**Figuras 9 e 10**).

A seção A apresenta dois proeminentes refletores rasos com mergulho em direção ao mar, nomeadas AR1 e AR2 (**Figura 9**), baseado principalmente no atributo cosseno da fase (**Figura 7C**), onde podemos observar a continuidade dos traços na porção sudeste do radargrama. O atributo TecVA (**Figura 7D**) corrobora com essa interpretação, devido as superfícies AR1 e AR2 possuírem um relevo distinto comparado às reflexões adjacentes. Por fim, observamos que ambas as reflexões têm uma distinta assinatura de alta amplitude quando utilizado o atributo *Reflection Strength* (**Figura 7B**). O atributo cosseno da fase (**Figura 7C**) ainda dá a possibilidade de inferir a geometria interna e os padrões de terminação de alguns refletores de baixa amplitude. Estas reflexões estão marcadas em laranja na **Figura 9**. As reflexões internas acima da superfície AR1 mostram uma relação sub-horizontal e mergulham suavemente para sudeste em direção ao oceano. As reflexões localizadas entre as superfícies AR1 e AR2 tem um mergulho em direção ao mar e possuem uma relação de truncamento entre si. Abaixo da superfície AR2, os refletores se tornam mais atenuados, porém ainda podemos observar que as reflexões possuem mergulho em direção ao mar também.

A Seção B também apresenta dois refletores proeminentes com mergulho em direção ao mar (**Figura 10**). Essas duas reflexões de alta amplitude foram nomeadas BR1 e BR2, que podem ser correlacionadas com as superfícies AR1 e AR2 presentes na seção A. O atributo cosseno da fase se mostrou muito benéfico para o mapeamento da continuidade lateral dos refletores, permitindo uma maior confiança na delimitação dos horizontes interpretados. Os radargramas convencionais mostram variações de amplitude que algumas vezes não são fáceis de identificar durante o processo de interpretação. Os atributos TecVA e *Reflection Strength* foram vantajosos para distinguir duas zonas sigmoidais com padrões distintos localizadas entre as superfícies estratigráficas BR1 e BR2. Como descrito acima, com o atributo cosseno da fase foi possível identificar a geometria interna dentro destas sigmóides. Estas reflexões possuem mergulho em direção ao continente e padrões de terminação em *downlap*. Na parte sudeste final do radargrama, próximo aos 350 metros, nos observamos uma zona com sinal atenuado que aparece bem definida no dado base e quando observamos com os atributos *Reflection Strength* e o TecVA (**Figuras 8B e 8D**), porém quando utilizamos o atributo cosseno da fase, é possível visualizar algumas reflexões com uma relação sub-horizontal entre si e com um mergulho muito suave em direção ao oceano.

Figura 9 – Seção B com diferentes tipos de Atributos GPR selecionados

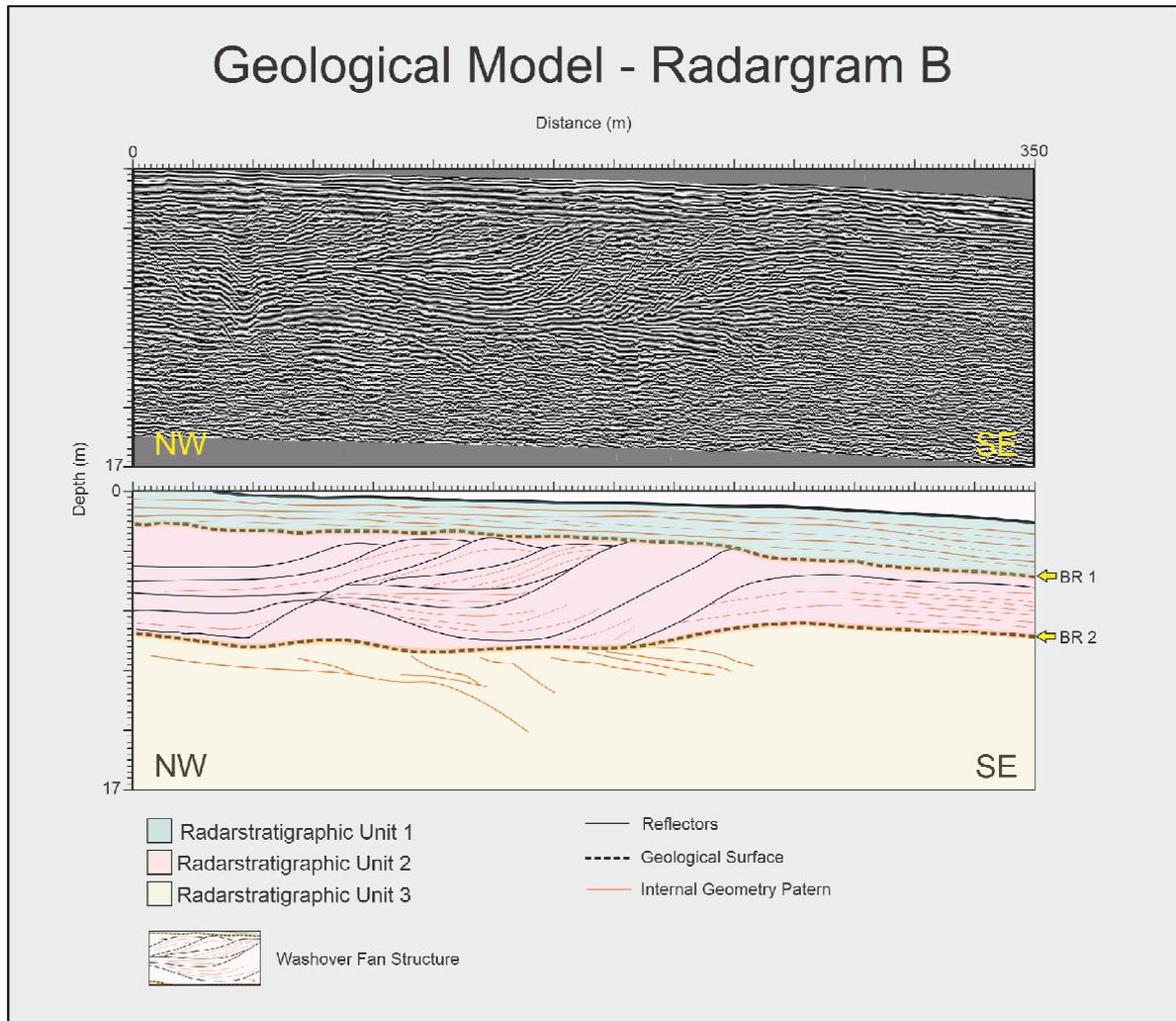
Legenda: Seção B, com 350 m de comprimento, localizada na área centra de Grumari. Atributos Seleccionados:



A – Atributo Amplitude; B – Amplitude Instantânea ou *Reflection Strength*; C – Cosseno da Fase; D – TecVa.

Fonte: O Autor, 2022.

Figura 10 – Seção B com diferentes tipos de Atributos GPR selecionados



Legenda: Seção B, com 350 m de comprimento, localizada na área centra de Grumari. Atributos Selecionados: A – Atributo Amplitude; B – Amplitude Instantânea ou *Reflection Strenght*; C – Cosseno da Fase; D – TecVa.  
Fonte: O Autor.

A zona sigmoidal observada na seção B pode ser relacionada com uma estrutura chamada de *Washover Fan* ou Leque de Lavagem. Essa estrutura sedimentar pode ser observada em planícies de cordões quando o oceano invade uma crista de praia, depositando sedimentos em direção ao continente, ocorrendo em eventos de grandes tempestades.

Como suporte para a nossa interpretação de radarfacies nós utilizamos como referência a classificação prévia fornecida por **Mira et al., 2021**, que interpretou um conjunto de dados com frequência de 100 MHz obtidos nos mesmos pontos. Nossas superfícies R1 e R2 e os principais horizontes estratigráficos são correlacionados com as superfícies S1 e S2 delimitadas por **Mira et al., 2021**. Nesse ponto, é importante

mencionar que nossas descobertas estendem o conhecimento prévio, principalmente quando observamos a seção B, onde com a utilização dos atributos adequados aplicados a seção de radar, podemos ampliar a quantidade de refletores mapeáveis, como por exemplo, as estruturas estratigráficas localizadas entre as superfícies BR1 e BR2.

Um exemplo são as estruturas sigmoides apresentadas na **Figura 10** localizadas entre os horizontes BR1 e BR2. Essas características são melhor representadas como zonas de baixa amplitude quando observamos o atributo *Reflection Strength* (**Figura 8B**). Nós interpretamos essa zona sigmoidal como possíveis estruturas de Leques de Lavagem (*washover fans*). Essa estrutura sedimentar pode ser observada em planícies de cordões quando o oceano invade a crista de praia em grandes eventos de tempestade, resultando na deposição de sedimentos em direção ao continente.

A zona atenuada observada no final da seção B pode ser associada com a intrusão de uma pluma de água salgada **Bear et al., (1999)**, devido ao fato da área de aquisição estar próxima à praia. Plumas salinas geralmente apresentam elevadas atenuações do sinal GPR devido ao aumento da condutividade **Costall et al., (2020)**.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresenta os benefícios do uso de atributos GPR para a interpretação de dados de radar. Os atributos GPR utilizam modelos matemáticos para fornecer uma abordagem quantitativa na análise radarestratigráfica. Esta abordagem torna mais fácil o processo interpretativo, sendo uma boa estratégia tanto para novos intérpretes quanto para os com mais tempo de experiência, pois o uso dos atributos pode reduzir a ambiguidade na definição de algumas características sutis presentes nos radargramas. Nós aplicamos três atributos, sendo eles, *Reflection Strenght*, *Cosine Phase* e o TecVA para auxiliar na interpretação de um novo conjunto de dados de alta resolução (200 MHz de frequência central) coletados na região costeira de Grumari.

Os atributos *Reflection Strenght* e TecVA foram importantes na separação de diferentes radarfácies. Eles também permitiram o reconhecimento de uma possível pluma de intrusão de água do mar na linha de costa. O Atributo cosseno da fase (*Cosine Phase*) foi especialmente adequado para uma melhor definição da continuidade de pequenas reflexões no radargrama, potencializando a identificação com maior resolução dos padrões de terminação dos refletores. A combinação destes atributos permitiu uma melhor definição dos eventos estratigráficos em ambos os perfis.

Nosso trabalho corrobora e estende a interpretação estratigráfica da área de estudo. Três horizontes estratigráficos principais foram identificados e podem ser relacionados com os eventos de flutuações do nível do mar. Por fim, nossos resultados endossam a interpretação das planícies de cordão para a evolução estratigráfica da área de Grumari.

## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, Vanessa Oliveira de Azevedo. Avaliação da restauração em restinga do Parque Natural Municipal de Grumari, RJ. 2010.
- ALMEIDA, FFM de et al. Províncias estruturais brasileiras, paper presented at 2nd Simp. **Geol. Nordeste, Anais Soc. Brás. Geol. Núcleo Nordeste**, p. 242-258, 1977.
- ANNAN, A. P. GPR—History, trends, and future developments. **Subsurface sensing technologies and applications**, v. 3, n. 4, p. 253-270, 2002.
- ARANHA, Paulo Roberto Antunes; AUGUSTIN, Cristina Helena Ribeiro Rocha; SOBREIRA, Frederico Garcia. The use of GPR for characterizing underground weathered profiles in the sub-humid tropics. **Journal of Applied Geophysics**, v. 49, n. 4, p. 195-210, 2002.
- BEAR, Jacob et al. (Ed.). **Seawater intrusion in coastal aquifers: concepts, methods and practices**. Springer Science & Business Media, 1999.
- BRISTOW, Charlie S.; JOL, Harry M. (Ed.). Ground penetrating radar in sediments.
- BULHÕES, Élvio Matos. Técnica “VOLUME DE AMPLITUDE” para mapeamento de feições estruturais. In: **6th International Congress of the Brazilian Geophysical Society**. European Association of Geoscientists & Engineers, 1999. p. cp-215-00239.
- CHEN, Quincy; SIDNEY, Steve. Seismic attribute technology for reservoir forecasting and monitoring. **The Leading Edge**, v. 16, n. 5, p. 445-448, 1997.
- CHOPRA, Satinder; MARFURT, Kurt J. Seismic attributes—A historical perspective. **Geophysics**, v. 70, n. 5, p. 3SO-28SO, 2005.
- CYPLES, Natasha N.; IELPI, Alessandro; DIRSZOWSKY, Randy W. Planform and stratigraphic signature of proximal braided streams: remote-sensing and ground-penetrating-radar analysis of the Kicking Horse River, Canadian Rocky Mountains. **Journal of Sedimentary Research**, v. 90, n. 1, p. 131-149, 2020.
- COSTALL, A. R. et al. Groundwater throughflow and seawater intrusion in high quality coastal aquifers. **Scientific reports**, v. 10, n. 1, p. 9866, 2020.
- DALLIMORE, S. R.; DAVIS, J. L. Ground probing radar investigations of massive ground ice and near surface geology in continuous permafrost, 1987.
- DE ALMEIDA, Fernando Flávio Marques; CARNEIRO, Celso Dal Ré. Origem e evolução da Serra do Mar. **Brazilian Journal of Geology**, v. 28, n. 2, p. 135-150, 1998.
- DE ALMEIDA, Fernando FM; HASUI, Yociteru; DE BRITO NEVES, Benjamim Bley. The upper precambrian of South America. **Boletim IG**, v. 7, p. 45-80, 1976.
- DE MENEZES TRAVASSOS, Jandy; MENEZES, Paulo de Tarso Luiz. GPR exploration for groundwater in a crystalline rock terrain. **Journal of applied geophysics**, v. 55, n. 3-4, p. 239-248, 2004.
- FORTE, Emanuele et al. Imaging and characterization of a carbonate hydrocarbon reservoir analogue using GPR attributes. **Journal of Applied Geophysics**, v. 81, p. 76-87, 2012.
- HEILBRON, Monica et al. Província mantiqueira. **Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**, p. 203-235, 2004.

HEILBRON, Monica; EIRADO, Luiz Guilherme; ALMEIDA, Júlio César Horta. Mapa geológico e de recursos minerais do estado do Rio de Janeiro. 2016.

JOL, Harry M. (Ed.). **Ground penetrating radar theory and applications**. elsevier, 2008.

MAGALHÃES, A. J. C. et al. Ground penetrating radar for facies architecture and high-resolution stratigraphy: Examples from the Mesoproterozoic in the Chapada Diamantina Basin, Brazil. **Marine and Petroleum Geology**, v. 86, p. 1191-1206, 2017.

MCCLYMONT, Alastair F. et al. Visualization of active faults using geometric attributes of 3D GPR data: An example from the Alpine Fault Zone, New Zealand. **Geophysics**, v. 73, n. 2, p. B11-B23, 2008.

MENEZES, Paulo TL et al. High-resolution facies modeling of presalt lacustrine carbonates reservoir analog: Morro do Chaves Formation example, Sergipe-Alagoas Basin, Brazil. **Interpretation**, v. 4, n. 2, p. SE63-SE74, 2016.

MENEZES, Paulo TL. The Itapemirim River Delta GPR Dataset. **Frontiers in Earth Science**, v. 9, p. 653275, 2021.

MIRA, Talissa et al. Stratigraphic analysis and geomorphological reconstruction of Grumari coastal plain, Rio de Janeiro, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 107, p. 103031, 2021.

MOYSEY, Stephen; KNIGHT, Rosemary J.; JOL, Harry M. Texture-based classification of ground-penetrating radar images. **Geophysics**, v. 71, n. 6, p. K111-K118, 2006.

PEREIRA, E. et al. Sedimentação Quaternária na planície costeira de Jacarepaguá e Guaratiba (Estado do Rio de Janeiro). **Baía de Sepetiba: Estado da Arte**, p. 63-82, 2012.

SILVEIRA, JD da. Morfologia do litoral. **Brasil: a terra e o homem**, v. 1, p. 253-305, 1964.

REYNOLDS, John M. **An introduction to applied and environmental geophysics**. John Wiley & Sons, 2011.

TAIOLI, Fabio et al. How Ground Penetrating Radar helps to understand the Nhecolândia lakes landscape in the Brazilian Pantanal wetland. **Brazilian Journal of Geology**, v. 51, p. e20200211, 2021.

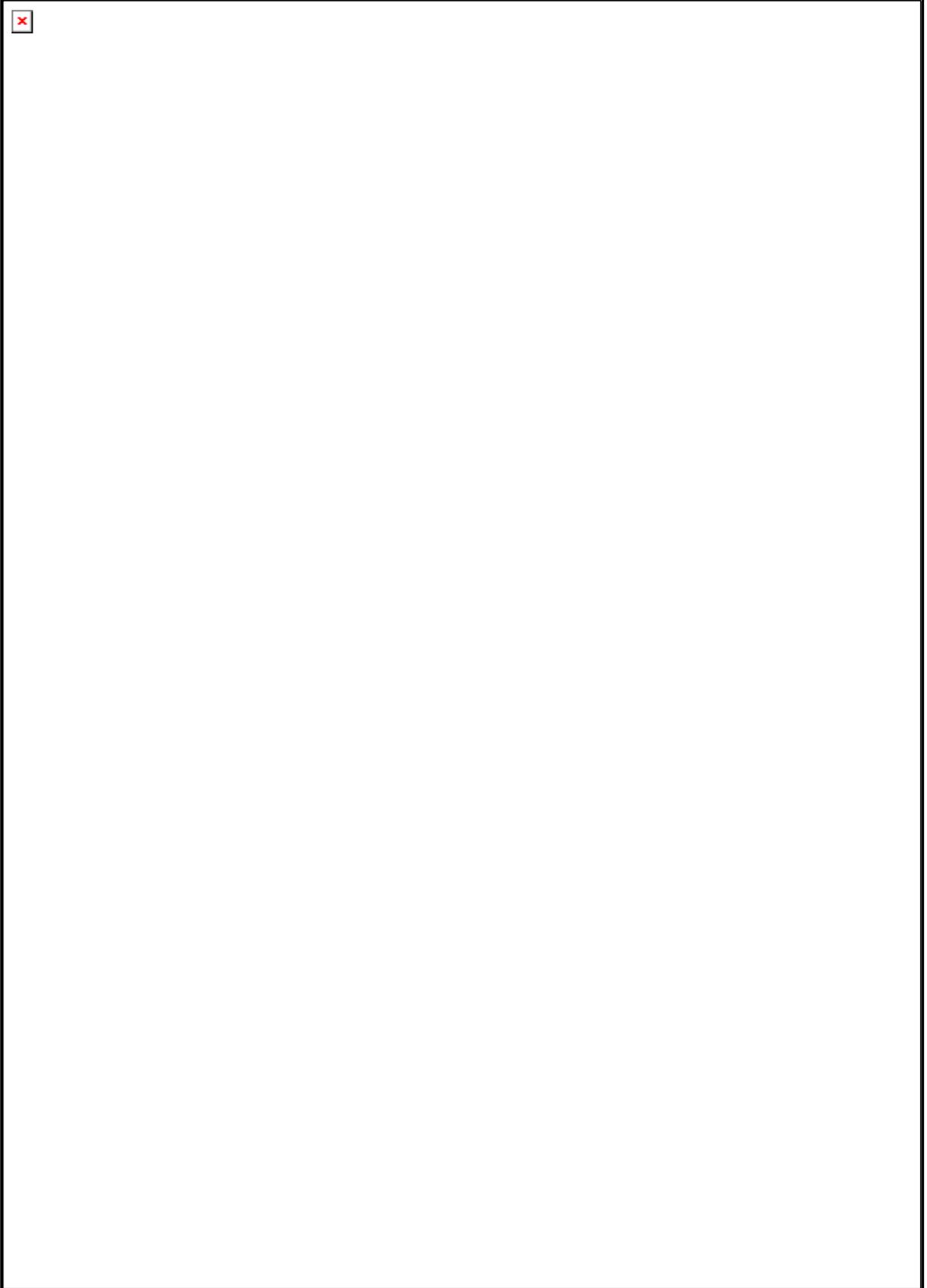
TANER, M. T.; SHERIFF, Robert E. Application of amplitude, frequency, and other attributes to stratigraphic and hydrocarbon determination: Section 2. Application of Seismic Reflection Configuration to Stratigraphic Interpretation. 1977.

VILLWOCK, Jorge Alberto et al. Geologia e geomorfologia de regiões costeiras. **Quaternário do Brasil**, p. 378, 2005.

YILMAZ, O. Seismic data processing: Soc. **Expl. Geophys**, v. 252, 1987.

ZALÁN, Pedro Victor et al. Origem e evolução estrutural do Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste do Brasil. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, v. 13, n. 2, p. 269-300, 2005.

**APÊNDICE A** – Artigo Científico



## 2 GPR ATTRIBUTES

---

The pulse reflects at interfaces separating rocks with distinct dielectric properties and is ultimately registered by a receiving antenna. The GPR can provide high-resolution images of the earth's subsurface, as long as the earth has a low electrical conductivity, and the dispersion losses can be neglected. Under ideal conditions, GPR equipment operating within a frequency range aimed at geologic targets may achieve a vertical resolution of up to a few decimeters and reach a penetration depth of tens of meters.

Hence, the GPR method can supply high-resolution images of small-scale near-surface bodies, similar to the seismic method, which offers images of large-scale deep geological features. Conventional uses of the GPR method include permafrost imaging (Dallimore and Davis, 1987), hydrogeologic exploration in sediments (Van Overmeeren, 1994), and crystalline rocks (de Menezes Travassos and Menezes, 2004), and soil studies (Aranha et al., 2002). More important to our purposes, the method has also been extensively used in the stratigraphic analysis (e.g., Magalhães et al., 2017; Cyples et al., 2020; Menezes, 2021; Taioli et al., 2021).

Radar interpretation is mostly based on qualitative parameters, which depend directly on the professional experience (Forte et al., 2012). One methodology that brings a quantitative approach, based on specific measures of kinematic, geometric, statistical, and dynamic features, to radar interpretation is the Attribute analysis (Chen and Sidney, 1997). Attribute Analysis was originally developed for seismic data studies, and one of its first applications was to define bright spots, strong amplitude zones associated with hydrocarbons.

Attribute analysis techniques can also be applied to GPR because, despite the differences in the measured parameters, scale, and resolution between the methods, both are based on the wave's propagation theory.

The present study interprets a new 200 MHz high-resolution GPR dataset to unveil the stratigraphic evolution of the Grumari plain. A significant advance to the previous studies was obtained by using math attributes to highlight hidden or masked features in the GPR data. Our results corroborate the previous interpretation in the studied area Mira et al. (2021).

### GEOLOGICAL SETTING

The study area is inserted in the tectonic context of the Mantiqueira Province Almeida et al. (1977). The Province is located along the Atlantic coast, south of the 15<sup>o</sup> parallel to the limit of the Uruguay border, being limited by São Francisco, Tocantins, and Paraná Provinces Almeida et al. (1977). The Mantiqueira Province developed the Brasiliano orogeny in the Neoproterozoic and encompassed the Araguaí, Ribeira, Brasília Meridional, Dom Feliciano and São Gabriel orogens (Heilbron et al., 2004). The Grumari Coastal Plain is specifically located in the Ribeira Belt Oriental Terrain, defined by (Heilbron et al., 2004)

The Ribeira Orogen presents a NE-SW structural trend, resulting from the interaction between São Francisco Craton and plates, microplates, and island arcs, located southeast of this Craton, as well as the Congo Craton SW portion (Heilbron et al., 2004). The Ribeira Belt can be subdivided into five tectonostratigraphic terrains called Ocidental, Paraíba do Sul, Embu, Oriental, and Cabo Frio terrains. These are sometimes separated by thrust faults and transpressive oblique shear zones.

Inside this geological context, we have the Serra do Mar that, according to de Almeida and Carneiro (1998), arose as a result of depressions in the Atlantic Plateau in the Santos Fault during a major tectonic event that started in the Paleocene. By the same time, the Guanabara Gráben was formed in the interior of the Atlantic Plateau, also rising along the Santos Fault. The Serra do Mar consists of a set of highlands with crystalline

foundations, with cliffs that form rocky promontory of coasts that reach the ocean, alternating with a recession that is almost always tectonically controlled (Villwock et al., 2005).

The South American Continental Margin geomorphological evolution is related to the tectonic events started in the Jurassic (130 Million Years), which resulted in the Gondwana supercontinent rupture and consequently in the South Atlantic Ocean opening (Villwock et al., 2005).

The coastal region is also conditioned by other factors, such as climatic variations, which alter the weathering rate, erosion, and transport. In the last two million years, cyclical alternations have produced glacial and interglacial stages, which have modified the sea level, causing major marine regressions and transgressions. In addition to the climatic and paleo-climatic processes, the coastal dynamics, such as the action of waves and wind, have been an important factor in the geomorphologic construction of the Brazilian Southeast Coastal Region (Villwock et al., 2005).

## METHODS

### Data acquisition

Almost all the GPR data were collected having the transmitter and the receiver in a fixed offset configuration. A GPR section comprises many traces collected along with a profile, thus allowing the observer to locate targets. Each new trace is acquired while dragging the two antennas along the profile. The wavelets reflected from two targets appear on the related traces plotted as a function known as two-way time (TWT), which is the time it takes the pulse to be emitted, bounces back, and recorded at the receiver. The TWT can be converted to depth when the velocity of radar waves in the subsurface is known. A velocity estimate can be achieved by analyzing common-mid-point (CMP) sections. In the CMP field layout, the transmitter and receiver are pushed away from each other up to a maximum distance (offset). This distance is a compromise between reaching greater exploration depths and increased absorption of the electromagnetic waves in the medium with increased offsets.

We have used a 200MHz shielded antenna GSSI GPR system to acquire the fixed-offset data. We acquired traces with 0.1 m inline spatial sampling along the two profiles shown in (Figure 1). The profiles comprised more than 4000 m, mainly deployed on relatively flat terrain (Figure 2).

The correct trace positioning was obtained through a Topcon Hyper GGD Differential Global Positioning System (DGPS) coupled to the GPR equipment, acquiring geographic data along the lines at 1-second intervals (Figure 2).

The CMP data was collected with a GSSI SIR 3000, non-shielded 100 MHz antenna, deployed in a broadside-perpendicular configuration. The Antenna separation was increased stepwise in increments of 0.1 m from the initial separation of 1 m, reaching a maximum offset of 20 m. Two CMP profiles were acquired at each fixed-offset profile; see their location in Figure 1. The total time window in both acquisition layouts reached up to 500 ns, sufficient to reach depths of 15-20 m.

### Data processing and Velocity Analysis

A standard processing workflow was applied to the fixed-offset GPR data using ReflexW version 8.5, a commercial software suite. The workflow consisted of the following steps: i) Remove header gain; ii) Dewow filter; iii)

#### 4 GPR ATTRIBUTES

---

AGC gain; iv) Bandpass filter; v) Trace equalizer gain; vi) Meanfilter; vii) Migration. The time window during the acquisition was cut to 300 at the processing stage.

The CMP data was processed by removing the header gain, then static correction, and dewow filtering. Before the velocity analysis, a final 400 ns time was used as the last step.

The propagation velocity of radar waves ( $V_r$ ) is a function of subsurface's the dielectric constant, which is, in turn, impacted by its moisture content. CMP measurements can determine the propagation velocity. From a CMP section, it is possible to infer the velocity of the direct waves (in air and the ground wave), the velocity of the reflected waves, and the refracted waves in some particular circumstances. Here, we focus on the velocity of reflected waves.

The reflections from the interfaces between layers with distinct dielectric constants occur as hyperbolas in CMP sections (Figure 3). This typical form is based on the premise that the arrival time for signals from layers ranges hyperbolically with the split between the transmitter and the receiver. This premise is valid as long as the layers have a small dip. The curvature of a given hyperbola depends on the velocity of the radar waves. Consequently, the velocity analysis of a given hyperbola will provide an average velocity to the depth of the reflection.

The velocity analysis utilizes the velocity stack in constant velocity earth (Yilmaz, 1987). CMP traces are compensated for normal moveout, adopting a constant velocity hyperbolic equation. Traces are then stacked. A velocity range from 0.05 to 0.20 m/ns was covered with increments of 0.001 m/ns (Figure 3). A reflection will stack coherently when a given velocity in that range matches the normal moveout velocity, resulting in larger amplitude stacks (Figure 3). On the other hand, traces add incoherently when a given velocity does not match the reflection's, resulting in smaller amplitudes. The CMP profile analysis yielded a two-layered velocity model of 0.105 and 0.135 m/ns. This model was used for migration and time-depth conversion purposes.

#### GPR ATTRIBUTES

The interpretation of GPR data often concentrates on studying the trace amplitude attribute. Consequently, interpreters try to recognize and map the principal stratigraphic horizons based on personal judgments of what they see in a reflection section, pursuing events denoting depositional patterns, lateral continuity of the reflections, frequency, and strength of the amplitude signal (Menezes et al., 2016).

On the other hand, trace attributes give descriptive and quantitative parameters on the same scale as the original GPR data, which can be shown much like the trace amplitude. Attribute analysis has become a standard instrument available to the interpreter, helping to emphasize faded or hidden geological information and allow suitable features to be extracted for structural and/or stratigraphic interpretation (Chopra and Marfurt, 2005).

Several interpreters have used statistical and geometric trace attributes for GPR data interpretation. For instance, McClymont et al. (2008) employed the coherence attribute to spotlight faults and fractures in GPR data. Forte et al. (2012) provided a comprehensive analysis of trace attributes' use in GPR data and demonstrated their usefulness by employing the trace and volumetric instantaneous attributes to describe horizons and geologic units.

In the present work, we interpret the GPR data by applying three texture attributes to help the stratigraphic interpretation: Instantaneous Amplitude, the Cosine Phase, and the TecVA (amplitude volume technique).

The Instantaneous Amplitude, also called reflection strength, is an attribute that is computed sample by sample and represents instantaneous variations of the trace envelope (Taner and Sheriff, 1977). Applied to GPR data, it is used to highlight dielectric contrasts (Forte et al., 2012).

The Cosine Phase is also called normalized amplitude and is continuously smooth. By providing the  $\pm 180$  degree discontinuity that occurs with the instantaneous phase, the cosine of the instantaneous phase can be further processed (e.g., filtered and stacked) using conventional processing tools (Taner and Sheriff, 1977). Amplitude peaks and troughs maintain their position but exhibit equal strength with strong and weak events. Its primary use is to clarify strong events and highlight discontinuities of reflections, faults, pinch-outs, angularities, and bed interfaces.

The TecVA converts the trace amplitude into a pseudo-relief attribute, allowing the interpreter to visualize and map horizons and faults. When portrayed with a suitable black-and-white scale, the TecVA can supply images that boost structural and stratigraphic features in the GPR data, such as unconformities, faults, fractures, and different facies. Sub-vertical fractures appear as interruptions in the continuity of the horizontal or relatively gently dipping reflections in this context. The TecVA attribute with  $-90^\circ$  phase rotation pushes the standard amplitude sections to resemble vertical outcrop planes (Bulhões, 1999).

Figures 4 and 5 show the distinct GPR attributes for the radargrams of lines Sections A and B, respectively. Both profiles were collected perpendicularly to the shoreline (dip, NW-SE direction), allowing better investigation of the sea-level variations in the coastal zone.

A visual summary of the various attributes and their primary uses in interpreting radar facies is shown in Figure 6. Readers can use it as a guide for their interpretations of coastal areas.

## DISCUSSION

In the present work, we use the radar-stratigraphy classification proposed by Moysey et al. (2006) to interpret our data. For interpretation purposes, we draw only the main reflections bounding the major stratigraphic units over the amplitude attribute (Figures 7 and 8).

Section A identified two prominent shallow dipping seaward reflections were portrayed, R1 and R2 (Figure 7), based mainly on the cosine phase attribute (Figure 4C), where we can observe the traces' continuity in the southeastern portion of the profile. The TecVa attribute (Figure 4D) corroborates that interpretation, as AR1 and AR2 have distinct relief compared to adjacent reflections. Finally, we observed that both reflections have a distinctive high amplitude signature in the reflection strength attribute (Figure 4B). Yet the cosine phase attribute ((Figure 4C) gives a possibility to infer the internal geometry and termination pattern of some low amplitude reflections. These reflections are orange in Figure 7. Internal Reflections above the AR1 surface show a sub-horizontal relationship dipping softly to the Southeast in the direction of the ocean. The reflections between AR1 and AR2 have seaward dipping with some truncation relationships. Below the AR2 surface, the reflections become more attenuated, but we can observe that reflections have seaward dip too.

Section B identified two main dipping seaward reflections (5A). These two high amplitude reflections were named BR1 and BR2 (Figure 8), and they are correlated with AR1 and AR2 present in section A. The Cosine Phase attribute was beneficial for mapping the continuity of the reflections, which allowed greater confidence in delineating the interpreted horizons. The conventional radargram shows amplitude variations that sometimes

## 6 GPR ATTRIBUTES

---

are not easy to follow during the interpretation process. The TecVa and reflection strength attributes were advantageous in distinguishing two sigmoidal zones with distinct patterns within BR1 and BR2 stratigraphic zones. As described above, with the cosine phase attribute was possible to identify the internal geometry inside the sigmoidal structures. These reflections dip landward direction and downlap termination. In the southeast end of the radargram, close to 350 Meters, we observed a zone with an attenuated signal that appears well-defined in base data. When using Reflection Strength and TecVa attributes (Figures 5B, and 5D), but with cosine phase, we can see some reflections with sub-horizontal relationship and smooth dip through ocean direction.

The sigmoidal Zone observed in section B can be related to a Washover fan structure. That sedimentary structure can be observed in strand plains when the ocean invades a beach ridge in great storm events and deposits sediment towards the mainland.

To support our interpretation of the imaged radarfacies, we relate to the previous classification provided by Mira et al. (2021) interpreting a 100 MHz dataset at the same spots (see Figures 2 and 3 of Mira et al. (2021)). Our R1 and R2 main stratigraphic horizons correlate with Mira et al. (2021) S1 and S2 surfaces. At this point, it is important to mention that our findings extend the previous knowledge, mainly in section B, where by using appropriate attributes applied to a dataset that extends deeply than the previously imaged Mira et al. (2021), we can image and interpret features like horizons BR1 and BR3 and the stratigraphic units in between, that was not observed in the previous interpretation (see Fig 3 of Mira et al. (2021)).

One example is the sigmoidal features highlighted in Figure 5A between the horizons BR1 and BR2. These features are best imaged as low amplitude zones in the reflection strength attribute (Figure 5B). We interpret that the sigmoidal zone observed in section B can be related to washover fan structures. That sedimentary structure can be observed in strand plains when the ocean invades a beach ridge in great storm events and deposits sediment towards the mainland.

The attenuation zone observed at the end of section B can be associated with a saltwater plume intrusion Bear et al. (1999). This area is close to the beach. Saltwater plumes usually show elevated attenuation of the GPR signals due to increased conductivity Costall et al. (2020).

## CONCLUSIONS

The present paper shows the benefits of using attributes to interpret GPR data. GPR attribute uses mathematical models to give a quantitative approach to radar-stratigraphy. That approach makes easier the interpretation process. That may be a good strategy for beginners and experienced interpreters, as using attributes can reduce the ambiguity in defining some subtle features. We applied three attributes, Reflection Strength, Cosine Phase, and TecVa, to help interpret a new 200 MHz high-resolution GPR dataset acquired in the Grumari coastal region.

The Reflection Strength and TecVa were important to separate distinct radarfacies. They also allowed the recognition of a high sea-water intrusion plume in the shoreline. The Cosine Phase was especially suitable for better defining the continuity of the small reflections in the radargram, enhancing the reflection termination patterns with greater resolution. That let a better definition of the stratigraphic events in both profiles.

Our work corroborates and extends a previous stratigraphic interpretation in the studied area. Three

main stratigraphic horizons were identified and related to sea-level fluctuations, and our outcomes endorse the strandplain interpretation for the stratigraphic evolution of the Grumari area.

#### ACKNOWLEDGMENTS

#### DATA AND MATERIALS AVAILABILITY

The GPR data can be provided upon request to the authors.

#### AUTHOR CONTRIBUTIONS

All authors contributed equally to the work.

#### CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

#### COPYRIGHT AND OPEN ACCESS

All copyrights are reserved to authors. The journal keeps the publishing rights.

Ideas, concepts, content and writing style are the sole responsibility of the authors. However, political, commercial or religious quotes will not be allowed in the article.

The BrJG is an open-access journal. All articles are published under Creative Commons CC-BY license which means that all content is freely available without charge. Users are allowed to read, download, copy, distribute, print, search, link to the full texts or use figures, maps and other illustrations, when due reference to the article is assigned.

#### REFERENCES

- Almeida, F. d., Y. Hasui, B. d. Brito Neves, and R. A. Fuck, 1977, Províncias estruturais brasileiras: Simpósio de Geologia do Nordeste, **8**, 363–391.
- Annan, A., 2002, Gpr—history, trends, and future developments: Subsurface sensing technologies and applications, **3**, 253–270.
- Aranha, P. R. A., C. H. R. R. Augustin, and F. G. Sobreira, 2002, The use of gpr for characterizing underground weathered profiles in the sub-humid tropics: *Journal of Applied Geophysics*, **49**, 195–210.
- Bear, J., A. H.-D. Cheng, S. Sorek, D. Ouazar, and I. Herrera, 1999, *Seawater intrusion in coastal aquifers: concepts, methods and practices*, **14**: Springer Science & Business Media.
- Bulhões, É. M., 1999, Técnica “volume de amplitude” para mapeamento de feições estruturais: 6th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, European Association of Geoscientists & Engineers, cp–215.
- Chen, Q., and S. Sidney, 1997, Seismic attribute technology for reservoir forecasting and monitoring: *The Leading Edge*, **16**, 445–448.
- Chopra, S., and K. J. Marfurt, 2005, Seismic attributes—a historical perspective: *Geophysics*, **70**, 3S0–28S0.
- Braz. J. Geophys.

- Costall, A. R., B. Harris, B. Teo, R. Schaa, F. Wagner, and J. Pigois, 2020, Groundwater throughflow and seawater intrusion in high quality coastal aquifers: Scientific reports, **10**, 1–33.
- Cyples, N. N., A. Ielpi, and R. W. Dirszowsky, 2020, Planform and stratigraphic signature of proximal braided streams: remote-sensing and ground-penetrating-radar analysis of the kicking horse river, canadian rocky mountains: *Journal of Sedimentary Research*, **90**, 131–149.
- Dallimore, S., and J. Davis, 1987, Ground probing radar investigations of massive ground ice and near surface geology in continuous permafrost: Current Research, Part A, Geological Survey of Canada Paper, **87**, 913–918.
- de Almeida, F. F. M., and C. D. R. Carneiro, 1998, Origem e evolução da serra do mar: *Revista Brasileira de Geociências*, **28**, 135–150.
- de Menezes Travassos, J., and P. d. T. L. Menezes, 2004, Gpr exploration for groundwater in a crystalline rock terrain: *Journal of applied geophysics*, **55**, 239–248.
- Forte, E., M. Pipan, D. Casabianca, R. Di Cuia, and A. Riva, 2012, Imaging and characterization of a carbonate hydrocarbon reservoir analogue using gpr attributes: *Journal of Applied Geophysics*, **81**, 76–87.
- Heilbron, M., A. C. Pedrosa-Soares, M. d. C. Campos Neto, L. d. Silva, R. A. J. Trouw, and V. d. A. Janasi, 2004, *Província mantiqueira: Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, CDR*, 203–234.
- Magalhães, A. J. C., F. P. Lima-Filho, F. Guadagnin, V. A. Silva, W. L. E. Teixeira, A. M. Souza, G. P. R. Gabaglia, and O. Catuneanu, 2017, Ground penetrating radar for facies architecture and high-resolution stratigraphy: Examples from the mesoproterozoic in the chapada diamantina basin, brazil: *Marine and Petroleum Geology*, **86**, 1191–1206.
- McClymont, A. F., A. G. Green, R. Streich, H. Horstmeyer, J. Tronicke, D. C. Nobes, J. Pettinga, J. Campbell, and R. Langridge, 2008, Visualization of active faults using geometric attributes of 3d gpr data: An example from the alpine fault zone, new zealand: *Geophysics*, **73**, B11–B23.
- Menezes, P. T., J. M. Travassos, M. A. Medeiros, and P. Takayama, 2016, High-resolution facies modeling of presalt lacustrine carbonates reservoir analog: Morro do chaves formation example, sergipe-alagoas basin, brazil: *Interpretation*, **4**, SE63–SE74.
- Menezes, P. T. L., 2021, The itapemirim river delta gpr dataset: *Frontiers in Earth Science*, **9**, 257.
- Mira, T., S. S. Martins, S. P. Gouvêa, and F. Dourado, 2021, Stratigraphic analysis and geomorphological reconstruction of grumari coastal plain, rio de janeiro, brazil: *Journal of South American Earth Sciences*, **107**, 103031.
- Moysey, S., R. J. Knight, and H. M. Jol, 2006, Texture-based classification of ground-penetrating radar images: *Geophysics*, **71**, K111–K118, doi: 10.1190/1.2356114.
- Pereira, E., P. Braga, C. Mendes, and S. Bergamaschi, 2012, Sedimentação quaternária na planície costeira de jacarepaguá e guaratiba (estado do rio de janeiro): *Baía de Sepetiba: Estado da Arte*, 63–82.
- Taioli, F., M. G. M. d. Santos, M. L. Assine, and D. Mendes, 2021, How ground penetrating radar helps to understand the nhocolândia lakes landscape in the brazilian pantanal wetland: *Brazilian Journal of Geology*, **51**.
- Taner, M. T., and R. E. Sheriff, 1977, Application of amplitude, frequency, and other attributes to stratigraphic and hydrocarbon determination: Section 2. application of seismic reflection configuration to stratigraphic

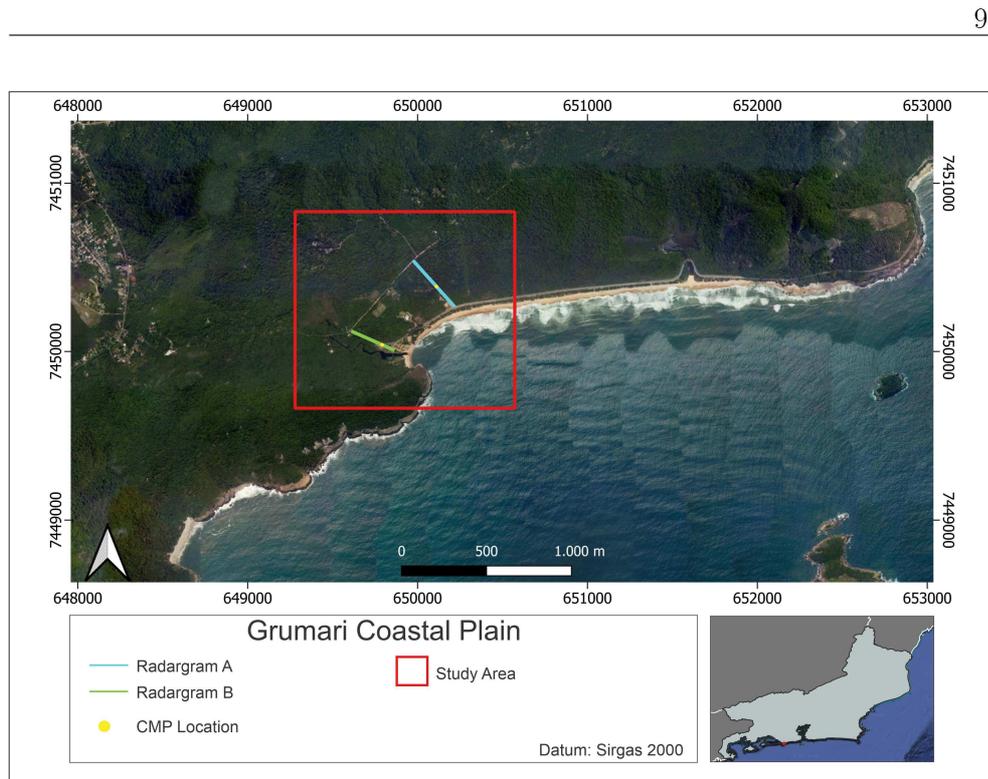


Figure 1: Grumari Coastal Plain location map.

interpretation.

Van Overmeeren, R., 1994, Georadar for hydrogeology: First break, **12**.

Villwock, J. A., G. C. Lessa, K. Suguio, R. J. Angulo, and S. R. Dillenburg, 2005, Geologia e geomorfologia de regiões costeiras: Quaternário do Brasil, 378.

Yilmaz, O., 1987, Seismic data processing: Investigations in geophysics.



Figure 2: GPR acquisition

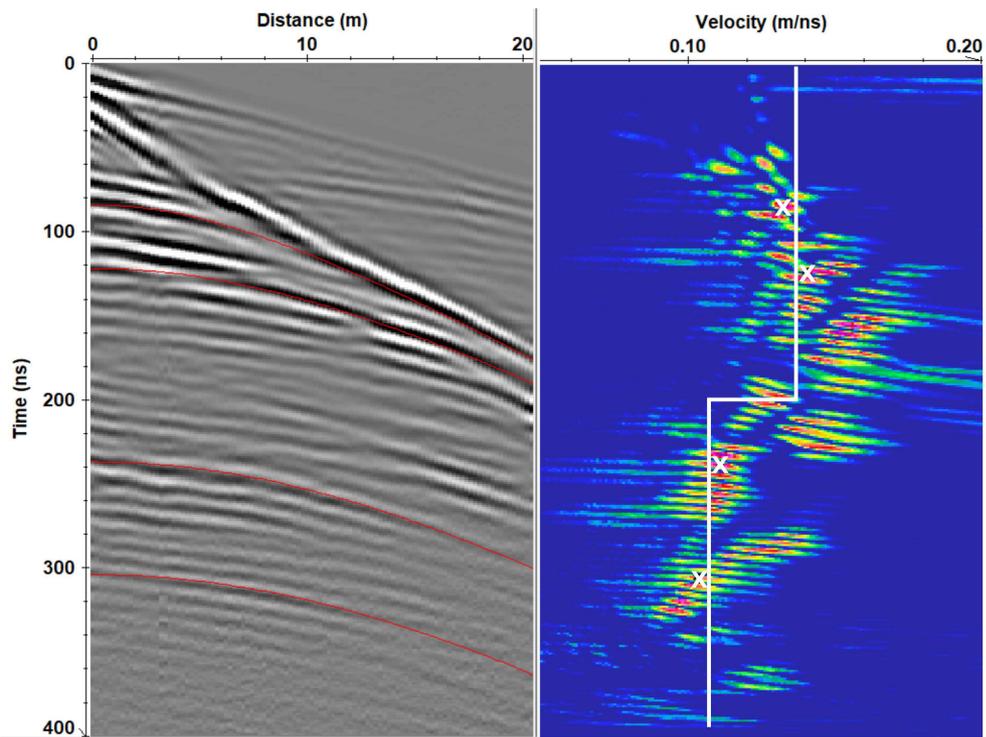


Figure 3: Velocity analysis performed on the 100 MHz CMP gather. Left panel - analyzed CMP, red lines designate the move-out hyperbolas of the selected velocities in the semblance panel. Right panel - semblance velocity panel with the picked velocities corresponding to the semblance maxima (x). The white line illustrates the chosen velocity model.

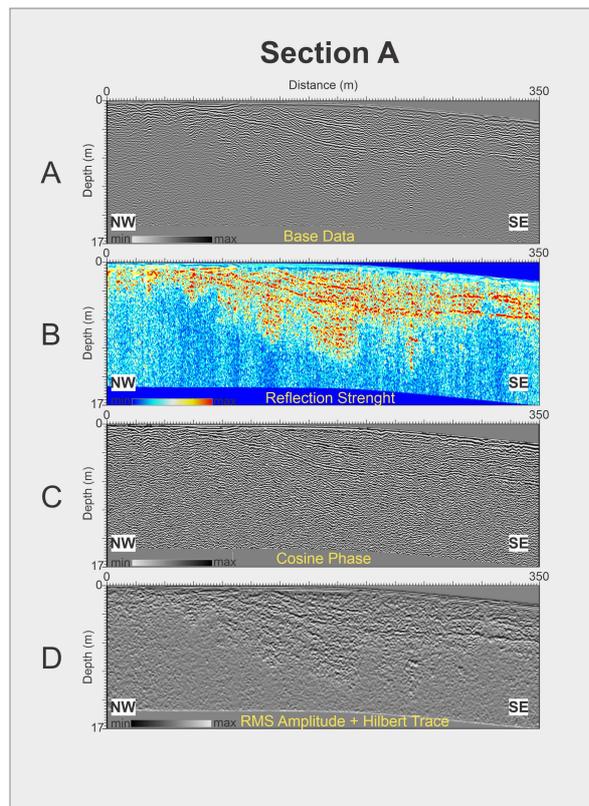


Figure 4: Section A, with 350 m length, located in Grumari central area (dip, NW-SE direction). Selected GPR Attributes: A) Amplitude attribute B) Reflection Strength or Instantaneous Amplitude; C) Cosine Phase; D) TecVA.

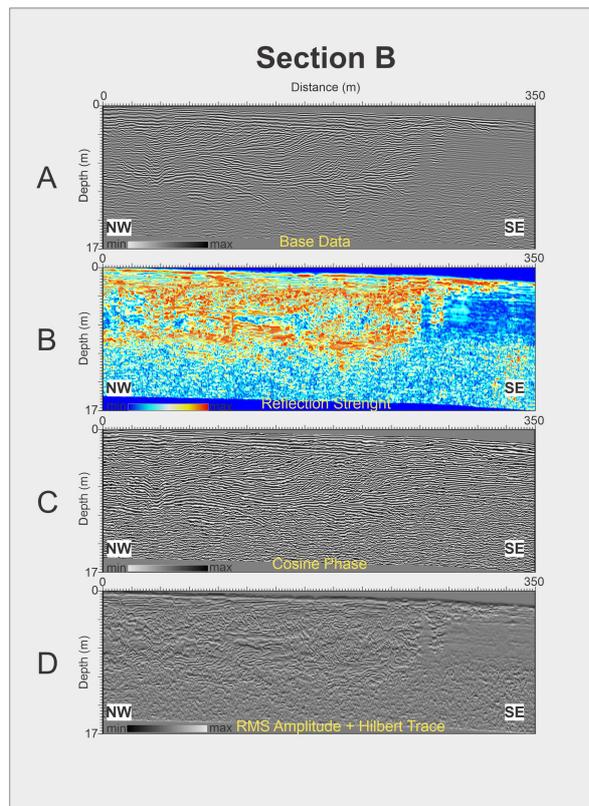


Figure 5: Section B, with 350 m length, located in Grumari central area (dip, NW-SE direction). Selected GPR Attributes: A) Amplitude attribute B) Reflection Strength or Instantaneous Amplitude; C) Cosine Phase; D) TecVA.

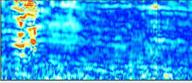
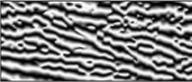
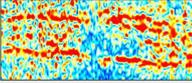
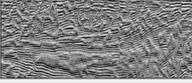
Radar Image	GPR Attribute	Geological Interpretation
	Reflection Strength	Attenuation Zone
	Cosine Phase	Cross Bedding Stratification
	Reflection Strength	Erosional Geological Surface
	TecVA	Sigmoidal Zones

Figure 6: Geological interpretation table, containing best GPR attribute to identify each specific pattern or structure.

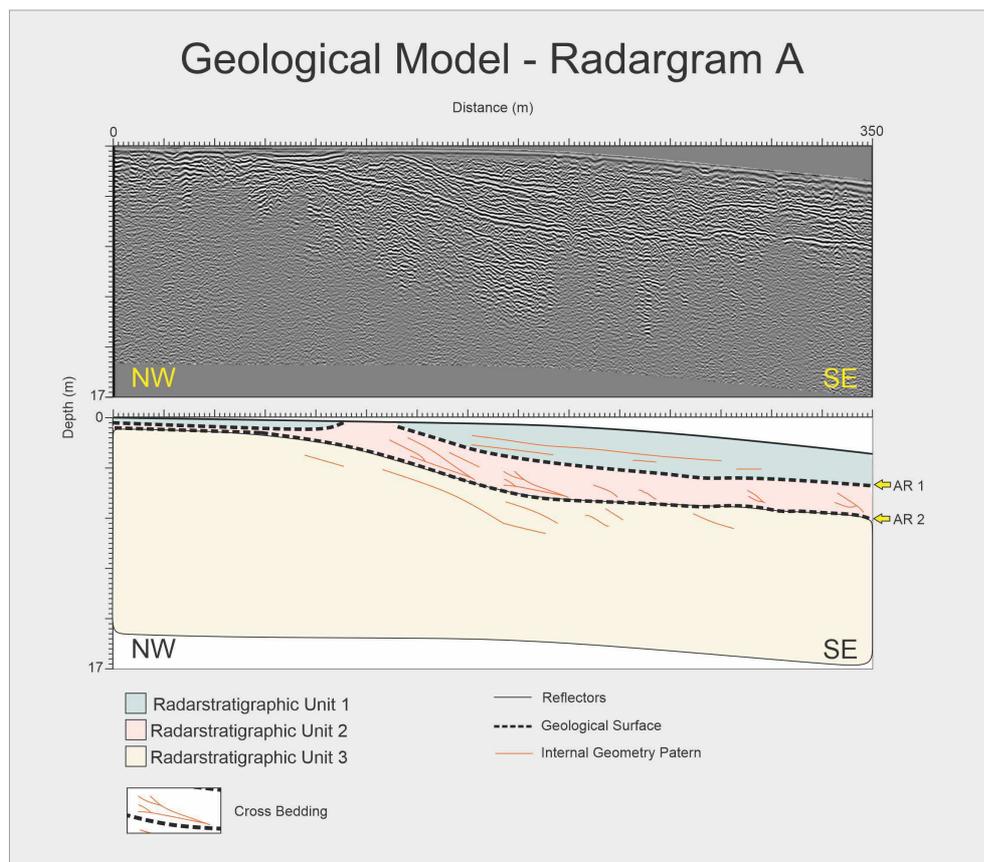


Figure 7: Interpretated Section A, with 350 m length, located in Grumari central area (dip, NW-SE direction), showing the presence of AR1 and AR2 surfaces;

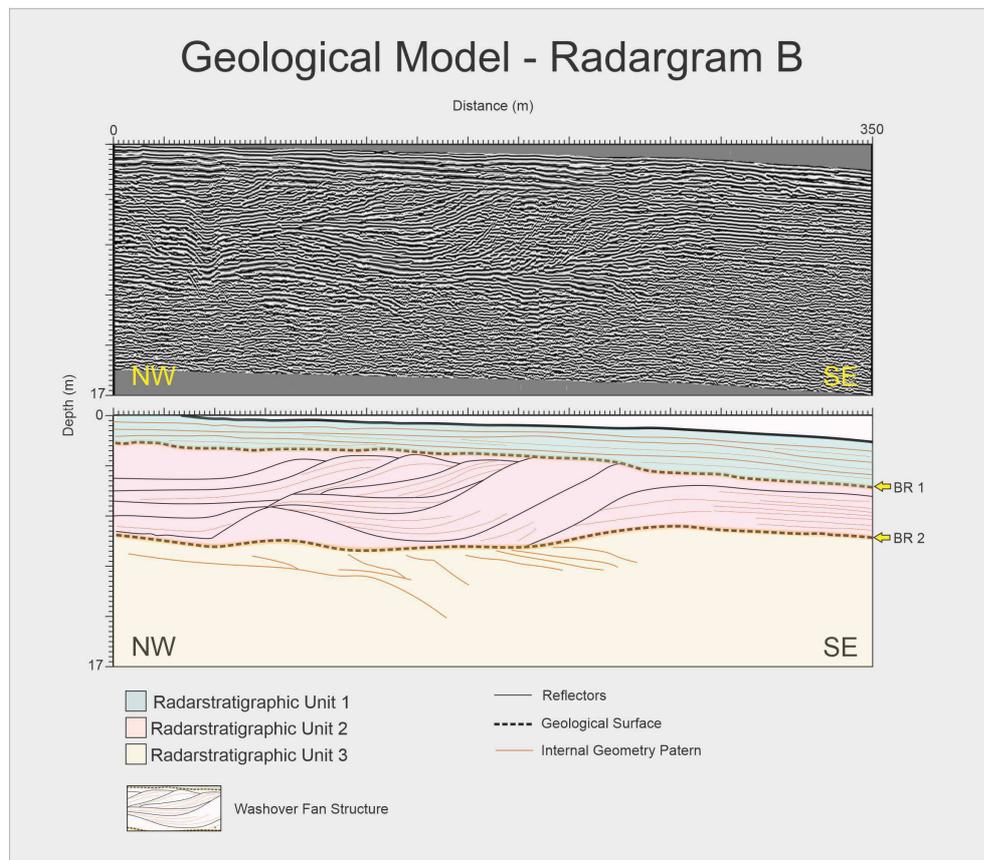


Figure 8: Interpreted Section B, with 350 m length, located southern of Grumari (dip, NW-SE direction), showing the presence of BR1 and BR2 surfaces;