



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS**

Reginaldo Lemos

**Aplicação do Georadar (GPR) ao estudo de estratigrafia rasa
no Parque Estadual de Vila Velha - PR**

Trabalho de conclusão de curso de Geologia da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para obtenção do título de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Accioly Teixeira de Oliveira

Florianópolis
2017

Reginaldo Lemos

**Aplicação do Georadar (GPR) ao estudo da estratigrafia rasa
no Parque Estadual de Vila Velha - PR**

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado (a) adequado (a) para obtenção do Título de Bacharel em Geologia, e aprovado em sua forma final pelo curso de graduação em geologia.

Florianópolis, 7 de dezembro de 2017.

Dr. Marivaldo dos Santos Nascimento
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Dr. Marcelo Accioly Teixeira de Oliveira
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr.^a Manoela Bettarel Bállico
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Fernando Jacques Althoff
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Deixo os meus sinceros agradecimentos à minha mãe, que mesmo distante sempre me apoiou.

Ao meu orientador, Marcelo Accioly Teixeira de Oliveira, pelos conhecimentos transmitidos, discussões e oportunidades oferecidas.

Agradeço a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), pela infraestrutura e apoio institucional.

Ao Instituto Ambiental do Paraná (IAP), por autorizar a realização de pesquisas dentro do Parque Estadual de Vila Velha.

Ao Laboratório de Oceanografia Costeira (LOC), pelo empréstimo do GPS para realizar o levantamento topográfico.

Aos membros da banca, professora Manoela Bettarel Bállico e professor Fernando Jacques Althoff pelas contribuições e pelo tempo dedicado para a avaliação deste trabalho.

Aos colegas do curso de geologia, em especial aos “Rockfellas” pela convivência durante esses anos.

Aos colegas do Laboratório de Geodinâmica Superficial (LAGES), que ajudaram nas etapas de campo e laboratório.

A PETROBRAS, que por meio do PFRH-PB240/UFSC, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), que por meio do projeto Aplicação do Georadar à estratigrafia de depósitos coluviais e aluviais quaternários: estudos de caso associados a cambissolos e neossolos em ambientes altimontanos e planálticos brasileiros, viabilizaram o auxílio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos moradores das Repúblicas: Orfanato, Al Capone e Casa Vermelha, que se tornaram grandes amigos durante essa longa caminhada.

E finalmente, agradeço a você Elba, que sempre teve um grande sorriso estampado no rosto, e com quem sempre pude contar.

No Meio do Caminho

“No meio do caminho tinha uma pedra
tinha uma pedra no meio do caminho
tinha uma pedra
no meio do caminho tinha uma pedra.
Nunca me esquecerei desse acontecimento
na vida de minhas retinas tão fatigadas.
Nunca me esquecerei que no meio do caminho
tinha uma pedra
tinha uma pedra no meio do caminho
no meio do caminho tinha uma pedra”.

(Carlos Drummond de Andrade, 1928)

RESUMO

Neste trabalho são apresentadas as contribuições do método georadar (GPR) aplicado ao estudo da estratigrafia rasa e fraturas. A área de estudo está localizada no Parque Estadual de Vila Velha, com foco na borda leste. A geologia da área é formada por arenitos quartzosos de coloração clara, médios a grossos, feldspáticos e/ou caulíníticos pertencentes a Formação Furnas, folhelhos de coloração cinza, contendo fósseis de plataforma marinha rasa e lentes de arenito fino da Formação Ponta Grossa, arenitos, diamictitos e folhelhos, intercalados isoladamente por lentes arenosas pertencentes a Formação Lagoa Azul, conglomerados e arenitos avermelhados mal selecionados, passando para folhelhos, ritmitos e diamictitos, pertencentes à Formação Campo Mourão (arenito Vila Velha), e depósitos quaternários indiferenciados. Os perfis foram levantados com objetivo de identificar a variação litológica, e fraturas associadas. Para isso foram feitos levantamentos com antena blindada monoestática de 200 MHz e antenas não blindadas de baixa frequência, 80 MHz. Após o processamento e interpretação dos radargramas foi possível individualizar duas superfícies discordantes de origem erosiva, doze unidades de radar e sete tipos de refletores associados às litologias presentes, outro atributo descrito foram as feições hiperbólicas que ocorrem quando há mudanças entre as unidades de radar, superfícies erosivas, zonas de falha e clastos presentes nas rochas.

Palavras-chave: GPR. Grupo Paraná. Grupo Itararé.

ABSTRACT

This paper presents the contributions of the georadar method (GPR) applied to the study of shallow stratigraphy and fractures. The study area is located in the Vila Velha State Park, with a focus on the eastern border. The geology of the area is formed by quartz sandstones of light color, medium to thick, feldspar and / or kaolinite rocks of the Furnas Formation, shales of gray color, containing shallow marine platform fossils and fine sandstone lenses of the Ponta Grossa Formation, sandstones, diamictites and shales, isolated by sand lenses belonging to Lagoon Azul, conglomerates and poorly selected reddish sandstones, passing to shales, rhythmites and diamictites, belonging to the Campo Mourão Formation (Vila Velha sandstone), and undifferentiated quaternary deposits. The profiles were collected with the objective of identifying the lithological variation, and associated fractures. In order to do so, we performed surveys with a 200 MHz monostatic shielded antenna and 80 MHz low frequency unshielded antennas. After the processing and interpretation of the radargrams, it was possible to identify two discordant surfaces of erosive origin, twelve radar units and seven types of associated reflectors to the present lithologies, another attribute described was the hyperbolic features that occur when there are changes between the radar units, erosive surfaces, fault zones and clasts present in the rocks.

Keywords: GPR . Paraná Group. Itararé Group.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Localização do Parque Estadual de Vila Velha. -----	15
Figura 2 - Mapa geral da Bacia do Paraná destacando os afloramentos do Gp. Itararé/Paraná e a área de estudo. -----	16
Figura 3 - Área de estudo com a localização das linhas GPR . -----	17
Figura 4 - Carta Estratigráfica da Bacia do Paraná, com destaque para os grupos presentes no PEVV, retângulo em vermelho. -----	20
Figura 5 - Mapa geológico regional, com a localização do Parque Estadual de Vila Velha. -----	21
Figura 6 - Síntese da evolução da nomenclatura estratigráfica do Gp Itararé. -----	25
Figura 7 - Coluna estratigráfica do Gp. Itararé. -----	26
Figura 8 - Seção regional com a integração entre as sequências definidas para o Grupo Itararé e sua classificação litoestratigráfica em subsuperfície. -----	28
Figura 9 - Afloramento do arenito Furnas no PEVV. -----	29
Figura 10 - A) Folhelho fóssilífero da Fm. Ponta Grossa ; B) Destaque para impressão do fóssil. -----	30
Figura 11 - Mapa geológico do Parque Estadual de Vila Velha, o retângulo preto indica a área aproximada do local de estudo. -----	31
Figura 12 - Mapa ilustrando a subdivisão das unidades litológicas do arenito Vila Velha, com destaque para o limite leste do PEVV. -----	33
Figura 13 - Seção de correlação estratigráfica entre perfis verticais levantados. -----	34
Figura 14 - Sistema GPR : A) Controladora; B) Antena de 200 MHz blindada; C) Módulos eletrônicos das antenas; D) Sistema GPR de baixa frequência não blindado. -----	37
Figura 15 - Aquisição pela método perfil de reflexão. -----	44
Figura 16 - Técnicas de sondagem por velocidade; A) Aquisição pela método CMP; B) Aquisição pela método WARR. -----	44
Figura 17 - Localização das linhas de caminhamento com GPR na borda leste do PEVV. -----	46
Figura 18 - A) Sistema GPR com antenas de baixa frequência (80 MHz); B) Detalhe da controladora; C) Módulo da antena receptora conectada ao odômetro. -----	47
Figura 19 - GPS usado no levantamento topográfico; A) Base receptora acoplado a um rádio externo para amplificar o sinal; B) Receptor rover e a coletora de dados. -----	47
Figura 20 - Parâmetros adotados para análise dos refletores. -----	49
Figura 21 - Refletores indentificados nos radargramas. -----	52

Figura 22 - Partes do radargrama da linha 3 (L3) destacando as superfícies erosivas identificadas nos radargramas e as unidades de radar adjacentes; em (A e B) perfil processado e (A' e B') perfil interpretado.

----- 53

Figura 23 - A) Vista geral do afloramento, onde se pode verificar os arenitos encontrados no perfil de caminhamento; B) Detalhe do arenito avermelhado; C) Detalhe do arenito esbranquiçado. ----- 56

Figura 24 - A) Vista geral do afloramento de folhelho fossilífero; B) Detalhe do pavimento (retângulo vermelho) contendo impressões de braquiópodes; C) Detalhe das impressões. ----- 57

Figura 25 - Perfil GPR linha 1 (L-1), radargrama adquirido com antena de 200 MHz, em (A e B) perfil processado e (A' e B') perfil interpretado onde foram desenhadas as superfícies que separam as unidades de radar, e o setor onde ocorre deformação rúptil, as setas vermelhas indicam a deformação e quebra dos refletores associados à camada que se deslocou ao longo do plano de falha.-----11

Figura 26 - Sondagem de ponto de controle, destacando a intercalação de depósito turfoso com camada de areias médias a grossas, onde está posicionada a escala fotográfica. A seta indica o topo do testemunho. 59

Figura 27 - Perfil GPR linha 2 (L-2), radargrama adquirido com antena de 200 MHz , em (A e B) perfil processado e (A' e B') perfil interpretado com destaque para as superfícies limitantes que separam as unidades de radar, e para o depósito aluvial; nessa figura ainda é possível observar a nítida a mudança de mergulho aparente das camadas do Furnas nos dois lados da canal.----- 60

Figura 28 - Afloramento localizado ao longo da estrada, ilustrando arenito amarelado intercalado por lentes arenosas.----- 63

Figura 29 - Setor de um radargrama não processado, os pontos vermelhos indicam a presença de hiperbóles isoladas ao longo da unidade 3. ----- 64

Figura 30 - Perfil GPR linha 3 (L-3), radargrama adquirido com antena de 200 MHz , em (A) perfil processado e (A') perfil interpretado onde foi desenhada a superfície erosiva S2, e a intersecção com a falha da Fortaleza, as setas vermelhas sinalizam a deformação e quebra dos refletores associados à camada que se deslocou ao longo do plano de falha; B) final do perfil GPR linha 3, radargrama processado; B') perfil interpretado destacando a superfície erosiva S1 e as unidades de radar adjacentes.----- 67

Figura 31 - Perfil GPR linha 3 (L-3), radargrama adquirido com antena de 200 MHz , em (A e B) perfil processado e (A' e B') perfil

interpretado destacando a irregularidade da superfície erosiva S2 e as unidades de radar adjacentes. -----	68
Figura 32 - Perfil GPR linha 4 (L-4), radargrama adquirido com antena de 80 MHz , em (A e B) perfil processado e (A' e B') perfil interpretado com destaque para as superfícies erosivas S1 e S2.-----	69
Figura 33 - Perfil GPR linha 4 (L-4), radargrama adquirido com antena de 80 MHz , em (A e B) perfil processado e (A' e B') perfil interpretado destacando a superfície erosiva S2 e as unidades de radar adjacentes. -	70
Figura 34 - Tipos de ruídos hiperbólicos observados nos radargramas não processados.-----	72
Figura 35 - Radargrama não processado, com destaque para as hiperbóles presentes ao longo das superfícies erosivas; associadas à falha da Fortaleza; e ao longo da unidade de radar 3. -----	72
Figura 36 - Atualização do mapa geológico do Parque Estadual de Vila Velha com base nos dados dos radargramas e nos mapas já existentes.	71

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Síntese das associações proposta para o Gp. Itararé.....	27
Tabela 2 - Síntese das unidades definidas para o arenito Vila Velha.....	35
Tabela 3 - Descrição e interpretação das liofácies do arenito Vila Velha.	35
Tabela 4 - Valores de constantes dielétricas e condutividades de alguns materiais geológicos em condição seca ou saturada.....	41
Tabela 5 - Etapas adotadas no processamento digital dos radargramas.	48
Tabela 6 - Síntese entre as unidades de radar e as unidades geológicas definidas por Vesely (2006).....	51
Tabela 7 - Síntese entre as unidades de radar e as unidades geológicas definidas por Vesely (2006).....	75
Tabela 8 - Dados de afloramentos compilados da literatura.....	84

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	13
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3. ÁREA DE ESTUDO	15
3.1. LOCALIZAÇÃO E ASPECTOS FISIOGRÁFICOS	15
4. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	19
4.1. BACIA DO PARANÁ	19
4.2. SUPERSEQUÊNCIA PARANÁ	22
4.2.1. Formação Furnas	22
4.2.2. Formação Ponta Grossa	23
4.3. SUPERSEQUÊNCIA GONDWANA I.....	24
4.3.1. Grupo Itararé	24
5. GEOLOGIA LOCAL	29
6. GPR (<i>GROUND PENETRATING RADAR</i>)	37
6.1. GEORADAR.....	37
6.2. ONDAS ELETROMAGNÉTICAS.....	38
6.2. EQUAÇÕES CONSTITUTIVAS.....	39
6.3.1. Condutividade elétrica (σ)	39
6.3.2. Permissividade dielétrica (ϵ)	40
6.3.3. Permeabilidade magnética (μ)	40
7. ATENUAÇÃO DO SINAL	41
8. AQUISIÇÃO DE DADOS	43
8.2. TÉCNICAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS GEOFÍSICOS.....	43
9. MATERIAIS E MÉTODOS	45
10. RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
10.1. INTERPRETAÇÃO ESTRATIGRÁFICA DE PERFIS DE RADAR (RADARGRAMAS).....	54
10.1.1. Perfil GPR linha 1 (L-1) - Fm. Campo Mourão (arenito	

Vila Velha).....	54
10.1.2. Perfil GPR linha 2 (L-2) - Falha associada à Fm. Furnas e aos depósitos Quaternários indiferenciados.....	57
10.1.3. Perfil GPR - linhas 3 (L-3) e 4 (L-4)-Fms. Lagoa Azul e Campo Mourão (arenito Vila Velha)	61
10.1.4. Feições hiperbólicas: ruídos significativos	71
10.1.5. Atualização do mapa geológico do PEVV.....	73
11. CONCLUSÕES	75

1. INTRODUÇÃO

A geofísica é uma ciência baseada em fundamentos físicos, que por meios instrumentais indiretos permite estudar o meio geológico, possibilitando inferir propriedades físicas intrínsecas aos solos e rochas (KEAREY et al., 2013). O Radar de Penetração do solo, conhecido também como georadar (GPR), é um instrumento geofísico que pode fornecer informações estratigráficas, estruturais, hidrológicas e sedimentológicas de subsuperfície rasa (até aproximadamente 50 m).

Semelhante à técnica de reflexão sísmica, que se baseia em registrar o tempo duplo de propagação (conhecido como *two-way-travel time* -TWTT) de um pulso sísmico (REYNOLDS, 2011), o GPR registra contrastes de impedância eletromagnética entre os materiais, por geração, transmissão, propagação, reflexão e recepção de pulsos eletromagnéticos de curta duração e alta frequência (entre 10 - 1000 MHz) (NEAL, 2004). A propagação e reflexão das ondas dependem, fundamentalmente, de três propriedades físicas dos materiais, no caso rochas e solos: condutividade elétrica, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética. Porsani (1999) destaca ainda o fato de a metodologia ser análoga à sísmica de reflexão, tanto no que toca aos princípios físicos quanto à metodologia de campo e laboratório.

Levando em consideração tais semelhanças, as etapas que servem de base ao processamento e interpretação da sísmica de reflexão, podem ser aplicadas ao GPR, (SANGREE e WIDMIER, 1979; YILMAZ, 2001; NEAL, 2004).

Inserida na Bacia do Paraná, a área de estudo localiza-se na borda leste do Parque Estadual de Vila Velha (PEVV), a geologia local apresenta predomínio de rochas sedimentares pertencentes à Fms. Furnas, Ponta Grossa, Lagoa Azul e Campo Mourão (arenito Vila Velha), além dessas formações ocorrem também os depósitos quaternários indiferenciados.

A Fm. Furnas é composta por arenitos quartzosos de coloração clara, médios a grossos, feldspáticos e/ou cauliniticos, com estratificação cruzada e níveis conglomeráticos; a Fm. Ponta Grossa é formada por folhelhos de coloração cinza, contendo fosseis de plataforma marinha rasa e lentes de arenito fino, (DINIZ, 1985; ASSINE, 1996; MILANI et al., 2007).

Depositada em ambiente subglacial a glaciomarinho, a Fm. Lagoa Azul é constituída por arenitos, diamictitos e folhelhos rítmicos, intercalados isoladamente por lentes arenosas no topo (FRANÇA et al., 1996).

Complementando a geologia local, Vesely (2006) propôs quatro unidades litoestratigráficas para a Fm. Campo Mourão (arenito Vila Velha), designadas da base para o topo de I, II, III e IV. A unidade I é interpretada como formada por depósitos de *outwash* subaquoso, gerando associação de conglomerados e arenitos mal selecionados, que gradam para folhelhos, ritmitos e diamictitos da unidade II, depositados em contexto glácio-marinho. As unidades III e IV são constituídas predominantemente de arenitos de coloração avermelhada com lentes de folhelho, associadas a fluxos de turbidez hiperpicnais, e frente deltaica com interação rio/ondas (VESELY et al., 2007).

Este trabalho trata da aplicação da metodologia de georadar à estratigrafia rasa (até aproximadamente 50 m de profundidade) das rochas locais, visando à identificação dos contatos litológicos, e fraturas de setores na borda leste do Parque Estadual de Vila Velha (PEVV), o qual se localiza na borda sudeste da bacia do Paraná. Pesquisas envolvendo o método GPR relacionadas à estratigrafia rasa e estruturas tectônicas são encontradas em; Rossetti et al. (2001); Rossetti (2003); Reiss et al. (2003); Souza (2010); Oliveira et al. (2012).

2. OBJETIVOS

Analisar o potencial da metodologia GPR na investigação da estratigrafia rasa e na definição de contatos por fraturas mapeadas em setores da borda leste do Parque Estadual de Vila Velha (PEVV).

2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

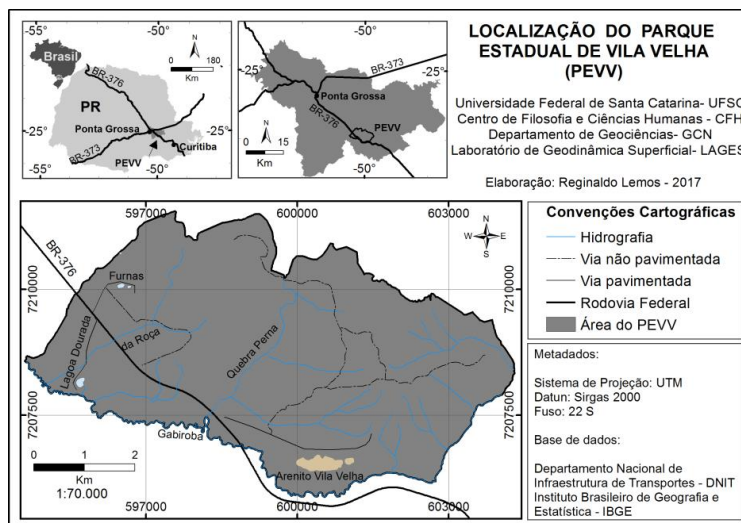
- Investigar os contatos litológicos em subsuperfície entre as formações presentes na borda leste do PEVV.
- Gerar informação geofísica de alta resolução (GPR) das geometrias gerais dos depósitos sedimentares presentes no setor investigado.
- Aplicar a metodologia georadar no reconhecimento de fraturas em subsuperfície rasa, associadas às formações geológicas presentes no PEVV, com base na configuração, geometria e continuidade dos refletores presentes em radargramas obtidos com o GPR.
- Atualização do mapa geológico do PEVV.
- Disponibilizar à administração do Parque Estadual de Vila Velha os principais resultados que serão obtidos pelo projeto para complementar os dados geológicos locais.

3. ÁREA DE ESTUDO

3.1. LOCALIZAÇÃO E ASPECTOS FISIOGRÁFICOS

A área de estudo, Parque Estadual de Vila Velha (PEVV), está localizada entre as coordenadas geográficas 25°13' de latitude Sul e 50°01' de longitude Oeste, a cerca de 20 km a sudeste da cidade de Ponta Grossa, com acesso pela BR-376 e 90 km a noroeste de Curitiba, Figura 1.

Figura 1 - Localização do Parque Estadual de Vila Velha.



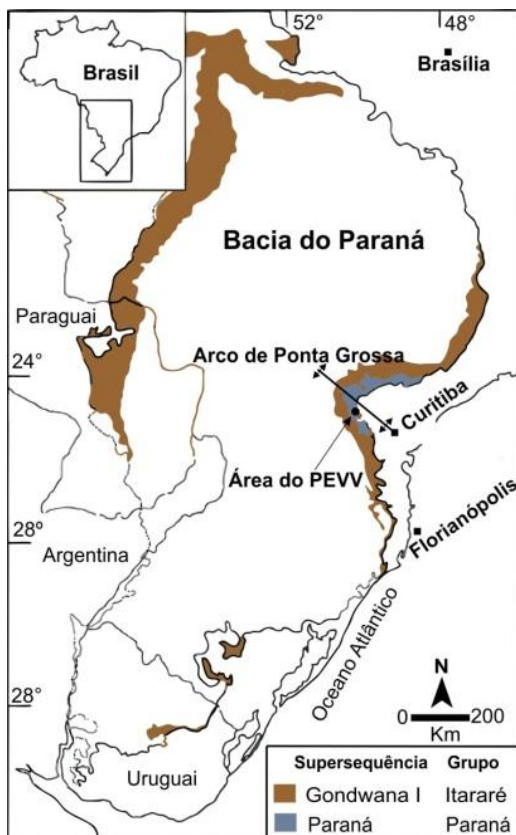
Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

O PEVV está inserido na Bacia do Paraná, situado no flanco sudoeste do Arco de Ponta Grossa, uma estrutura geológica de direção NW-SE com caimento no sentido NW, cujo arqueamento se estabeleceu durante o Mesozoico (Jurássico-Cretáceo, Ferreira, 1982), figura 2. Responsável pela compartimentação tectônica da Bacia do Paraná, este arqueamento colocou em exposição às unidades geológicas Paleozoicas, dando origem a um relevo escalonado em planaltos erosivos (primeiro, segundo e terceiro planalto paranaense), Melo (2004).

O PEVV situa-se no segundo planalto (no reverso da Escarpa devoniana), o qual se caracteriza por apresentar uma faixa média de 100

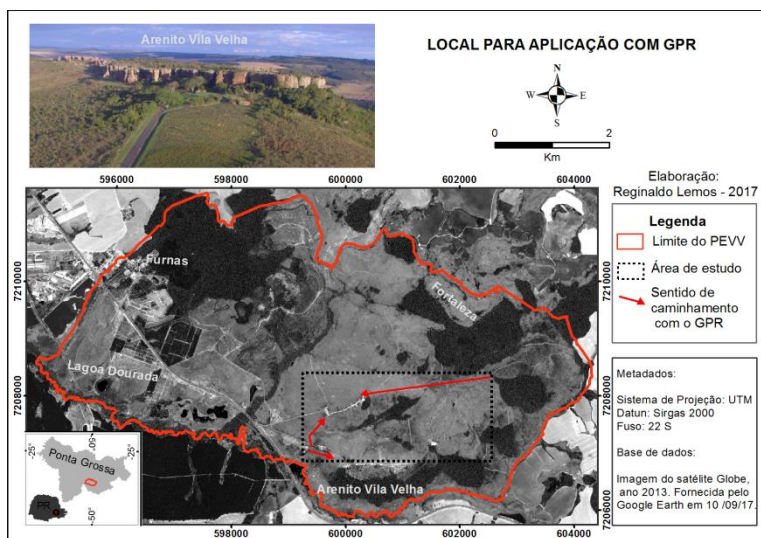
km de largura, limitada pela “Escarpa Triássica” (ou Escarpa Serra Geral) a oeste e pela “Escarpa Devoniana” a leste. A altitude média no local de estudo varia entre 800 e 1100 m. As aquisições com GPR realizadas concentraram-se próximas ao platô do arenito Vila Velha e Fortaleza, limite norte do parque, seccionando a falha da Fortaleza, no fundo do vale, que pode estar associado a esta falha, Figura 3.

Figura 2 - Mapa geral da Bacia do Paraná destacando os afloramentos do Gp. Itararé/Paraná e a área de estudo.



Fonte: Modificado de Milani e Ramos (1998) e Vesely et al. (2007).

Figura 3 - Área de estudo com a localização das linhas GPR .



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

4. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

4.1. BACIA DO PARANÁ

A Bacia do Paraná, classificada como uma bacia intracratônica, abrange área de aproximadamente 1.400.000 km², dos quais 1.100.000 Km² estão em território brasileiro, e o restante distribuído pelo Paraguai, Argentina e Uruguai, (BERGAMASCHI, 1999). A forma geométrica da bacia se assemelha a uma elipse, com eixo maior N-S. A sua evolução ocorreu durante o Paleozoico e o Mesozoico, tendo origem em um golfo aberto para o Oceano Panthalasa. A bacia passou para uma depressão intracratônica devido ao movimento convergente entre o Gondwana e a crosta oceânica, Milani et al. (1998).

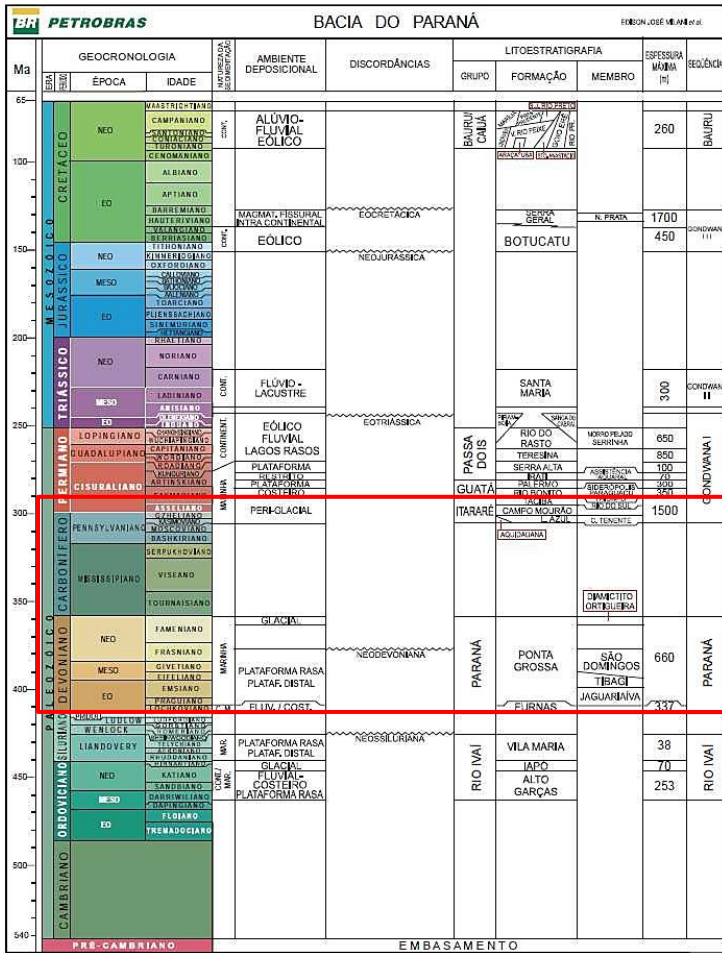
A bacia é preenchida por um unidade sedimentar-magmático do Ordoviciano Superior ao Cretáceo Superior, gerando empilhamento sedimentar de aproximadamente sete mil m, (MILANI et al., 2007). Ainda segundo esse autor, são reconhecidas seis unidades aloestratigráficas de segunda ordem ou supersequências, individualizadas por superfícies de discordância inter-regional (Fig. 4). Essas unidades são: 1) Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano); 2) Paraná (Devoniano); 3) Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico); 4) Gondwana II (Meso a Neotriássico); 5) Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e 6) Bauru (Neocretáceo). As três primeiras supersequências (Rio Ivaí, Paraná e Gondwana I) registram ciclos de transgressão e de regressão do nível do mar no Paleozoico, enquanto que as três últimas Gondwana II, Gondwana III e Bauru) são constituídas por sequências sedimentares continentais (Mesozoico) e associação de rochas ígneas.

Considerando esse contexto aloestratigráfico, as formações geológicas que ocorrem na área de estudo (Fig. 5) pertencem às seguintes supersequências, que ocorrem sotopostas a depósitos cenozoicos indiferenciados :

- Supersequência Paraná: Fm. Furnas e Ponta Grossa;
- Supersequência Gondwana I: Fm. Lagoa Azul e Campo Mourão, constituintes da base do Gp. Itararé.

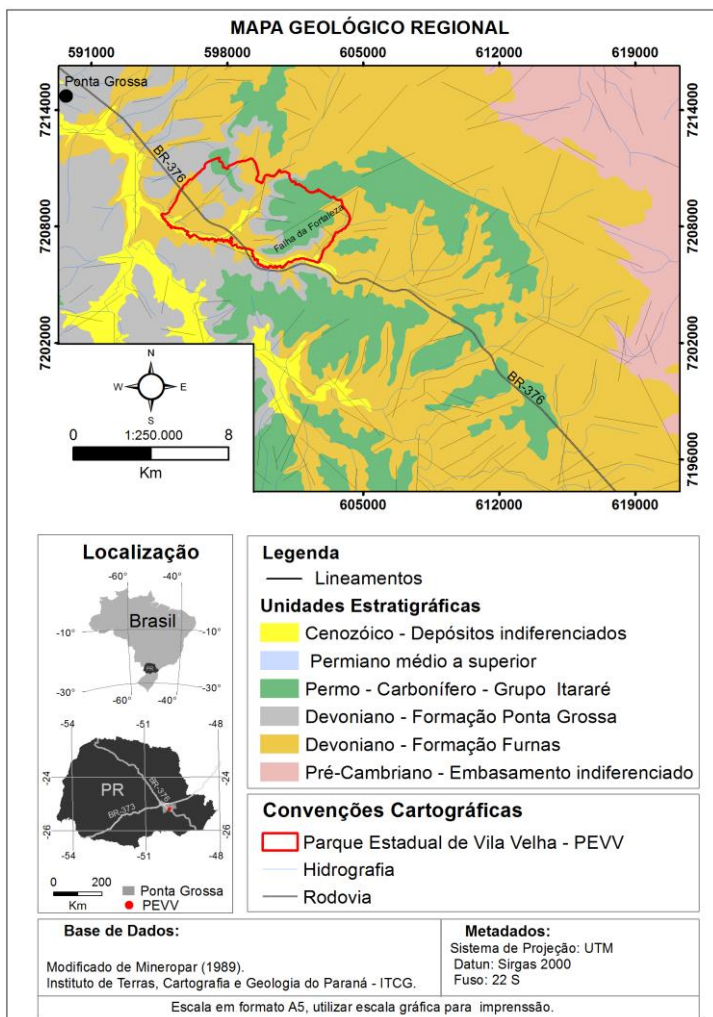
A seguir, descrevemos brevemente somente as supersequências acima, que ocorrem dentro dos limites do PEVV.

Figura 4 - Carta Estratigráfica da Bacia do Paraná, com destaque para os grupos presentes no PEVV, retângulo em vermelho.



Fonte: Modificado de Milani et al. (2007).

Figura 5 - Mapa geológico regional, com a localização do Parque Estadual de Vila Velha.



Fonte: Modificado de Mineropar (1989).

4.2. SUPERSEQUÊNCIA PARANÁ

Os sedimentos que constituem essa supersequência foram depositados durante o Devoniano, formando rochas cuja espessura atinge cerca de 900 m. Essas rochas são divididas entre duas formações, que representam o segundo ciclo transgressivo-regressivo da Bacia do Paraná: Fm. Furnas e Fm. Ponta Grossa. O contato inferior dessa supersequência ocorre de forma discordante sobre rochas ordovício-silurianas do Gp. Rio Ivaí, enquanto que o contato superior é marcado por uma discordância erosiva (conhecida como “pré-Itararé”), desenvolvida no final do Devoniano, que separa o topo do Gp. Paraná do Gp. Itararé. Em virtude disso, as rochas carboníferas do Gp. Itararé ocorrem em alguns locais em contato direto com as rochas da Fm. Furnas e, em outros locais, em contato com as rochas Fm. Ponta Grossa (Devoniano).

4.2.1. Formação Furnas

A Fm. Furnas é formada por camadas de geometrias tabulares, essencialmente arenosa, com espessura variando entre 250 e 300 m, cuja deposição começou no Devoniano inferior (Lochkoviana), (ASSINE, 1996), composta predominantemente por arenitos quartzosos de coloração clara, granulometria média a grossa, feldspáticos e/ou caulíníticos, com grãos angulosos a subangulosos. Ocorrem também leitos conglomeráticos e níveis micáceos. As estruturas presentes são caracterizadas por estratificações plano-paralelas, cruzadas tabulares e, secundariamente, acanaladas (ASSINE et al., 1994; ASSINE, 1996; ASSINE, 1999; MILANI et al., 2007).

Existe debate importante sobre o ambiente deposicional da Fm. Furnas, com visões que colocam em oposição interpretações por vezes associadas a ambiente fluvial entrelaçado ou anastomosados, e por vezes associadas a ambiente marinho raso. O tipo de contato da Fm. Furnas com a Fm. Ponta Grossa também é motivo de debate atualmente. As interpretações paleoambientais sugeridas na literatura para esse contato propõem: a) ambiente marinho-raso com contato concordante-transicional, (PETRI, 1948; SANFORD e LANGE, 1960); b) sistemas fluviais, transicionais e costeiros, com contato concordante-transicional (BERGAMASCHI, 1993); c) sistema deltaico influenciado por rios entrelaçados, em contato concordante-transicional (ASSINE et al., 1994); d) depósitos de sistema deltaico, construídos por rios entrelaçados.

dos retrabalhados por ondas e correntes de maré, em contato concordante-transicional (ASSINE, 1996); e) ambiente flúvio-costeiro, em contato transicional (MILANI et al., 2007), e f) mais recentemente, baseado em estudos de arquitetura deposicional, paleocorrentes e análise de fácies, Araújo (2016) propõe interpretação associada a sistema deposicional fluvial de rios entrelaçados, não abordando a natureza entre o contato da Fm. Furnas e Ponta Grossa.

Segundo Assine (1996), ainda a Fm. Furnas pode ser dividida em três unidades faciológicas distintas que sucedem verticalmente, de acordo com o padrão de paleocorrentes: a) **unidade I**, constituída por fácies areno-conglomeráticas (arenitos médios a muito grossos), com paleocorrentes para oeste, interpretada como depósitos de planícies aluviais costeiras; b) **unidade II**, predominantemente arenosa, com intercalações siltico-argilosas, com traços da icnofácies Cruziana, paleocorrentes unimodais para sudoeste, indicando deposição em ambiente marinho dominado por marés, sob ação de correntes oblíquas paralelas à linha de costa; c) **unidade III**, composta por arenitos médios a muito grossos, com níveis de seixos e calhaus, associada a um ambiente marinho raso sob ação de ondas.

Caracterizado por Petri (1948), o contato transicional entre o topo da Fm. Furnas e a base da Fm. Ponta Grossa foi identificado na cidade de Jaguariaíva. Esse contato é marcado pela presença de siltitos e arenitos finos intercalados por folhelhos fossilíferos, evidenciando sequência granodecrescente. Outro fator que atesta essa passagem gradativa entre as formações, é o aumento em unidades API (American Petroleum Institute) na leitura dos perfis de raios gama, indicativo de acréscimo nos teores de argila, Milani et al. (2007).

4.2.2. Formação Ponta Grossa

A individualização da Fm. Ponta Grossa se deve a Lange e Petri (1967), que a dividiram em três membros: Jaguariaíva, Tibagi e São Domingos. O membro Jaguariaíva, com aproximadamente 100 m de espessura, é constituído por folhelhos e folhelhos silticos fossilíferos, de idade Praguiano a Frasniano (ASSINE, 1996; BERGAMASCHI, 1999). O membro Tibagi (20-30 m de espessura), de idade Eifeliana (LANGE e PETRI, 1967), é constituído por arenitos lenticulares, de granulometria fina a muito fina, intercalados por siltitos, depositados em plataforma marinha sob ação de ondas (ASSINE et al., 1998). O Membro São Domingos (espessura 90 m), é formado predominantemente por

folhelhos intercalados por arenitos finos, encerrando o registro Devoniano (MILANI et al., 2007).

Essa unidade sedimentar representa um ciclo de transgressão e regressão marinha que recobriu a Fm. Furnas durante evento de subsidência da Bacia do Paraná, condicionado pela Orogenia Precordilheirana (MILANI et al., 1998). Tal ciclo foi marcado pela presença de fósseis de braquiópodes articulados e inarticulados, bivalves, gastrópodes, trilobitas e equinodermas, evidenciando que a deposição da Fm. Ponta Grossa ocorreu em um paleoambiente marinho raso (DINIZ, 1985; ASSINE, 1996).

4.3. SUPERSEQUÊNCIA GONDWANA I

A supersequência Gondwana I (Carbonífera-Eotriássica) é formada por empilhamento heterogêneo de estratos sedimentares com espessura estimada de 2.500 m, dividido entre: o Grupo Itararé e a Fm. Aquidauana; Grupo Guatá; Grupo Passa Dois; Formações Pirambóia e Sanga do Cabral (MILANI et al., 2007).

Os estratos glaciogênicos do Gp. Itararé, estão sotopostos à sucessão transgressiva do Gp. Guatá, composta por arenitos, siltitos e carvões de ambiente deltaico (Fm. Rio Bonito), e siltitos e folhelhos relacionados a evento de máxima transgressão (Fm. Palermo) (MILANI et al., 2007). De acordo com esse autor, acima da Fm. Palermo ocorre ainda o Gp. Passa Dois (Formações Irati, Serra Alta, Teresina, Corumbataí e Rio do Rastro), compondo seção regressiva representada por rochas sedimentares marinhas e transicionais.

A seguir, descrevemos brevemente somente as rochas do Grupo Itararé, que ocorrem dentro dos limites do PEVV.

4.3.1. Grupo Itararé

Formando a base da supersequência Gondwana I, o Gp. Itararé, possui espessura de aproximadamente 1500 m, com idades entre o Moscoviano (final) e o Sakmariense (início). Essas rochas depositaram-se em *onlap* de norte para sul, sobre a discordância pré-Itararé (MILANI et al., 1998). A presença de diamictitos maciços e estratificados, com clastos facetados e estriados; folhelhos e ritmitos com clastos dispersos; marcas

de estrias e sulcos glaciais indica que as rochas do Gr. Itararé se depositaram sob a influência de processos glaciomarinhas e glaciocontinentais (FRANÇA et al., 1996; VESELY 2006, 2011; VESELY et al., 2015).

A primeira tentativa de classificação dos estratos permocarboníferos da Bacia do Paraná foi feita por White (1908), que denominou essas rochas de série Tubarão, abrangendo os depósitos glaciais da base e os pós-glaciais de topo. Posteriormente, fundamentados em dados de afloramentos mapeados no estado de Santa Catarina e no Sul do Paraná, Schneider et al. (1974) propuseram uma divisão do Gp. Itararé nas formações Campo do Tenente, Mafra e Rio do Sul. Porém, a primeira proposta formal de subdivisão do Gp. Itararé para toda a bacia foi apresentada por França e Potter (1988). A partir da análise de dados de raios gama obtidos em poços profundos, esses autores reconheceram três ciclos granodécrescentes, formados por unidades basais arenosas e unidades de topo pelíticas, resultando em uma divisão do Gp. Itararé nas formações Lagoa Azul, Campo Mourão e Taciba (correlacionadas com a divisão de Schneider et al. (1974), seguida da Fm. Aquidauna, composta por camada arenosa avermelhada, que ocorre de forma restrita na borda leste da bacia, Figuras 6 e 7.

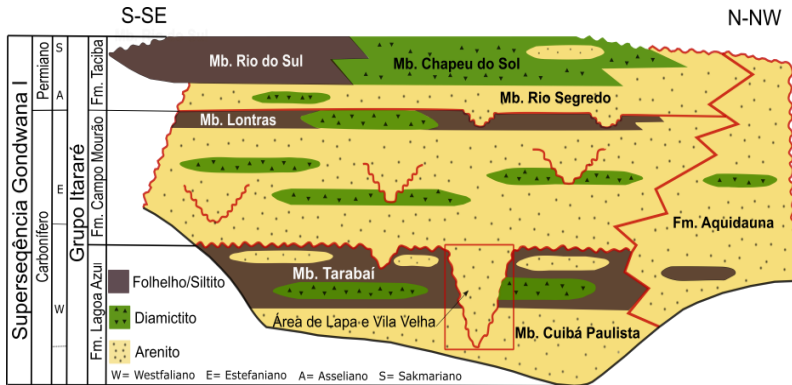
Figura 6 - Síntese da evolução da nomenclatura estratigráfica do Gp Itararé.

White (1908)		Schneider et al. (1974)		França e Potter (1988)	
Série Tubarão	Fm. Rio Bonito	Supergrupo Tubarão	Grupo Guatá	Grupo Itararé	Fm. Taciba
	Conglomerado glacial Orleans		Fm. Rio do Sul		Mb. Rio do Sul / Mb. Chapéu do Sol
	Arenitos e Folhelhos		Fm. Mafra		Mb. Rio Segredo
Fm. Campo do Tenente		Mb. Lontras			
					Fm. Lagoa Azul
					Mb. Tarabai
					Mb. Cuiabá Paulista

Milani et al. (1994)			Milani et al. (2007)		
Grupo Itararé	Fm. Taciba	Mb. Rio do Sul / Mb. Chapéu do Sol	Grupo Itararé	Fm. Taciba	Mb. Rio do Sul
	Fm. Campo Mourão	Mb. Rio Segredo		Fm. Campo Mourão	
	Fm. Lagoa Azul	Mb. Tarabai		Fm. Lagoa Azul	Mb. Campo do Tenente
		Mb. Cuiabá Paulista			Fm. Aquidauna

Fonte: Modificado de Vesely (2006).

Figura 7 - Coluna estratigráfica do Gp. Itararé.



Fonte: Modificado de França e Potter (1988) e França et al. (1996).

Fundamentados na sucessão vertical de fácies, Vesely e Assine (2004), reconheceram cinco sequências deposicionais com padrão vertical retrogradacional - progradacional. Essas sequências são limitadas no topo e na base por desconformidades associadas a ciclos de 3ª ordem, com duração estimada de 0,5 a 3 Ma. Segundo esses autores, a análise de paleocorrentes sugere deposição no sentido O-NO para as sequências 1 e 2 e para norte nas sequências 3, 4 e 5.

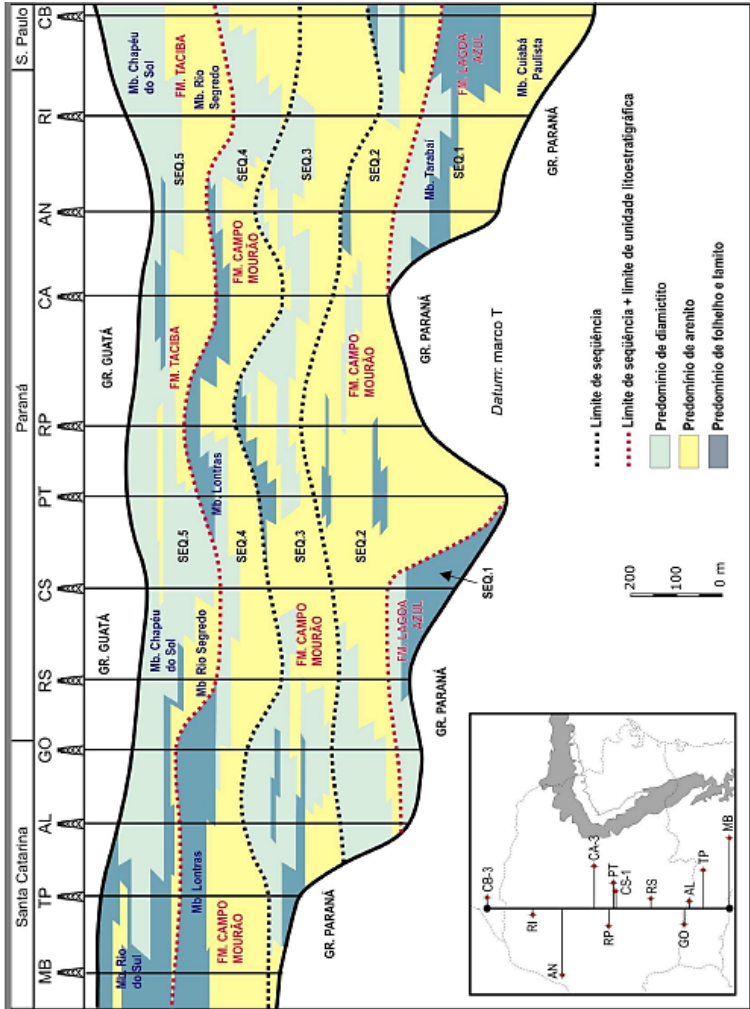
Com enfoque na porção centro - leste da Bacia do Paraná, de acordo com Vesely (2006), o Gp. Itararé é constituído por cinco litotipos: 1. Arenitos; 2. Diamictitos; 3. folhelhos e lamitos indiferenciados; 4. ritmitos e fácies heterolíticas, e 5. conglomerados. Esses litotipos são individualizados em 32 fácies, agrupadas em quatro associações genéticas (A, B, C e D), definindo cinco sequências deposicionais (1, 2, 3, 4 e 5) limitadas por desconformidades, que podem ser correlacionadas na faixa de afloramentos e em perfis de poços profundos. A Sequência 1 corresponde à Formação Lagoa Azul, as sequências 2, 3 e 4 referem-se à Fm. Campo Mourão e a Sequência 5 é correlata à Formação Taciba (Fig. 8). Ainda segundo este autor, esse arcabouço foi depositado em três tratos de sistemas, variando de glaciais a deglaciais (Tabela 1).

Tabela 1 - Síntese das associações proposta para o Gp. Itararé.

Associação	Litotipo	Tratos de sistemas
D	Turbiditos e depósitos costeiros periglaciais	Trato de deglaciação
C	Turbiditos e diamictitos subaquosos de ressedimentação e/ou chuva de detritos	Trato de deglaciação
B	Arenitos e conglomerados de <i>outwash</i> subaquoso	Trato de deglaciação
A	Tilitos e depósitos de contato glacial	Trato de máximo glacial

Fonte: Modificado de Vesely (2006).

Figura 8 - Seção regional com a integração entre as seqüências definidas para o Grupo Itararé e sua classificação litoestratigráfica em subsuperfície.



Fonte: Vesely (2006).

5. GEOLOGIA LOCAL

As unidades geológicas presentes no Parque Estadual de Vila Velha (PEVV) são: rochas pertencentes ao Gp. Paraná (Fm. Furnas e Ponta Grossa); Gp. Itararé, Fm. Lagoa Azul e Campo Mourão (arenito Vila Velha); e os depósitos quaternários indiferenciados. Além dessas formações, cortando a Fm. Campo Mourão na área do PEVV ocorre a chamada falha da Fortaleza, a qual apresenta movimentação oblíqua normal-sinistral, condicionando relação de contato local entre o Gp. Itararé e o Gp. Paraná, e acarretando em um deslocamento entre as camadas da Fm. Campo Mourão, com bloco baixo a sudeste e bloco alto a noroeste da falha, Trzaskos et al. (2006). Segundo essa autora, essas relações de contato poderiam estar associadas à movimentação da referida falha anteriormente à deposição do Gp. Itararé. Enumeramos, a seguir, algumas informações sobre a geologia no interior do PEVV.

Formações Furnas e Ponta Grossa

Essa Formação apresenta as mesmas características descritas na seção 4.2.1, com arenitos quartzosos de coloração clara, granulometria média a grossa, feldspáticos e/ou caulíníticos, com grãos angulosos a subangulosos. Devido às restrições para coleta de rochas no interior do parque, apresentamos abaixo exemplo de afloramento desses arenitos, localizado na borda leste do parque, Figura 9.

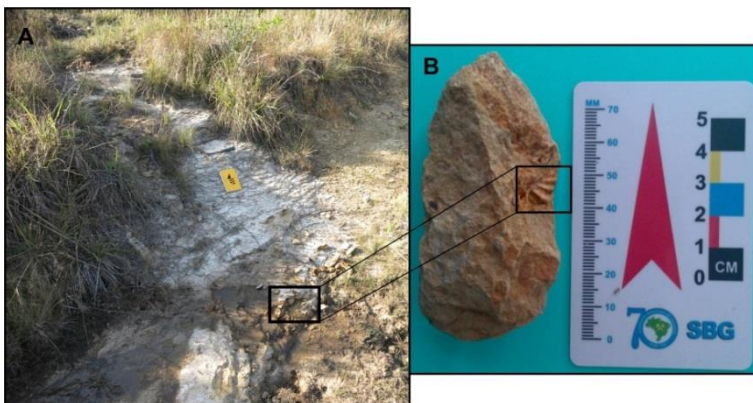
Figura 9 - Afloramento (lajeado) do arenito Furnas no PEVV.



Fonte: Acervo pessoal (2017).

A Fm. Ponta Grossa ocorre de forma restrita no limite leste do parque, entre a Fm. Furnas (Devoniano) e o Gp. Itararé (Permocarbonífero), sendo composta por folhelhos silto-argilosos, micáceos, de coloração cinza, com laminação plano-paralela e fósiferos. Devido ao alto grau de alteração em superfície, esse folhelho apresenta cores amarelada, avermelhada e castanha, com concentrações de óxidos de ferro (Fig.10a e b).

Figura 10 - A) Folhelho fósifero da Fm. Ponta Grossa ; B) Destaque para impressão do fósfil.



Fonte: Acervo pessoal (2017).

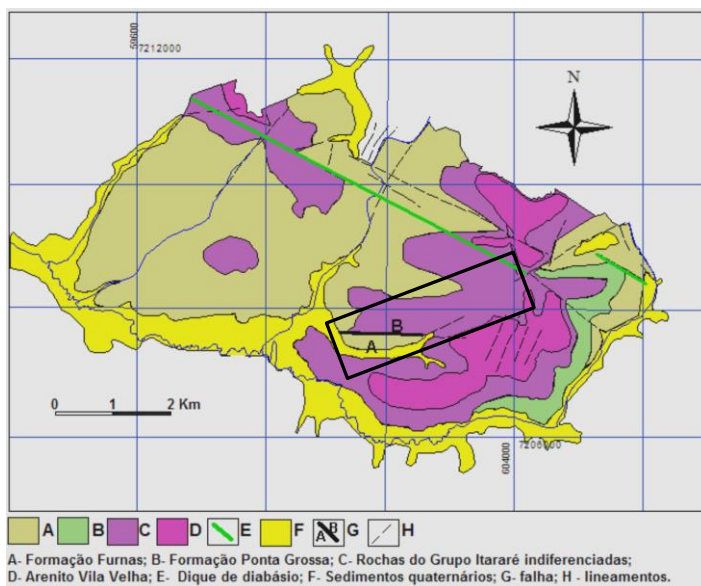
Formação Lagoa Azul e Fm. Campo Mourão (arenito Vila Velha)

Depositada em ambiente subglacial a glaciomarinho, durante o Carbonífero, a Fm. Lagoa Azul é constituída por dois membros. O primeiro, basal, é caracterizado por arenitos (Membro Cuiabá Paulista), que passam para diamictitos e folhelhos rítmicos de cor marrom avermelhada, intercalados isoladamente por lentes arenosas, no topo (Membro Tarabaí) (FRANÇA et al., 1996).

A Fm. Campo Mourão, presente no PEVV e arredores, foi descrita por Maack (1946, apud VESELY, 2006) como arenito Vila Velha, composto por diversas litologias, incluindo tilitos, diamictitos e arenitos com intercalações de folhelhos, depositados em contexto flúvio-glacial. Segundo França et al. (1996), o arenito Vila Velha e o arenito Lapa compõem modelo de trato de sistemas subaquosos em canal e lobos, no

qual o arenito Vila Velha representa lobos subaquosos, derivados de fluxos gravitacionais originados na base de geleiras, e o arenito Lapa teria resultado de canal subaquoso (de orientação N-S) que alimentaria os lobos formadores do arenito Vila Velha (ver Figura 7). O arenito Vila Velha aflora no PEEV na forma de platôs sub-horizontais, enquanto o arenito Lapa desenvolve morfologia linear ao sul do sítio de Vila Velha. A Fm. Taciba, de idade eopermiana, não ocorre na área de estudo, seja em superfície ou subsuperfície. Esta formação é constituída por arenitos, conglomerados e diamictitos. Nos trabalhos realizados por Melo et al. (2004), o Gp. Itararé, na área do PEVV, foi dividido em duas unidades: I) unidade basal, composta por diamictitos, argilitos, folhelhos e arenitos subordinados; II) unidade de topo, formada pelos arenitos avermelhados “Vila Velha”, Figura 11.

Figura 11 - Mapa geológico do Parque Estadual de Vila Velha, o retângulo preto indica a área aproximada do local de estudo.



Fonte: Adaptado de Letenski et al. (2009) e modificado de Melo (2004).

Ao caracterizar a arquitetura estratigráfica do arenito “Vila Velha”, Vesely (2006) descreveu seis perfis estratigráficos em quatro localidades: a) Fazenda Rivadávia (perfis RV-1, RV-2 e RV-3); b) Parque Estadual de Vila Velha (perfil PQ); c) Fortaleza (perfil FZ), e d) Fazenda Cambiju (perfil CJ). O perfil com a seção estratigráfica mais completa é o RV-1, na Fazenda Rivadávia, vizinha ao PEVV (Figura 12). Tendo como base a interpretação de processos sedimentares; de relações espaciais e genéticas entre as fácies; dos padrões de empilhamento, e baseando-se no código de fácies proposto por Eyles et al. (1983), Vesely et al. (2007), definiram quinze fácies para o arenito “Vila Velha” (Fm. Campo Mourão) (Tabelas 2 e 3). Essas fácies estão agrupadas em quatro unidades litoestratigráficas, ou associações faciológicas, aqui nomeadas da base para o topo em unidades I, II, III e IV. Segundo Trzaskos et al. (2006), essas unidades são mapeáveis na escala 1:25.000 (Fig. 13). Ainda segundo Vesely e Assine (2004), a Fm Campo Mourão abarca três sequências deposicionais, limitadas por discordâncias erosivas.

Segundo Vesely (2006) e Vesely et al. (2007), as quatro unidades litológicas definidas para o arenito Vila Velha são caracterizadas como segue. A **Unidade I**, depositada discordantemente sobre a Fm. Lagoa Azul (Limite de sequência 1), ou sobre o Gp. Paraná possui espessura que varia entre 10 e 35 m, é constituída por conglomerados e arenitos mal selecionados, com as fácies, Gc, Gm, Gg, Sp/St, e Sh, formando ciclo de granodecrescência, que termina nas camadas lamíticas da unidade II. As estruturas sedimentares mais frequentes são estratificações plano-paralela; cruzada planar; cruzada acanalada; ondulações de correntes e *climbing ripples*.

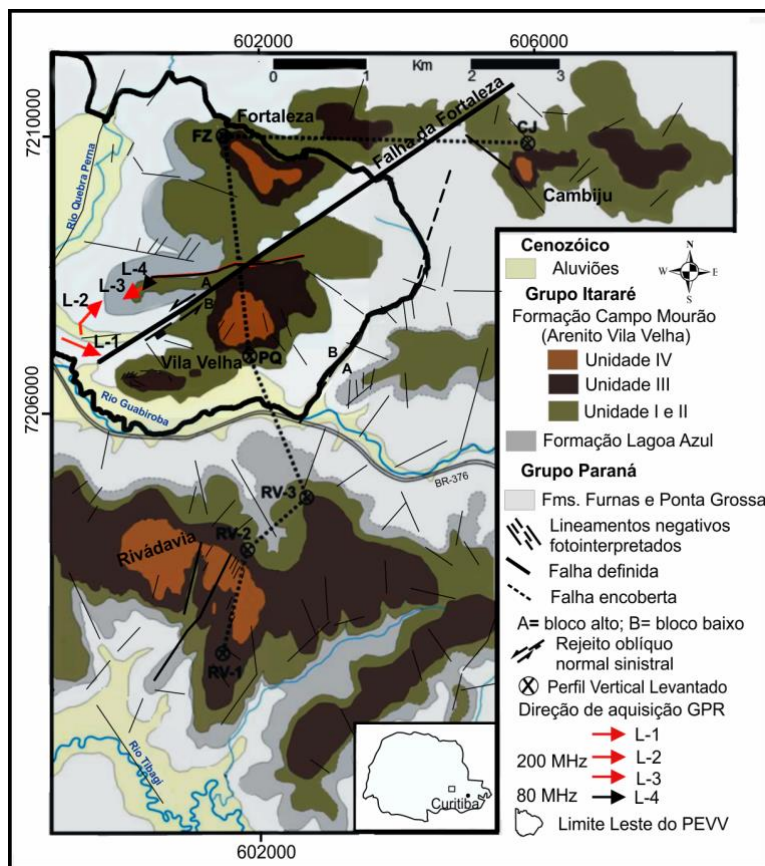
Unidade II, sobreposta em contato gradual à unidade I, tem espessura de aproximadamente 15 m. Essa unidade está associada à sucção glacio-marinha argilosa composta por intercalações de diamictitos, ritmitos, siltitos e folhelhos, com níveis de arenitos médios, representados pelas fácies Ds, Fld, Sm e Sg, formando empilhamento retrogradacional de depósitos de *outwash*, causados por retração de geleiras.

Unidade III, depositada em contato abrupto e erosivo sobre a unidade II (limite de sequência 2), o limite basal da unidade III é considerado uma superfície de 6° ordem, segundo a classificação de Miall (1988, apud VESELY, 2006), Essa unidade é constituída por arenitos avermelhados, que são interpretados como turbiditos, apresentando as fácies Sm, Sg, Si, Sr e Sp. A espessura máxima dessa unidade é de 30 m, apresentando padrão de granodecrescência ascendente. As estruturas descritas na unidade são: maciça; plano-paralela; cruzada planar; cruza-

da sigmoide; ondulação de corrente; *climbing ripples*, e estruturas de escape de fluídos.

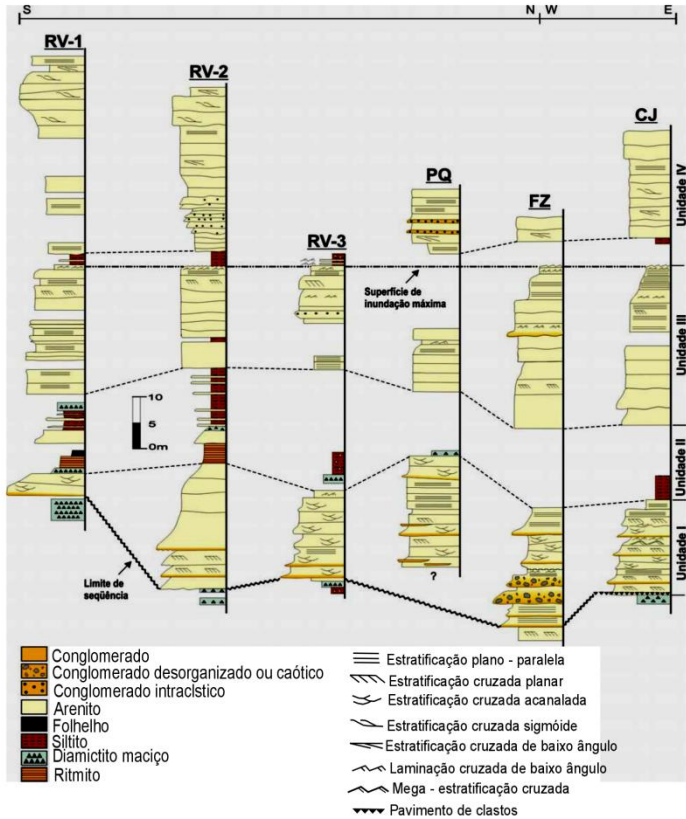
Unidade IV, com espessura em torno de 38 m, é formada por arenitos de fácies Ss, Sl, Sm, Sg e Si, culminando com depósitos de praia no topo. A variação textural na vertical é de granocrescência, com espessamento das camadas próximas ao topo da unidade. A geometria externa é tabular, em geral, ocorrendo lentes e camadas argilosas no interior da unidade. As estruturas encontradas são plano-paralelas, cruzadas sigmóides e cruzada planar.

Figura 12 - Mapa ilustrando a subdivisão das unidades litológicas do arenito Vila Velha, com destaque para o limite leste do PEVV.



Fonte: Modificado de Vesely (2006) e Trzaskos et al.(2006).

Figura 13 - Seção de correlação estratigráfica entre perfis verticais levantados.



Fonte: Vesely (2006).

Tabela 2 - Síntese das unidades definidas para o arenito Vila Velha.

Unidades	Fácies	Modo de deposição	Espessura máxima (m)	Grau de variação lateral de espessura	Geometria externa
4	Ss, Sl, Sm Sg, Si	Frete deltaica com interação rio/ondas	40	Moderado	Tabular
3	Sm, Sg, Si, Sr, Sp,	Fluxos de turbidez hiperpicnais	45	Baixo	Tabular
2	Ds, Fld, Sm, Sg	Glácio-marinho dominado por lama	15	Moderado a alto	Tabular ou lente
1	Gc, Gm, Gg, Sp/St, Sh	Outwash subaquoso	35	Alto	Canal (vale) ou montiforma

Fonte: Modificado de Vesely (2006).

Tabela 3 - Descrição e interpretação das liofácies do arenito Vila Velha.

Fácies	Características	Processo
Gm	Conglomerado polimítico maciço ou com estratificação incipiente; clastos subarredondados a arredondados; raramente imbricação dos clastos; matriz arenosa	fluxo de detritos não coesivos.
Gc	Conglomerado polimítico caótico; mal selecionado; clastos angulosos a arredondados; clastos de lama; matriz lama - arenosa.	Fluxo hiperconcentrado.
Gg	Conglomerado polimítico; gradação normal; clastos subarredondados a arredondados; raramente imbricação dos clastos; clastos acima da média dispersos; matriz arenosa.	corrente de turbidez de alta concentração
Gp/Gt	Conglomerado polimítico; estratificação cruzada planar/acanalada de médio porte; grânulos e seixos subarredondados a arredondados; matriz arenosa.	Corrente de tração unidirecional (migração de formas de leito efêmeras) corrente de turbidez de alta concentração.
Sm	Arenito médio a grosso; maciço; topo ondulado; clastos dispersos; corpos amalgamados.	Correntes de turbidez (fluxo hiperpicnal).
Sg	Arenito médio a grosso; gradação normal; seixos e grânulos na base dos corpos; corpos amalgamados.	Correntes de turbidez (fluxo hiperpicnal).
Si	Arenito médio a grosso; gradação inversa; corpos amalgamados.	Correntes de turbidez (fluxo hiperpicnal).

Continuação

Tabela 3 - Descrição e interpretação das liofácies do arenito Vila Velha.

Sh	Arenito fino a médio; laminação horizontal ou raramente de baixo ângulo.	Corrente detração (leito plano) ou Correntes de turbidez.
Sp/St	Arenito média conglomerático; estratificação cruzada planar ou acanalada de médio a grande porte; clastos de lama.	Tração de corrente unidirecional (migração de formas de leito).
Sl	Arenito médio a grosso; estratificação cruzada planar de baixo ângulo e de grande porte; lineações de corrente.	Tração (fluxo de swash e backwash).
Ss	Arenito médio a grosso; estratificação cruzada sigmoide de médio a grande porte.	Corrente de tração unidirecional (migração de formas de leito) com suspensão associada.
Sr	Arenito fino a médio; ondulações de corrente e/ou <i>climbing ripples</i> de pequeno a médio porte (<i>megaripples</i>); lineações de corrente.	Corrente de tração unidirecional (migração de <i>ripples</i>) e suspensão associada.
Fl/Fld	Siltito, folhelho ou ritimito silte/argila; clastos esparsos.	Decantação/corrente de turbidez de baixa concentração.
Dm	Diamictito maciço a sutilmente laminado; matriz lamítico arenosa; espessura métrica.	Chuva de detritos (decantação de pluma hipo/homopical e queda de clastos de gelo flutuante)
Ds	Diamictito estratificado e heterogêneo; matriz lamítica a lamítico-arenosa; inclusões de arenito; espessura métrica a decamétrica.	Escorregamento de massa (<i>slump</i>) e fluxo de detritos coesivos

Fonte: Vesely et al. (2007).

6. GPR (*GROUND PENETRATING RADAR*)

6.1. GEORADAR

O sistema GPR é composto por: dois módulos eletrônicos, um transmissor, que gera e envia pulsos de curta duração e alta frequência (entre 10-1000 MHz) para a subsuperfície, e outro receptor, o qual recebe o sinal e envia para a unidade de controle central; antenas transmissoras (Tx) e receptoras (Rx), as quais podem ser blindadas ou não; unidade de controle central; odômetro, instrumento usado para medir a distância percorrida ao longo do perfil de aquisição, e cabos de fibra óptica, usados para conectar os módulos eletrônicos a unidade de controle, onde são gerados os radargramas, Figura 14.

Figura 14 - Sistema GPR : A) Controladora; B) Antena de 200 MHz blindada; C) Módulos eletrônicos das antenas; D) Sistema GPR de baixa frequência não blindado.



Fonte: Acervo pessoal (2017).

O GPR registra contrastes de impedância eletromagnética entre os materiais, e consiste na geração, transmissão, propagação, reflexão e recepção de pulsos eletromagnéticos de alta frequência (entre 10-1000 MHz). Após a antena transmissora emitir os pulsos eletromagnéticos de curta duração e alta voltagem para a subsuperfície, os pulsos refletidos para a superfície, são registrados pela antena receptora, que os amplia e converte em dados digitais a serem visualizados pela controladora (ANNAN, 2004; NEAL, 2004). A propagação e reflexão das ondas dependem, fundamentalmente, de três propriedades físicas dos materiais, no caso rochas e solos: condutividade elétrica, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética, que segundo Dagallier et al. (2000), estas três propriedades juntamente com a frequência do pulso emitido determinam a profundidade de investigação em subsuperfície. Porém a presença de água, porosidade e argila podem interferir na propagação dos pulsos, acarretando em uma diminuição da profundidade de investigação desejada. Maiores detalhes do método encontram-se bem descritos em Porsani (1999), Neal (2004) e Annan (2004).

6.2. ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

Os princípios eletromagnéticos são embasados pelas equações de Maxwell, as quais descrevem matematicamente a interação entre campos elétricos/magnéticos, e as relações entre as propriedades constitutivas, (condutividade elétrica, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética), que quantificam os materiais, (ANNAN, 2004). A partir da interação dessas propriedades, é possível determinar a velocidade de propagação da onda, o comprimento da onda no meio material, e a atenuação da energia durante a trajetória (sinais GPR), Annan (2004), Rodrigues (2010).

As equações de Maxwell compreende um conjunto de quatro (4) equações sobre a eletricidade e o magnetismo, as quais formam as bases do eletromagnetismo. Tais equações expressam: I) Lei de Gauss: relaciona o fluxo do campo elétrico através de uma área com carga elétrica, (Eq. 3.1); II) Lei de Gauss para o magnetismo: o fluxo magnético resultante de uma área fechada é nulo, (Eq. 3.2); III) Lei da indução de Faraday: campo magnético que varie com o tempo produz um campo elétrico, (Eq. 3.3); e IV) Lei de Ampère: campos magnéticos podem ser gerados a partir de correntes elétricas, (Eq. 3.4).

$$\text{Lei de Gauss} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = q \quad (3.1)$$

$$\text{Lei de Gauss para o magnetismo} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.2)$$

$$\text{Lei da indução de Faraday} \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.3)$$

$$\text{Lei de Ampère - Maxwell} \quad \vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3.4)$$

Onde:

\vec{D} Deslocamento do campo elétrico em C/m^2 .

q Densidade da carga elétrica em C/m^3 .

\vec{B} Indução magnética em Wb/m^2 ou Tesla.

\vec{E} Intensidade do campo elétrico em V/m .

\vec{H} Intensidade do campo magnético em A/m .

\vec{j} Densidade de corrente elétrica introduzida por Maxwell em A/m^2 .

$\vec{\nabla}$ É o divergente (operação matemática sobre um vetor) do campo vetorial em $1/m$.

$\vec{\nabla} \times$ É o divergente rotacional do campo vetorial em $1/m$.

6.2. EQUAÇÕES CONSTITUTIVAS

As equações apresentadas acima não abordam as propriedades físicas dos materiais, entretanto para complementar as equações de Maxwell, é preciso introduzir as equações constitutivas do meio, que segundo Annan (2004), em escala macroscópica, através de tais equações é possível quantificar as propriedades físicas dos materiais, e descrever o comportamento dos mesmos diante de um campo eletromagnético.

6.3.1. Condutividade elétrica (σ)

A primeira equação constitutiva relaciona a densidade da corrente elétrica (\vec{j}) ao campo elétrico (\vec{E}), por meio da condutividade elétrica (σ), uma propriedade física que expressa à capacidade de um material em transmitir corrente elétrica, ou de acordo com a lei de Ohm, a facilidade com que a corrente elétrica atravessa um meio material.

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (\text{Eq. 5})$$

(σ) - Expressa em Siemens/metro (S/m).

De acordo com Keller (1987), os valores de condutividade (σ) de minerais ou rochas não são constantes, podendo variar com o tempo, temperatura, pressão, entre outros fatores ambientais. Além disso, como os meios geológicos são heterogêneos, os principais fatores que podem comprometer a condutividade elétrica desses meios são: a presença de água, porosidade, proporção da fração argila e a presença de minerais condutivos.

6.3.2. Permissividade dielétrica (ϵ)

A segunda propriedade física do meio é a permissividade dielétrica (ϵ), que expressa a característica de um material em armazenar cargas elétricas. Essa propriedade é definida pela segunda equação constitutiva, (Eq. 6), a qual relaciona a intensidade do campo elétrico (\vec{E}) à corrente de deslocamento ou à polarização (\vec{D}). Em aplicações GPR, usa-se a permissividade dielétrica relativa (ϵ_r) (conhecida também como constante dielétrica), que relaciona a permissividade dielétrica do material com a permissividade dielétrica do vácuo (ϵ_0), dada pela (Eq. 7). A permissividade pode variar dependendo do tipo de material e da frequência.

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

(ϵ): É a permissividade dielétrica (F/m).

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde (ϵ_0) é igual a $8,85 \times 10^{-12}$ F/m.

6.3.3. Permeabilidade magnética (μ)

A terceira propriedade física do meio é a constante de permeabilidade magnética (μ), a qual mensura a capacidade de um material em se polarizar quando submetido a um campo magnético, ou ainda, é a capacidade que um meio tem em armazenar campo magnético. Esta propriedade é definida pela terceira equação constitutiva que relaciona a força do campo magnético (\vec{H}) com a indução magnética (\vec{B}), (Eq. 8).

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{Eq. 8})$$

(μ) - Medida em Henry/metro(H/m).

7. ATENUAÇÃO DO SINAL

Ao se propagarem em um meio geológico, as ondas começam a perder sinal (há atenuação) por dispersão geométrica da frente de ondas; efeitos de polarização (absorção); e dispersão. Além desses fatores, a composição, meios saturados em água, íons dissolvidos e a presença de porosidade tornam o meio mais condutivo (ANNAN, 2004), consequentemente, a absorção do sinal se torna mais expressiva.

Além dos parâmetros intrínsecos aos materiais apresentados anteriormente, há ainda alguns fatores externos ao levantamento que contribuem para a atenuação do sinal, como cabos de transmissão de energia elétrica, transmissor de rádio/celular, automóveis, superfícies metálicas, entre outros, (ANNAN, 2004). A Tabela 4 mostra a relação entre determinados materiais e os valores referentes às suas propriedades físicas.

Tabela 4 - Valores de constantes dielétricas e condutividades de alguns materiais geológicos em condição seca ou saturada.

Material	Constante Dielétrica ϵ	Condutividade Elétrica $-\sigma$ (mS/M)
Areia seca e cascalho	2 - 6	0,01
Areia saturada	20 - 30	0,1 - 1
Argila (seco/saturado)	5 - 40	2 - 1000
Folhelho e silte (seco/saturado)	5 - 15	1-100
Calcário	4 - 8	0,5 - 2
Granito	4 - 6	0,1 - 1
Basalto (seco/saturado)	6 - 8	1 -10
Diabásio (seco/saturado)	7 - 8	10 - 100
Solo argiloso (seco/saturado)	2,4 - 15	0,27 - 15
Solo arenoso (seco/saturado)	2,5 - 25	0,14 - 6,9

Fonte: Modificado de Porsani (1999) e Annan (2004).

8. AQUISIÇÃO DE DADOS

8.1. ANTENAS

Como exposto anteriormente, a antena transmissora (Tx) e a receptora (Rx) podem ser blindadas ou não. Levantamentos realizados com antenas não blindadas permite trabalhar com diferentes métodos de aquisição, podendo variar a distância entre as antenas (Tx) e (Rx), porém a aquisição realizada com esse tipo de antena fica mais susceptível a ruídos externos, que podem ser causados por fiação elétrica, torres de alta tensão, celulares, rádios, entre outros. Enquanto que por estarem em uma posição fixa dentro de uma caixa blindada, as antenas blindadas são imunes a interferências externas.

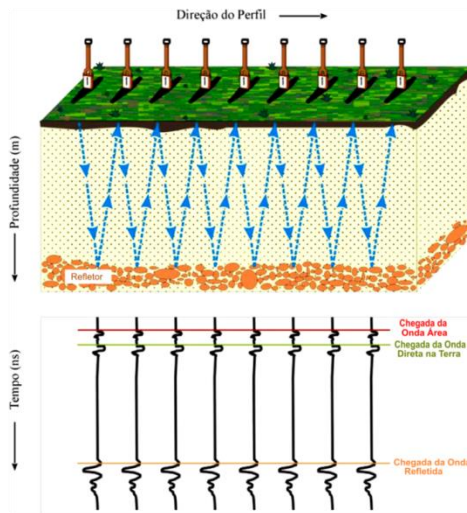
8.2. TÉCNICAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS GEOFÍSICOS

As técnicas de aquisição de dados são divididas em três tipos: perfil de reflexão com afastamento constante (*common offset*), sondagens de velocidade (CMP e WARR) e tomografia (REYNOLDS, 2011). Neste trabalho serão descritas as duas primeiras, pois são os métodos mais empregados.

A aquisição pela técnica perfil de reflexão é a forma mais comum e simples de ser empregada. Nesse método, o espaço entre as antenas transmissoras e receptoras é mantido fixo, e ambas são deslocadas ao longo do perfil de caminhamento simultaneamente, Figura 15.

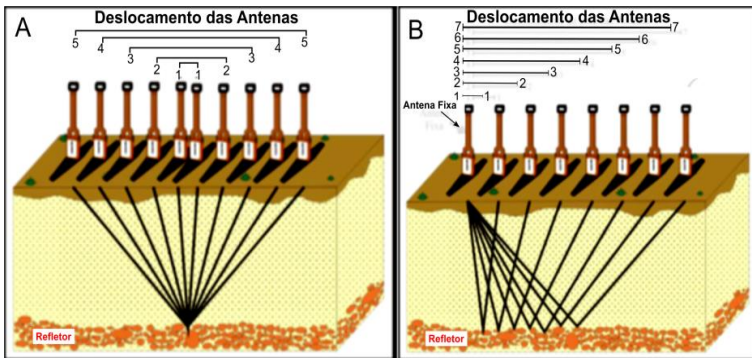
Enquanto que a técnica sondagem por velocidade é aplicada para estimar a velocidade do sinal em relação à profundidade de investigação. Pode ser feita pelos arranjos CMP ou WARR, variando a distância entre as antenas e registrando o tempo duplo (ida e volta) das reflexões (conhecido como *two-way-travel-time- TWTT*), (ANNAN, 2004). O arranjo CMP (*common mid point*) consiste em mover as antenas (transmissora e receptora) a partir de um ponto fixo e em direções opostas para posteriormente obter a velocidade em função de um ponto médio comum, (Fig. 16a). Enquanto que no arranjo WARR (*Wide Angle Reflection and Refraction*), uma das antenas é sucessivamente deslocada em relação à outra que é mantida fixa, Figura 16b.

Figura 15 - Aquisição pela método perfil de reflexão.



Fonte: Borges (2002).

Figura 16 - Técnicas de sondagem por velocidade; A) Aquisição pela método CMP; B) Aquisição pela método WARR.



Fonte: Borges (2002).

9. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido em cinco fases principais: (1) levantamento bibliográfico; (2) aquisição de dados geofísicos e topografia; (3) controle de campo; (4) processamento digital dos radargramas; (5) interpretação de dados.

(1) levantamento bibliográfico: sobre a geologia local e do método geofísico GPR.

(2) Aquisição de dados geofísicos e topografia: As aquisições geofísicas e topográficas foram realizadas principalmente ao longo de linhas de caminhamento na borda leste do PEVV, onde há contatos litológicos, e fraturas, (Fig. 17). Essa etapa ocorreu durante quatro etapas de campo, setembro/2016, Maio/2017, setembro/2017 e outubro/2017.

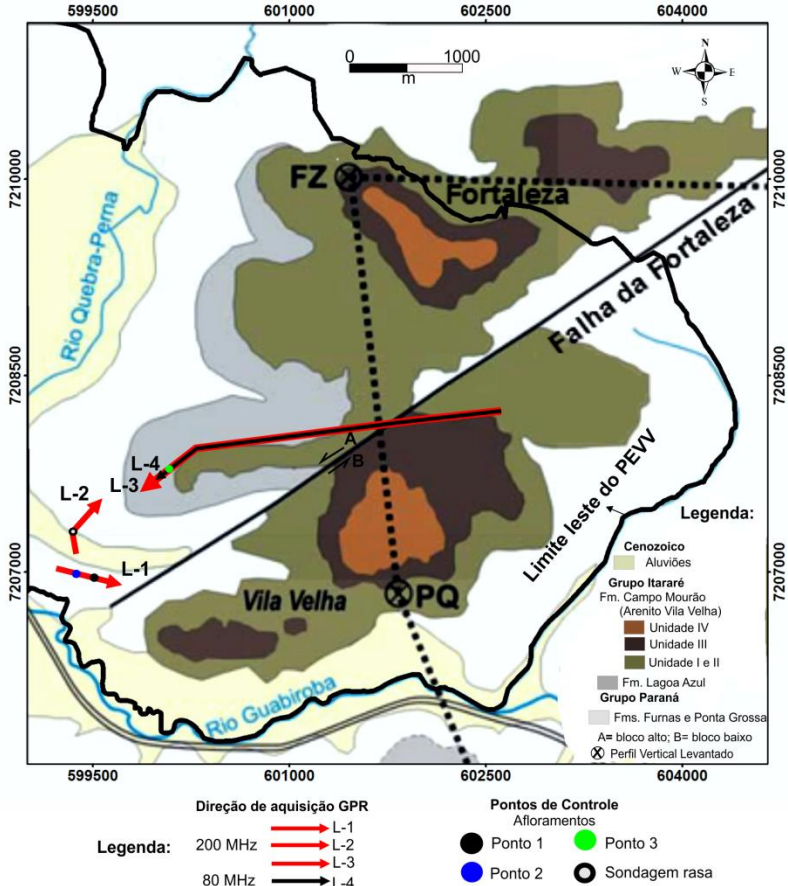
O levantamento geofísico foi realizado com o equipamento GPR da GSSI (Geophysical Survey Systems Inc.), usando antena blindada monoestática na frequência de 200 MHz e antena de baixa frequência (80 MHz) não blindada, (Fig. 18). Com a antena de 200 MHz, foram adquiridos seis km de perfis de GPR e três km usando antena de baixa frequência (80 MHz), com espaçamento de 1,5 m entre as antenas. As aquisições foram realizadas pela técnica reflexão com afastamento constante, seguindo o mesmo sentido de caminhamento e direção, garantindo assim um imageamento das camadas e estruturas rúpteis em diversas escalas temporais e espaciais.

Visando a correção altimétrica dos dados GPR na fase de pós-processamento, foi executado, paralelamente à aquisição de dados GPR, levantamento topográfico pela técnica RTK (*Real Time Kinematic*). O equipamento usado foi um GPS (*Global Positioning System*) da marca *Trimble R6*, Figura 19.

Nesse método, um receptor (Base) permanece fixo em um determinado ponto de coordenadas conhecidas, enquanto que o outro receptor permanece em movimento (Rover) coletando os dados, e fornecendo o posicionamento relativo em tempo real. Enquanto que, no levantamento topográfico realizado pelo modo estático, dois ou mais receptores rastreiam os satélites comuns entre si por um determinado período de tempo, que pode variar de acordo com o comprimento da linha de base (distância entre a estação de referência e os demais receptores

) e a precisão requerida (INCRA, 2013).

Figura 17 - Localização das linhas de caminamento com GPR na borda leste do PEVV.



Fonte: Modificado de Vesely (2006) e Trzaskos et al.(2006).

Figura 18 - A) Sistema GPR com antenas de baixa frequência (80 MHz); B) Detalhe da controladora; C) Módulo da antena receptora conectada ao odômetro.

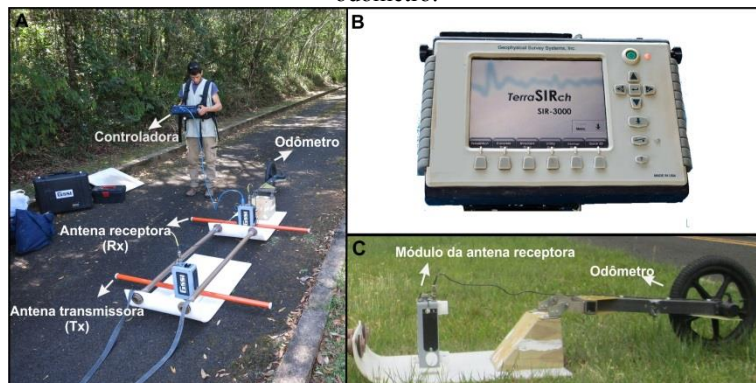


Foto: Acervo pessoal (2017).

Figura 19 - GPS usado no levantamento topográfico; A) Base receptora acoplado a um rádio externo para amplificar o sinal; B) Receptor rover e a coletora de dados.

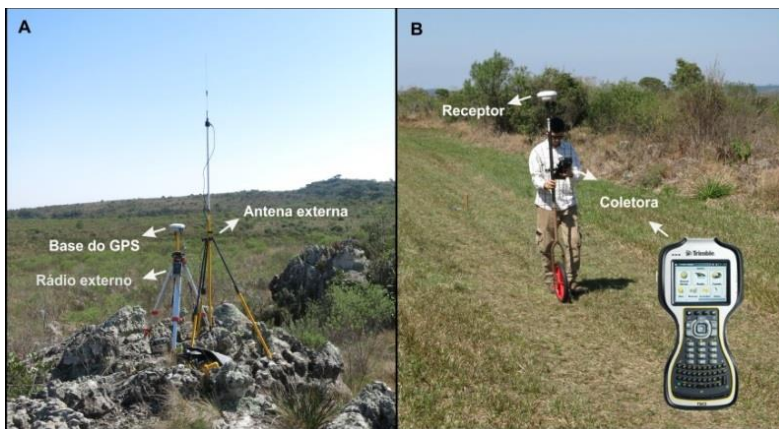


Foto: Acervo pessoal (2017).

(3) Controle de campo: Essa etapa consistiu em descrever afloramentos nos locais de caminhada com GPR; e com base na interpretação (de campo) dos radargramas, foram selecionados pontos para as realizações de furos de sondagens rasas (5m).

(4) O processamento digital dos radargramas: foi executado através dos softwares RADAN® e Reflex View®, consistindo em: (i) pré - processamento básico, incluindo remoção e/ou aplicação de ganhos temporais, (ii) pós-processamento básico, incluindo correção do tempo zero; empilhamento (*stacking*); aplicação de filtros de frequência (passa banda alta e banda baixa); aplicação de ganhos temporais; migração, *back ground removal* e correção topográfica. A Tabela 5 apresentam as etapas de processamento e o que consiste cada uma delas. Todos os equipamentos e softwares necessários ao trabalho estão à disposição do laboratório de Geodinâmica Superficial (GCN – UFSC).

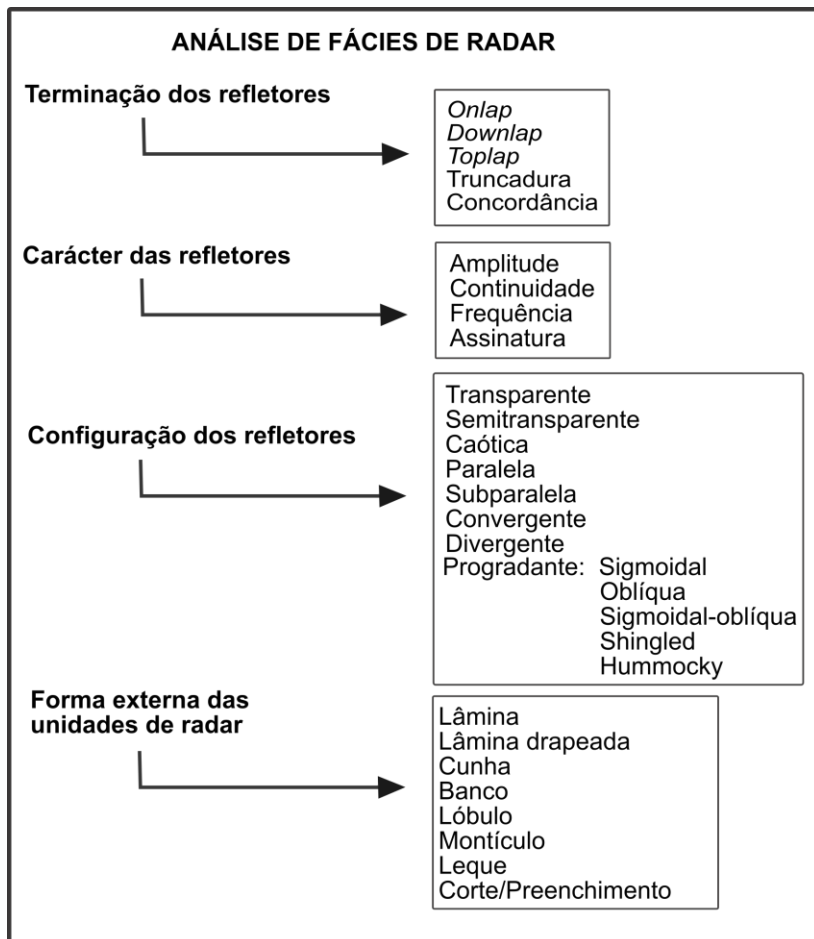
Tabela 5 - Etapas adotadas no processamento digital dos radargramas.

Etapas	Descrição
Correção do Start Time	Remove os registros nulos, ajustando os traços em função do tempo de chegada da primeira onda direta (onda que se propaga entre as antenas transmissora e receptora).
Stacking (empilhar)	Visa comprimir um perfil GPR muito longo.
Restauração de Ganho	Remove o ganho aplicado durante a aquisição.
Aplicação de filtros	Remove os ruídos de alta e baixa frequência que estão fora da banda de sinal da frequência central da antena utilizada.
Aplicação de ganhos	Aumenta relação sinal ruído, corrigindo os efeitos de perda de sinal relacionados à propagação das ondas.
Stretching (descomprimir)	Descomprime o perfil, voltando ao tamanho real.
Background Removal	Remove os ruídos de fundo provenientes das ondas aéreas e das ondas terrestres diretas, realçando os sinais que variam lateralmente.
Migração	Remove difrações, distorções e hipérbolares associadas a alvos pontuais e/ou estruturas geológicas em subsuperfície.
Correção topográfica	Consiste em corrigir as posições dos refletores, atribuindo a cada traço seu respectivo valor de cota.

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

5) A interpretação dos radargramas: Nessa etapa foi analisada os conjuntos de refletores, tendo como base a aplicação dos princípios da sismoestratigrafia, tal como abordado por Mitchum Jr. et al. (1977a, 1977b). Os parâmetros analisados foram: **a)** terminação das refletores; **b)** carácter das reflexões; **c)** configuração das reflexões internas; **d)** identificação da forma externa das unidades sísmicas (nesse trabalho denominado de unidades de radar), essa fase está ilustrada na Figura 20. Ressaltando que nesse trabalho não abordará a análise de fácies sísmica (aqui denominadas fácies de radar).

Figura 20 - Parâmetros adotados para análise dos refletores.



Fonte: Adaptado de Roque (1998).

10. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados da associação entre os dados obtidos através dos radargramas e a geologia local. De acordo com a descrição genérica das unidades de radar mapeadas, de seus contatos, e características específicas, podemos apresentar a seguinte síntese das associações feitas neste trabalho entre as unidades de radar e unidades geológicas já mapeadas no setor analisado do PEVV, fazendo referência aos perfis GPR aqui apresentados, (Tabela 6).

Tabela 6 - Síntese entre as unidades de radar e as unidades geológicas definidas por Vesely (2006).

Linhas GPR	Pacotes de radar	Unidades Geológicas
L-2	U-7	Depósitos aluviais
	U-6	Latossolos
L-3 e L-4	U-5	Unidade III Fm. Campo Mourão (arenito Vila Velha)
	U-4E	
L-1	U-4D	
	U-4C	Unidade I/II Fm. Campo Mourão (arenito Vila Velha) (?)
	U-4B	
	U-4A	
L-3 e L-4	U-4	Unidade II Fm. Campo Mourão (arenito Vila Velha)
	U-3	Unidade I Fm. Campo Mourão (arenito Vila Velha)
	U-2	Fm. Lagoa Azul (membro Tarabai)
L-2	U-1	Fm. Furnas

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

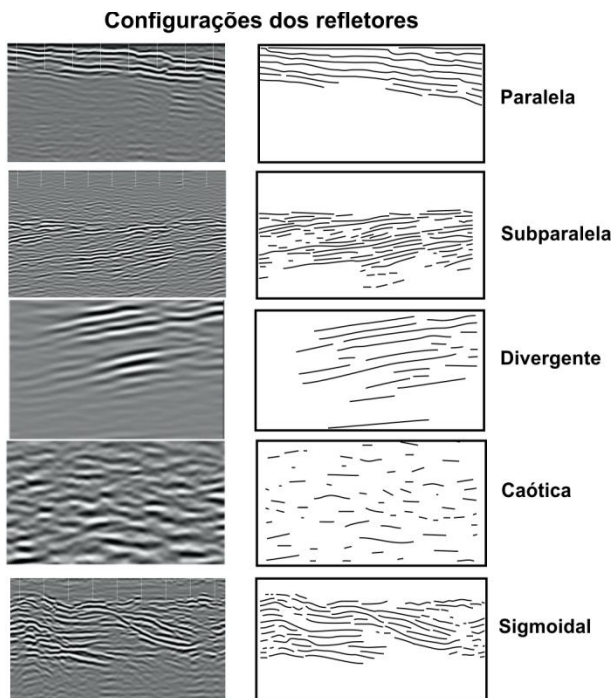
Em função disso, a descrição dos resultados será apresentada de acordo com a estratigrafia local, segundo o princípio da litoestratigrafia. Ressalte-se ainda que, em função da natureza deste trabalho, é apresentada somente a descrição de conjuntos de refletores GPR, materializados através da análise de radargramas. Ou seja, não foi feita análise de fácies de radar para este trabalho. São esses conjuntos mais genéricos de refletores, portanto, que são associados às principais litologias que caracterizaram a geologia local. São ressaltadas também as principais feições estruturais de interesse para este estudo: contatos entre unidades lito-estratigráficas e eventuais contatos de falha.

Através da interpretação dos radargramas foram reconhecidos doze unidades de radar (U-1, U-2, U-3, U-4, U-4A, U-4B, U-4C, U-4D, U-4E, U-5, U-6 e U-7), individualizadas por seis conjuntos de refletores: paralelos, subparalelos, divergentes ou convergentes, caóticos e sigmoidais, (Fig. 21) e a partir da identificação de duas superfícies estratigráficas de origem erosiva (S1 e S2), (Fig. 22).

Particularmente, a observação da variação da continuidade, ou

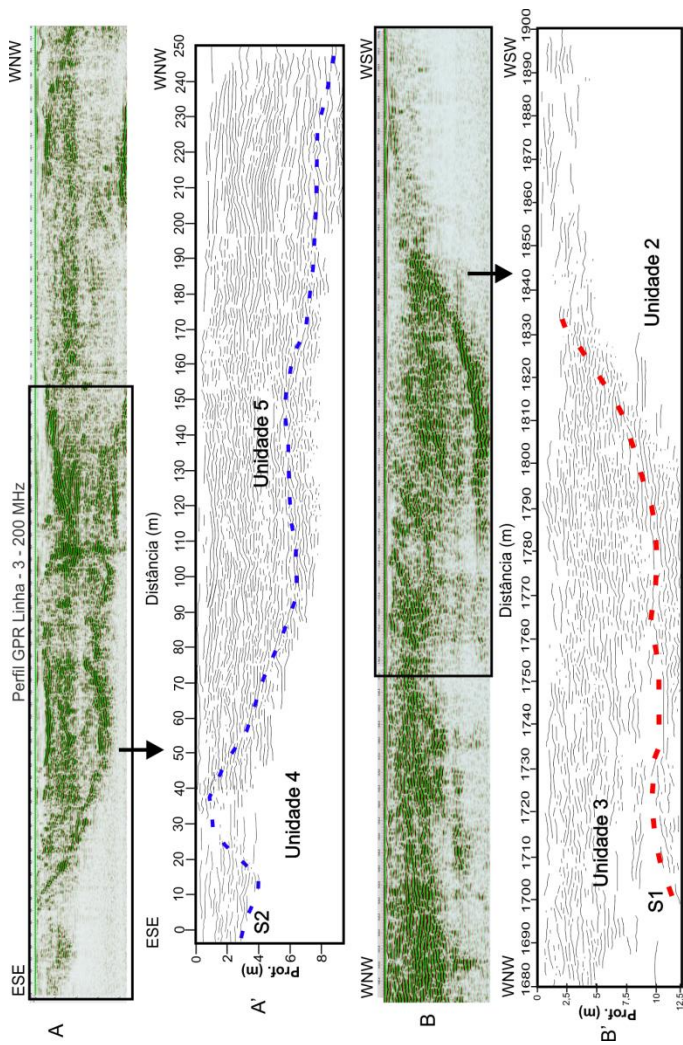
descontinuidade lateral de refletores, associada à observação da variação da atenuação do sinal GPR entre as diferentes unidades litoestratigráficas, permite associar conjuntos de refletores e litologias mapeadas. Em geral unidades de textura fina (lamitos, ritmitos, diamictitos e folhelhos) apresentam maior atenuação do sinal GPR, em relação às unidades arenosas, criando referencial descritivo passível de interpretação. Além desses conjuntos genéricos de padrões de reflexão, foi dada atenção à ocorrência e à localização de sinais hiperbólicos, mais frequentes em algumas litologias. Essas feições são associadas a alvos de caráter pontual, como clastos dispersos ao longo de superfícies erosivas; clastos caídos em depósitos glaciais, característicos de algumas unidades litológicas do arenito Vila Velha, e cruzamento com linhas e zonas falhas e fraturas, ao longo de linhas de levantamento GPR, tal como ilustrado por Rossetti (2001 e 2003), Souza (2010), Heteren et al.(1998) e Reiss et al. (2003).

Figura 21 - Refletores indetificados nos radargramas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Figura 22 - Partes do radargrama da linha 3 (L-3) destacando as superfícies erosivas identificadas nos radargramas e as unidades de radar adjacentes; em (A e B) perfil processado e (A' e B') perfil interpretado.



Fonte: elaborado pelo autor (2017).

10.1. INTERPRETAÇÃO ESTRATIGRÁFICA DE PERFIS DE RADAR (RADARGRAMAS).

Com base no que foi exposto acima, este item apresenta os principais resultados associados à aplicação do GPR ao longo de linhas de caminhamento que atravessam a interseção de diferentes unidades estratigráficas com a superfície topográfica.

10.1.1. Perfil GPR linha 1 (L-1) - Fm. Campo Mourão (arenito Vila Velha)

É possível individualizar nesse radargrama, cinco unidades de radar (U-4A, U-4B, U-4C, U-4D, U-4E), compostos por refletores sigmoidais, paralelos a semi-paralelos (Fig. 22). Descreveremos a seguir essas unidades de acordo com suas principais características geofísicas, e os afloramentos usados como pontos de controle, (Figuras 23 e 24).

Unidades de radar U-4A e U-4B: O unidade de radar U-4A, apresenta refletores de alta magnitude, com padrão cruzado perto da origem da linha de caminhamento (radargrama). A partir dos 40 m da origem, os refletores tendem a aumentar sua continuidade lateral, assumindo configuração paralela a semi-paralela, que se torna côncava para o topo a partir de 60/70 m da origem, com terminações em *toplap*, logo abaixo da superfície topográfica. Entre 80 e 90 m da origem, observa-se passagem para o unidade de radar U-4B, que apresenta mudança significativa do padrão de distribuição dos refletores, em relação ao unidade anteriormente descrita (U-4A). Aqui, os refletores são descontínuos e relativamente caóticos, próximo da superfície e em profundidade, com a exceção de refletor de geometria acanalada ampla, lateralmente contínuo, em torno de 1 m de profundidade (Fig. 25-a e a’).

Unidade de radar U-4C: Localizada a partir de 130 m da origem do radargrama, o padrão de reflexão dessa unidade foi associado a arenitos descritos ao longo da linha de caminhamento, (Fig. 23). Tal unidade é caracterizada pela mudança abrupta da distribuição e da geometria aparente dos refletores, ao longo de setor que sugere a ocorrência de deformação rúptil, ao qual segue sucessão de refletores com mergulho aparente para ESE de geometria sigmoidal. Esses refletores tendem a apresentar maior continuidade lateral para ESE, assumindo distribuição paralela, com mergulhos aparentes relativamente constantes até aproximadamente 210 m da origem do radargrama (Fig. 25-b’). É notável a terminação desses refletores em *toplap*, na passagem

para a superfície topográfica, revelando o truncamento recente das rochas entre 170 e 190 m da origem do radargrama (Fig. 25-a' e b').

Unidade de radar U-4D: Essa unidade ocorre em forma de lente a partir de 200 m da origem, e se estende ao longo de aproximadamente 150 m. Seus refletores ocorrem em baixas profundidades, próximos da superfície topográfica, e são relativamente contínuos lateralmente, assumindo padrão paralelo a subparalelo, e terminando localmente em *onlap*, a WNW e a ESE, nos limites do corpo lenticular, aparentemente apoiados sobre os refletores da unidade U-4C e sobre os refletores da unidade U-4E (Fig. 25-b e b'). Verifica-se forte dissipação do sinal EM a partir de profundidades superiores a 1 m. Fato que pode ser interpretado como consequência da textura fina dos folhelhos que foram verificados no setor (Fig. 24). Como sugerido pelo padrão de reflexão desse setor do radargrama, os refletores dessa unidade de radar podem estar associados ao folhelho presente na unidade litológica II do arenito Vila Velha, segundo a diferenciação proposta por Vesely (2006). Porém, como não foram feitas neste trabalho, nem análise detalhada de fácies de radar, nem análise petrológica, a verificação da associação referida acima está prevista para trabalhos futuros, que devem ser realizados como desdobramentos desta pesquisa.

Unidade de radar U-4E: Verificada apenas ao final do radargrama, ao longo de 10 m, apresenta refletores bem definidos, de amplitude relativa elevada, que variam de contínuos a descontínuos, lateralmente, sugerindo unidade de camadas de configuração sigmoidal, com mergulho aparente para WNW, (Fig. 25-b e b').

Ressalta-se que as associações entre as unidades de radar descritas anteriormente carecem de mais dados para serem relacionados às unidades geológicas locais.

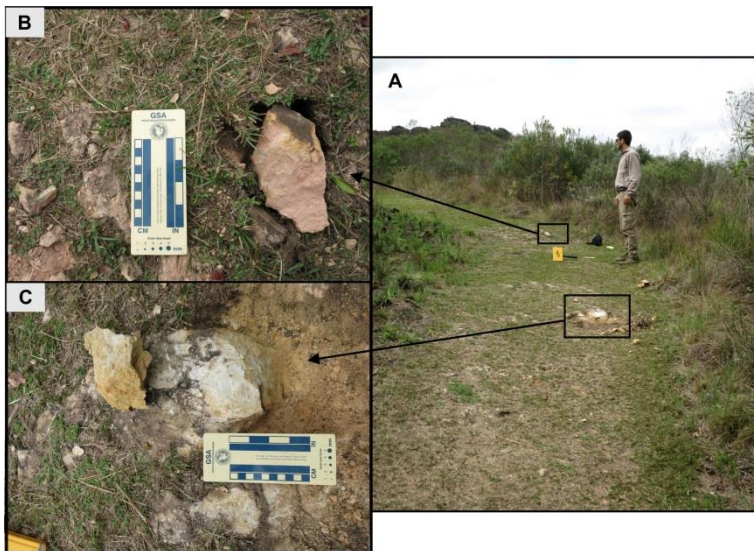
Apresentamos a seguir breve descrição de pontos de controle, para a obtenção de dados de afloramento, ao longo da linha de caminhamento associada a esse radargrama.

Ponto 1- Localização: Perfil GPR linha 1 (L-1) - Unidade Litoestratigráfica: Grupo Itararé, Fm. Campo Mourão.

Descrição: arenito quartzoso de coloração amarelada, granulometria fina a média, moderadamente selecionado e pouco friável, sotoposto a arenito avermelhado, de granulometria fina a média, feldspático (Fig. 23). Não foi possível verificar estruturas sedimentares no local, devido a pequena área aflorante. Entretanto, os arenitos aparentam ser maciços no

afloramento examinado (pelo radargrama, observa-se também que podem ser maciços ou com estratificação plano-paralela). Esses arenitos são representados no radargrama pelos refletos da unidade de radar 4C (U-4C), localizados dos 140 aos 190 m a partir da origem (Fig. 25- a' e b').

Figura 23 - A) Vista geral do afloramento, onde se pode verificar os arenitos encontrados no perfil de caminhamento; B) Detalhe do arenito avermelhado; C) Detalhe do arenito esbranquiçado.



Fonte: Acervo Pessoal (2017).

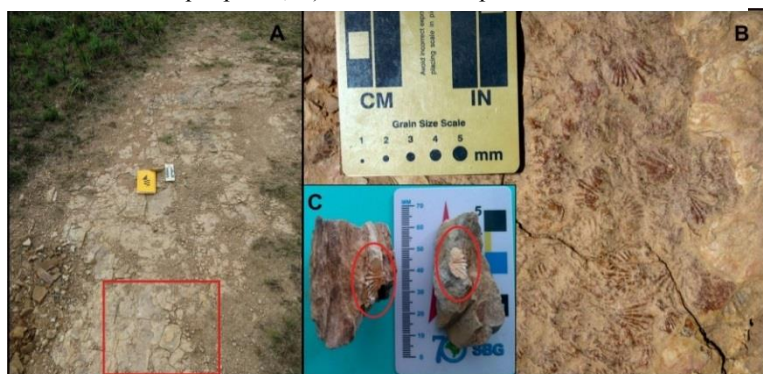
Ponto 2 – Localização: Perfil GPR linha 1 (L-1), Unidade Litoestratigráfica: Grupo Itararé, Fm. Campo Mourão.

Descrição: Folhelhos sílticos, de coloração cinza a amarela, devido à alteração, com laminação plano-paralela. O afloramento ocorre ao longo de aproximadamente 100 m, onde foi observado aglomerado de impressões de braquiópodes, ressaltadas por óxidos de ferro (Fig. 24). Esse afloramento fóssilífero era desconhecido dos gestores do parque, que foram prontamente avisados da ocorrência durante a execução deste trabalho. Como expresso anteriormente, esse folhelho está associado a unidade de radar 4D (U-4D), identificada entre 200 e 330 m da origem do radargrama (Figura 25-b').

Devido à sua posição estratigráfica, e considerando-se a diferenciação do arenito Vila Velha proposta por Vesely (2006), (Ver Fig. 13, pag. 34), esse folhelho pode estar associado à unidade litológica II daquele arenito. Segundo Vesely (op.cit), essa unidade é composta por intercalações de diamictitos, ritmitos, siltitos e folhelhos, com níveis de arenitos médios, marcando a transição da unidade I para a unidade II do arenito Vila Velha.

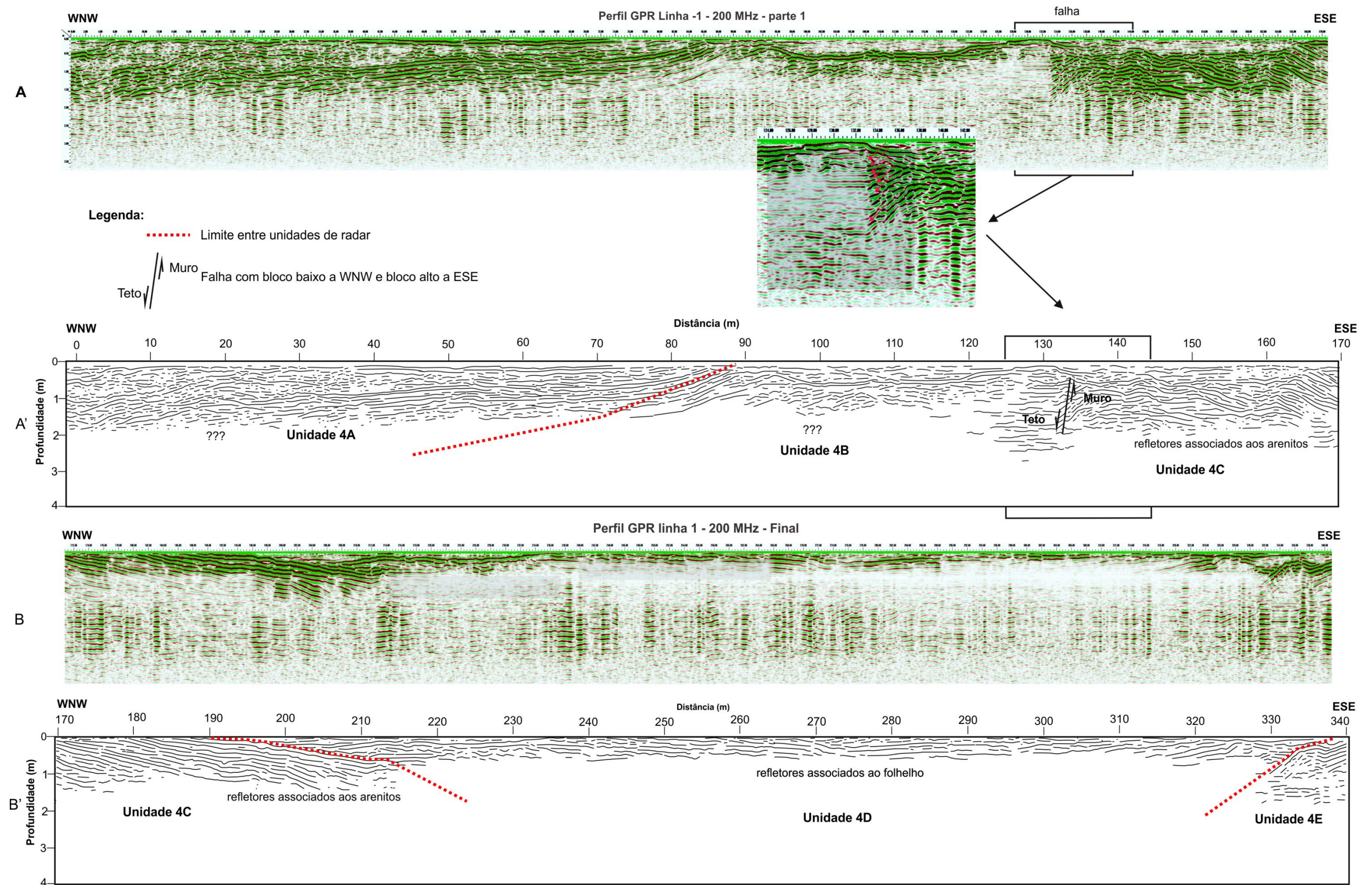
Embora a interpretação acima ainda careça de confirmação sedimentológica e estratigráfica, as evidências até aqui acumuladas nos levaram a adaptar o mapa geológico do PEVV (Fig. 35, página 71, estendendo para WNW a área sustentada pela unidade litológica I/II do chamado arenito Vila Velha. Salientamos que no mapa geológico de Vesely (2006) (ver Figura 12, página 33), esta mapeado para o local os arenitos da Fm. Furnas. Essa atualização pontual do mapa geológico local, que ainda precisar ser devidamente verificada, ressalta a aplicação da metodologia GPR para efeitos de mapeamento geológico.

Figura 24 - A) Vista geral do afloramento de folhelho fossilífero; B) Detalhe do pavimento (retângulo vermelho) contendo impressões de braquiópodes; C) Detalhe das impressões.



Fonte: Acervo pessoal (2017).

Figura 25 - Perfil GPR linha 1 (L-1), radargrama adquirido com antena de 200 MHz, em (A e B) perfil processado e (A' e B') perfil interpretado onde foram desenhadas as superfícies que separam as unidades de radar, e o setor onde ocorre deformação rúptil, as setas vermelhas indicam a deformação e quebra dos refletores associados à camada que se deslocou ao longo do plano de falha.



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

10.1.2. Perfil GPR linha 2 (L-2) - Falha associada à Fm. Furnas e aos depósitos Quaternários indiferenciados.

O radargrama desse perfil foi obtido, seguindo linha de caminhamento que cruza pequeno vale, sob o qual estão mapeados rochas da Fm. Furnas e depósitos quaternários indiferenciados. Além dessas feições, o mapa geológico local indica a presença de falha normal ao longo do setor percorrido pelo radargrama. Foram individualizadas no radargrama três unidades de radar: unidade 1 (U1); unidade 6 (U6), e a unidade 7 (U7), de acordo com as características gerais dos refletores observados na Figura 27, e respeitando, no que toca à litoestratigrafia local.

Unidade de radar 1 (U1): Essa unidade ocorre ao longo de todo o radargrama, que possui 250 m de comprimento. Os refletores que o caracterizam ocorrem em longos pacotes com geometria tabular, paralelos a subparalelos, delimitados por refletores de alta amplitude relativa, lateralmente contínuos e concordantes, com refletores internos bem definidos. Observa-se que os mergulhos aparentes dos refletores dessa unidade são opostos em ambos os lados do local onde estão mapeados os depósitos aluviais (entre aproximadamente 170 e 220 m da origem do radargrama). Os refletores têm mergulhos aparentes para WNW nos primeiros 150 m do perfil, até desaparecerem abruptamente em local que coincide com depósitos aluviais, que foram caracterizados preliminarmente em campo. Aproximadamente a partir do setor medial desses depósitos, a aproximadamente 190 m da origem do perfil, os refletores passam a ter um mergulho aparente para SSW, (Fig. 27-a' e b'). Essa inversão de direção de mergulhos pode estar associada à ocorrência da falha normal mapeada no local (LETENSKI et al. 2009). Segundo esse mesmo mapa (ver figura 11, página 31), as rochas falhadas pertencem aos arenitos da Fm. Furnas, cuja descrição litológica foi abordada nos capítulos 4 e 5. De fato, de acordo com vários radargramas que não foram incluídos neste trabalho, mas que foram obtidos em locais de ocorrência do arenito Furnas, no interior do PEVV, o sinal GPR indica refletores contínuos, lateralmente extensos, com geometria geral paralela a subparalela, individualizando majoritariamente corpos tabulares a lenticulares. Entretanto, apesar do potencial revelado pela aplicação do GPR para a identificação de estruturas falhadas, como sugere o estudo desse caso, é preciso ressaltar que esse perfil ilustra também os efeitos de deformação importante de mergulhos aparentes de refletores GPR, em função de o perfil atravessar

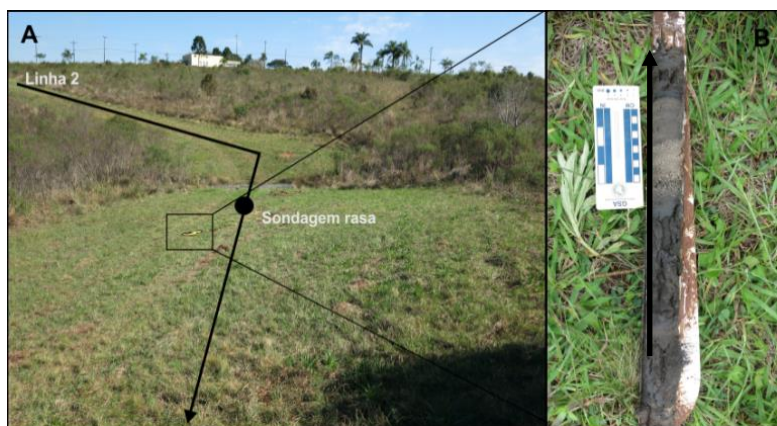
pequeno vale com vertentes adjacentes que mergulham em direções opostas, e de essa variação topográfica não ter sido corrigida a tempo para este trabalho. Ou seja, a oposição de mergulhos aparentes dos arenitos da Fm. Furnas entre os dois lados do depósito aluvial quaternário, deve ser muito menor do que é possível inferir com base nos dados aqui apresentados. A correção topográfica, procedimento essencial nesse estudo de caso, será realizada posteriormente, como desdobramento do projeto.

Unidade de radar 6 (U6): Ocorrendo somente nos primeiros 150 m do perfil, esse unidade está sobreposto, em contato relativamente gradual, ao unidade de radar U1, e é definida por mudança importante da intensidade e da organização espacial dos seus refletores. Nessa unidade, os refletores assumem padrão caótico, com raros refletores apresentando continuidade lateral notável, e revelando sinal de retorno de baixa intensidade (baixa amplitude) (Fig. 27-a e a'). Como revelado por várias sondagens manuais executadas sobre depósitos quaternários preservados sobre os arenitos da Fm. Furnas, associadas aos projetos no qual este trabalho está inserido, esse padrão de refletores está associado aos latossolos (ferrisolos) que estão mapeados no parque, e que ocorrem em associação com a Fm. Furnas, sobretudo ao longo de platôs residuais, mas também ao longo de vales.

Unidade de radar 7 (U7): Presente a partir dos 160 m de origem do radargrama, materializando conjunto de refletores com geometria geral acanalada. Dois conjuntos de refletores são identificados nessa unidade: o primeiro conjunto, mais próximo da superfície, é formado por refletores de alta amplitude, com padrão subparalelo, moderadamente contínuos, e terminando lateralmente em *onlap* contra as superfícies limitantes. O segundo conjunto ocorre entre 1 e 4 m de profundidade, com refletores que são caracterizados por sinal de baixa amplitude e por serem lateralmente descontínuos. Sondagens manuais realizadas a 175 e 183 m da origem do radargrama revelam depósitos típicos de planície aluvial, intercalando lamas turfosas, lamas arenosas, e lentes arenosas, sobrepostas a depósito relativamente espesso de lamas síltico-argilosas entre as profundidades de 3 a 5 m abaixo da superfície (Fig. 26). É bastante provável que essas lamas basais sejam a principal causa da dissipação do sinal EM associado às zonas de refletores com baixa amplitude relativa salientadas ao longo do radargrama. Essa unidade assume geometria lenticular com base côncava, possui extensão de aproximadamente 60 m, e atinge profundidades superiores a 5 m (Fig. 27-b e b').

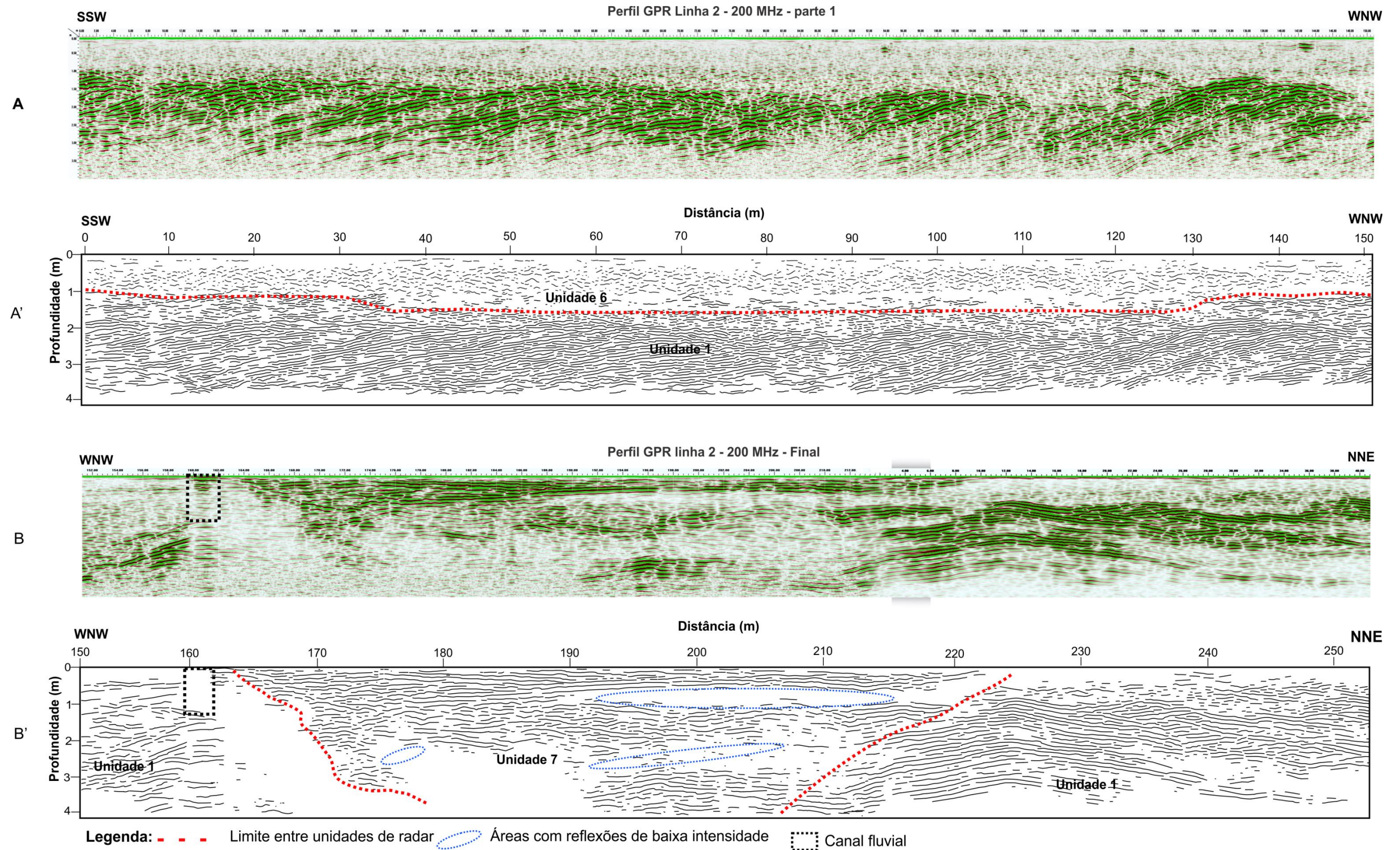
Como exemplo de ponto de controle para obtenção de dados de afloramento, apresentamos testemunho de sondagem rasa, que atingiu profundidade de 4,44 m, (Fig. 26). Podemos notar na figura, camadas de depósito lamoso a turfoso intercaladas com lamas mais ou menos arenosas e com camada de areias médias a grossas. Esses depósitos serão datados posteriormente, apoiando resultados dos projetos em curso.

Figura 26 - Sondagem de ponto de controle, destacando a intercalação de depósito turfoso com camada de areias médias a grossas, onde está posicionada a escala fotográfica. A seta indica o topo do testemunho.



Fonte: Acervo Pessoal (2017).

Figura 27 - Perfil GPR linha 2 (L-2), radargrama adquirido com antena de 200 MHz, em (A e B) perfil processado e (A' e B') perfil interpretado com destaque para as superfícies limitantes que separam as unidades de radar, e para o depósito aluvial; nessa figura ainda é possível observar a nítida mudança de mergulho aparente das camadas do Furnas nos dois lados da canal.



10.1.3. Perfil GPR - linhas 3 (L-3) e 4 (L-4)-Fms. Lagoa Azul e Campo Mourão (arenito Vila Velha)

Esse perfil foi levantado, visando atravessar os contatos entre as unidades I/II e III da Fm. Campo Mourão (arenito Vila Velha), e entres essas com a Fm. Lagoa Azul. O perfil atravessa igualmente falha mapeada, localmente conhecida como falha da Fortaleza (TRZASKOS et al. 2006). Foram realizados no setor levantamentos GPR, associados à aplicação de antenas com frequências de 200 MHz e de 80 MHz. Com base na estratigrafia de radar; no mapeamento geológico disponível para o parque (ver Fig.17 - pag. 45), e na descrição das unidades litológicas do arenito Vila Velha, apresentadas no capítulo 4, foram individualizadas duas superfícies discordantes de natureza erosiva (S1 e S2) que separam quatro unidades de radar, (U2, U3, U4 e U5), (ver figuras 30, 31, 32 e 33).

A seguir serão descritas as principais características dos perfis GPR associados às superfícies e as unidades de radar identificadas. Ressaltamos que essa descrição começa no ponto final das linhas de caminhamento dos perfis GPR 3 e 4 (entre 1600/1900 m a partir da origem), pois foi feita a opção de apresentar os resultados obtidos, seguindo a ordem ditada pela estratigrafia, que seria invertida caso seguissemos o sentido da linha de caminhamento. Igualmente, devido a problemas operacionais negligenciados em campo (associados a excesso de ruído captado pelas antenas de 80 MHz, que não são blindadas, tornando-as sensíveis a sinais externos) parte do setor mapeado que contempla justamente a falha da Fortaleza não gerou resultados que permitam visualização de alcance mais profundo. Em função disso, apresentamos para o setor que abarca a falha da Fortaleza apenas resultados obtidos com antena de 200 MHz.

Iniciamos ressaltando que as superfícies individualizadas (S1 e S2) definem unidades de radar bidimensionais relativamente extensas em relação às unidades de radar descritas anteriormente. Essas superfícies separam unidades de radar também temporalmente mais profundos, com refletores internos bem delineados e com padrões de distribuição espacial suficientemente claros, conjugando características que possibilitariam a aplicação da abordagem denominada análise de fácies de radar. Mas essa abordagem não é desenvolvida neste trabalho, de modo a evitar extrapolar os seus objetivos iniciais.

Apesar disso, o estudo desse caso, revela superfícies que podem ser interpretadas como superfícies limitrofes, separando diferentes

unidades litoestratigráficas mapeadas no parque e no seu entorno. A presença de grupos de hipérbolos de refração ao longo das possíveis superfícies limitrofes, facilitou o seu reconhecimento nos perfis não processados, como será discutido mais adiante, de modo a ilustrar a importância diagnóstica de ruídos GPR.

A superfície S1 desaparece na base dos radargramas, em função do alcance obtido com as configurações utilizadas durante a aquisição de dados, com as antenas de 80 e 200 MHz. Pode-se observar, porém, que os radargramas apresentam sinal claro até as suas bases, indicando que novos dados podem ser obtidos, iluminando mais profundamente as unidades mapeadas, seja através do aumento da janela temporal de aquisição para as frequências já utilizadas, seja através de aplicação de antenas GPR de frequência mais baixa.

A superfície S1 foi mapeada até a profundidade de 12 m, apresentando extensão lateral visível de aproximadamente 190 m, e assumindo configuração côncava, com suave mergulho para a direção WNW, (ver figuras 30-b e b' e 32-b e b'). A superfície separa duas unidades de radar com características bem distintas no que toca à configuração geral dos seus refletores.

Unidade de radar 2 (U2): Ocorre na parte final do perfil GPR entre 1600 a 1900 m a partir da origem), sendo limitada acima pela superfície S1. O unidade 2 (U2) é representada por refletores de baixa magnitude relativa (indicativo de litologias homogêneas ou finas) que se agrupam abaixo da superfície limítrofe, na parte inferior do radargrama, e próximos da superfície topográfica, assumido padrão de distribuição oblíqua, em mergulhos cruzados, onde os refletores são descontínuos, próximos à superfície do terreno, e distribuição subparalela, onde os refletores atingem profundidades superiores a 12,5 m, abaixo da superfície S1. Observa-se forte atenuação do sinal eletromagnético (EM) em profundidade, abaixo de toda a superfície S1, sobretudo no setor WSW do radargrama.

Esse padrão de reflexão está provavelmente associado aos arenitos intercalados por lentes arenosas que caracterizam as unidades litoestratigráficas descritas pela literatura (FRANÇA et al., 1996) para a área atravessada pelo radargrama (Fig. 28). A unidade de radar apresenta geometria tabular com o topo côncavo, (ver figuras 30-b e b' e 32-b e b').

De acordo com o conjunto de refletores observados, e considerando a localização do radargrama no mapa geológico do parque (Fig. 17 - pag. 45), a unidade 2 (U2) pode estar relacionada ao membro

Tarabaí (diamictitos e folhelhos rítmicos de cor marrom avermelhada, intercalados isoladamente por lentes arenosas), topo da Fm. Lagoa Azul.

Como ponto de controle (ponto 3) foi descrito afloramento ao longo do perfil de caminhamento.

Ponto 3 – Localização: Perfil GPR linhas 3 e 4 (L-3 e L-4), Unidade Litoestratigráfica: Grupo Itararé, (Fm. Lagoa Azul).

Descrição: arenito de granulometria fina a média, bem selecionado de coloração castanho-amarelada, (estrutura maciça?), intercalado com lentes arenosas no topo. As lentes são maciças ou com gradação normal, mal selecionadas, com espessura variando entre 1 a 3 cm.

Figura 28 - Afloramento localizado ao longo da estrada, ilustrando arenito amarelado intercalado por lentes arenosas.

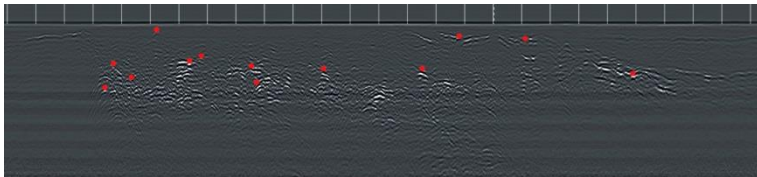


Fonte: Acervo pessoal (2017).

Unidade de radar 3 (U3): limitada na base pela superfície S1, essa unidade é caracterizada internamente por conjunto de refletores de alta amplitude relativa, com continuidade lateral variável, apoiados em *onlap* sobre S1 e assumindo padrão de distribuição oblíquo, em conjuntos cruzados com refletores internos bem definidos. A unidade (U3) apresenta geometria geral irregular, lateralmente continua, sendo limitada nas extremidades a WSW pela S1 e a ESE pelo plano da falha

da Fortaleza (ver figuras 30-a' e b' e 32-a' e b'). Outra característica marcante dessa unidade, observada somente no radargrama não processado, foi a presença de várias hipérboles (figuras de refração) que ocorrem de forma isolada, dispersas no corpo da unidade. Esse fato pode ser interpretado como indicativo de clastos isolados dispersos no interior da rocha (Fig. 29). De acordo com a geologia local e a subdivisão proposta por Vesely (2006), (Fig. 17 - pag. 45), essa unidade de radar (U3) pode estar associado à unidade litológica I do arenito Vila Velha (constituída por conglomerados e arenitos mal selecionados, com as fácies, Gc, Gm, Gg, Sp/St, e Sh).

Figura 29 - Setor de um radargrama não processado, os pontos vermelhos indicam a presença de hiperbóles isoladas ao longo da unidade 3.



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Unidade de radar 4 (U4): Essa unidade localiza-se nos primeiros 950 m do perfil, sendo limitada acima pela superfície erosiva (S2), que apresenta continuidade lateral marcante ao longo das seções GPR. A superfície mergulha suavemente, definindo traçado ondulado, ao longo dos primeiros 300 m a partir da origem do perfil, seguindo direção WNW, e evidenciando paleo-relevo com depressões localizadas. A superfície S2 ultrapassa o alcance temporal definido para as antenas utilizadas, atingindo profundidades estimadas de aproximadamente 11 m (ver figuras 30-a', 31-a' e b', 32- a'e 33- a' e b').

É verificado na unidade 4 forte atenuação do sinal GPR. Os refletores se organizam em padrões paralelos a subparalelos, de caráter ondulado, nas proximidades de S2. Esses refletores apresentam forte magnitude relativa, de início, com pouca continuidade lateral, mas ficam praticamente transparentes no espaço de aproximadamente 1 m abaixo da S2. Os radargramas indicam que a unidade 4 não gera refletores notáveis, e que é definida no topo por geometria com alto grau de variação lateral. Sua espessura máxima pode atingir, segundo os perfis GPR obtidos, mais de 10 m, permanecendo provavelmente mapeável

através da aplicação de antenas GPR de frequência mais baixa (ver figuras 31-a' e b' e 33-a' e b').

Unidade de radar 5 (U5): Essa unidade está sobreposta em discordância com o unidade 4 (U4), através da superfície erosiva S2. A unidade 5 é caracterizada por refletores de magnitude variável, que se distribuem lateralmente em padrão ondulado, atingindo. Seus refletores internos são bem definidos, atingindo extensão lateral variável, distribuídos em geral de modo oblíquo cruzado, formando por vezes subsets de ondulações de menor amplitude. O que pode ser melhor observado entre 250 a 340 m da origem do perfil, onde os refletores convergem em direção às cavas das ondulações, terminando em *downlap* ou em concordância sobre S2 (ver figuras 31-a' e b' e 32- a' e 33-a' e b', páginas 67, 68 e 69). Já no setor intermediário do radargrama, os refletores terminam lateralmente em *onlap* sobre S2 (ver figuras 31-a' e b' e 32-a' e 33-a' e b', páginas 67, 68 e 69. Essas terminações ocorrem em *toplap* quando próximos da superfície do terreno, como esperado para o que pode ser caracterizado como passagem para a superfície de truncamento quaternária.

O conjunto desses refletores evidencia camada de geometria tabular com base côncava (?), com extensão lateral de aproximadamente 950 m, atingindo espessura superior a aproximadamente de 12 m (ver figuras 30-a', 31-a' e b', 32-a' e 33-a' e b').

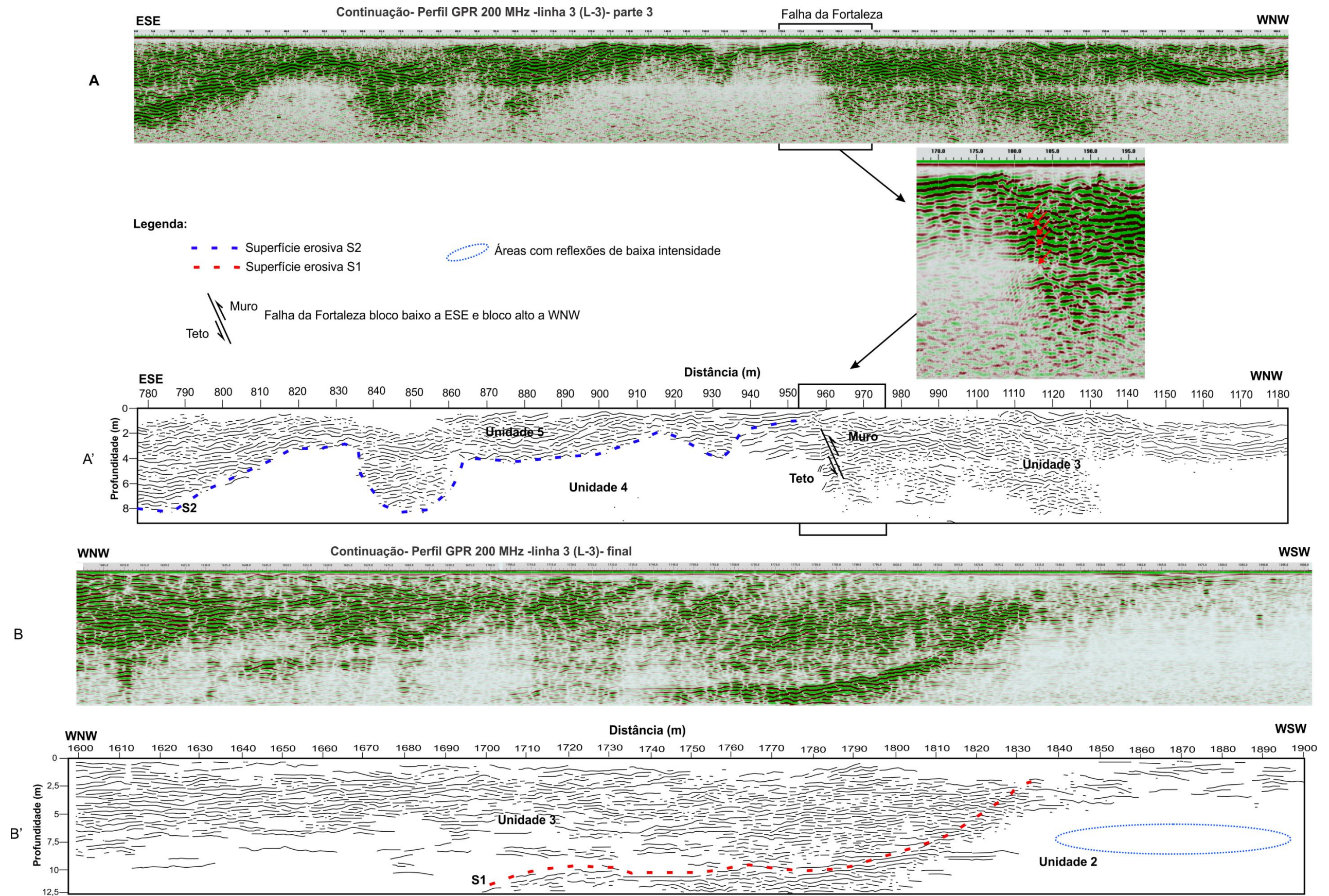
Tanto o unidade de radar 4 (U4) quanto o unidade 5 (U5) são truncadas lateralmente pelo plano da denominada falha da Fortaleza (cuja direção é N10-20E) (TRZASKOS et al. 2006). O radargrama da Figura 30-a e a', ilustra o contato por falha entre essas unidades e a unidade 3 (U3), implicando rejeito importante do ponto de vista estratigráfico.

Levando em consideração: a) o forte sinal associado à superfície S2 nas seções GPR, definindo passagem entre os unidades de radar 4 (U4) e 5 (U5); b) as características de reflexão bastante distintas entre essas unidades; c) a posição das linhas GPR L-3 e L-4 no mapa geológico (ver Fig.17 - pag. 45), os quais atravessam setor do PEVV onde estão mapeadas as unidades litológicas I/II e III do arenito Vila Velha; d) a presença da falha da Fortaleza, é possível associar diretamente os unidades de radar 4 (U4) e 5 (U5) às unidades II e III do arenito Vila Velha, caracterizadas, respectivamente por uma sucessão glacio-marinha argilosa composta de intercalações de diamictitos, ritmitos, siltitos e folhelhos, com níveis de arenitos médios e por

arenitos avermelhados, que são interpretados como turbiditos, (VESELY, 2006).

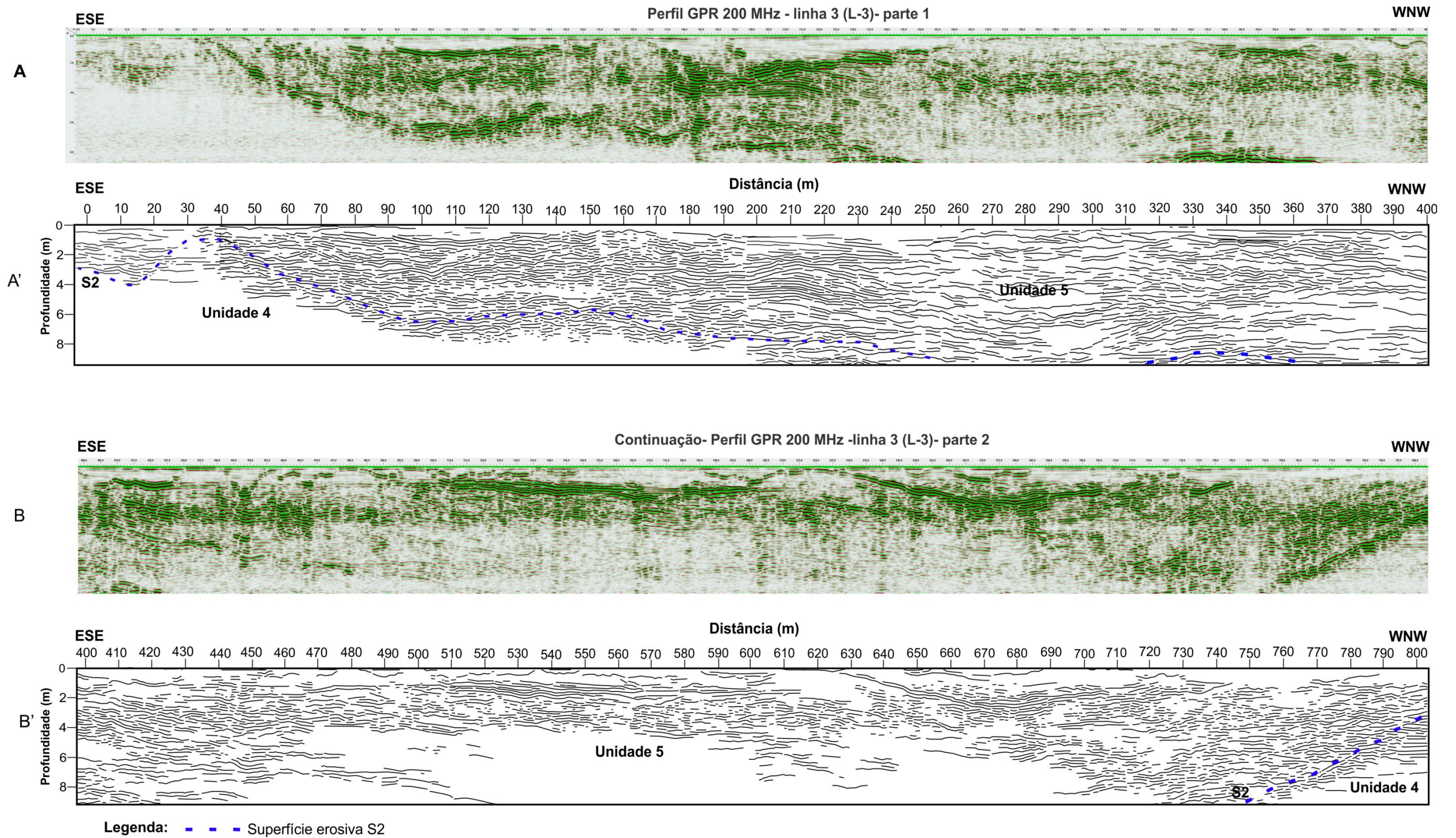
Caso essa interpretação seja confirmada, como aparenta ser provável, a superfície S2 marca a transição da unidade II para a unidade III do arenito Vila Velha, caindo em acordo com a descrição e a interpretação de Vesely (2006) para esse contato. Esse autor considera incerta a origem da superfície erosiva que separa as referidas unidades litológicas, embora seja avançada a hipótese de erosão subaérea, associada à queda do nível de base, decorrente de soerguimento glácio-isostático, o que a definiria como superfície limítrofe de 6ª ordem com base na classificação de Miall (1988, apud VESELY, 2006).

Figura 30 - Perfil GPR linha 3 (L-3), radargrama adquirido com antena de 200 MHz , em (A) perfil processado e (A') perfil interpretado onde foi desenhada a superfície erosiva S2, e a intersecção com a falha da Fortaleza, as setas vermelhas sinalizam a deformação e quebra dos refletores associados à camada que se deslocou ao longo do plano de falha; B) final do perfil GPR linha 3, radargrama processado; B') perfil interpretado destacando a superfície erosiva S1 e as unidades de radar adjacentes.



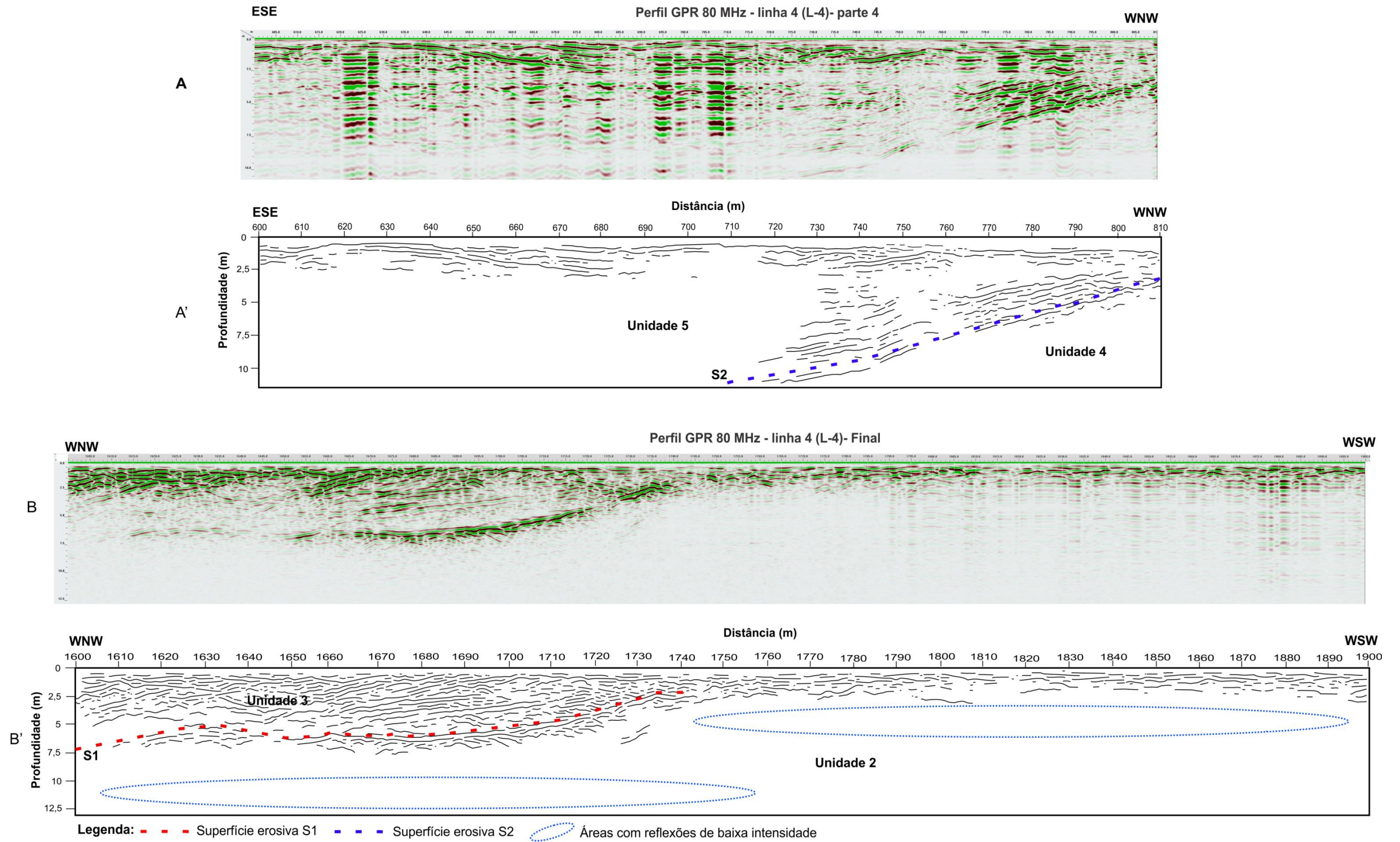
Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Figura 31 - Perfil GPR linha 3 (L-3), radargrama adquirido com antena de 200 MHz , em (A e B) perfil processado e (A' e B') perfil interpretado destacando a irregularidade da superfície erosiva S2 e as unidades de radar adjacentes.



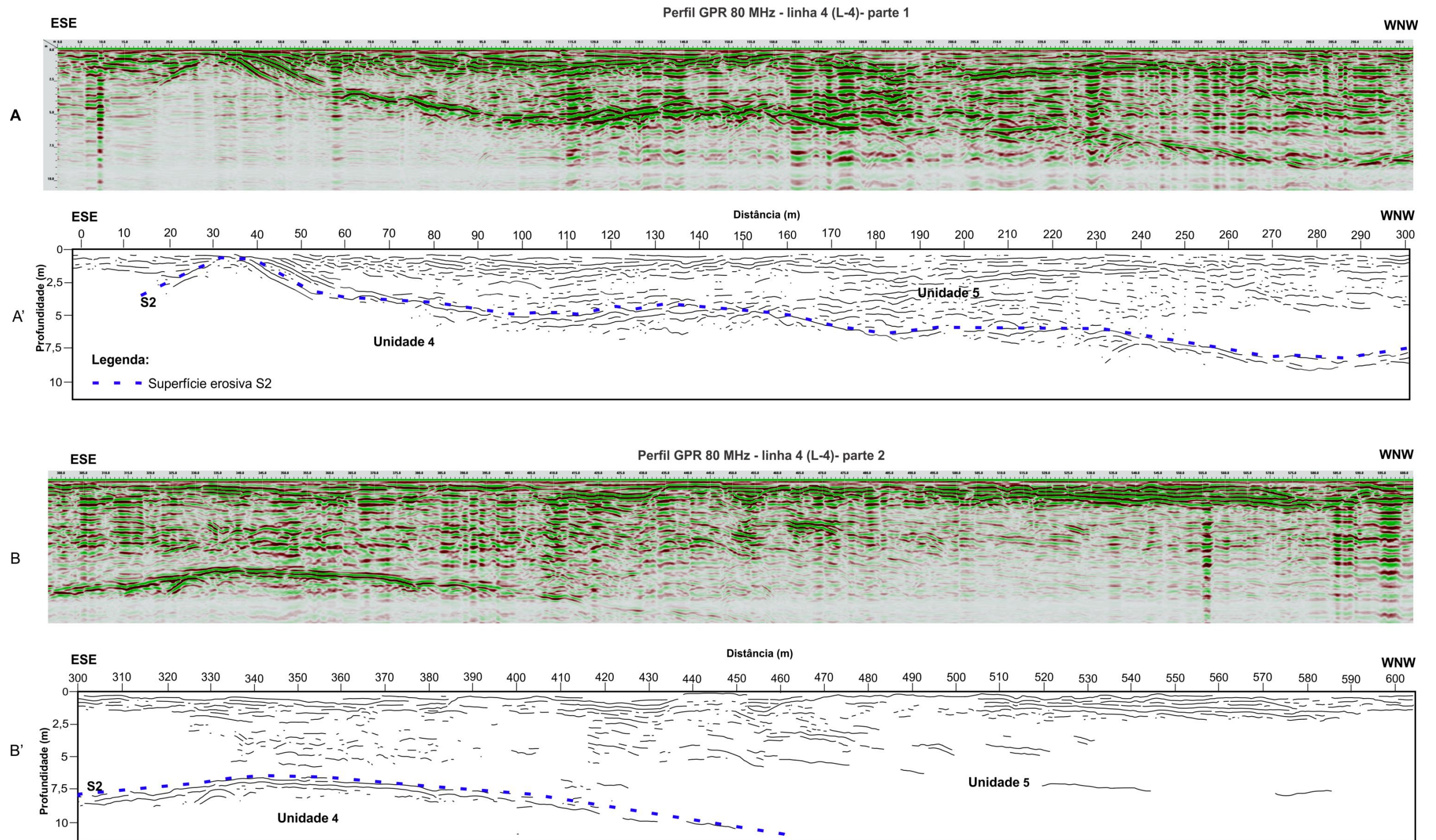
Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Figura 32 - Perfil GPR linha 4 (L-4), radargrama adquirido com antena de 80 MHz , em (A e B) perfil processado e (A' e B') perfil interpretado com destaque para as superfícies erosivas S1 e S2. Lembrando que aqui está faltando o setor da falha da Fortaleza.



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Figura 33 - Perfil GPR linha 4 (L-4), radargrama adquirido com antena de 80 MHz , em (A e B) perfil processado e (A' e B') perfil interpretado destacando a superfície erosiva S2 e as unidades de radar adjacentes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

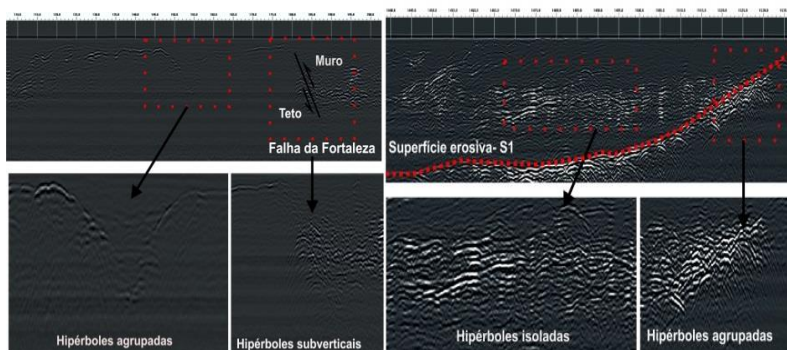
10.1.4. Feições hiperbólicas: ruídos significativos

Apesar de a metodologia de processamento de imagens GPR ter como objetivo diminuir a relação ruído/sinal, ruídos de refração associados a alvos de caráter pontual, em relação a uma linha de caminhamento GPR, oferecem feições de radar que permitem, quando há resolução suficiente e necessidade de fazê-lo, caracterizar esses alvos pontuais. Feições hiperbólicas resultam da aproximação e do afastamento da antena GPR ao cruzar alvos pontuais, gerando refletor de refração que depende do tempo duplo de propagação das ondas EM no meio atravessado. Segundo GSSI (2001), hipérbolas ocorrem associadas a raízes, tubos, cabos, blocos, seixos, ou qualquer outro corpo de geometria pontual em relação ao radargrama. Isso acontece porque o pulso de onda eletromagnética tem a forma de um cone que se expande na direção de propagação, atingindo o objeto pontual antes, durante e depois da passagem do GPR. O resultado é a geração de refletor hiperbólico com o vértice centrado no alvo pontual, e com lados que são tanto mais profundos quanto maior é a velocidade de propagação do pulso EM no meio. Sua ocorrência, em ambiente de rochas sedimentares, portanto, indica a presença de seixos, blocos e planos com mergulhos muito elevados, como fraturas e falhas.

Neste trabalho os ruídos hiperbólicos foram caracterizados por sinais de alta amplitude relativa, que aparecem em três circunstâncias distintas, (Fig. 34): a) hipérbolas isoladas, associadas principalmente aos perfis GPR levantados ao cruzar as unidades litológicas I/II do arenito Vila Velha, possivelmente relacionados a elastos dispersos nas rochas), (Fig. 35); b) hipérbolas agrupadas, marcando superfícies erosivas, que delimitam unidades de radar distintos, como por exemplo, na transição da unidade 2 (U2) para o unidade 3 (U3) e entre o unidade 4 (U4) para o unidade 5 (U5) (ver figuras 30-b e b' e 31-a e a''), (Fig. 35); c) feições hiperbólicas em sequência, vertical a subvertical, que foram interpretadas como associadas a falhas, (Fig. 35).

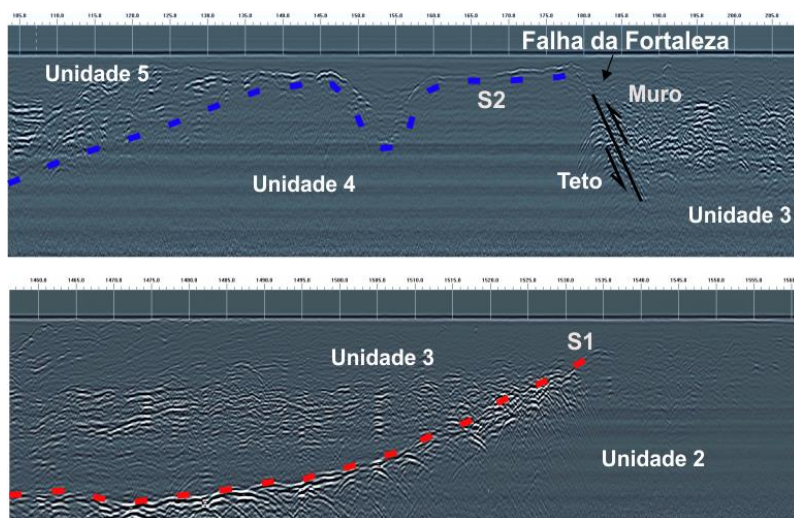
Como mencionado anteriormente, quando aplicada à geologia, essas feições, que são propriamente um artefato criado pela geometria de propagação do pulso EM, são classificadas como ruídos. E, enquanto ruídos, devem ser eliminados do radargrama, apesar de serem ricos em significados geológicos e sedimentológicos.

Figura 34 - Tipos de ruídos hiperbólicos observados nos radargramas não processados.



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Figura 35 - Radargrama não processado, com destaque para as hiperbóles presentes ao longo das superfíes erosivas; associadas à falha da Fortaleza; e ao longo da unidade de radar 3.

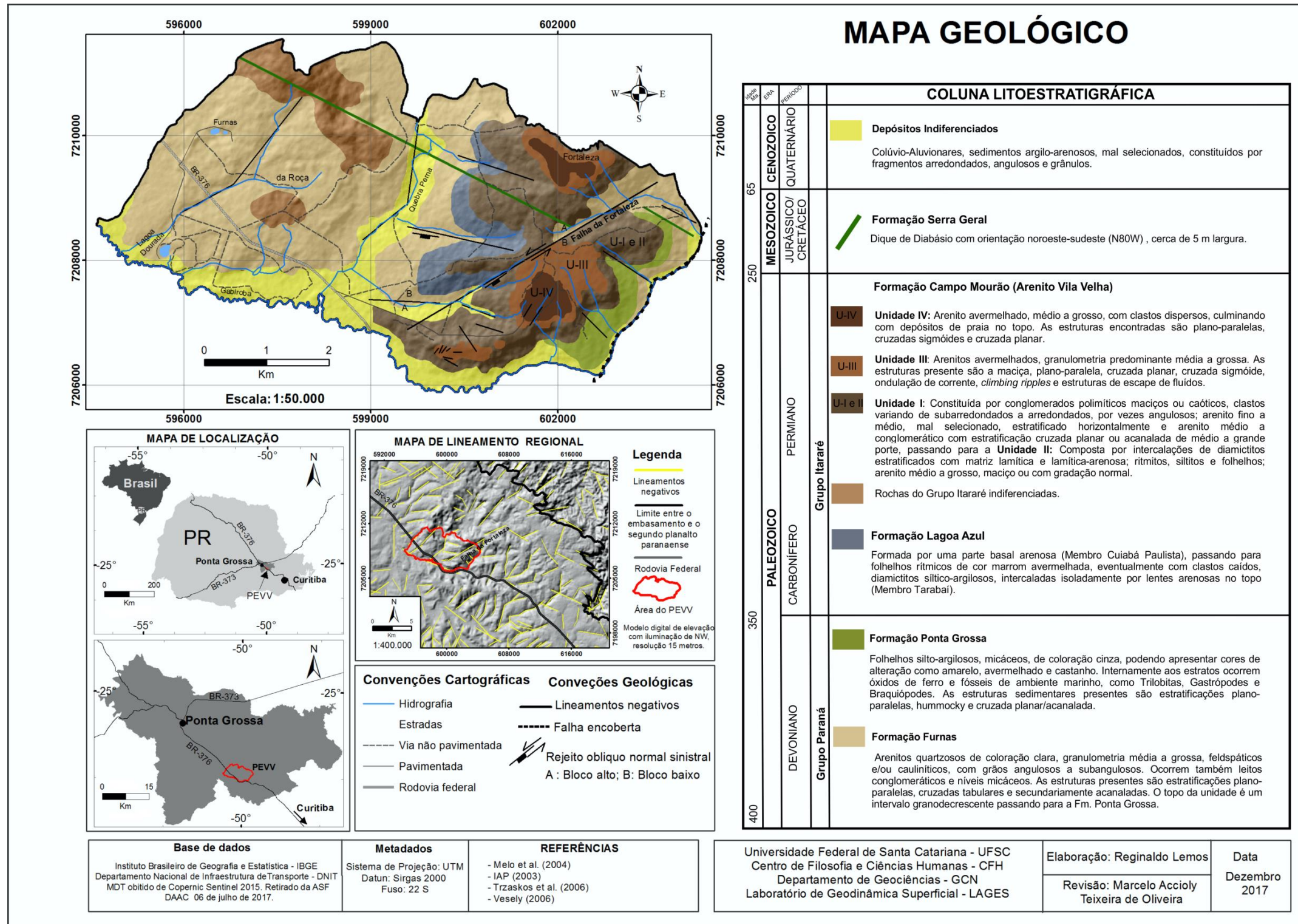


Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

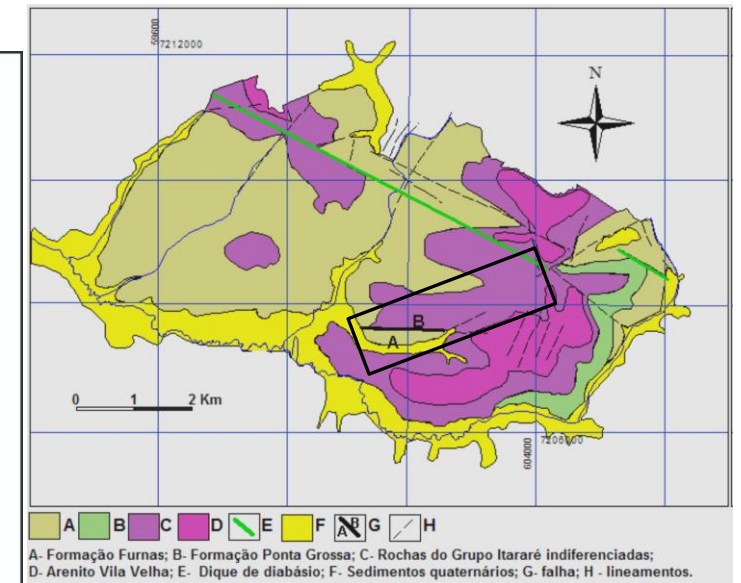
10.1.5 . Atualização do mapa geológico do PEVV.

Com base nos dados compilados da literatura (ver figuras 11 – pag. 31 e 12 – pag. 33), e respeitando os resultados aqui apresentados, foi elaborado um mapa geológico para o Parque Estadual de Vila Velha, (Fig. 36). Como mencionado anteriormente, foram incluídas nesse mapa algumas modificações associadas à ocorrência espacial das litologias mapeadas, como sugerido pelos resultados GPR. Como pontos de controle para a elaboração desse mapa, foram usados dados de afloramento descritos na literatura, (Anexo-A-Tabela 8). Salientamos, portanto, a utilidade da metodologia GPR para aplicação em mapeamento geológico.

Figura 36 - Atualização do mapa geológico do Parque Estadual de Vila Velha com base nos dados dos radargramas e nos mapas já existentes.

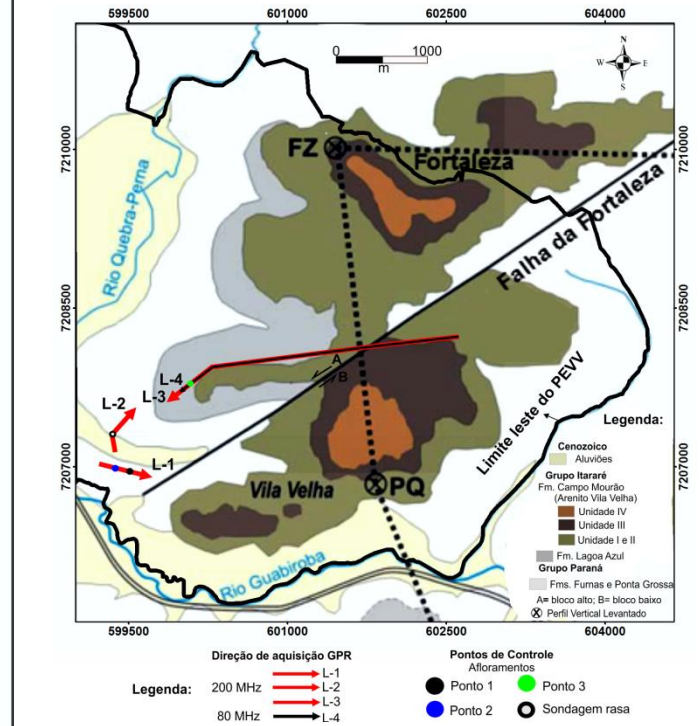


Mapa geológico do Parque Estadual de Vila Velha, o retângulo preto indica a área aproximada do local de estudo.



Fonte: Adaptado de Letenski et al. (2009) e modificado de Melo (2004).

Subdivisão das unidades litológicas do arenito Vila Velha (Fm. Campo Mourão) na borda leste do



Fonte: Modificado de Vesely (2006) e Trzaskos et al. (2006).

11. CONCLUSÕES

Concluindo a descrição genérica das unidades de radar mapeadas, de seus contatos, e características específicas, podemos apresentar a seguinte síntese das associações feitas neste trabalho entre unidades de radar e unidades geológicas já mapeadas no setor analisado do PEVV, fazendo referência aos perfis GPR aqui apresentados, (Tabela 7).

Tabela 7 - Síntese entre as unidades de radar e as unidades geológicas definidas por Vesely (2006).

Linhas GPR	Pacotes de radar	Unidades Geológicas
L-2	U-7	Depósitos aluviais
	U-6	Latossolos
L-3 e L-4	U-5	Unidade III Fm. Campo Mourão (arenito Vila Velha)
L-1	U-4E	Unidade I/II Fm. Campo Mourão (arenito Vila Velha) (?)
	U-4D	
	U-4C	
	U-4B	
	U-4A	
L-3 e L-4	U-4	Unidade II Fm. Campo Mourão (arenito Vila Velha)
	U-3	Unidade I Fm. Campo Mourão (arenito Vila Velha)
	U-2	Fm. Lagoa Azul (membro Tarabai)
L-2	U-1	Fm. Furnas

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

A associação sintetizada na tabela acima, ainda que fundamentada na descrição genérica e pouco detalhada de conjuntos de refletores GPR, constitui um dos principais resultados deste trabalho, ilustrando o potencial da aplicação da metodologia GPR à estratigrafia rasa e ao mapeamento geológico.

O conjunto de resultados alcançados confirma a aplicação dessa metodologia à geofísica de alta resolução de rochas sedimentares associadas ao Grupo Paraná e ao Grupo Itararé, ressaltando, na ordem de apresentação:

a) a necessidade de adaptação do mapa geológico do PEVV, em decorrência da resolução de detalhe do georadar, implicando em revisão da estratigrafia local, que deverá ser encaminhada posteriormente, como desdobramento deste trabalho;

b) a possibilidade de mapeamento e de caracterização de contatos de falha;

c) a definição de características genéricas das diferentes litologias mapeadas, no que toca à configuração geral de refletores GPR, que foram ressaltados, segundo a metodologia geral proposta;

d) a necessidade de cautela ao descrever mergulhos aparentes em

setores mapeados que apresentem variação importante do relevo de superfície (efeitos associados à ausência de correção topográfica);

e) a delimitação de depósitos e de superfícies de truncamento quaternárias;

f) a definição de superfícies limítrofes, passíveis de classificação hierárquica (possíveis desdobramentos futuros);

g) a definição de conjuntos de refletores que permitirão a descrição e interpretação de fácies de radar, também em trabalhos futuros.

Os resultados obtidos, portanto, podem ser considerados como preliminares, em função dos escopos deste trabalho. Mas o seu alcance é bastante promissor, e aponta para a necessidade de aprofundamento das informações obtidas e das interpretações feitas, de modo a caracterizar com maior precisão as associações possíveis entre fácies de radar e litofácies associadas às Formações Furnas, Lagoa Azul, Campo Mourão e depósitos quaternários.

No total, foram identificadas e mapeadas duas superfícies discordantes de origem erosiva (S1 e S2); doze unidades de radar (U-1, U-2, U-3, U-4, U-4A, U-4B, U-4C, U-4D, U-4E, U-5, U-6 e U-7), e seis tipos genéricos de conjuntos de refletores associados à geologia local (paralelos, subparalelos, divergentes, caóticos e sigmoidais).

Igualmente, foi salientada a importância metodológica da identificação de feições hiperbólicas que, nos casos estudados, devem estar associadas à ocorrência de clastos esparsos, ao longo de superfícies erosivas, e de clastos caídos em depósitos glaciais, como os que são característicos do ambiente de formação das unidades litológicas da Fm. Campo Mourão (arenito Vila Velha), Vesely (2006). Feições hiperbólicas também foram identificadas em associação com locais de ocorrência de falhas.

Por fim, salientamos o mapa geológico realizado, que já apresenta algumas atualizações associadas às interpretações estratigráficas realizadas até o momento. Em alguns casos, essas interpretações precisam ser confirmadas por levantamentos futuros de maior detalhe. Porém, na medida em que houver avanços que permitam eventualmente confirmar a necessidade de atualização do mapa geológico local, essas informações serão repassadas para os gestores do parque, após publicação. Configurando contribuição que já está sendo valorizada por gestores e guias que trabalham no Parque Estadual de Vila Velha.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, T. P. **Sistema fluvial ou dominado por maré? Estudos de processos de sedimentação e arquitetura deposicional no Canyon Do Guartelá, Formação Furnas, Devoniano inferior, Bacia Do Paraná, Brasil.** 2016. 61 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.
- ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y. **O pré-cambriano do Brasil.** Editora Edgard Blücher, 19840.
- ANNAN, A. P. Ground Penetrating Radar Principles, Procedures, and Applications, 286 pp., Sensors and Software. **Inc., Mississauga, Ontario, Canada,** 2004.
- ASSINE, M. L.; PERINOTTO, J. A. J.; FÚLFARO, V. J.; PETRI, S. 1998. Progradação deltaica Tibagi no Devoniano da Bacia do Paraná. São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, V 34, 2004.
- ASSINE, M. L. Fácies, icnofósseis, paleocorrentes e sistemas deposicionais da Formação Furnas no flanco sudeste da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 29, n. 3, p. 357-370, 1999.
- ASSINE, M. L. **Aspectos da estratigrafia das sequências pré-carboníferas da Bacia do Paraná no Brasil.** 1996. 207 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.
- ASSINE, M. L.; SOARES, P. C.; MILANI, E. J. Sequências tectono-sedimentares mesopaleozóicas da Bacia do Paraná, sul do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 24, n. 2, p. 77-89, 1994.
- BERGAMASCHI, S. **Análise estratigráfica do Siluro - Devoniano Bacia do Paraná, Brasil.** 1999. 167 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

BORGES, W, R. **Investigações geofísicas na borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e Eletorresistividade.** 2002. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geofísica, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

DAGALLIER, G. et al. Ground penetrating radar application in a shallow marine Oxfordian limestone sequence located on the eastern flank of the Paris Basin, NE France. **Sedimentary Geology**, v. 130, n. 3, p. 149-165, 2000.

EYLES, N. Earth's glacial record and its tectonic setting. **Earth-Science Reviews**, v. 35, n. 1-2, p. 1-248, 1993.

DINIZ, M. N. **Interpretação ambiental da Formação Ponta Grossa na parte central da Bacia do Paraná: um estudo de subsuperfície.** 1985. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1985.

FERREIRA, F. J. F. **Integração de dados aeromagnéticos e geológicos: configuração e evolução tectônica do Arco de Ponta Grossa.** 1982. 169 f. Dissertação (Mestrado). Curso de Geologia, Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo. São Paulo, 1982.

FRANÇA, A. B; POTTER, P. E. Estratigrafia, ambiente deposicional e análise de reservatório do Grupo Itararé (Permocarbonífero), Bacia do Paraná (Parte 1). **Boletim de Geociências da PETROBRÁS**, v. 2, n. 2/4, p. 147-191, 1988.

FRANÇA, A. B; WINTER, W. R; ASSINE, M. L. Arenitos Lapa-Vila Velha: um modelo de trato de sistemas subaquosos canal-lobos sob influência glacial, Grupo Itararé (CP), Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 26, n. 1, p. 43-56, 1996.

GSSI. **Handbook for Radar Inspection of Concrete.** [S.l.]: [s.n.], 2001.

HETEREN, S. V. et al. Radar facies of paraglacial barrier systems: coastal New England, USA. **Sedimentology**, v. 45, n. 1, p. 181-200, 1998.

Instituto Ambiental do Paraná (Org.). **Plano de Manejo do Parque Estadual de Vila Velha**. 1. ed. Curitiba, 2004. 124 p.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Banco de dados: geociências. Acesso em: 10 de julho de 2011. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/geologia.htm>.

Instituto nacional de colonização e reforma agrária (incra). Diretoria de ordenamento da estrutura fundiária coordenação geral de cartografia. **Norma Técnica para Georreferenciamento de Imóveis Rurais**. 3a Edição, INCRA. Brasília, 2013.

KEAREY, P; BROOKS, Michael; HILL, Ian. **An introduction to geophysical exploration**. John Wiley & Sons, 2013.

KELLER, G. V. Rock and mineral properties. **Electromagnetic methods in applied geophysics**, v. 1, p. 13-51, 1988.

LANGE, F. W.; PETRI, S. The Devonian of the Paraná Basin. In: BIGARELLA, J. J. (Ed.). **Problems in Brazilian Devonian geology**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1967. p. 5-55. (**Boletim Paranaense de Geociências**, 21/22).

LETENSKI, R et al. Geoturismo no Parque Estadual de Vila Velha: nas trilhas da dissolução. **Pesquisas em Turismo e Paisagens Cársticas**, v. 2, n. 1, p. 5-15, 2009.

MAACK, R. A. 1946. Geologia e geografia da região de Vila Velha (Paraná) e considerações sobre a glaciação carbonífera no Brasil. **Arquivos do Museu Paranaense**, 5: 1-305.

MELO, M. S; GODOY, L. C; MENEGUZZO, P. M; DA SILVA, D. J. P. A geologia no plano de manejo do Parque Estadual de Vila Velha. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 34, n. 4, p. 561-570, 2004.

MIALL, A. D. Reservoir heterogeneities in fluvial sandstones: lessons from outcrop studies. **AAPG bulletin**, v. 72, n. 6, p. 682-697, 1988.

MILANI, E. J; MELO, J. H. G; SOUZA, P. A; FERNANDES, L. A; FRANÇA, A. B. 2007. Bacia do Paraná. Rio de Janeiro, **Boletim de Geociências da PETROBRÁS**, 15(2): 265 - 287.

MILANI, E. J; RAMOS, V. A. Orogenias paleozóicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, n. 4, p. 473-484, 1998.

MINEROPAR- MINERAIS DO PARANÁ Universidade Federal do Paraná-UFPR. **Mapeamento Geológico da Folha de Ponta Grossa (1:100.000)**. 1. Ed. Curitiba, 2007. 158 p.

MINEROPAR-MINERAIS DO PARANÁ, S. A. Mapa geológico do Estado do Paraná. **Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM), Brasília, 1map**, 1989.

MITCHUM, R. M; VAIL, P. R; SANGREE, J. B; 1977b. Seismic stratigraphy and global changes of sea level: Part 6. Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences In: Payton, C.E. (Ed.), **Seismic Stratigraphy-Applications to Hydrocarbon Exploration**. AAPG Mem. 16, p. 117– 133.

MITCHUM Jr., R.M. 1977a. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part II: Glossary of Terms Used in Seismic Stratigraphy. In: Payton, C.E. (ed.). **Seismic Stratigraphy-Applications to Hydrocarbon Exploration**. The American Association of Petroleum Geologists Memoir 26, p. 205-212.

Modelo Digital de Elevação. Disponível em <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/#>: Acessado em: 6 de julho de 2017.

NEAL, A; 2004. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. **Earth-Science Reviews** 66, 261–330.

OLIVEIRA, M. A. T. et al. Upper Pleistocene to Holocene peatland evolution in Southern Brazilian highlands as depicted by radar stratigraphy, sedimentology and palynology. **Quaternary research**, v. 77, n. 3, p. 397-407, 2012.

PETRI, S. 1948. Contribuição ao Estudo do Devoniano Paranaense. DNPM/DGM, Boletim 129: 1-125.

PORSANI, J. L. "**Ground penetrating radar (GPR): proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado-SP**". 1999. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista, 30.03. 99.

REISS, S; REICHERTER, K. R.; REUTHER, C. D. Visualization and characterization of active normal faults and associated sediments by high-resolution GPR. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 211, n. 1, p. 247-255, 2003.

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

RODRIGUES, S. I. **Contribuições dos métodos gpr e eletromagnético indutivo em estudos de sítios arqueológicos de sambaquis costeiros no Estado de Santa Catarina**. 2009. 235 f. Tese (Doutorado). Curso de Geofísica, Departamento de Geofísica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

ROSSETTI, D. F. Delineating shallow Neogene deformation structures in northeastern Para State using ground penetrating radar. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 75, n. 2, p. 235-248, 2003.

ROSSETTI, D. F; GÓES, A. M; SOUZA, L. S. B. Estratigrafia da sucessão sedimentar Pós-Barreiras (Zona Bragantina, Pará) com base em radar de penetração no solo. **Brazilian Journal Of Geophysics**, São Paulo, v. 19, n. 2, p.1-18, 30 ago. 2001.

ROQUE, C. **Análise Morfo-sedimentar da Sequência Depositional do Quaternário Superior da Plataforma Continental Algarvia Entre**

Faro e a Foz do Rio Guadiana. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geologia, Departamento de Geologia, Universidade de Lisboa, 221pp. Lisboa, 1998.

SANFORD, R. M.; LANGE, F. W. Basin-study approach to oil evaluation of Paraná miogeosyncline, south Brazil. **AAPG Bulletin**, v. 44, n. 8, p. 1316-1370, 1960.

SANGREE, J. B.; WIDMIER, J. M. Interpretation of depositional facies from seismic data. **Geophysics**, v. 44, n. 2, p. 131-160, 1979.

SCHNEIDER, R. L. et al. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: **Congresso brasileiro de Geologia**. 1974. p. 41- 65.

SOUZA, L. S. B. **Evidências tectônicas no leste da ilha do marajó: integração de dados morfoestruturais e geofísicos.** 2010. 203 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

TRZASKOS, B; VESELY, F. F; ROSTIROLLA, S. P. Eventos tectônicos recorrentes impressos no arcabouço estratigráfico do Grupo Itararé na região de Vila Velha, Estado do Paraná. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 58, p. 98-104, 2006.

VESELY, F. F. et al. Sedimentary record of a fluctuating ice margin from the Pennsylvanian of western Gondwana: Paraná Basin, southern Brazil. **Sedimentary Geology**, [s.l.], v. 326, p.45-63, ago. 2015.

VESELY, F. F. Sulcos de origem glacial em arenitos neocarboníferos do Parque Estadual de Vila Velha, sudeste do Paraná. **Geociências (São Paulo)**, v. 30, n. 4, p. 589-599, 2011.

VESELY, F. F. et al. Late Paleozoic glacially related sandstone reservoirs in the Parana Basin, Brazil. **AAPG bulletin**, v. 91, n. 2, p. 151-160, 2007.

VESELY, F. F. **Dinâmica sedimentar e arquitetura estratigráfica do Grupo Itararé no centro-leste da Bacia do Paraná.** Curitiba. 2006.

226 f. Dissertação (Doutorado). Curso de Geologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

WHITE, I. C. Relatório final da Comissão de Estudos das Minas de Carvão de Pedra do Brasil, Rio de Janeiro. **Relatório final da Comissão de Estudos das Minas de Carvão de Pedra do Brasil, Rio de Janeiro**, 1908.

YILMAZ, Öz. **Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data**. Society of exploration geophysicists, 2001.

ANEXOS A

Tabela 8 - Dados de afloramentos compilados da literatura.

Afloramentos	X	Y	Referência
GEO-1	595884	7210708	MINEROPAR (2007)
GEO-2	597690	7208043	MINEROPAR (2007)
GEO-3	601911	7206107	MINEROPAR (2007)
GEO-4	600212	7207822	MINEROPAR (2007)
GEO-5	600224	7207801	MINEROPAR (2007)
GEO-6	601471	7210497	MINEROPAR (2007)
GEO-7	600010	7206720	MINEROPAR (2007)
GEO-8	596460	7210023	MINEROPAR (2007)
GEO-9	595561	7208030	MINEROPAR (2007)
GEO-10	605926	7209871	Vesely (2006)
GEO-11	602096	7206085	Vesely (2006)
GEO-12	601468	7210503	Vesely (2006)
GEO-13	602460	7206750	Vesely (2006)
GEO-14	600224	7207821	Vesely (2006)
GEO-15	603689	7208685	Vesely (2006)
GEO-16	601484	7210095	IAP (2003)
GEO-17	601752	7210084	IAP (2003)
GEO-18	601446	7209071	IAP (2003)
GEO-19	600148	7207814	IAP (2003)
GEO-20	600592	7206739	IAP (2003)
GEO-21	600488	7206734	IAP (2003)
GEO-22	600272	7206622	IAP (2003)
GEO-23	600382	7206733	IAP (2003)
GEO-24	600461	7206786	IAP (2003)
GEO-25	601035	7206714	IAP (2003)
GEO-26	600903	7206641	IAP (2003)
GEO-27	600180	7206610	IAP (2003)
GEO-28	600837	7210690	IAP (2003)
GEO-29	596561	7210024	IAP (2003)
GEO-30	596441	7209969	IAP (2003)
GEO-31	595711	7207999	IAP (2003)
GEO-32	595824	7208083	IAP (2003)
GEO-33	596012	7208850	IAP (2003)
GEO-34	596334	7209255	IAP (2003)
GEO-35	598025	7209373	IAP (2003)

Continuação.

Afloramentos	X	Y	Referência
GEO-36	598153	7209410	IAP (2003)
GEO-37	598181	7209330	IAP (2003)
GEO-38	599977	7209731	IAP (2003)
GEO-39	600185	7207587	IAP (2003)
GEO-40	600878	7208383	IAP (2003)
GEO-41	600969	7208699	IAP (2003)
GEO-42	600564	7209364	IAP (2003)
GEO-43	600399	7209424	IAP (2003)
GEO-44	599983	7210687	IAP (2003)
GEO-45	601332	7210299	IAP (2003)
GEO-46	599634	7207095	IAP (2003)
GEO-47	600518	7209546	IAP (2003)
GEO-48	600231	7209683	IAP (2003)
GEO-49	600350	7209303	IAP (2003)
GEO-50	600604	7209385	IAP (2003)
GEO-51	600720	7209566	IAP (2003)
GEO-52	601626	7208790	IAP (2003)
GEO-53	602138	7208149	IAP (2003)
GEO-54	602281	7208012	IAP (2003)
GEO-55	602877	7207776	IAP (2003)
GEO-56	603637	7208626	IAP (2003)
GEO-57	602065	7206097	IAP (2003)
GEO-58	602776	7205890	IAP (2003)
GEO-59	599086	7207600	IAP (2003)
GEO-60	604021	7208773	IAP (2003)
GEO-61	603609	7208347	IAP (2003)
GEO-62	602600	7208304	IAP (2003)
GEO-63	602135	7207523	IAP (2003)
GEO-64	602312	7207288	IAP (2003)
GEO-65	602624	7206708	IAP (2003)
GEO-66	602309	7207015	IAP (2003)
GEO-67	599116	7207186	IAP (2003)
GEO-68	599103	7206865	IAP (2003)
GEO-69	599661	7206204	IAP (2003)
GEO-70	599023	7210260	IAP (2003)
GEO-71	598546	7209559	IAP (2003)
GEO-72	598700	7209849	IAP (2003)
GEO-73	597218	7212208	IAP (2003)
GEO-74	597649	7212040	IAP (2003)