



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Verônica de Carvalho Batista

**ANÁLISE DE RADARGRAMA EM UM AFLORAMENTO DA
FORMAÇÃO RESENDE, BACIA DE VOLTA REDONDA**

Trabalho Final de Curso (Geologia)

UFRJ
Rio de Janeiro
2016



UFRJ

Verônica de Carvalho Batista

**ANÁLISE DE RADARGRAMA EM UM AFLORAMENTO DA FORMAÇÃO
RESENDE, BACIA DE VOLTA REDONDA**

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Geólogo.

Orientadores:

Prof. Dr. Claudio Limeira Mello
(Depto. Geologia, IGEO/UFRJ)

Dr. Alípio José Pereira
(CENPES/PETROBRAS)

Rio de Janeiro

Janeiro de 2016

Batista, Verônica de Carvalho

Análise de radargrama em um afloramento da Formação Resende, Bacia de Volta Redonda. – Verônica de Carvalho Batista – Rio de Janeiro: UFRJ, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2016. x. 35p.

Orientadores: Claudio Limeira Mello

Alípio José Pereira

Trabalho Final de Curso: Graduação em Geologia – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia.

1.GPR, 2.Formação Resende, 3.Fácies de Radar, 4.Unidades de Radar.

Verônica de Carvalho Batista

ANÁLISE DE RADARGRAMA EM UM AFLORAMENTO DA FORMAÇÃO RESENDE,
BACIA DE VOLTA REDONDA

Trabalho Final de Curso apresentado ao
Departamento de Geologia da
Universidade Federal do Rio de Janeiro,
como parte dos requisitos necessários à
obtenção do grau de Geólogo.

Orientadores:

Prof. Dr. Claudio Limeira Mello

Dr. Alípio José Pereira

Aprovado em: ___/___/_____

Por:

Orientador: Prof. Dr. Claudio Limeira Mello (IGEO/UFRJ)

Orientador: Dr. Alípio José Pereira (CENPES/PETROBRAS)

Prof. Dr. Renato Rodriguez Cabral Ramos (MN/UFRJ)

Dra. Aline Theophilo Silva (CENPES/PETROBRAS)

Aos meus pais, pelo amor e pelos ensinamentos valiosos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Departamento de Geologia da UFRJ por ter me proporcionado a qualidade de ensino necessária para minha formação profissional. Aos professores e funcionários que trabalham com afinco para tornar a instituição cada vez melhor.

À minha família que sempre acreditou nos meus sonhos e fizeram todo possível para que eles se tornassem realidade. Especialmente à minha mãe Maria Lucia, ao meu pai Paulo Hermes e ao meu irmão Felipe.

Aos meus orientadores Prof. Dr. Claudio Limeira Mello e Dr. Alípio José Pereira que confiaram em mim e deram todo apoio necessário para conclusão deste trabalho, principalmente, pela paciência e dedicação ao repassar seus conhecimentos.

Ao CENPES (PETROBRAS) e ao LAGEMAR/UFF pelo empréstimo dos equipamentos de GPR. Ao geofísico Amilsom Rodrigues pela ajuda na aquisição e no processamento dos dados. Aos geólogos Aline Theophilo Silva e Anderson Moraes pelas discussões e pelo apoio nos trabalhos de campo.

Às amigas e colegas de trabalho da sala 23, Thaís Coelho Brêda, Ingrid Barreto Maciel, Suelen do Nascimento Vogel e Cheyenne Campos da Silva, por toda ajuda nos trabalhos de campo e por todas as discussões geológicas.

Aos amigos mais que amigos da turma de Geologia UFRJ 2011, pelo apoio, incentivo, motivação e amizade. Muito obrigada, MUSA.

RESUMO

BATISTA, Verônica de Carvalho. Análise de radargrama em um afloramento da Formação Resende, Bacia de Volta Redonda. 35p. Trabalho Final de Curso, Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2016.

A Bacia de Volta Redonda constituiu um hemigráben inserido no contexto do Rift Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) e suas principais unidades litoestratigráficas são as formações Ribeirão dos Quatis, Resende e Pinheiral, que são interpretadas como sistemas fluviais entrelaçados, de idade eocênica a oligocênica. Destaca-se, ainda, a presença de rochas vulcânicas alcalinas ultramáficas intercaladas aos depósitos da Formação Resende. Durante a evolução da Bacia de Volta Redonda, são registradas diversas fases tectônicas, a que se associam diferentes padrões de estruturas rúpteis. O objetivo do presente estudo foi interpretar os resultados de levantamentos geofísicos com o emprego de radar de penetração subterrânea (GPR) em afloramento localizado na borda sul da bacia, que corresponde à borda de falha. Buscou-se a caracterização de radarfácies e a identificação de falhas e outras estruturas rúpteis, visando a possível correlação com a seção geológico-estrutural disponível para o afloramento, elaborada por outros autores. Um radargrama foi obtido com o uso de antenas de 200 MHz. Os dados de GPR foram adquiridos através da técnica conhecida como caminhamento com afastamento constante, em que, durante a aquisição, o afastamento entre as antenas é fixo e elas são deslocadas em conjunto. Foram feitos os ajustes do instante zero para todas as ondas recebidas e o ajuste de ganhos para melhorar a visualização dos refletores, além da conversão tempo-profundidade, que foi realizada utilizando uma velocidade constante de 0,08m/Ns. Os procedimentos de interpretação foram efetuados com base nos princípios da sismoestratigrafia, sendo realizada a identificação de radarfácies (e sua interpretação a partir de modelos de fácies sedimentares conhecidos e da correlação com a seção geológica disponível) e a individualização de falhas. A análise do radargrama proporcionou a caracterização de 6 (seis) fácies de radar, 6 (seis) unidades de radar e a identificação de diversas falhas, sendo 2 (duas) falhas principais, que serviram como limite entre algumas unidades de radar.

Palavras chave: GPR, Formação Resende, Fácies de radar, Unidade de radar.

ABSTRACT

BATISTA, Verônica de Carvalho. *Radargram analysis on an outcrop of Resende Formation, Volta Redonda Basin*. 35p. Trabalho Final de Curso, Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2016.

The Volta Redonda Basin is an hemigraben that fits into the context of the Continental Rift of the Southeast Brazil and their main lithostratigraphic units are the Ribeirão dos Quatis, Resende and Pinheiral formations, which are interpreted as braided river systems, of Eocene and Oligocene age. Noteworthy is also the presence of ultramafic alkaline volcanic rocks interspersed to Resende Formation deposits. During the evolution of Volta Redonda Basin many tectonics phases are registered, which are associated with different patterns of brittle structures. The aim of this study was to interpret the results of geophysical surveys with ground penetrating radar (GPR) in outcrop located on the southern edge of the basin, which is the edge of failure. It sought to characterize radar facies and the identification of faults and other brittle structures, aiming the possibility of correlation with the geological and structural section available to the outcrop, elaborated by other authors. A radargram was obtained using antennas of 200 MHz. The GPR data were acquired by the technique known as a constant spacing, wherein, during acquisition, the spacing between the antennas is fixed and they are moved together. For all received waves it was made the instant zero settings and the gain adjustment have been made to improve the visibility of the reflectors, besides the conversion of time in depth, which was performed using a constant speed of 0.08 m / Ns. The interpretation procedures were performed using the principles of seismic stratigraphy, with the identification of radar facies (and its interpretation from models of known sedimentary facies and with the correlation with a geological section available), and and the identification of brittle structures. The radargrama the analysis provided a characterization of six (6) radar facies, six (6) radar units and the identification of various faults, and two (2) major faults, which served as the boundary between some radar units.

Keywords: GPR, Resende Formation, radar facies, radar units.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Mapa de localização do afloramento estudado e imagem com a localização do afloramento em terreno particular às margens da Rodovia do Contorno (<i>Google Earth</i> - acessado em 04/11/2015).	3
Figura 2	Localização da Bacia de Volta Redonda no contexto do Segmento Central do <i>Rift</i> Continental do Sudeste do Brasil (imagem retirada de Riccomini <i>et al.</i> , 2004). Destaque para as bacias sedimentares de São Paulo (SP), Taubaté (TB), Resende (RE), Volta Redonda (VR) e Macacu (MC), além dos planaltos da Bocaina (PB), na Serra do Mar, e de Campos do Jordão (CJ), na Serra da Mantiqueira, e os maciços alcalinos de Poços de Caldas (PC), Passa Quatro (PQ), Itatiaia (IT), São Sebastião (SB), Tinguá (TI) e Mendanha (MD).	4
Figura 3	Mapa apresentando o delineamento do SRCSB e seus domínios: (A) Paraíba do Sul, (B) Litorâneo, (C) Ribeira e (D) Marítimo (Zalán & Oliveira, 2005).	5
Figura 4	Coluna litoestratigráfica e fases de evolução tectônica da Bacia de Volta Redonda (Sanson <i>et al.</i> , 2006).	6
Figura 5	Ilustração da aquisição dos dados de GPR.	8
Figura 6	Principais técnicas de aquisição de dados de GPR (retirada de Pinto, 2007). a) Afastamento constante; b) WARR; c) CMP.	9
Figura 7	Disposição, no afloramento, da linha de GPR analisada. A seta indica o sentido da aquisição dos dados.	13
Figura 8	Aparelho de GPR utilizado no presente estudo.	14
Figura 9	Linha de GPR bruta (sem nenhum tipo de processamento).	15
Figura 10	Linha de GPR com correção do tempo zero.	15
Figura 11	Linha de GPR com aplicação do filtro no domínio da frequência.	16
Figura 12	Linha com aplicação do filtro passa-banda e ajuste de ganhos.	16
Figura 13	Seção geológico-estrutural do afloramento estudado, elaborada por Maciel <i>et al.</i> (2015, modificada), e perfis litológicos representativos (cedidos por Ingrid Barreto Maciel).	20
Figura 14	A) Radargrama não-interpretado B) Radargrama com a interpretação das unidades de radar e estruturas de deformação identificadas.	24
Figura 15	Radargrama interpretado, com os perfis litológicos 1 e 2 cedidos por Ingrid Barreto Maciel. As setas vermelhas indicam a inconsistência entre a atenuação do sinal eletromagnético na profundidade de 4 metros e o contato entre intervalos de arenitos e argilitos na profundidade de 5 metros.	26
Figura 16	Radargrama interpretado, com os perfis litológicos 1 e 2 cedidos por Ingrid Barreto Maciel. A seta vermelha indica o ajuste do intervalo vertical do radargrama ao contato entre intervalos de arenitos e argilitos na profundidade de 5 metros.	27

Figura 17	Comparação entre a seção geológico-estrutural produzida por Maciel <i>et al.</i> (2015) e a interpretação do radargrama realizada no presente estudo.	31
------------------	---	-----------

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Permissividade dielétrica relativa e condutividade elétrica observadas em diferentes materiais, para frequências comuns utilizadas no GPR (adaptado de Porsani, 1999).	11
Tabela 2	Frequência central das antenas <i>versus</i> profundidade máxima de penetração (adaptado de Porsani, 1999).	12
Tabela 3	Frequência central <i>versus</i> resolução vertical (adaptado de Annan & Cosway, 1992).	13
Tabela 4	Tipos de materiais <i>versus</i> velocidade das ondas eletromagnéticas (adaptado de Annan & Cosway, 1992).	17
Tabela 5	Fácies de radar definidas no presente estudo.	21
Tabela 6	Unidades de Radar, com as fácies de radar que as caracterizam e os principais aspectos litológicos relacionados.	28

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	2
3. ÁREA DE ESTUDO	3
3.1. Localização	3
3.2. Geologia Regional.....	4
4. METODOLOGIA	8
4.1. Conceitos básicos quanto ao método GPR	8
4.2. Aquisição, processamento e interpretação dos dados	13
5. RESULTADOS	19
5.1. Fácies de radar	21
5.2. Estruturas de deformação.....	23
5.3. Unidades de radar	25
5.4. Comparação entre a seção do afloramento e o radargrama.....	30
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

1. INTRODUÇÃO

O radar de penetração em subsuperfície, mais comumente conhecido como GPR (*Ground Penetration Radar*), é um método geofísico que emprega ondas eletromagnéticas na detecção e confirmação de diversas feições geológicas. Por ser um método geofísico de alta resolução, destinado a investigações rasas, o GPR se faz muito útil na investigação de feições geológicas de pequeno porte, resultando em dados com alto grau de detalhe. Esses dados de alta resolução, quando integrados a outros dados sedimentológicos, estratigráficos e estruturais, possibilitam a modelagem de afloramentos como análogos a reservatórios.

Diversos autores tiveram como objetivo o uso de GPR com enfoque em modelagem de afloramentos análogos a reservatórios. Alguns exemplos são os trabalhos realizados por Baker (1991), Gawthorpe *et al.* (1993), Porsani & Rodrigues (1995), entre outros.

Nas bacias do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil alguns exemplos de trabalhos que empregaram o GPR são os realizados por Madeira (2002), que aplicou o GPR para o estudo da estratigrafia e arquitetura de depósitos sedimentares cenozoicos; Araújo Junior (2004), que fez o levantamento e processamento de dados de GPR em um afloramento da Bacia de Resende; e Rodrigues (2004), que utilizou o GPR para caracterização estrutural de um afloramento da Bacia de Resende.

No presente estudo, a aplicação do GPR é voltada para subsidiar a caracterização da deformação tectônica de depósitos da Formação Resende na Bacia de Volta Redonda, dentro do interesse de contribuir para a modelagem de afloramentos análogos a reservatórios siliciclásticos pouco consolidados e fraturados.

2. OBJETIVO

O presente estudo teve como objetivo interpretar o produto de levantamentos geofísicos com o emprego de radar de penetração em subsuperfície (GPR) em um afloramento da Formação Resende, na Bacia de Volta Redonda, com a finalidade de contribuir para a análise da deformação em arenitos pouco consolidados.

Buscou-se a caracterização de radarfácies e a identificação de falhas e outras estruturas rúpteis, visando à possível correlação com a seção geológico-estrutural disponível para o afloramento, elaborada por Maciel *et al.* (2015).

3. ÁREA DE ESTUDO

3.1. Localização

O afloramento estudado situa-se no município de Volta Redonda, estado do Rio de Janeiro, em um terreno particular na área da Rodovia do Contorno (Figura 1), tendo as seguintes coordenadas UTM 23K 0597428 / 7507066 (Datum Córrego Alegre).

Quanto ao contexto geológico, o afloramento está localizado nas proximidades da borda sul do Gráben de Casa de Pedra, principal área de acúmulo sedimentar da Bacia de Volta Redonda.

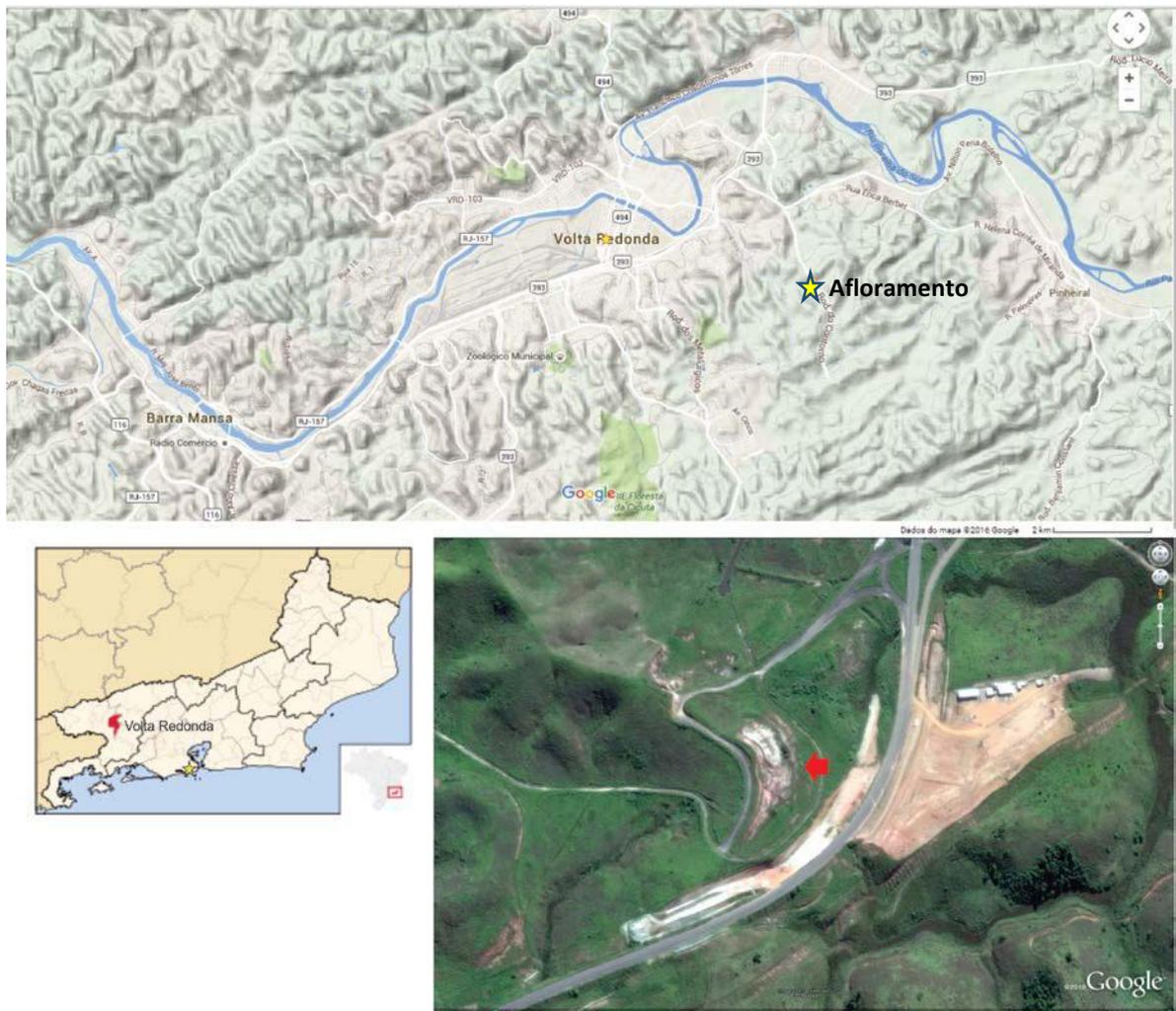


Figura 1: Mapa de localização do afloramento estudado e imagem com a localização do afloramento em terreno particular às margens da Rodovia do Contorno (Google Earth - acessado em 04/11/2015).

3.2. Geologia Regional

A Bacia de Volta Redonda é uma das bacias sedimentares que compõem o *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (RCSB - Riccomini, 1989), que corresponde a um complexo de vales tectônicos, serras e bacias sedimentares, com orientação ENE-WSW e idade Eoceno-Oligoceno, desenvolvido entre as cidades de Tijucas do Sul, no estado do Paraná, e a área submersa defronte a Macaé, no estado do Rio de Janeiro, com extensão de pouco mais de 900 km de comprimento (Riccomini *et al.*, 2004). Juntamente às bacias de São Paulo, Taubaté e Resende, a Bacia de Volta Redonda integra o Segmento Central do RCSB (Figura 2)

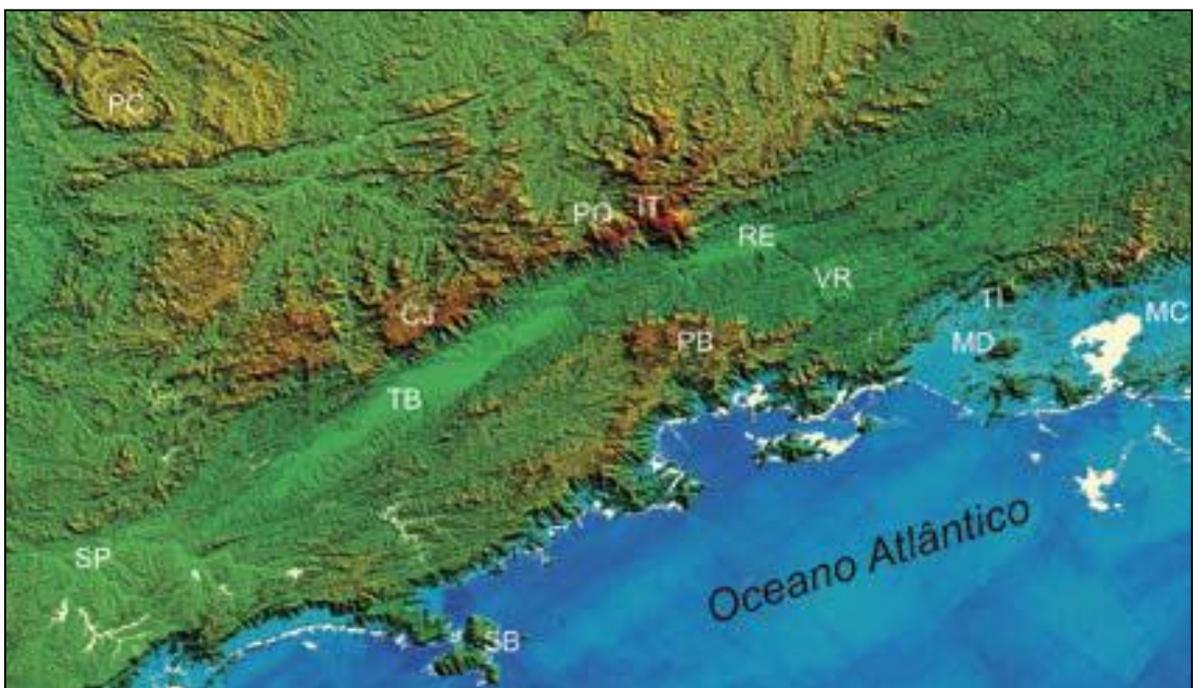


Figura 2: Localização da Bacia de Volta Redonda no contexto do Segmento Central do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (imagem retirada de Riccomini *et al.*, 2004). Destaque para as bacias sedimentares de São Paulo (SP), Taubaté (TB), Resende (RE), Volta Redonda (VR) e Macaé (MC), além dos planaltos da Bocaina (PB), na Serra do Mar, e de Campos do Jordão (CJ), na Serra da Mantiqueira, e os maciços alcalinos de Poços de Caldas (PC), Passa Quatro (PQ), Itatiaia (IT), São Sebastião (SB), Tinguá (TI) e Mendanha (MD).

O RCSB está implantado sobre o segmento central da Faixa Móvel Ribeira, que constitui um complexo cinturão de dobramentos e empurrões gerados no Neoproterozoico/Cambriano, durante a Orogênese Brasileira (Heilbron *et al.*, 1995).

Zalán & Oliveira (2005) atribuíram a denominação de Sistema de Riftes Cenozoicos do Sudeste do Brasil (SRCSB) à associação das serras do Mar/Mantiqueira com os vales tectônicos intervenientes e suas extensões na

plataforma continental das bacias de Santos/Campos (até as suas charneiras, a oeste das quais não ocorrem sedimentos cretáceos) – Figura 3. No modelo proposto por estes autores, a Bacia de Volta Redonda inclui-se no domínio chamado Rifte do Paraíba do Sul.

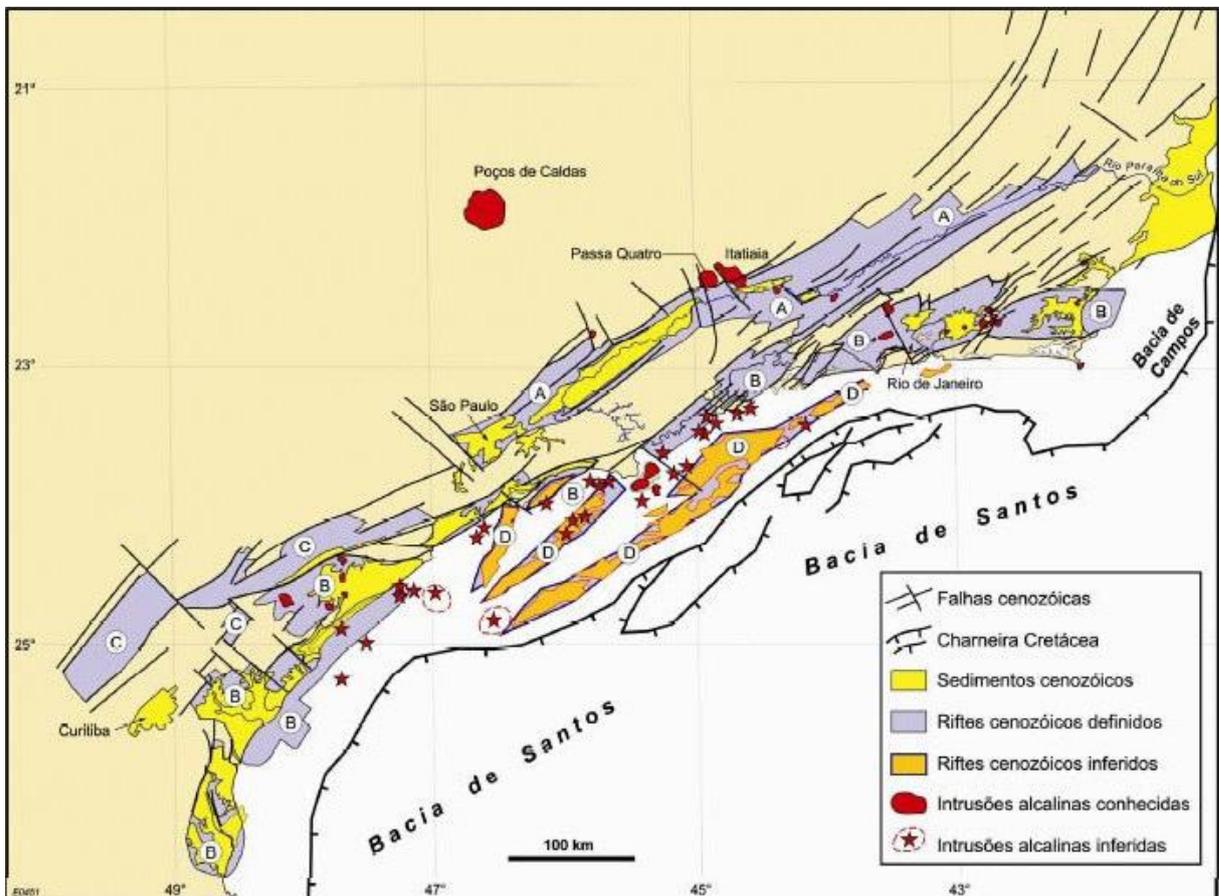


Figura 3: Mapa apresentando o delineamento do SRCBS e seus domínios: (A) Paraíba do Sul, (B) Litorâneo, (C) Ribeira e (D) Marítimo (Zalán & Oliveira, 2005).

3.2.1. Estratigrafia e evolução tectônica da Bacia de Volta Redonda

Sanson *et al.* (2006) e Negrão *et al.* (2015) apresentaram a seguinte divisão litoestratigráfica da Bacia de Volta Redonda (Figura 4):

- Formação Ribeirão dos Quatis: unidade estratigráfica disposta sobre o embasamento proterozoico, constituída por conglomerados quartzosos intercalados com arenitos feldspáticos. Estes depósitos são interpretados como um sistema fluvial entrelaçado de alta energia, associado a fase pré-rifte da evolução da Bacia de Volta Redonda.

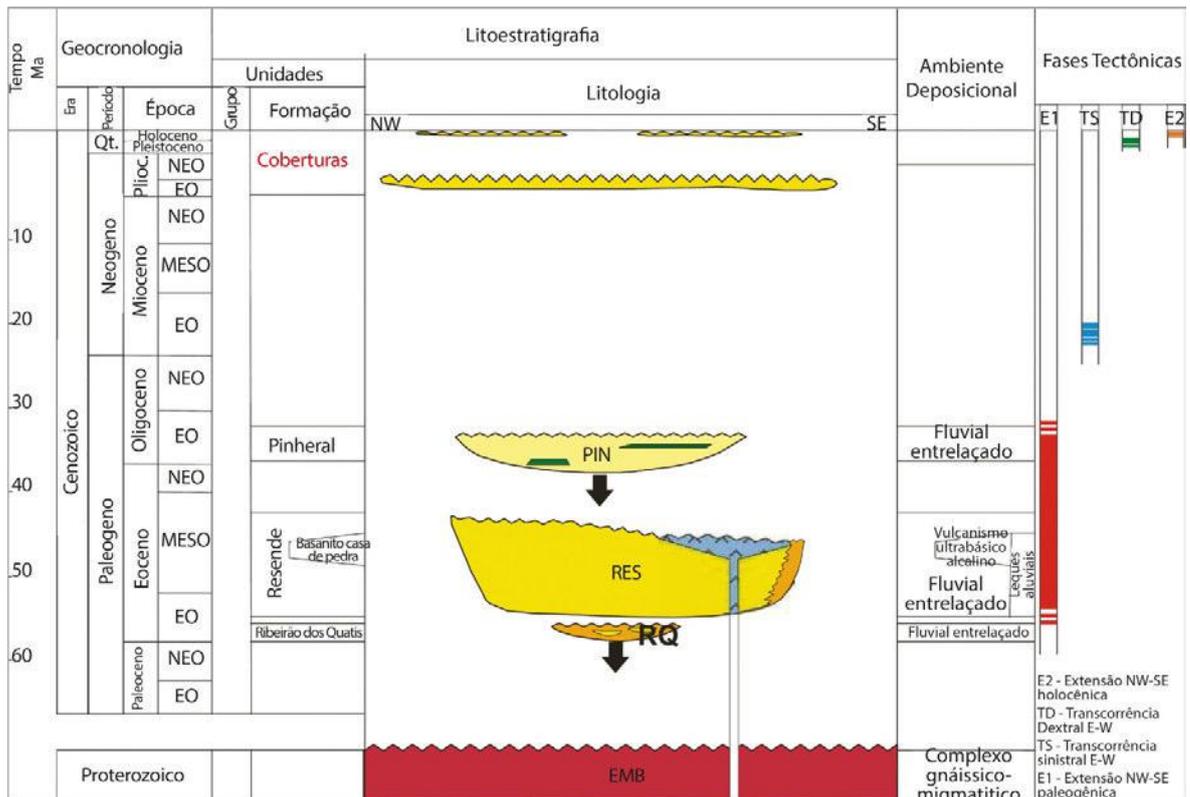


Figura 4: Coluna litoestratigráfica e fases de evolução tectônica da Bacia de Volta Redonda (Sanson *et al.*, 2006).

- Formação Resende: corresponde ao principal registro sedimentar identificado na Bacia de Volta Redonda, relacionando-se com a mais importante fase de sedimentação da bacia, no Eoceno. Os depósitos estão dispostos em inconformidade com o embasamento proterozoico e são constituídos por intercalações de arenitos feldspáticos, com níveis de conglomerados finos, e lamitos esverdeados. Esta unidade foi interpretada como depósitos de leques aluviais e de canais fluviais entrelaçados.
- Basanito Casa de Pedra: derrames ultrabásicos alcalinos posicionados entre as formações Resende e Pinheiral (conforme Sanson *et al.*, 2006) ou intercalados aos depósitos da Formação Resende (conforme Riccomini, 1989 e Negrão *et al.*, 2015). As rocha apresentam textura porfírica, maciça, ou com vesículas e amígdalas, com feições que sugerem a existência de, pelo menos, dois derrames superpostos (Sanson *et al.*, 2006).
- Formação Pinheiral: esta unidade colmata o preenchimento sedimentar da Bacia de Volta Redonda e está em discordância sobre o embasamento e os depósitos da Formação Resende e, localmente, sobre o Basanito Casa de Pedra. É constituída predominantemente por arenitos e conglomerados, relacionados a canais fluviais

entrelaçado, com expressiva sedimentação pelítica relacionada a eventos de inundação e avulsão dos canais fluviais.

Na evolução da Bacia de Volta Redonda, são descritos por Sanson (2006) e Negrão (2014) quatro eventos tectônicos (Figura 4). O primeiro evento (E1 – distensão NW-SE), de idade paleogênica, foi responsável pela abertura da bacia, principal fase de sedimentação e vulcanismo; os demais eventos (TS, TD e E2) têm caráter deformador. Ao evento TS (transcorrência sinistral E-W), de idade miocênica, relacionam-se as primeiras estruturas responsáveis pela deformação dos depocentros paleogênicos, compartimentando-os, principalmente, na direção NE-SW, através da reativação e soerguimento de altos estruturais e bordas de falhas de mesma direção. Ao evento subsequente, TD (transcorrência dextral E-W), de idade pleistocênica, relacionam-se, principalmente, as importantes estruturas de direção NW-SE e NNW-SSE, responsáveis pela compartimentação transversal dos depocentros paleogênicos. Ao evento de deformação, E2 (distensão NW-SE), holocênico, atribui-se a reativação generalizada de estruturas de direção NE-SW.

Ainda de acordo com Negrão (2014), podem ser evidenciadas diferentes tectonossequências na evolução da Bacia de Volta Redonda, limitadas por discordâncias erosivas:

- Fase Pré-Rifte – corresponde à tectonossequência mais antiga, representada pela Formação Ribeirão dos Quatis. Esta tectonossequência vincula-se ao registro de um sistema fluvial entrelaçado de alta energia, fluindo em calhas relativamente estreitas e rasas, de direção predominante NE-SW, e fortemente controladas por sistemas de fraturas e falhas precursoras ao estágio rifte.
- Fase Rifte I – esta tectonossequência é representada pela Formação Resende, que corresponde ao registro de um sistema fluvial entrelaçado associado a leques aluviais, com desenvolvimento de amplas planícies lamosas, e pelo vulcanismo basanítico (Basanito Casa de Pedra).
- Fase Rifte II – esta tectonossequência é representada pela Formação Pinheiral, que corresponde a um sistema fluvial entrelaçado, com possível formação de corpos lacustres restritos. Pelas características das associações faciológicas e petrográficas desta tectonossequência, considera-se que fase Rifte II tenha tido taxas de subsidência relativamente menores que a fase Rifte I.

4. METODOLOGIA

4.1. Conceitos básicos quanto ao método GPR

O método geofísico do GPR é uma ferramenta muito útil para investigações de subsuperfície rasa, permitindo a aquisição rápida dos dados e com uma grande facilidade no deslocamento do equipamento, se comparado a outros métodos.

Esse método consiste na emissão de ondas eletromagnéticas de alta frequência (10 - 1000 MHz) e a recepção dessas ondas após sofrerem reflexões em interfaces de diferentes propriedades eletromagnéticas. A emissão das ondas eletromagnéticas é feita por uma antena transmissora (Tx), e a captação das ondas refletidas é feita por uma antena receptora (Rx), situadas paralelamente uma a outra - Figura 5. Os sinais de radar são registrados digitalmente em nanossegundos, representativos do intervalo de tempo entre o momento de emissão da onda até seu retorno para a antena receptora, deslocada ao longo de uma trajetória.

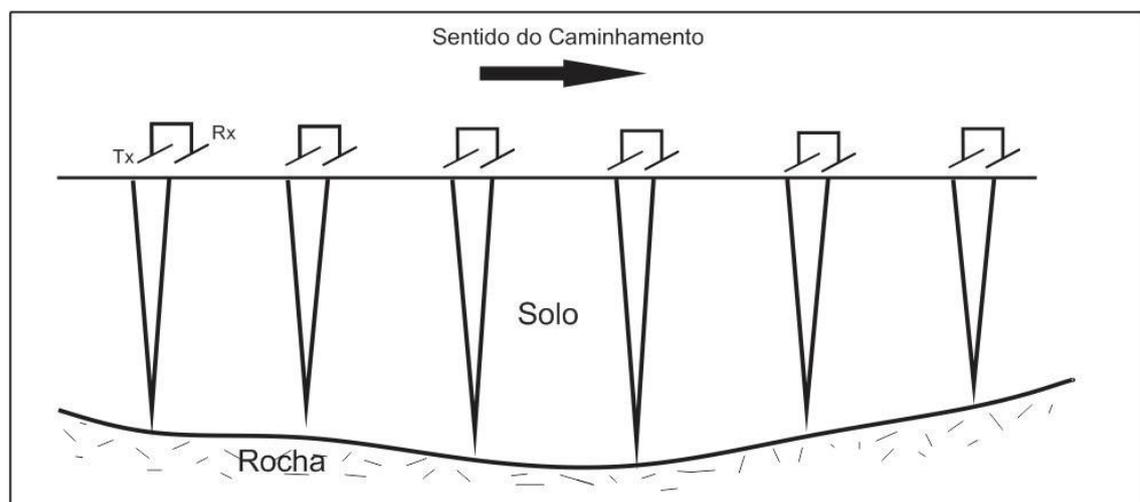


Figura 5: Ilustração da aquisição dos dados de GPR.

A aquisição dos dados GPR é semelhante à aquisição dos dados sísmicos, sendo utilizados, principalmente, três tipos de técnicas de levantamento dos dados (Figura 6): o afastamento constante de antenas (*common offset*); a reflexão e refração de grande ângulo (*Wide Angle Reflection and Refraction*) ou WARR; e o

Ponto Médio Comum (*Common Mid Point-CMP*). Na técnica de afastamento constante, as antenas possuem uma separação fixa entre si e são deslocadas conjuntamente. Em cada ponto de medida um pulso eletromagnético é emitido e é refletido nas interfaces entre camadas com diferentes propriedades. No método WARR, uma antena é mantida fixa enquanto a outra é deslocada lateralmente. Em contrapartida, no método CMP, as antenas são deslocadas lateralmente para lados opostos a partir de um ponto central comum.

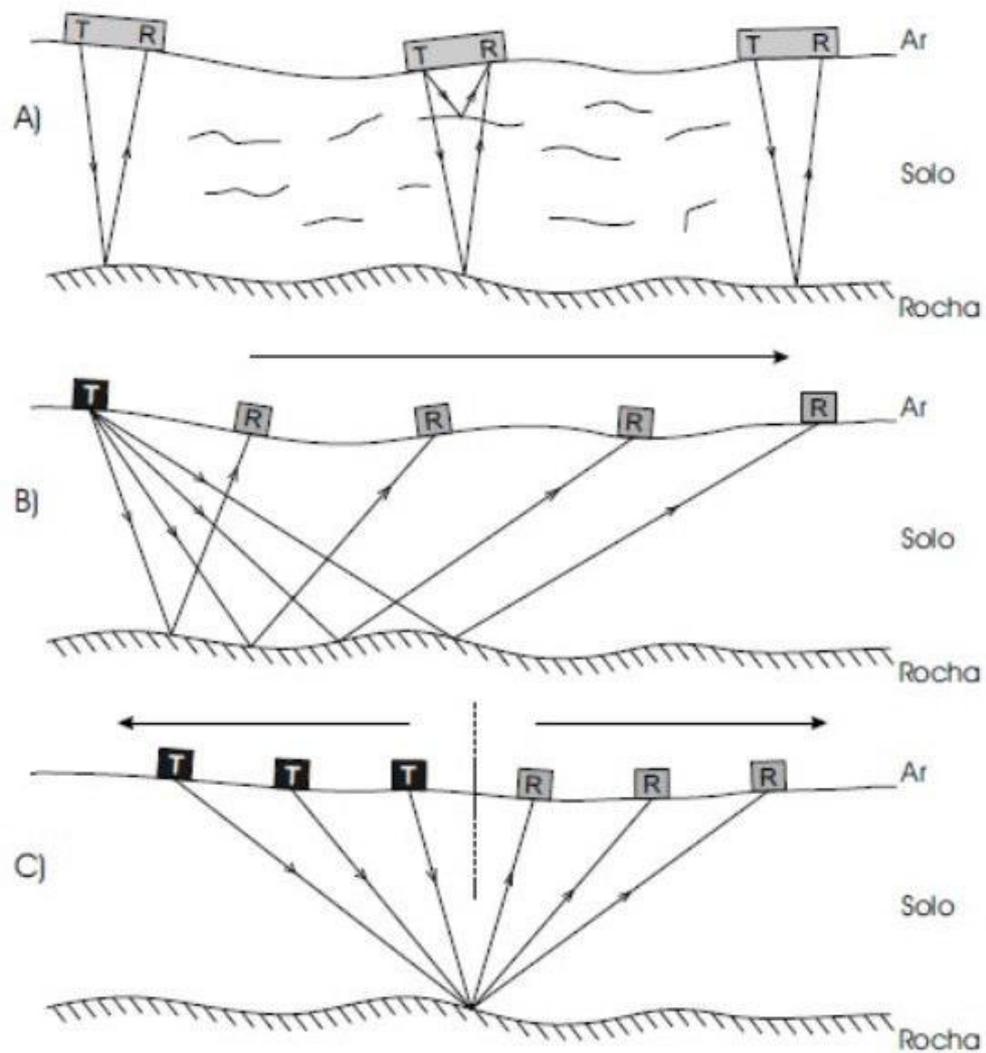


Figura 6: Principais técnicas de aquisição de dados de GPR (retirada de Pinto, 2007). a) Afastamento constante; b) WARR; c) CMP.

Segundo Annan & Cosway (1992), as propriedades eletromagnéticas dos materiais dependem da sua composição e umidade, ambas controlando a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas e sua atenuação. Seguindo este princípio, os materiais geológicos podem ser divididos em semicondutores ou isolantes¹, sendo controlados por três propriedades principais: condutividade elétrica, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética (Annan e Cosway, 1992).

A condutividade elétrica (σ) de um material é uma medida de sua habilidade em conduzir corrente elétrica e ela, ou seu inverso, a resistividade (ρ), pode variar até 20 ordens de magnitude para os materiais geológicos (Keller, 1987). O teor de umidade, a porosidade, a salinidade, a proporção da fração argila e a presença de materiais condutivos são os principais fatores que afetam a condutividade elétrica.

A permissividade dielétrica (ϵ) é, em termos físicos, a quantidade de energia elétrica armazenada e perdida, através da criação de um campo elétrico interno (entre íons e/ou moléculas), devido a deslocamentos induzidos, quando moléculas e/ou íons são submetidos a um campo elétrico externo variável (Powers, 1997).

Segundo Annan (1996), tanto a condutividade elétrica quanto a permissividade dielétrica são importantes, pois afetam diretamente a atenuação e a propagação das ondas eletromagnéticas, respectivamente.

Da mesma forma que a permissividade dielétrica, a permeabilidade magnética também é uma quantidade que expressa o acúmulo de energia, contudo proveniente da indução magnética. Uma característica desta propriedade é que ela praticamente não se altera com a frequência e, assim, a variação entre a permeabilidade magnética do meio e a do espaço livre não é significativa (Keller, 1987).

Na Tabela 1, adaptada de Porsani (1999), são apresentados valores de condutividade elétrica e permissividade dielétrica relativa dos materiais para as frequências utilizadas no GPR. Pode-se notar que o conteúdo de água afeta a característica elétrica das rochas e solos, isto se dá porque as moléculas de água têm efeito dissipador nas ondas eletromagnéticas, o que atenua a propagação da onda no meio.

¹ Os materiais são classificados como condutores quando a sua condutividade é maior que $10^4/\Omega.m$, semicondutores se sua condutividade estiver no intervalo entre $10^{-10}/\Omega.m$ e $10^4/\Omega.m$, e isolantes se sua condutividade for menor que $10^{-10}/\Omega.m$.

Tabela 1: Permissividade dielétrica relativa e condutividade elétrica observadas em diferentes materiais, para frequências comuns utilizadas no GPR (adaptado de Porsani, 1999).

Materiais	Permissividade dielétrica relativa	Condutividade elétrica (mS/m)
Ar	1	0
Água destilada	81	0,01
Água fresca	81	0,5
Água do mar	81	3000
Areia seca e cascalho	2-6	0,01
Areia saturada	20-30	0,1-1
Argila seca	5	2
Argila saturada	40	1000
Calcário seco	4	0,5
Calcário saturado	8	2
Folhelho e siltito seco	5	1
Folhelho saturado	7	100
Siltito saturado	30	100
Silte saturado	10	1-10
Arenito saturado	20-30	40
Solo arenoso seco	2,6	0,14
Solo arenoso saturado	25	6,9
Solo argiloso seco	2,4	0,27
Solo argiloso saturado	15	50
Basalto seco	6	1
Basalto saturado	8	10
Diabásio seco	7	10
Diabásio saturado	8	100
Granito seco	5	0,01
Granito saturado	7	1
Sal seco	5-6	0,01-1
Ferro	1	10^6
Aço	1	∞
PVC	8	0
Asfalto	3-5	0
Concreto seco	5,5	0
Concreto saturado	12,5	0
LNAPL	2	0
DNAPL	2-3	0
Hexano	1,88	0,5

A profundidade do levantamento está intimamente ligada com a frequência da antena utilizada (Tabela 2). Quanto menor a frequência da antena utilizada, menor será a resolução dos dados e maior será a profundidade de investigação. Dados em terrenos resistivos, com pequena quantidade de sedimentos na fração argila, são, geralmente, melhores que dados em terrenos condutivos, com grande quantidade de sedimentos na fração argila, pois estes tendem a atenuar bastante o sinal, provocando, assim, uma menor resolução dos refletores.

Tabela 2: Frequência central das antenas *versus* profundidade máxima de penetração (adaptado de Porsani,1999).

Frequência Central (MHz)	Profundidade Máxima de Penetração (m)
1000	1
400	2
200	4
100	25
50	30
25	40
10	50

Segundo Madeira (2002), a resolução do sistema de radar é controlada pela performance do sistema, características da atenuação e do contraste nas propriedades elétricas dos materiais investigados. Pode-se considerar dois tipos de resolução (Madeira, 2002): 1) resolução vertical, que se refere ao mínimo de separação detectável em profundidade entre interfaces refletoras (Tabela 3); e 2) resolução lateral, que está relacionada à extensão horizontal do refletor.

Tabela 3: Frequência central *versus* resolução vertical (adaptado de Annan & Cosway, 1992).

Frequência Central (MHz)	Resolução Vertical (m)
200	0,25
100	0,50
50	1,0
25	2,0

4.2. Aquisição, processamento e interpretação dos dados

A aquisição do perfil analisado no presente estudo foi realizada no mês de dezembro, época de chuvas na região (e, portanto, o terreno estava úmido). Foi adquirida uma seção de 45 m (Figura 7), com o uso de antenas de 200MHz, através do emprego da técnica de afastamento constante de antenas.

O equipamento utilizado (Figura 8) é do modelo GSSI/SIR 3000 – *Geophysical Survey Systems Inc.*, com o console de propriedade do LAGEMAR/UFF (Laboratório de Geologia Marinha da Universidade Federal Fluminense) e antenas de propriedade da PETROBRAS/CENPES/GEOF.



Figura 7: Disposição, no afloramento, da linha de GPR analisada. A seta indica o sentido da aquisição dos dados.



Figura 8: Aparelho de GPR utilizado no presente estudo.

O processamento dos dados foi realizado no LAGEMAR/UFF, por Amilsom Rodrigues, com o uso do *software* RADAN 6.5. As etapas do processamento estão descritas a seguir (ver também figuras 9 a 12):

- Correção do tempo zero – esse tipo de correção remove a ausência de sinal gerada pela distância das antenas em relação a superfície do terreno (Figura 10).
- Aplicação do filtro no domínio da frequência – a aplicação deste filtro é utilizada para a supressão de ruídos existentes no perfil, evitando assim ruídos gerados por emissão de ondas eletromagnéticas de valores próximos aos das antenas. A maioria dos ruídos foram excluídos, porém alguns refletores ficaram mais atenuados (Figura 11).
- Aplicação do filtro passa-banda – a aplicação desse filtro é utilizada com o objetivo de restringir o sinal a uma faixa de frequências próxima à utilizada pelas antenas e eliminar o ruído de alta frequência. A linha passa a ficar mais limpa e com poucos ruídos, porém os refletores da parte mais profunda da linha não podem ser distinguidos (Figura 12).
- Ajuste de ganhos – existe uma série de fenômenos que causam perdas de energia do sinal de GPR à medida que a onda vai se propagando. O ajuste nos ganhos compensa os efeitos da atenuação e melhora a visualização dos refletores em subsuperfície (Figura 12).

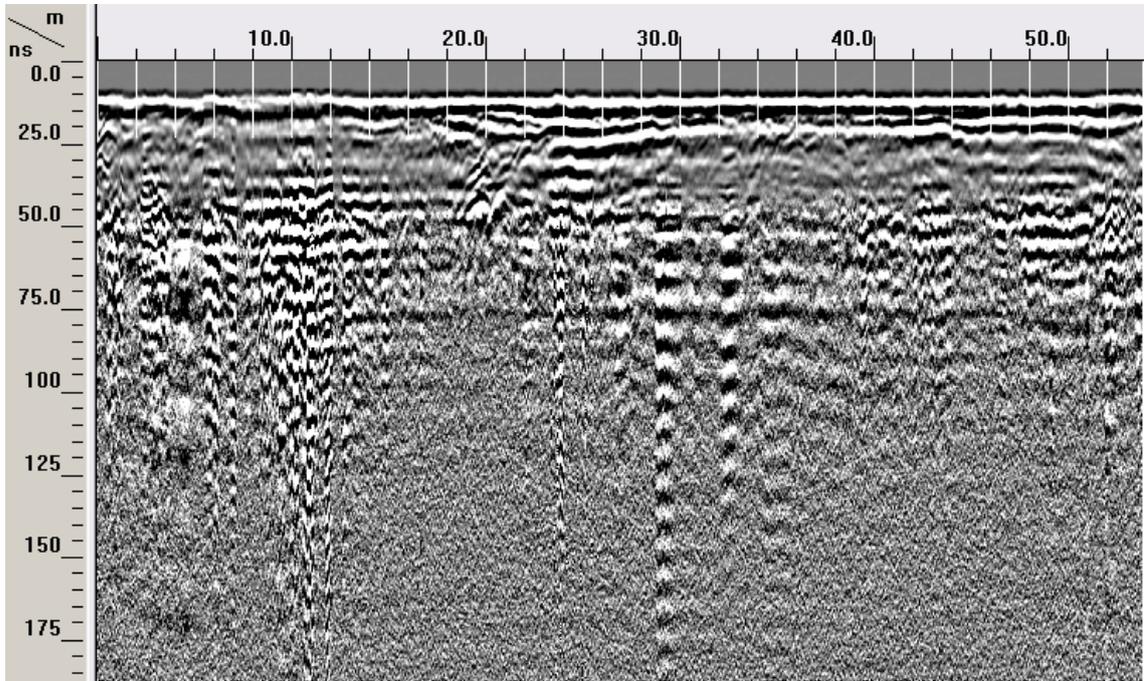


Figura 9: Linha de GPR bruta (sem nenhum tipo de processamento).

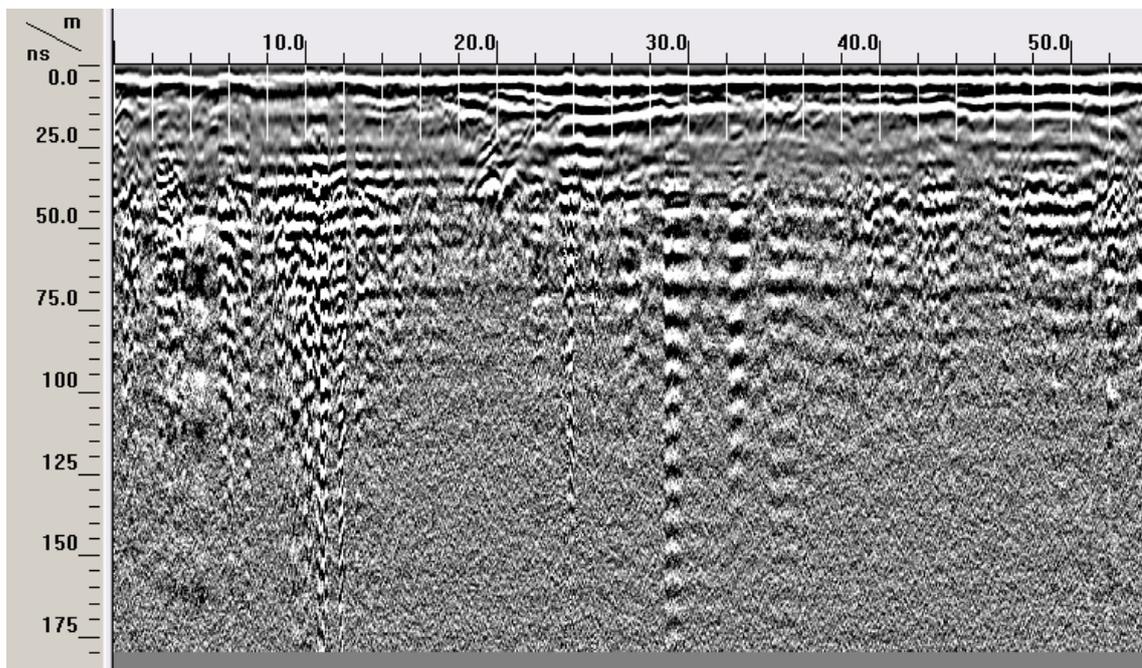


Figura 10: Linha de GPR com correção do tempo zero.

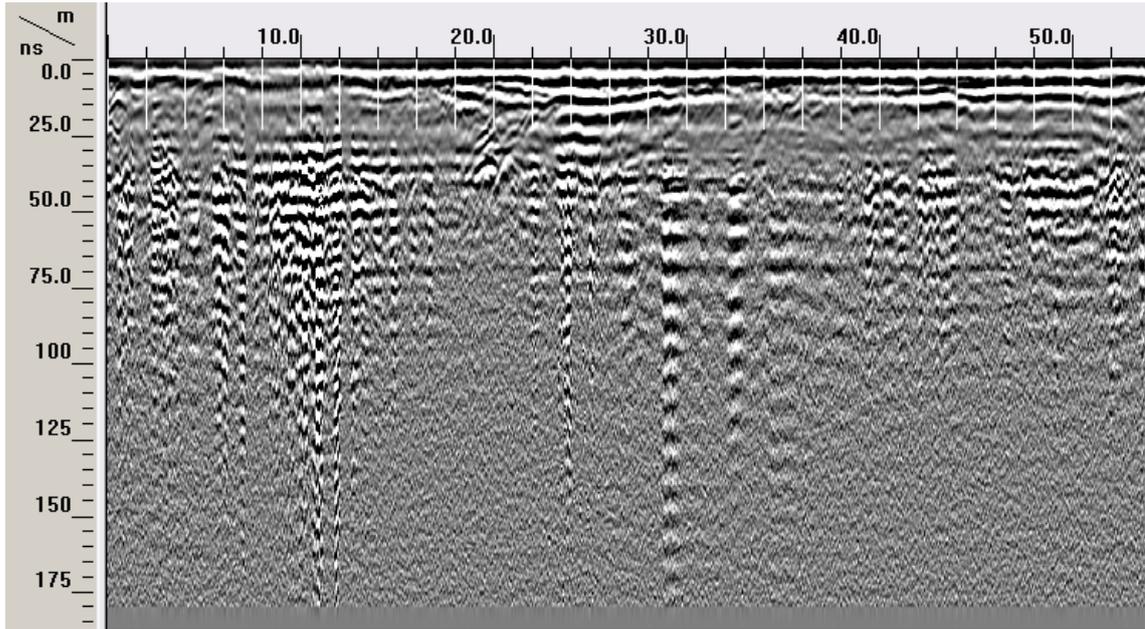


Figura 11: Linha de GPR com aplicação do filtro no domínio da frequência.

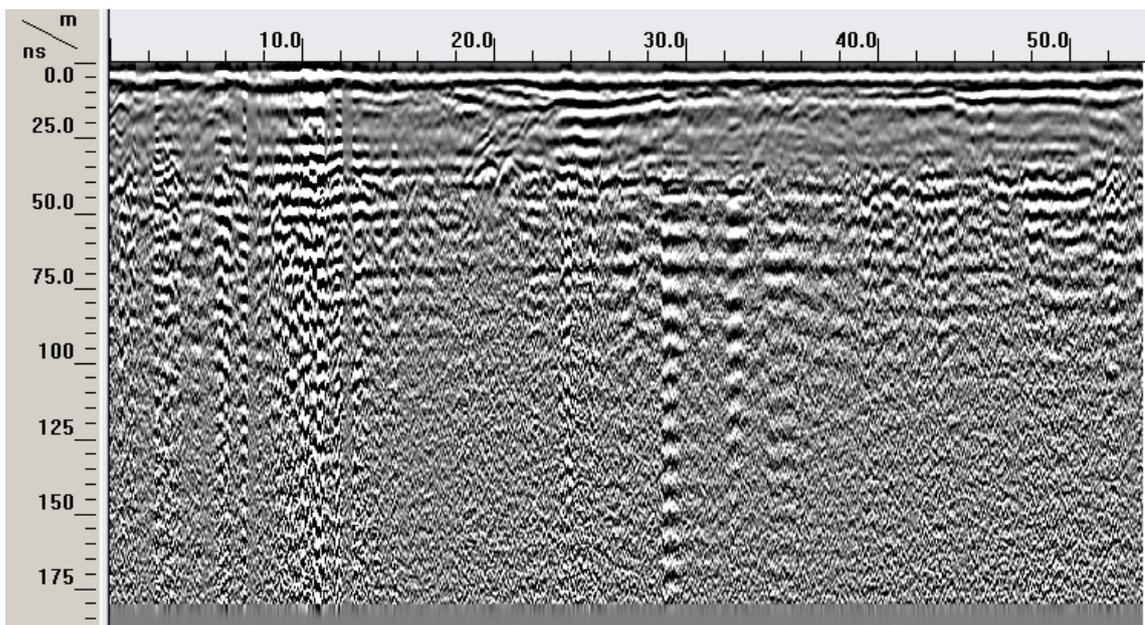


Figura 12: Linha com aplicação do filtro passa-banda e ajuste de ganhos.

- Conversão do tempo em profundidade – a análise de velocidades foi realizada através do ajuste de hipérboles de difração. A energia transmitida pelo GPR ao terreno é parcialmente refletida quando são encontrados contrastes produzidos por objetos. Como são emitidas ondas em todas as direções, a energia refletida é

medida antes que o equipamento esteja diretamente sobre o objeto. Com isso, as reflexões nas seções de radar formam uma hipérbole. A maioria dos *softwares* para análise de dados fornece rotinas onde a velocidade pode ser determinada interativamente por ajustes manuais das hipérbolas (Mesquita, 2011). Este método, embora sujeito a erros de ajuste visual, realizado pelo responsável pelo processamento, se mostra uma maneira fácil e rápida de estimar a velocidade do meio sem a necessidade de uma aquisição CMP. A partir desta análise, a velocidade utilizada para converter o tempo (Ns) em profundidade (m) foi de 0,08m/Ns. Este velocidade se mostrou adequada em comparação com dados disponíveis na literatura (Tabela 4), pois o afloramento é constituído de intercalações de material arenoso e material argiloso.

Tabela 4: Tipos de materiais *versus* velocidade das ondas eletromagnéticas (adaptado de Annan & Cosway, 1992).

Tipo de material	Velocidade (m/Ns)
Ar	0,3
Água destilada	0,033
Água doce	0,033
Areia seca	0,15
Areia saturada	0,06
Calcário	0,12
Folhelho	0,09
Siltito	0,07
Argila	0,06
Granito	0,13

A interpretação de dados de GPR é baseada na imagem e, portanto, é necessário compreender a natureza e origem das reflexões para se obter uma interpretação segura.

As reflexões de radar podem ser comparadas ao produto de levantamentos sísmicos, pois fornecem uma imagem contínua dos estratos em subsuperfície, baseada nos padrões de reflexão que estes apresentam. Cada conjunto de

refletores com configurações semelhantes corresponde a uma fácies de radar, e cada conjunto de refletores concordantes, limitados por superfícies discordantes, constitui uma unidade de radar (Van Overmeren, 1998).

A fácies de radar se refere às diferenças visíveis nos padrões de reflexão de uma seção de GPR. Tanto as feições texturais como estruturais em subsuperfície influenciam as respostas do radar e produzem efeitos característicos nas observações de radar. Estes efeitos são chamados de elementos de fácies de radar. Os mais comuns são: 1) amplitude da reflexão; 2) continuidade da reflexão; 3) configuração da reflexão; e 4) geometria (Van Overmeren, 1998).

Van Overmeren (1998) destaca seis fatores que diferenciam fácies de radar de fácies sísmicas: 1) o nível freático que separa duas zonas distintas, a não saturada e a saturada; 2) existe mais dispersão de sinal no terreno ou acima dele; 3) as difrações são mais proeminentes; 4) a profundidade de investigação é muito menor; 5) a atenuação em materiais condutivos é muito severa; e 6) o comprimento de onda é menor.

5. RESULTADOS

A partir da descrição elaborada por Maciel *et al.* (2015), além de observações efetuadas durante a etapa de aquisição dos dados geofísicos, o afloramento estudado pode ser caracterizado como composto predominantemente por intervalos de arenitos finos a grossos, com até 3 metros de espessura e geometria lenticular extensa a tabular (Figura 13); os arenitos são feldspáticos, em geral com estratificações cruzadas acanaladas, mas também maciços e laminados. São observados, ainda, intervalos lenticulares extensos a tabulares, com até 2 metros de espessura, de conglomerados sustentados pelos clastos, com arcabouço de seixos finos a grossos, estratificação horizontal ou cruzada acanalada e frequentes intraclastos argilosos; e intervalos lenticulares e tabulares de siltitos e argilitos maciços, de coloração esverdeada, com até 2 metros de espessura.

Segundo Maciel *et al.* (2015), o pacote sedimentar está interceptado por duas falhas principais, de caráter normal, com orientação N70E e mergulhos opostos para NW (F1) e SE (F2), com rejeitos aproximados de 5 e 8 metros, respectivamente, produzindo uma feição de gráben. Estas falhas, atribuídas ao evento E2 (distensão NW-SE, de idade holocênica), compartimentam o afloramento em três blocos, controlando ainda a cimentação dos depósitos por óxido de ferro.

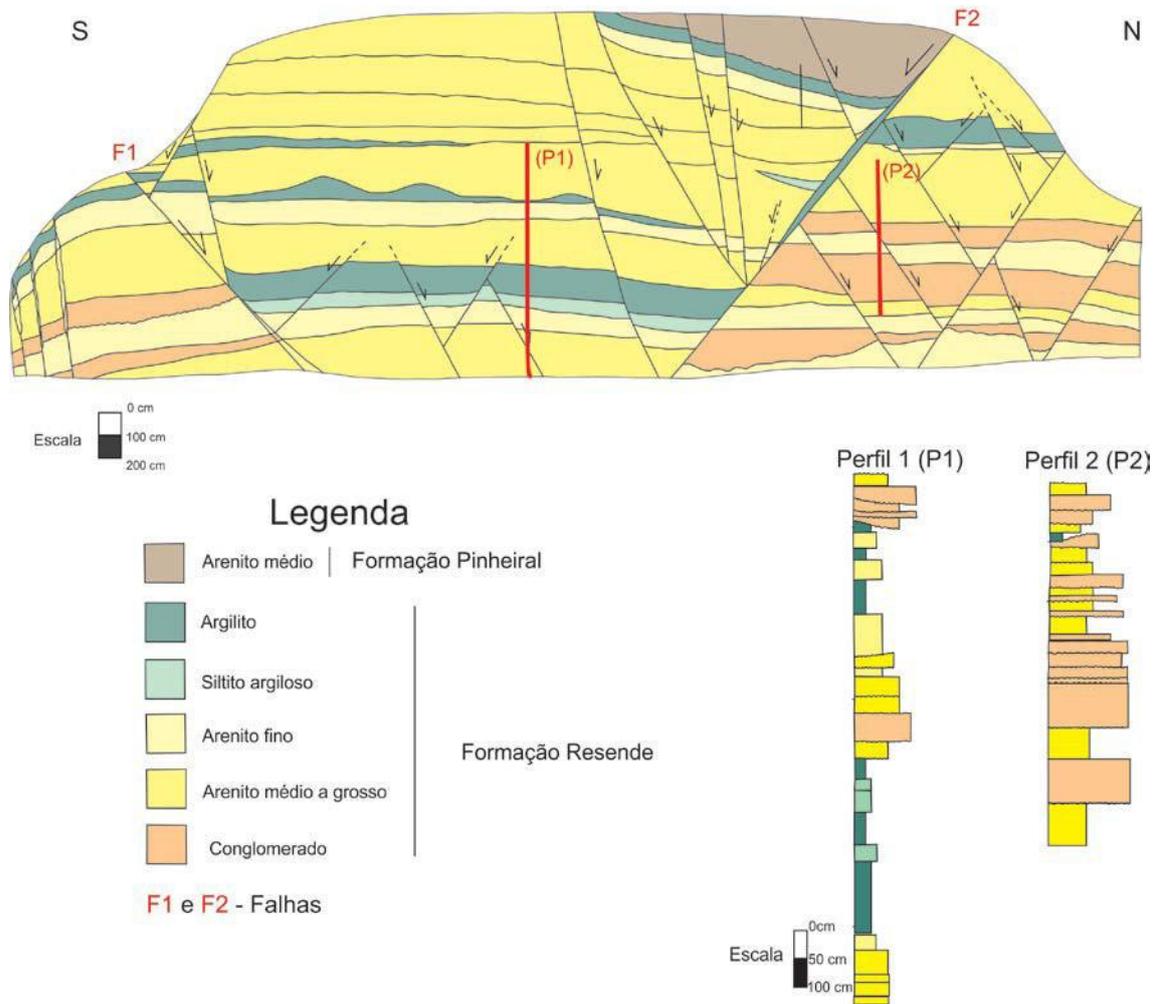
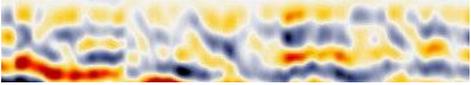
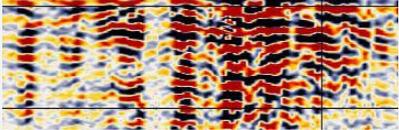
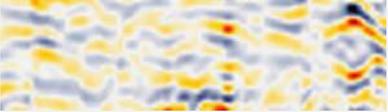
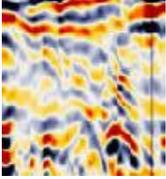


Figura 13: Seção geológico-estrutural do afloramento estudado, elaborada por Maciel *et al.* (2015, modificada), e perfis litológicos representativos (cedidos por Ingrid Barreto Maciel).

5.1. Fácies de Radar

Foram definidas seis fácies de radar para o intervalo estratigráfico analisado (Tabela 5).

Tabela 5: Fácies de radar definidas no presente estudo.

<u>FÁCIES DE RADAR</u>	<u>DESCRIÇÃO</u>	<u>REPRESENTAÇÃO</u>
FÁCIES DE RADAR I	Refletores subparalelos, localmente entrecruzados, e com baixa amplitude	
FÁCIES DE RADAR II	Refletores entrecruzados, por vezes descontínuos, e com baixa a média amplitude	
FÁCIES DE RADAR III	Refletores subparalelos, localmente entrecruzados, crenulados e com alta amplitude	
FÁCIES DE RADAR IV	Refletores paralelos, contínuos e de média a alta amplitude	
FÁCIES DE RADAR V	Refletores ondulados, com aspecto crenulado e baixa amplitude	
FÁCIES DE RADAR VI	Refletores irregulares e com média a alta amplitude	

A Fácies de Radar I exhibe um padrão de refletores subparalelos, localmente entrecruzados, e com baixa amplitude. Nesta fácies de radar os refletores aparecem com um certo grau de atenuação em toda extensão do radargrama, o que foi atribuído à presença significativa de água, tendo em vista que a aquisição da linha foi realizada em um período chuvoso.

A Fácies de Radar II apresenta refletores com maior amplitude do que os da Fácies de Radar I, podendo representar uma menor atenuação das ondas de radar pela água. Também é observado um padrão entrecruzado nos refletores, que pode ser característico de padrões sedimentares, como estratificações cruzadas ou geometrias lenticulares, como também pode ser ocasionado pela presença de diversas fraturas no pacote sedimentar. Os refletores desta fácies de radar apresentam-se, por vezes, descontínuos, o que também pode ser ocasionado tanto pela geometria dos pacotes sedimentares quanto pela presença de falhas e fraturas.

A Fácies de Radar III exhibe refletores subparalelos, localmente entrecruzados, crenulados e com alta amplitude. O aspecto crenulado pode ser explicado pela presença de falhas e fraturas, que conferem uma aparência caótica aos refletores, ou pela geometria dos pacotes sedimentares (quanto mais lenticular mais ondulado serão os refletores).

A Fácies de Radar IV exhibe um padrão de refletores paralelos e contínuos, com média a alta amplitude. O padrão mais contínuo e paralelo pode representar uma geometria mais tabular dos pacotes sedimentares.

A Fácies de Radar V possui refletores ondulados, com aspecto crenulado, e baixa amplitude. O aspecto crenulado pode ser fruto da geometria lenticular dos pacotes sedimentares ou associado à presença de estruturas deformacionais.

Por fim, a Fácies de Radar VI possui refletores irregulares, de média a alta amplitude. O fator mais relevante para diferenciação entre as fácies de radar VI e III foi a diferença de amplitude.

5.2. Estruturas de deformação

Durante a análise do radargrama (Figura 14), foram identificadas diversas estruturas de deformação, interpretadas com base na ruptura e descontinuidade dos refletores.

Destacam-se no radargrama analisado duas feições principais interpretadas como falhas normais, com mergulhos opostos, para norte (D1) e para sul (D2). Estas feições serviram de limite para a separação de algumas unidades de radar. Falhas com menor rejeito também foram identificadas no radargrama, porém não serviram de limite para unidades de radar, uma vez que não provocaram mudanças bruscas na continuidade dos refletores.

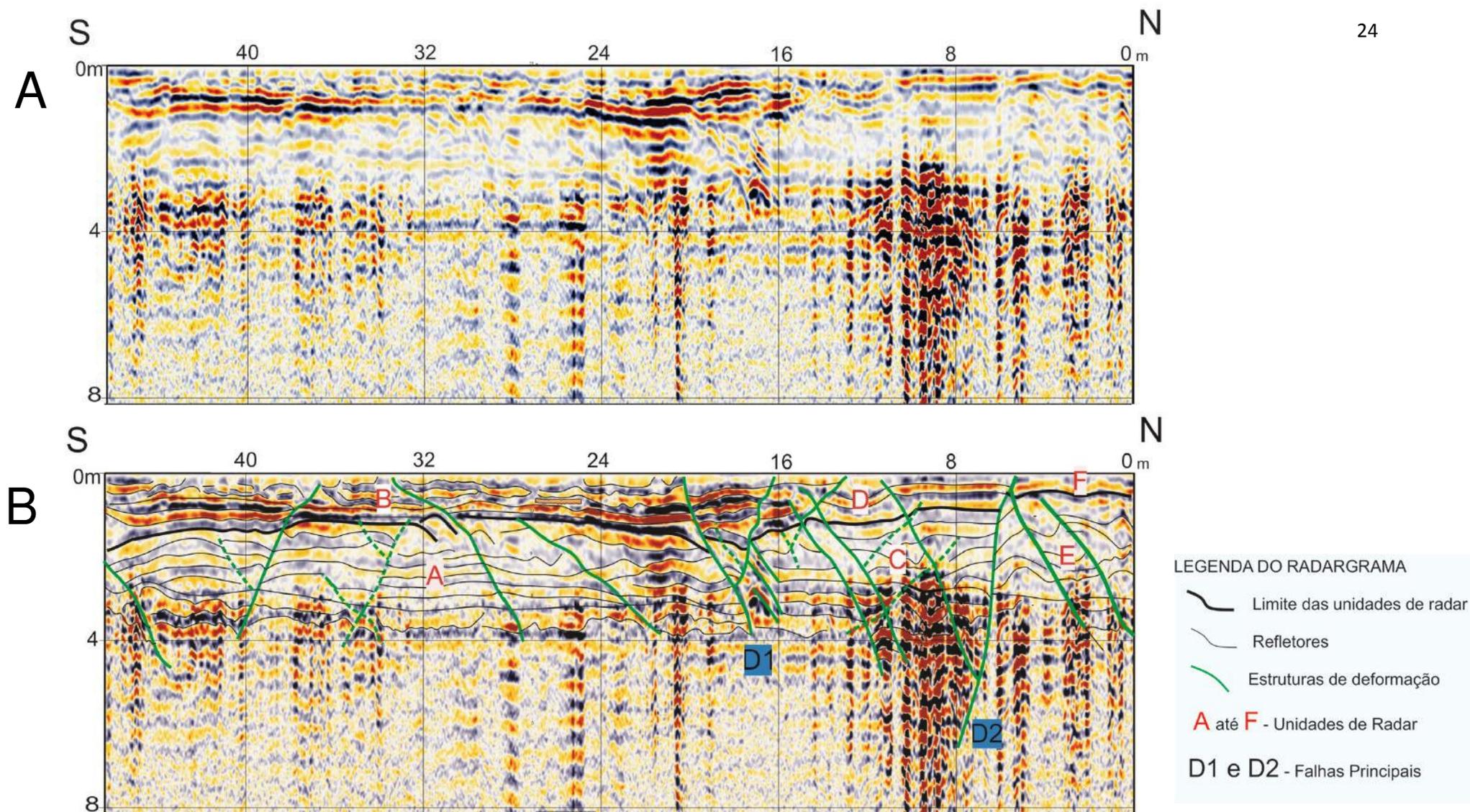


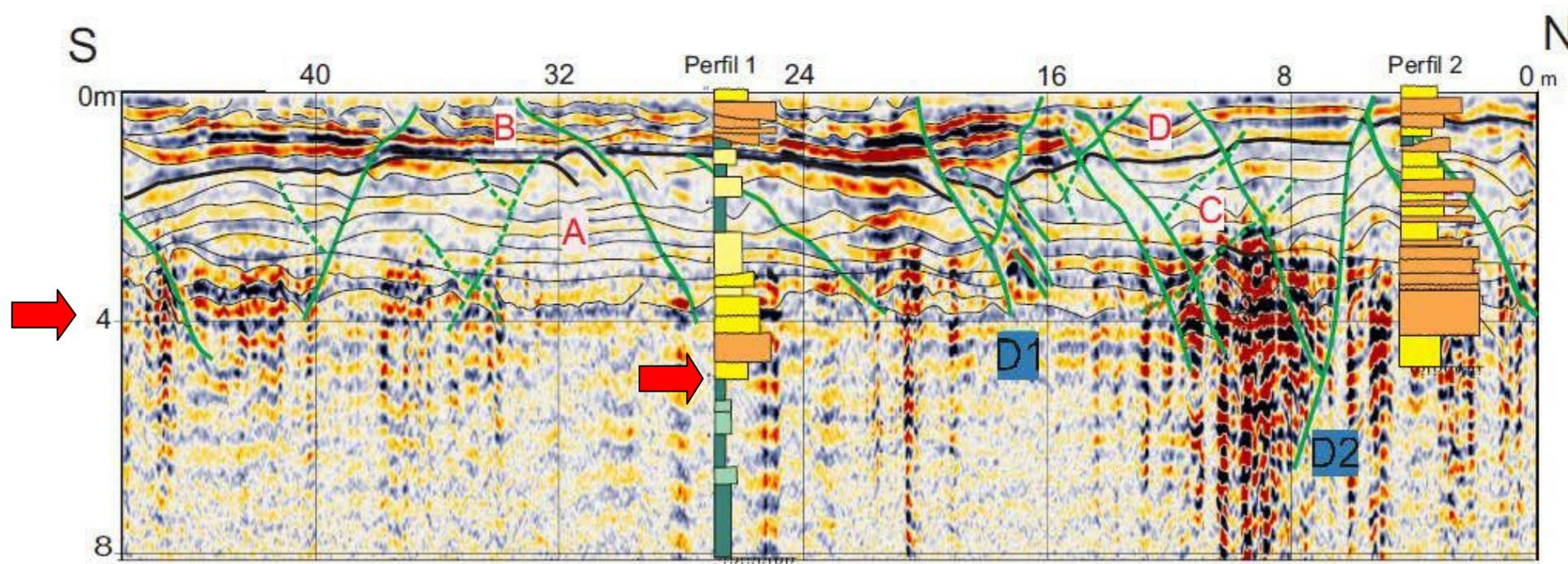
Figura 14: A) Radargrama não-interpretado B) Radargrama com a interpretação das unidades de radar e estruturas de deformação identificadas.

5.3. Unidades de Radar

O radargrama possui dois padrões de reflexão principais. No topo, os refletores apresentam maior amplitude e maior continuidade, enquanto que, abaixo, verifica-se um padrão de reflexão com menor amplitude. A forte atenuação da reflexão pode ser associada a uma considerável percolação de água no material, já que a aquisição foi realizada em um período chuvoso. De acordo com Porsani (1999), tal atenuação não é comum em unidades arenosas secas, pois a permeabilidade dielétrica e a condutividade elétrica são baixas em arenitos secos (ver Tabela 1).

Nota-se uma perda significativa de sinal aos 4 metros, não sendo possível identificar com precisão os refletores. Tal resultado é condizente com a frequência da antena utilizada, já que, segundo Porsani (1999), o alcance de uma antena de 200 MHz é de aproximadamente 4 metros em materiais arenosos.

Considerando a correlação do radargrama com os perfis litológicos, foi observada uma inconsistência: na profundidade onde houve a perda significativa de sinal no radargrama, o perfil litológico (perfil 1) apresenta um intervalo composto por arenitos médios a grossos (Figura 15), tipo de litologia que não costuma gerar atenuações deste tipo. Seria esperada a atenuação do sinal em camadas argilosas, que apresentam condutividade elétrica mais alta do que em arenitos, com maior efeito dissipativo nas ondas eletromagnéticas (Porsani, 1999). Ainda de acordo com o perfil 1, há um intervalo relativamente espesso de argilitos na profundidade de 5 metros (Figura 15). A partir dessas informações, optou-se por ajustar o intervalo vertical do radargrama com base no perfil litológico, de modo a associar a atenuação do sinal eletromagnético ao intervalo de argilitos (Figura 16). Como o afloramento é heterogêneo e foi utilizada uma velocidade constante para todo pacote sedimentar, este tipo de ajuste se fez necessário.



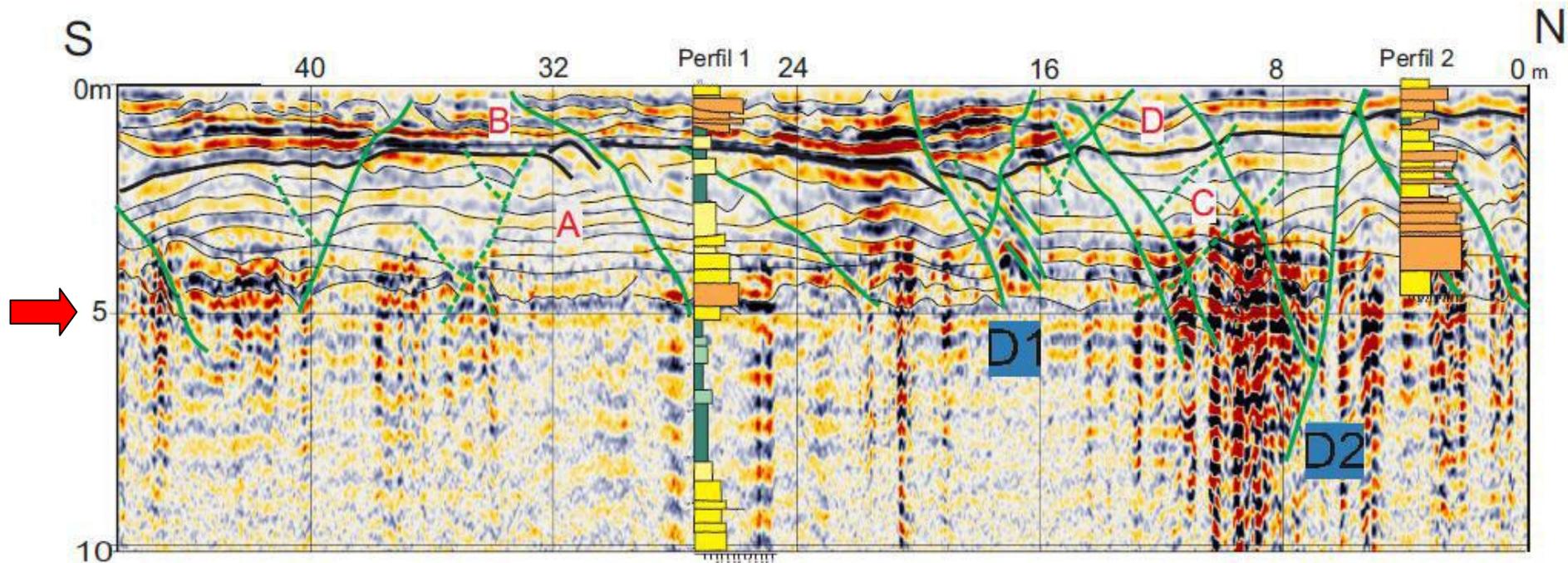
LEGENDA DO RADARGRAMA

-  Limite das unidades de radar
-  Refletores
-  Estruturas de deformação
- A** até **F** - Unidades de Radar
- D1** e **D2** - Falhas Principais

Legenda

-  Argilito
-  Siltito argiloso
-  Arenito fino
-  Arenito médio a grosso
-  Conglomerado

Figura 15: Radargrama interpretado, com os perfis litológicos 1 e 2 cedidos por Ingrid Barreto Maciel. As setas vermelhas indicam a inconsistência entre a atenuação do sinal eletromagnético na profundidade de 4 metros e o contato entre intervalos de arenitos e argilitos na profundidade de 5 metros.



LEGENDA DO RADARGRAMA

-  Limite das unidades de radar
-  Refletores
-  Estruturas de deformação
- A** até **F** - Unidades de Radar
- D1** e **D2** - Falhas Principais

Legenda

-  Argilito
-  Siltito argiloso
-  Arenito fino
-  Arenito médio a grosso
-  Conglomerado

Figura 16: Radargrama interpretado, com os perfis litológicos 1 e 2 cedidos por Ingrid Barreto Maciel. A seta vermelha indica o ajuste do intervalo vertical do radargrama ao contato entre intervalos de arenitos e argilitos na profundidade de 5 metros.

Com base nos principais aspectos observados no radargrama (fácies de radar e estruturas de deformação), foram definidas seis unidades de radar (Tabela 5 e Figura 14).

Tabela 6: Unidades de Radar, com as fácies de radar que as caracterizam e os principais aspectos litológicos relacionados.

<u>Unidade de Radar</u>	<u>Fácies de Radar</u>	<u>Aspectos litológicos</u>
A	I, III e V	Intercalação de argilitos e arenitos finos no topo e intercalação de arenitos grossos e conglomerados na base
B	II e IV	Intercalação de arenitos grossos e conglomerados
C	I, III e IV	Intercalação de argilitos e arenitos finos no topo e intercalação de arenitos grossos e conglomerados na base
D	III e IV	Intercalação de arenitos grossos e conglomerados
E	V	Intercalação de arenitos grossos e conglomerados
F	II	Intercalação de arenitos grossos e conglomerados

No topo do radargrama, na parte sul da seção, foi individualizada a Unidade de Radar “B”, limitada no topo pela superfície do terreno; na base, com a Unidade de Radar “A”, por um refletor de alta amplitude; e lateralmente pela falha D1. Apresenta refletores descontínuos típicos da Fácies de Radar II e, em sua base, refletores paralelos típicos da Fácies de Radar IV.

A Unidade de Radar “A” é limitada lateralmente pela falha D1 e seu limite basal não é reconhecido, devido à perda do sinal eletromagnético. Possui refletores da Fácies de Radar I, na parte central da unidade; da Fácies de Radar III, próximo à falha D1; e da Fácies de Radar V, na parte sul da unidade. Próximo à falha D1, observa-se a mudança no padrão de reflexão, da Fácies de Radar I para a Fácies de Radar IV, o que pode ser característico de acumulações de óxido de ferro nas proximidades da falha, o que aumentaria a amplitude de sinal.

A Unidade de Radar “D” é limitada no topo pela superfície do terreno e lateralmente pelas falhas principais D1 e D2, possuindo refletores típicos das fácies de radar III e IV. Os refletores típicos da Fácies de Radar III se encontram nas zonas mais deformadas da unidade, ou seja, nos locais com maior concentração de falhas ou fraturas.

Logo abaixo da Unidade de Radar “D” encontra-se a Unidade de Radar “C”, que também é limitada lateralmente pelas falhas principais D1 e D2. Esta unidade contém refletores da Fácies de Radar I, na parte central da unidade; da Fácies de Radar III, próximo à falha D2; e da Fácies de Radar IV, próximo à falha D1. As fácies de radar III e IV ocorrem sempre nas proximidades das falhas principais, onde há a presença de diversas falhas ou fraturas.

A Unidade de Radar “F” é limitada no topo pela superfície do terreno; lateralmente pela falha D2; e na base, com a Unidade de Radar “E”, por uma superfície plana. Possui refletores típicos da Fácies de Radar II.

A Unidade de Radar “E” é limitada lateralmente pela falha D2, apresentando refletores típicos da Fácies de Radar V.

Os limites entre as unidades de radar foram reconhecidos como de dois tipos: limites estratigráficos (entre as unidades A e C, C e D, e E e F); e limites estruturais, definidos pelas falhas D1 e D2 (entre as unidades A e C, B e D, C e E, e D e F).

As unidades de radar “A”, “B”, “C” e “D” puderam ser correlacionadas com o perfil estratigráfico 1 e as unidades de radar “E” e “F” foram correlacionadas com o perfil estratigráfico 2. As unidades “A” e “C” são compostas por uma intercalação de argilitos e arenitos finos no topo e uma intercalação de arenitos grossos e conglomerados na base. Os depósitos com granulometria mais grossa na base conferem uma maior amplitude aos refletores basais. As unidades “B” e “D” são compostas por uma intercalação de arenitos grossos e conglomerados. A geometria lenticular dos pacotes conglomeráticos pode explicar o aspecto mais descontínuo dos refletores na Unidade “B”, enquanto a presença de falhas e fraturas condicionou o aspecto crenulado dos refletores em algumas porções da Unidade “D”. As unidades “E” e “F” são compostas por uma intercalação de arenitos grossos e conglomerados e, assim como a Unidade “B”, a presença de refletores mais ondulados e crenulados pode ser condicionada pela geometria lenticular dos pacotes conglomeráticos.

5.4. Comparação entre a seção do afloramento e o radargrama

Alguns aspectos observados no radargrama puderam ser bem correlacionados à seção geológico-estrutural elaborada por Maciel *et al.* (2015) – Figura 17. A comparação levou em conta a semelhança com relação à geometria, a distância relativa entre os objetos correlacionados e os aspectos litológicos de cada Unidade de Radar.

Destacam-se, nesta correlação, o contato entre as unidades “A” e “B” e a presença das falhas principais D1 e D2, que aparentam ser mais verticalizadas no radargrama devido ao processamento da linha e ao exagero vertical. A falha D2 pode ser correlacionada com a falha principal (F2) descrita por Maciel *et al.*, (2015). Estas feições são muito bem marcadas tanto no radargrama quanto na seção geológico-estrutural.

O aspecto mais destoante na comparação entre a seção geológico-estrutural e a interpretação do radargrama está no abatimento das camadas entre as falhas D1 e D2, que na seção geológico-estrutural está para norte, enquanto no radargrama está para sul. Isto pode ser explicado devido à diferença de resolução entre a seção e o radargrama e a profundidade atingida pelo levantamento com o GPR. Como o radargrama possui um nível de detalhe maior que o da seção geológico-estrutural e o levantamento com o GPR não atingiu a base do afloramento, possivelmente estão registrados no radargrama estruturas de deformação secundárias presentes na porção superior da feição principal de abatimento limitada pelas falhas D1 e D2.

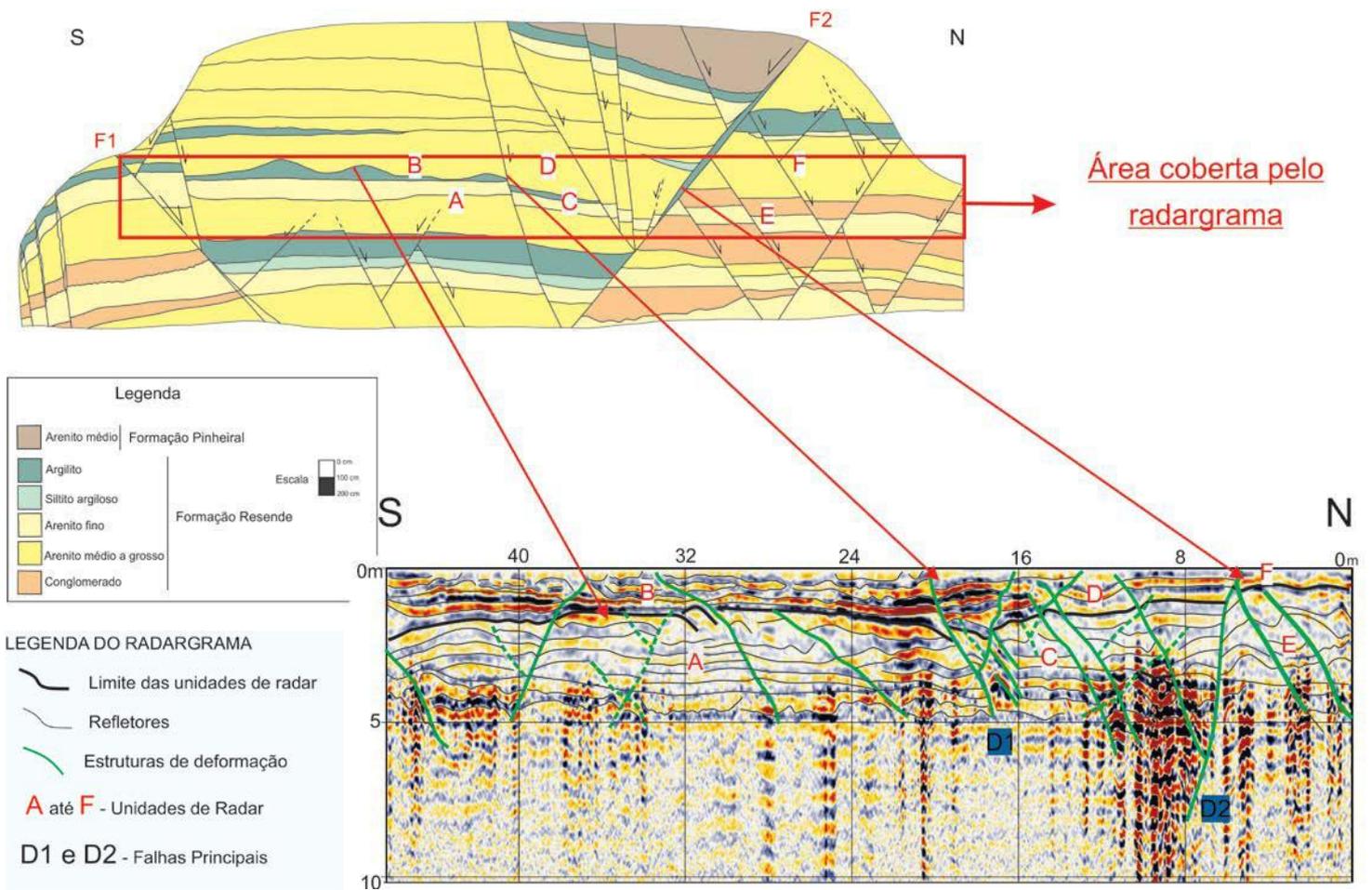


Figura 17: Comparação entre a seção geológico-estrutural produzida por Maciel *et al.* (2015) e a interpretação do radargrama realizada no presente estudo.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da caracterização das fácies de radar foi possível observar que os aspectos como ruptura e descontinuidade dos refletores das fácies de radar III e VI foram controlados pelos elementos deformacionais. Falhas e fraturas condicionaram a feição irregular e crenulada dos refletores. As demais fácies de radar possuem aspectos controlados pela granulometria dos pacotes sedimentares (quanto maior a granulometria, mais crenulados são os refletores) e pela geometria dos pacotes sedimentares (quanto mais lenticulares, mais descontínuas são as reflexões de radar). A umidade no substrato dificultou a penetração do sinal a partir de 2,5 metros de profundidade, atenuando assim uma parte do radargrama.

A identificação dos elementos deformacionais no radargrama foi bem sucedida, pois diversas falhas e outras estruturas rúpteis foram identificadas, sendo duas delas falhas principais (D1 e D2), que definiram limites estruturais de algumas unidades de radar.

As unidades de radar e os elementos deformacionais puderam ser relativamente bem correlacionados com a seção geológico-estrutural. Não foi possível correlacionar as falhas de menor rejeito, pois são abundantes tanto na seção geológico-estrutural quanto no radargrama, sendo assim difícil afirmar com precisão a posição de cada estrutura.

A antena de 200MHz alcançou boa resolução até a profundidade de 5 metros, coerente com o alcance previsto por Porsani (1999) para esta frequência em materiais arenosos. Para um alcance maior de profundidade, recomenda-se a utilização de antenas com menor frequência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F. F. M. 1976. *The system of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil*. An. Acad. bras. Ci. (Supl.), 15-26.
- ANNAN, A. P. e COSWAY, S. W. 1992. *Ground Penetrating Radar Survey Design. Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*. SAGEEP'92, April 26-29, 1992, Oakbrook, IL, pp. 329-35.
- ANNAN, A. P. 1996. *Transmission dispersion and GPR*. JEEG. Vol. 0, January 1996, pp. 125–136.
- ARAÚJO JUNIOR, Z. A. 2004. *Levantamento e processamento de dados de radar de penetração no solo (GPR) em um afloramento da Bacia de Resende - RJ*. 2004. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 48p.
- BAKER, P. L. 1991. *Fluid, lithology, geometry and permeability information from groundpenetrating radar for some petroleum industry applications*, Soc. Petrol.Eng. SPE-22976, pp. 277–286.
- GAWTHORPE, R.L.; COLLIER, R.E.L.; ALEXANDER, J.S. e LEEDER, M.R. 1993. *Ground penetrating radar: application to sand body geometry and heterogeneity studies*, in north, c.p and prosser, d.j. eds., *Characterization of fluvial Aeolian reservoir: Geol. Soc. London Spec. Publ.*, pp 421-432.
- HEILBRON, M.; VALERIANO, M.C.; VALLADARES, S.C. & MACHADO, N. 1995. *A orogênese Brasileira no segmento central da Faixa Ribeira, Brasil*. Revista Brasileira de Geociências, 25 (4): 249-266.
- KELLER, G. V. 1987. *Rock and mineral properties*. In M. N. Nabighian, Ed., *Electromagnetic methods in applied geophysics-Theory*: Soc. Expl. Geophys.
- MACIEL, I. B.; MELLO, C .L.; SILVA, A. T.; MORAES, A.; VOGEL, S. N.; RODRIGUES, J. R. S. S. 2015. *Caracterização de estruturas rúpteis em depósitos siliciclásticos pouco consolidados (Bacia de Volta Redonda, estado do Rio de Janeiro)*. In: XV Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 2015, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

- MADEIRA, C. V. 2002. *Estratigrafia e Arquitetura de Depósitos Sedimentares Quaternários no SE do Brasil, com base em Reflexões de Ondas de Radar*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 269p.
- MESQUITA, M. J. L. 2011. *Estimativas de Umidade no Solo Usando GPR*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geofísica, Universidade Federal do Pará. Belém, 61p.
- NEGRÃO, A .P. 2014, *Evolução Tectonossedimentar e Deformação Rúptil Cenozoica da Região da Bacia Sedimentar de Volta Redonda (Segmento Central do Rifte Continental do Sudeste do Brasil, RJ)*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 249p.
- NEGRÃO, A. P.; RAMOS, R. R. C.; MELLO, C. L.; GOMES, B. L.; SANSON, M. S. R. 2015, *Cartografia Geológica, Estratigrafia e Tectônica do Cenozoico da Região das Bacias de Resende e Volta Redonda (Segmento Central do Rifte Continental do Sudeste do Brasil, Rj)*. In: 14º Simpósio de Geologia do Sudeste - Geosudeste 2015, 2015, Campos do Jordão. A Importância dos Recursos Naturais na Economia Brasileira, 2015.
- PORSANI, J. L e RODRIGUES, A.R., 1995. *O método GPR aplicado à caracterização de reservatórios: um exemplo na Bacia Potiguar- RN*. In: Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 4, 1995, Rio de Janeiro. Resumos expandidos, Rio de Janeiro: SBGf, v.2, p.843-845.
- PORSANI, J. L. 1999. *Ground penetrating radar (GPR): proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado-SP*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências da UNESP, Campus de Rio Claro-SP, Brasil, 145p.
- POWERS, M. H. 1997. *Modeling frequency-dependent GPR: The Leading Edge*. 16, p. 1657-1662.
- RICCOMINI, C. 1989. *O Rift continental do sudeste do Brasil*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 256 p.

- RICCOMINI, C; SANT'ANNA, L.G.; FERRARI, A.L. 2004. *Evolução geológica do Rift continental do sudeste do Brasil*. In: Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C.D.R.; Brito-Neves, B.B. (Ed.). *Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, São Paulo, p. 383-405.
- RODRIGUES, L. H. O. 2004. *Levantamento geofísico com radar de penetração no solo (GPR) visando caracterização estrutural de um afloramento na Bacia de Resende – RJ*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 54p.
- SANSON, M. S. R. 2006. *Sistemas Depositionais Aluviais e Tectônica Cenozóica na Região de Volta Redonda (RJ) – Rift Continental do Sudeste do Brasil*. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 151 p.
- SANSON, M. S. R.; RAMOS, R. R. C. & MELLO, C. L. 2006. *Bacias Sedimentares Brasileiras – Bacia de Volta Redonda*. Phoenix, 88: 1 – 6.
- VAN OVERMEREN, R.A. 1998. *Radar Facies of unconsolidated sediments in the Netherlands: a radar stratigraphy interpretation method for hydrogeology*. *Journal of Applied Geophysics*. 40 (1-3): 1-18.
- ZALÁN, P.V & OLIVEIRA, J.A.B. 2005. *Origem e evolução estrutural do Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste do Brasil*. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 13(2): 269-300.