



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

PAULO CESAR TEIXEIRA FILHO

**A UTILIZAÇÃO DO MÉTODO GPR PARA LOCALIZAÇÃO DE TUBULAÇÕES:
ESTUDO PRÉVIO PARA AS INSTALAÇÕES DO SÍTIO CONTROLADO DA
GEOFÍSICA/UFRJ.**

**RIO DE JANEIRO
2012**

PAULO CESAR TEIXEIRA FILHO

**A UTILIZAÇÃO DO MÉTODO GPR PARA LOCALIZAÇÃO DE TUBULAÇÕES:
ESTUDO PRÉVIO PARA AS INSTALAÇÕES DO SÍTIO CONTROLADO DA
GEOFÍSICA/UFRJ.**

Monografia submetida à Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como requisito necessário à obtenção do grau de Bacharel em Ciências (Geologia).

**Orientadora:
Gleide Alencar do Nascimento Dias**

**RIO DE JANEIRO
2012**

**A UTILIZAÇÃO DO MÉTODO GPR PARA LOCALIZAÇÃO DE TUBULAÇÕES:
ESTUDO PRÉVIO PARA AS INSTALAÇÕES DO SÍTIO CONTROLADO DA
GEOFÍSICA/UFRJ.**

Paulo Cesar Teixeira Filho

Orientador: Gleide Alencar do Nascimento Dias

Monografia submetida à Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Ciências (Geologia).

Aprovada por:

**D. Sc. Gleide Alencar do Nascimento Dias
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ**

**D. Sc. Kátia Leite Mansur
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ**

**D. Sc. Antônio Nuno de Castro Santa Rosa
Universidade de Brasília - UnB**

Filho, Paulo Cesar Teixeira

A UTILIZAÇÃO DO MÉTODO GPR PARA LOCALIZAÇÃO DE TUBULAÇÕES: ESTUDO PRÉVIO PARA AS INSTALAÇÕES DO SÍTIO CONTROLADO DA GEOFÍSICA/UFRJ. / Paulo Cesar Teixeira Filho - 2012.

67f.: il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) - Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Primeiro Semestre de 2012

Orientadora, Gleide Alencar do Nascimento Dias

1. Ground Penetration Radar (GPR). 2. Geofísica Aplicada. 3. Geotecnia.

"Sou um pouco de todos que conheci, um pouco dos lugares que fui, um pouco das saudades que deixei e sou muito das coisas que gostei".

"Aqueles que passam por nós, não vão sós, não nos deixam sós. Deixam um pouco de si, levam um pouco de nós".

Antoine de Saint-Exupéry.

Dedico a obtenção do grau de bacharel em ciências ao meu querido pai, que de onde está, tenho certeza que sempre olhou por todos nós de sua maravilhosa família.

Agradecimentos

A minha mãe Regina pela dedicação total, força sobre-humana, apoio, incentivo, compreensão e paciência. Ao meu pai Paulo pelos poucos anos, mas não menos intensos e importantes na minha vida. Às minhas tias e tios, Ângela, Bia, Iolanda, Luiz Paulo, Sérgio, que constantemente me ajudaram de alguma maneira. Às minhas avós, Alice e Edith, pelos momentos de carinho e atenção.

À minha namorada Michelle pelo companheirismo, carinho, apoio e compreensão nos momentos mais difíceis, entendendo minhas ausências, meus anseios e angústias.

Ao Curso de Graduação em Geologia pela excelência, e a todos os professores que colaboraram de alguma forma na minha formação no curso de graduação, em especial à minha orientadora Prof^a. Dr^a. Gleide Alencar do Nascimento Dias, pelas sugestões e por compartilhar preciosos conhecimentos.

Aos meus professores do Departamento de Geologia, Aristóteles Netto, Cláudio Limeira, Leonardo Morato e Renato Ramos pela competência no ato de ensinar e valiosas lições ao longo do Curso de Geologia.

Aos colegas da Graduação: Anderson Araújo, Dandara David, Gabriel Valente, Iviana Setta, João Carlos Menescal, Manuela Souza, Mariana Meirelles, Mário Martins, Natasha Rocha, pelos momentos de descontração, pela ajuda e incentivo no decorrer do curso.

Ao técnico do laboratório Roberto, pelas dicas e suporte na coleta dos dados em campo.

Aos secretários da Coordenação do Departamento de Geologia, Aluísio e Walgenor, pela colaboração nos momentos necessários.

Por fim, agradeço a todos que colaboraram, direta e indiretamente, na realização deste trabalho.

Resumo

Este trabalho consistiu em verificar a aplicabilidade do método GPR (*Ground Penetrating Radar*) na localização de tubulações de diferentes tipos de materiais (concreto, PVC e ferro fundido), e de diversos diâmetros, utilizados para o escoamento de águas pluviais e de esgoto. A fim de alcançar este objetivo foram adquiridos 19 perfis dentro da área de estudo, utilizando-se uma antena de 200 MHz, em duas direções perpendiculares entre si, para detectar os dutos paralelos e transversais. Após o processamento dos dados, a análise de todos os radargramas, em geral, apresentou alguns bons resultados, podendo ser identificada quase todas as tubulações subsuperficiais de PVC e de concreto, através da presença de feições hiperbólicas, formadas pela difração das ondas eletromagnéticas nestes materiais. Somente em determinados perfis não foi possível identificar alguns desses dutos, devido a presença de um forte ruído causado pela reverberação do sinal nas antenas (*ringing*), ruído este, que pode estar relacionado com o tipo de solo (aterro) e com o comprimento de onda utilizado. Após o estudo, foi possível concluir que o método GPR é muito útil na localização de tubulações, podendo ser extrapolado para outras áreas onde não se detém nenhum conhecimento prévio da subsuperfície.

Palavras-chaves: Ground Penetration Radar. Geofísica Aplicada. Geotecnia.

Abstract

This study verifies the applicability of the method GPR (Ground Penetrating Radar) on the location of different materials (concrete, PVC and cast iron) of pipes and various diameters used for stormwater and sewage runoff. In order to reach this objective, we have acquired 19 profiles using a 200 MHz antenna within the study area, in two directions perpendicular, to detect the parallel and transverse ducts. After processing the data, the analysis of all radargrams, generally, showed some good results, we could identify almost all subsurface PVC and concrete pipes, through the presence of hyperbolic features formed by diffraction of electromagnetic waves in these materials. Only a few profiles was not possible to identify some of these pipes, due to the presence of a strong noise caused by ringing from the signal antenna, this noise, which can be related to the soil type (landfill) and the length wave used. After the study, we conclude that the GPR method is very useful in locating pipes, could be extrapolated to other areas where it hasn't any knowledge of the subsurface.

Keywords: Ground Penetration Radar. Applied Geophysics. Geotechnics.

Sumário:

<i>Agradecimentos</i>	vi
<i>Resumo</i>	vii
<i>Abstract</i>	viii
<i>Sumário:</i>	ix
<i>Índice de Figuras:</i>	xi
<i>Índice de tabelas</i>	xii
1 <i>Introdução</i>	1
1.1 <i>Considerações iniciais</i>	1
1.2 <i>Histórico e trabalhos anteriores</i>	1
1.3 <i>Justificativa e objetivo</i>	3
2 <i>Geologia e características físicas da área de estudo</i>	4
2.1 <i>Localização e acessos</i>	4
2.2 <i>Fisiografia</i>	4
2.3 <i>Geologia Regional</i>	5
2.4 <i>Geologia Local</i>	8
3 <i>O método Ground Penetrating Radar (GPR)</i>	11
3.1 <i>Princípios físicos do método GPR</i>	13
3.2 <i>Propriedades elétricas e magnéticas dos materiais geológicos</i>	13
3.3 <i>Propagação de ondas eletromagnéticas</i>	16
3.4 <i>Aplicações do método</i>	18
4 <i>Aquisição de dados</i>	19
4.1 <i>Planejamento da aquisição</i>	19
4.2 <i>Técnicas de aquisição</i>	20
4.2.1 <i>Afastamento Constante ou Common Offset</i>	20
4.2.2 <i>CMP (Common Mid Point) e WARR (Wide Angle Reflection and Refraction)</i>	21
4.2.3 <i>Transiluminação e tomografia de radar</i>	22

4.3	<i>Parâmetros da aquisição</i>	23
4.3.1	<i>Frequência</i>	23
4.3.2	<i>Janela</i>	24
4.3.3	<i>Intervalo de amostragem</i>	24
4.3.4	<i>Espaçamento entre antenas</i>	24
4.3.5	<i>Posicionamento e espaçamento entre linhas</i>	25
4.4	<i>Modo de Aquisição do Estudo</i>	25
5	<i>Processamento dos Dados de GPR</i>	28
5.1	<i>Edição</i>	28
5.2	<i>Filtragem DC (dewowing)</i>	29
5.3	<i>Aplicação de Ganhos</i>	30
5.4	<i>Deconvolução</i>	31
5.5	<i>Filtragem Espacial e Temporal</i>	31
5.6	<i>Migração</i>	32
5.7	<i>Dados processados</i>	32
6	<i>Análise e Interpretação dos dados de GPR</i>	38
7	<i>Conclusões e Recomendações</i>	49
8	<i>Referências Bibliográficas</i>	51

Índice de Figuras:

Figura 2.1 - Localização da área de estudo, entre os departamentos de Geologia e Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Fonte: Google Earth.	4
Figura 2.2 - Fotografia área de 1945 mostrando a configuração das ilhas que deram origem ao <i>campus</i> da Cidade Universitária. Fonte: SIBI - UFRJ.....	5
Figura 2.3 - Visão 3D do Gráben da Guanabara com os subgrábens da Baía (A), Guandu-Sepetiba (B) e Paraty (C) e a Zona de Acomodação de Ilha Grande-Sepetiba (D). Em um plano mais elevado (cerca de 500 m) pode-se observar os grábens de Resende-Volta Redonda (E), Queluz (F) e Taubaté (G). Fonte: Zalán e Oliveira (2005).....	7
Figura 2.4 - Perfil morfo-estrutural interpretado do Gráben da Guanabara, assimétrico com borda falhada (Serra do Mar) e borda flexural (Maciço da Tijuca). Fonte: Zalán e Oliveira (2005).	7
Figura 2.5 - Mapa Geológico modificado da Ilha do Fundão em escala 1:100.000.	9
Figura 2.6 - Afloramento de gnaisses bandados próximo à área de estudo.....	9
Figura 2.7 - Mapa de distribuição dos solos baseada na avaliação da fertilidade. Fonte: Santos (2000).	10
Figura 3.1 - Esquema de registro da captação dos sinais refletidos em uma escala vertical baseada no tempo.....	12
Figura 3.2 - Exemplos de Radargramas, com hipérbolos geradas pela presença de dutos.	12
Figura 3.3 - Propagação das ondas eletromagnéticas.	17
Figura 4.1 - Equipamento TerraSIRch SIR System-3000.....	19
Figura 4.2 - Perfil com espaçamento constante.....	21
Figura 4.3 - a) Arranjo CMP mostrando o deslocamento lateral das antenas.....	22
Figura 4.4 - Modelos esquemáticos dos tipos de arranjos mais comuns no método de transiluminação.....	23
Figura 4.5 - Localização aproximada das linhas dentro da área de estudo.	26
Figura 4.6 - Modelo esquemático da distribuição dos perfis de GPR.	27
Figura 5.1 - Tipos de apresentação de radargramas.....	29
Figura 5.2 - Dado Bruto, adquirido diretamente do equipamento.....	33
Figura 5.3 - Resultado do Ajuste do Tempo Zero (Move Startime).	34
Figura 5.4 - Resultado do Filtro 1D (Subtract Mean - Dewow).	34
Figura 5.5 - Resultado do Filtro 2D (Background Removal).	35
Figura 5.6 - Resultado do Ganho (Energy Decay).....	35
Figura 5.7 - Resultado do Filtro 1D (Bandpassfrequency).....	36

Figura 5.8 - Resultado do Filtro 1D (Deconvolution predictive) na janela inferior.	36
Figura 5.9 - Resultado do Filtro 1D (Deconvolution predictive) na janela superior.....	37
Figura 5.10 - Resultado do Filtro 2D (Background Removal).	37
Figura 6.1 - Feições hiperbólicas e contato aterro-solo na interpretação do perfil L03.....	39
Figura 6.2 - Interpretação do perfil L04, reforçando as marcações no perfil L03.....	39
Figura 6.3 - Interpretação do Perfil L07.	41
Figura 6.4 - Perfil L08 com o deslocamento aparente da tubulação.	41
Figura 6.5 - Perfil L12 mostrando a continuidade das tubulações paralelas ao bloco da Geologia.	42
Figura 6.6 - Interpretação do perfil L16, onde foi possível identificar o deslocamento lateral da tubulação (trecho de metal).	43
Figura 6.7 - Interpretação do perfil L17.	43
Figura 6.8 - Mudança do tipo de material da tubulação (PVC), caracterizada pela abertura da hipérbole, relacionada à velocidade de propagação.	44
Figura 6.9 - Interpretação do perfil L19, continuidade do tipo de material da tubulação.	44
Figura 6.10 - Modelo esquemático 3D com os perfis e as tubulações que foram identificadas.45	
Figura 6.11 - Outro ângulo de visualização do modelo 3D confeccionado a partir das interpretações.....	46
Figura 6.12 - Modelo com foco na visualização das tubulações através dos perfis.	47
Figura 6.13 - Disposição das tubulações em subsuperfície.....	48

Índice de tabelas

<i>Tabela 3.1 - Valores típicos de propriedades eletromagnéticas para diferentes tipos de materiais.</i>	<i>15</i>
<i>Tabela 4.1 - Frequência vs Profundidade de Penetração (Porsani, 2001).....</i>	<i>24</i>
<i>Tabela 4.2 - Valores médios da janela temporal em função da profundidade. Fonte: Annan (2000).</i>	<i>24</i>
<i>Tabela 5.1 - Fluxograma com as etapas do processamento de dados.....</i>	<i>33</i>

1 Introdução

1.1 Considerações iniciais

A possibilidade de obter informações sobre o modelo geológico (estratigráfico, estrutural e geotécnico) e localizar remotamente o posicionamento exato de objetos, por exemplo, galerias de canalização de águas pluviais, canos e dutos (metálicos ou não metálicos) de gás, esgoto e luz enterrados no subsolo é algo que há muito tempo encanta a humanidade. A criação de uma técnica para visualizar a subsuperfície geológica e seu conteúdo tem concentrado esforços dos mais diversos ramos da engenharia, na busca desse propósito. Na Geofísica, os métodos sísmicos, resistividade elétrica, polarização induzida e gravimetria entre outros, têm-se revelados satisfatórios.

O Radar de Penetração no Solo (Ground Penetrating Radar - GPR) é um método geofísico eletromagnético cujo desenvolvimento nas últimas décadas foi tão grande que hoje é tratado separadamente dos outros métodos eletromagnéticos devido ao seu emprego nas mais variadas especializações, tais como: aplicações forensicas, militares, engenharia civil, estudos de solos, exploração mineral, geologia básica e ambiental, geotecnia, hidrogeologia, pesquisa arqueológica, planejamento urbano, dentre outras (Porsani, 2008). Trata-se de um método não invasivo, ou seja, sem a necessidade de escavações ou perfurações para a localização do alvo a ser investigado, por isso, e devido aos baixos custos e à praticidade na realização dos trabalhos de campo, tornou-se um dos melhores e mais eficazes métodos para sondagens e investigações em pequenas profundidades (geofísica rasa) (Annan, 2000).

1.2 Histórico e trabalhos anteriores

O método investigação geofísica GPR foi patenteado em 1904 (Patente nº DE165546), pelo engenheiro alemão Christian Hülsmeier (Reynolds, 1997), fundamentada na propagação de ondas eletromagnéticas de alta frequência para o estudo da subsuperfície. Entretanto, somente seis anos depois, em 1910, que foi publicado o primeiro trabalho realizado por Gotthelf Leimbach e Heinrich Löwy, na Alemanha, descrevendo uma aplicação do método, no qual os sinais eletromagnéticos foram empregados na detecção de artefatos enterrados, utilizando equipamentos que transmitiam ondas continuamente. Posteriormente, por volta de 1926, Hülsenbeck patenteou (nº 489434) o primeiro equipamento que usava a emissão de pulsos eletromagnéticos curtos, com objetivo de investigar a natureza das estruturas em

subsuperfícies. Em 1929, na Áustria, Stern realizou o primeiro levantamento prático do GPR, com a finalidade de determinar a espessura de geleiras (Olhoeft, 1981).

Durante as décadas de 1950 e 1960, os militares norte-americanos desenvolveram e aprimoraram o método eletromagnético de alta resolução, denominado Radar (Radio Detection and Ranging) ou Ground Penetrating Radar (GPR), com o objetivo de localizar túneis escavados e usados como rota de fuga pelos vietnamitas. A partir desse momento foram desenvolvidos sistemas de GPR mais complexos e precisos, permitindo a aplicação desse método em uma vasta área (Daniels, 2004).

Ainda na década de 1960 e meados de 1970, as aplicações do deste método consistiam-se basicamente para determinar e mapear espessuras e fissuras em geleiras no Ártico e na Antártica, dentre os quais podemos citar Harrison (1970), Campbell & Orange (1974), Annan & Davis (1976). Segundo Borges (2007), a National Aeronautics and Space Administration (NASA) intensificou as atividades para a utilização em pesquisas da subsuperfície lunar com a nave Apollo 17, em realizada em 11 de dezembro de 1972. A partir desse evento, a utilização do sistema de GPR foi intensificada e, deste modo, surgiram diversas aplicações, pesquisas e publicações. Nos estágios iniciais da aplicação do método GPR, um dos grandes empecilhos era o equipamento, pois era produzido artesanalmente, o que tornava mais difícil o acesso das universidades e empresas de pequeno porte ao equipamento. Só a partir de 1972, com a fundação da companhia Geophysical Survey Systems Incorporated (GSSI), o equipamento passou a ser disponibilizado comercialmente.

Entretanto, somente na década de 1980, foi reconhecido como método de exploração geofísica por parte da comunidade geocientífica mundial. Segundo Porsani (1999), isso ocorreu devido ao desenvolvimento das inovações eletrônicas e computacionais, que possibilitaram o aperfeiçoamento dos modos de aquisição, processamento e interpretação dos dados, otimizando sua portabilidade, baixando seu custo, tornando-se mais fácil a sua aquisição e, portanto, a sua utilização, realçando-se dos demais métodos geofísicos empregados no estudo da subsuperfície (Daniels, 2004). Como consequência, um grande número de trabalhos científicos foram publicados nessa década, dentre eles, considera-se de maior importância os trabalhos de Ulriksen (1982); Olhoeft (1984); Davis & Annan (1989).

No aspecto prático, o GPR é uma técnica muito versátil e, desde a década de 1990 até os dias atuais, ele tem sido utilizado na geologia, na geotecnia, na hidrogeologia, no meio ambiente, nas ciências do solo, na arqueologia e em vários outros campos. Com o avanço tecnológico e computacional foram notáveis os avanços no desenvolvimento de vários

protótipos e nas técnicas de aquisição e processamento, particularmente em volumes de dados 3D. Sendo que muitos desses trabalhos foram realizados em países da América do Norte, Europa e Ásia, nos quais o tipo de solo e as condições climáticas diferem dos solos tropicais. Nesta época, destacam-se os trabalhos de Annan et al. (1991); Benson (1995); Olhoeft (1996).

No Brasil, os primeiros trabalhos de aplicação do método GPR foram realizados pelo Centro de Pesquisa da PETROBRAS (Cenpes), em 1994. No entanto, apesar do sucesso das aplicações do método GPR em vários países, foi necessário estudar as potencialidades do método em condições geológicas e geotécnicas brasileiras.

1.3 Justificativa e objetivo

Este trabalho tem como objetivo principal, a localização de tubulações de água e esgoto através da aplicação do método GPR, a fim da elaboração de um projeto de pesquisa para a instalação de uma área de testes controlados de geofísica rasa no Campus da UFRJ, semelhante ao Sítio Controlado de Geofísica Rasa - SCGR do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas - IAG, existente na Universidade de São Paulo (Porsani, 2002). O sítio será utilizado para a realização de diferentes tipos de levantamentos geofísicos sobre alvos conhecidos que estarão enterrados, a fim de calibrar diversos equipamentos e métodos. Além de ter aplicação prática nas aulas de geofísica ministradas para a graduação e pós-graduação no Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, simulando situações de vários tipos de contexto.

2 Geologia e características físicas da área de estudo

2.1 Localização e acessos

A área de estudo localiza-se na Cidade Universitária da Universidade Federal do Rio de Janeiro - Campus Ilha do Fundão, no Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza (CCMN), entre os Departamentos de Geologia e Geografia (Fig. 2.1). O local de estudo possui uma área de aproximadamente 600m². O acesso ao Campus é feito pelas Linhas Amarela e Vermelha, e posteriormente pela Avenida Athos da Silveira Ramos, onde está localizado o prédio do CCMN.

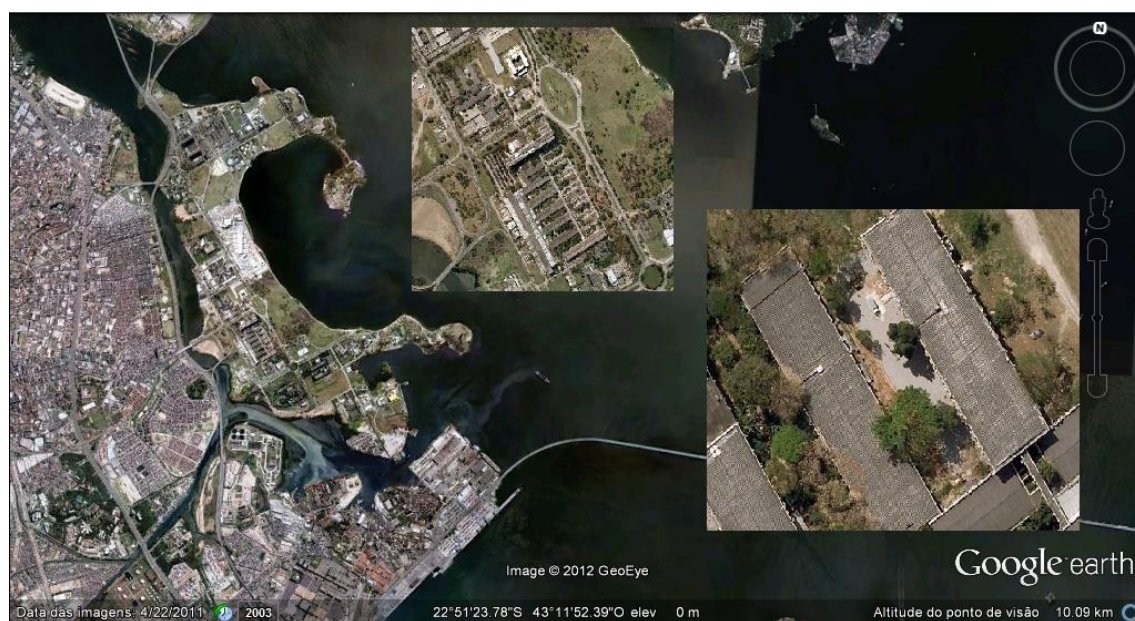


Figura 2.1 - Localização da área de estudo, entre os departamentos de Geologia e Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Fonte: Google Earth.

2.2 Fisiografia

Ilha do Fundão, que é quase toda ocupada pela Cidade Universitária, localiza-se na margem oeste e é uma das várias ilhas da Baía de Guanabara, e se localiza entre as coordenadas latitudinais 22°49'55"S-22°53'10"S e longitudinais 43°12'25"W-43°14'45"W. De acordo com Amador (1996) possui uma área superficial de 377,0Km², excluindo as ilhas e considerando seu limite pelas pontas de Copacabana e de Itaipu. As profundidades médias na baía são de 3 metros na área do fundo; de 8,3 na região entre a Ilha do Governador e as pontas de Gragoatá e Calabouço e de 16,9 no canal de entrada (Amador, 1982).

A Ilha do Fundão foi criada a partir do processo de aterramento dos canais entre o arquipélago de nove ilhas (Cabras, Pindaí do Ferreira, Pindaí do França, Baiacu, Fundão,

Catalão, Bom Jesus, Pinheiro e Sapucaia), localizadas no Estuário de Manguinhos, na Enseada de Inhaúma (Fig. 2.2), durante a construção do *campus* durante a década de 50.

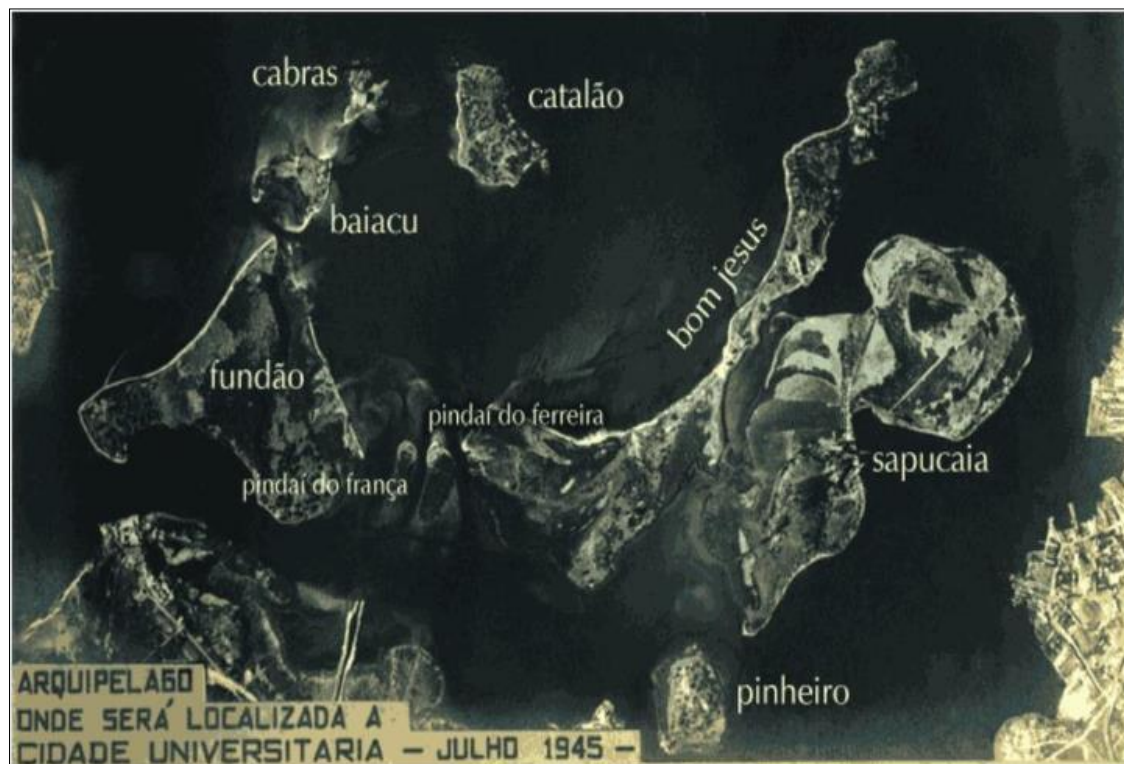


Figura 2.2 - Fotografia aérea de 1945 mostrando a configuração das ilhas que deram origem ao *campus* da Cidade Universitária. Fonte: SIBI - UFRJ.

O relevo dominante é plano, devido ao fato da maior área ser constituída por aterro, mas podem ser encontradas algumas depressões ou ondulações de acordo com as características rocha/solo do substrato local. A vegetação primitiva foi de floresta tropical subcaducifólia, nas partes mais elevadas e de mangues, em áreas alagadas diariamente pelas marés (Santos, 2000). O clima da região é predominantemente tropical úmido com fortes influências marinhas, em vista da variação sazonal da pluviosidade, o clima da baía pode ser dividido em um período seco, compreendendo os meses de junho a agosto, e um período úmido relativo aos meses de dezembro a abril.

2.3 Geologia Regional

A baía de Guanabara, incluindo a maior parte de sua bacia hidrográfica contribuinte, corresponde a um compartimento estrutural tectonicamente rebaixado, de idade Cenozóica (zona fisiográfica denominada Baixada Fluminense). Segundo Ruellan (1944), a baía se originou de uma depressão de ângulo de falha entre dois grupos de blocos falhados: o da Serra dos Órgãos e dos pequenos maciços costeiros (Fig. 2.3). As linhas estruturais que condicionaram a existência da Baixada seriam reativações Cenozóicas de linhas estruturais Pré-Cambrianas

(Almeida, 1976). A esta região rebaixada, Ruellan (1944) *apud* Ferrari (1990) denominou gráben da Guanabara e Almeida (1976) *apud* Ferrari (1990) denominou rift da Guanabara.

De acordo com Zalán e Oliveira (2005), o rift da Guanabara se instalou sobre rochas Pré-Cambrianas de complexa evolução, constituídas predominantemente por gnaisses, migmatitos e granitos. Três fases deformacionais são encontradas na área, sendo a segunda a mais importante, tendo produzido intensa transposição de uma xistosidade anterior, gerando extensivamente uma nova xistosidade plano axial e dobras fechadas a isoclinais, de direção NE e ENE. Dessa forma, para Ferrari (1990), o rift da Guanabara é do tipo semigráben, com blocos basculados para NW, com desnivelamento topográfico mais intenso na borda norte. O rift é subdividido, transversalmente, em blocos limitados por falhas NNW, estas com movimentação de até 3,0 Km (Fig. 2.4).

Durante estágio de rebaixamento do nível do mar, durante o último período interglacial (Sangamon), há cerca de 200.000 anos, começou a se desenvolver em seu interior um sistema hidrográfico que escoou para o mar por um rio que passava pela atual entrada da baía de Guanabara. A linha de costa, nesta época se situaria a dezenas de quilômetros da atual, constituindo parte do que é denominado Plataforma Continental. De forma gradual, marcando o início do Holoceno Inferior, começou um processo de transgressão e conseqüentemente o afogamento da antiga bacia fluvial pleistocênica, pelas águas marinhas. Essa fase transgressiva é conhecida como Transgressão Guanabarina (Amador, 1980), que pode ser relacionada com as Transgressões Santista (Suguio e Martin, 1975) e Flandriana (Fairbridge, 1962). Foram igualmente inundadas as baías de Sepetiba e Ilha Grande, orladas pelas escarpas da Serra do Mar, assim como o canal de São Sebastião e o paleo-vale fluvial que se inicia em sua entrada sul dirigindo-se para SE (Furtado *et al.* 1996).

A estratigrafia da Baía de Guanabara foi definida por Amador (1996), por, sedimentos estuarinos holocênicos, correspondentes à sedimentação da baía após as transgressões; sedimentos fluviais da Formação Caceribu e embasamento cristalino, constituído por gnaisses e migmatitos diversos.

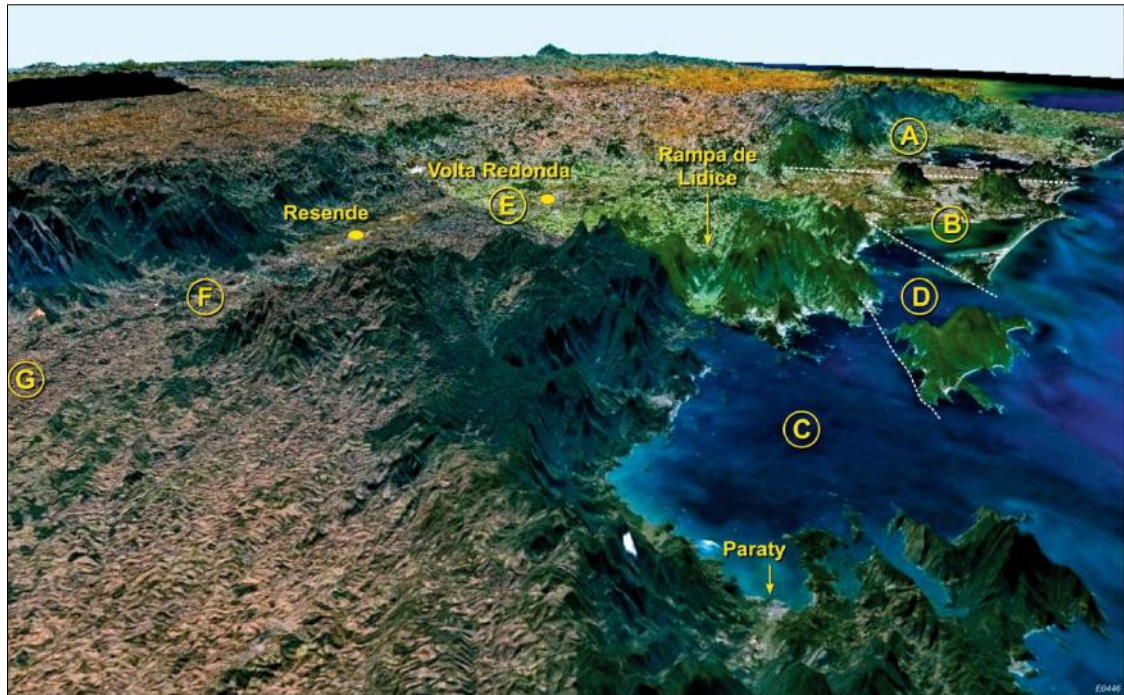


Figura 2.3 - Visão 3D do Gráben da Guanabara com os subgrábens da Baía (A), Guandu-Setetiba (B) e Paraty (C) e a Zona de Acomodação de Ilha Grande-Setetiba (D). Em um plano mais elevado (cerca de 500 m) pode-se observar os grábens de Resende-Volta Redonda (E), Queluz (F) e Taubaté (G). Fonte: Zalán e Oliveira (2005).

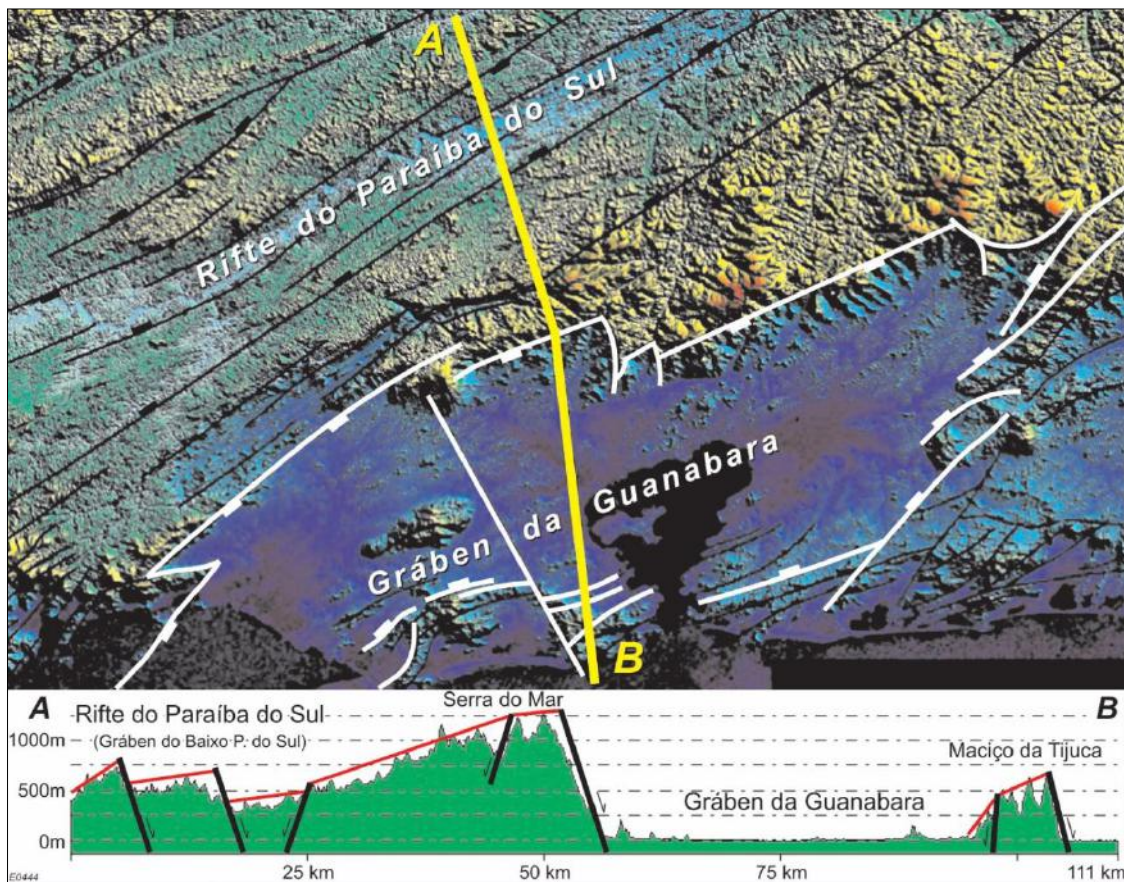


Figura 2.4 - Perfil morfo-estrutural interpretado do Gráben da Guanabara, assimétrico com borda falhada (Serra do Mar) e borda flexural (Maciço da Tijuca). Fonte: Zalán e Oliveira (2005).

2.4 Geologia Local

Estas ilhas são constituídas predominantemente por gnaisses variados e migmatitos, de idade Pré-Cambriana, denominados Gnaisses da Série Inferior por Helmbold *et al.* (1965). Quanto aos aterros são constituídos por areias dragadas da Baía de Guanabara e solos de alteração de Gnaisses e migmatitos provenientes do desmonte da Colina do Fundão.

De acordo com a Folha SF23-Z-B-IV - Baía de Guanabara (Fig. 2.5), escala 1:100.000, do Programa Geologia do Brasil - CPRM, na área da Ilha do Fundão foram mapeadas nessa escala apenas duas unidade litoestratigráficas, Complexo Rio Negro (NP23γ1rn) e Depósitos Antropogênicos (Q2at). O Complexo Rio Negro é descrito pela própria folha como Quartzo-plagioclásio-biotita gnaisses mesocráticos de composição quartzo diorítica a diorítica, intensamente deformados e migmatizados, de especto geralmente bandado (Fig. 2.6); ortoclásio(microclina)-quartzo gnaisses acinzentados de composição granodiorítica; rochas anfibolíticas, todas de Idade U-Pb TIMS 792 ± 12 Ma. Já os Depósitos Antropogênicos são àqueles produzidos pelo homem, aterros de praias, lagoas e de baías (blocos, areia, saibro) e aterros sanitários.

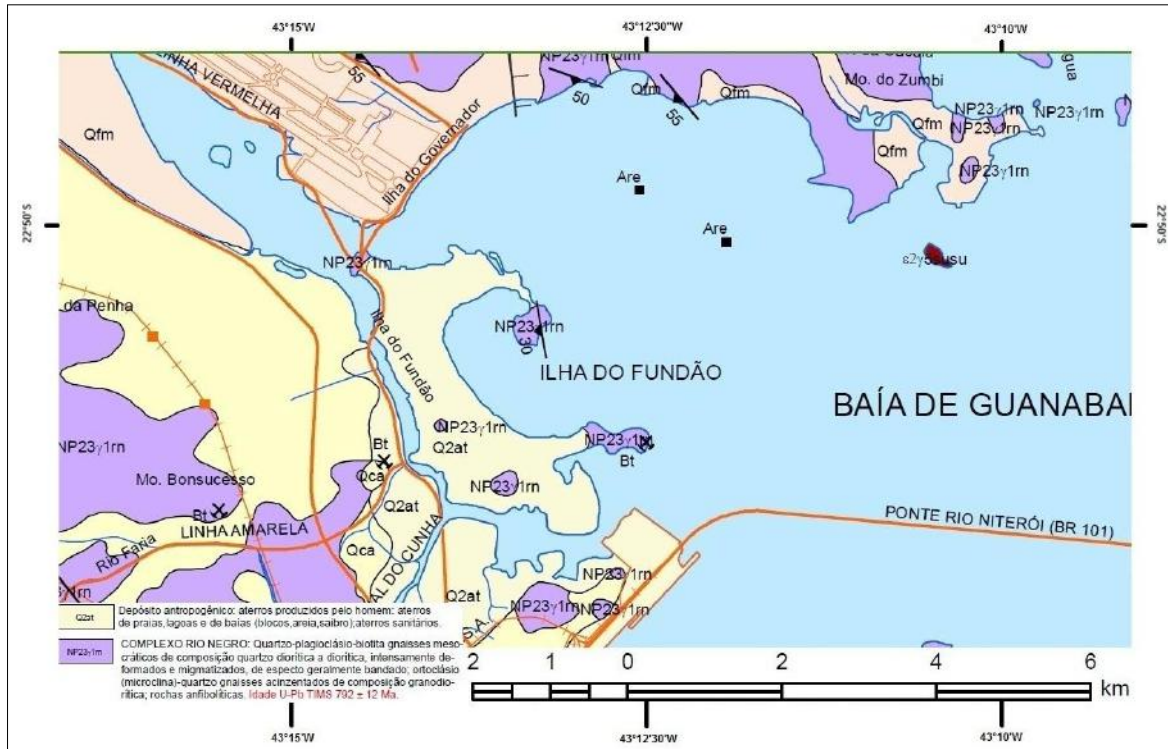


Figura 2.5 - Mapa Geológico modificado da Ilha do Fundão em escala 1:100.000.
Fonte: Geobank - CPRM.



Figura 2.6 - Afloramento de gnaisses bandados, atrás da Biblioteca Central do CCMN, a cerca de 500m da área de estudo.

De acordo com Santos (2000), na Ilha do Fundão foram mapeados e descritos cinco tipos de solos classificados de acordo com a avaliação do grau de fertilidade das amostras de aterros e/ou solos *in situ* coletadas. Os cinco tipos são aterro solódico ou não (AT1), aterro com calhaus a 20cm (AT2), aterro com calhaus a 60cm ou 80cm (AT3), aterro gleizado (AT4) e Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico abrupto (PVAe). Este trabalho teve como objetivo fornecer dados para melhor orientação de manejo e conservação do solo do *campus* e gerou como produto final um mapa de distribuição dos solos na Ilha do Fundão (Fig. 2.7).

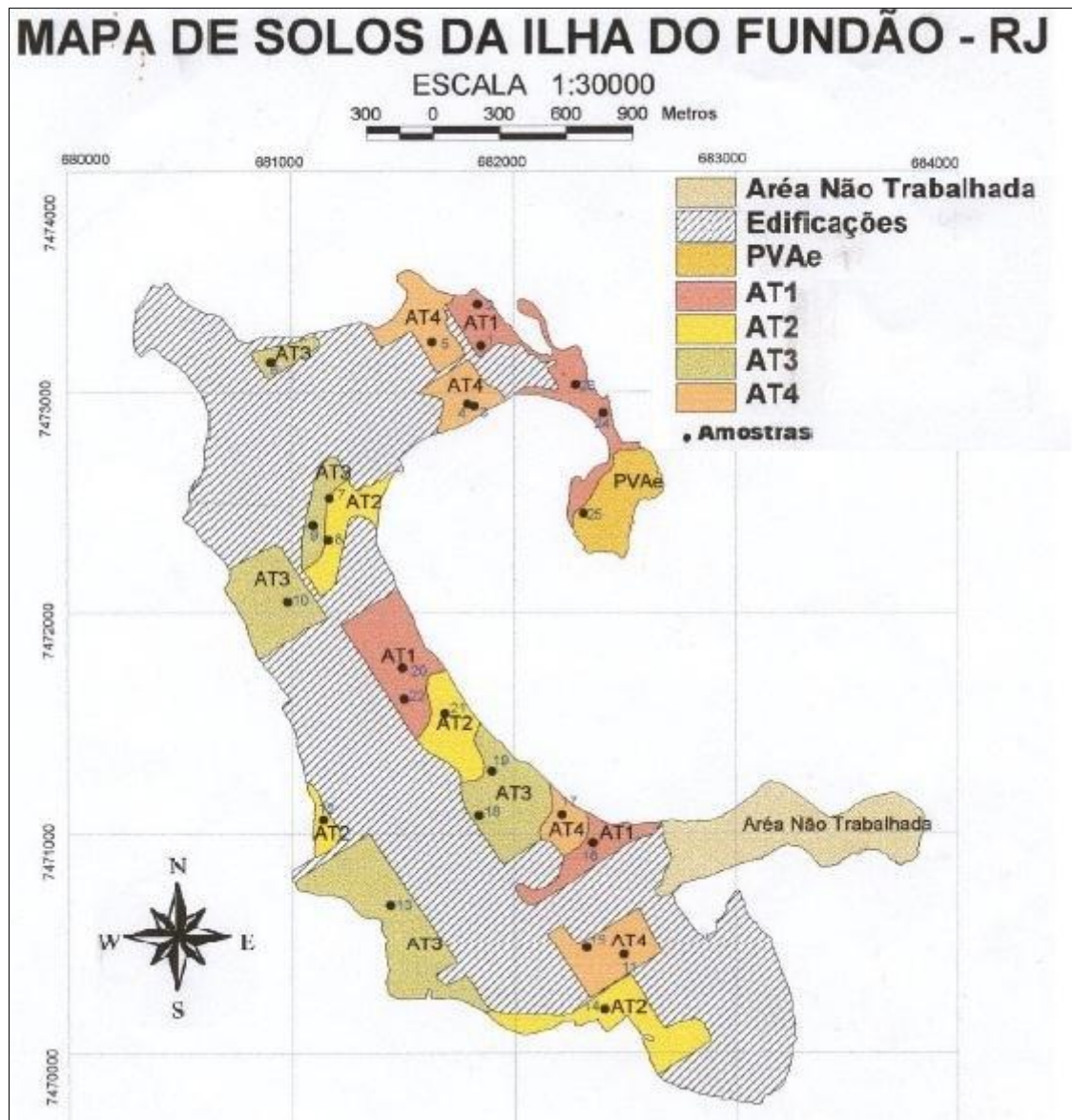


Figura 2.7 - Mapa de distribuição dos solos baseada na avaliação da fertilidade. Fonte: Santos (2000).

3 O método Ground Penetrating Radar (GPR)

O GPR (Radar de Penetração no Solo) é um método geofísico não destrutivo e não invasivo que produz continuamente perfis gerados sobre uma superfície onde se deseja extrair informações de subsolo, com a possibilidade de aquisição de um grande volume de dados em um curto período de tempo (Knight, 2001).

O GPR é um método eletromagnético que emprega ondas de rádio em frequências elevadas (espectros variando entre 10 e 2500 MHz) sendo capaz de caracterizar, localizar e mapear estruturas, feições geológicas ou objetos enterrados pelo homem em subsuperfície de forma eficiente (Annan, 2000). Neste método as ondas eletromagnéticas são emitidas para o solo através de uma antena, denominada de transmissora, e posterior recepção dos sinais refletidos e/ou difratados das feições de subsuperfície (Fig. 3.1.a). Enquanto a onda se propaga no meio geológico, as interfaces entre materiais de diferentes propriedades eletromagnéticas (permissividade dielétrica) causam variações no campo da onda original. Assim, uma parte da energia da onda será refletida e outra, a refratada, continuará percorrendo as maiores profundidades até ser totalmente absorvida. Parte da parcela do sinal que foi refletida à superfície é capturada por uma antena receptora, que capta os sinais refletidos onde são armazenados em um dispositivo e os registrando em uma escala vertical baseada no tempo, gerando uma sequência de traços (Fig. 3.1.b), que quando coletados ao longo de um caminhamento resulta em imagens 2D de alta resolução da subsuperfície, denominadas de radargramas. Relacionado ao nosso estudo de caso, na figura 3.2 temos um exemplo de radargrama com feições hiperbólicas geradas pela presença de tubulações em subsuperfície.

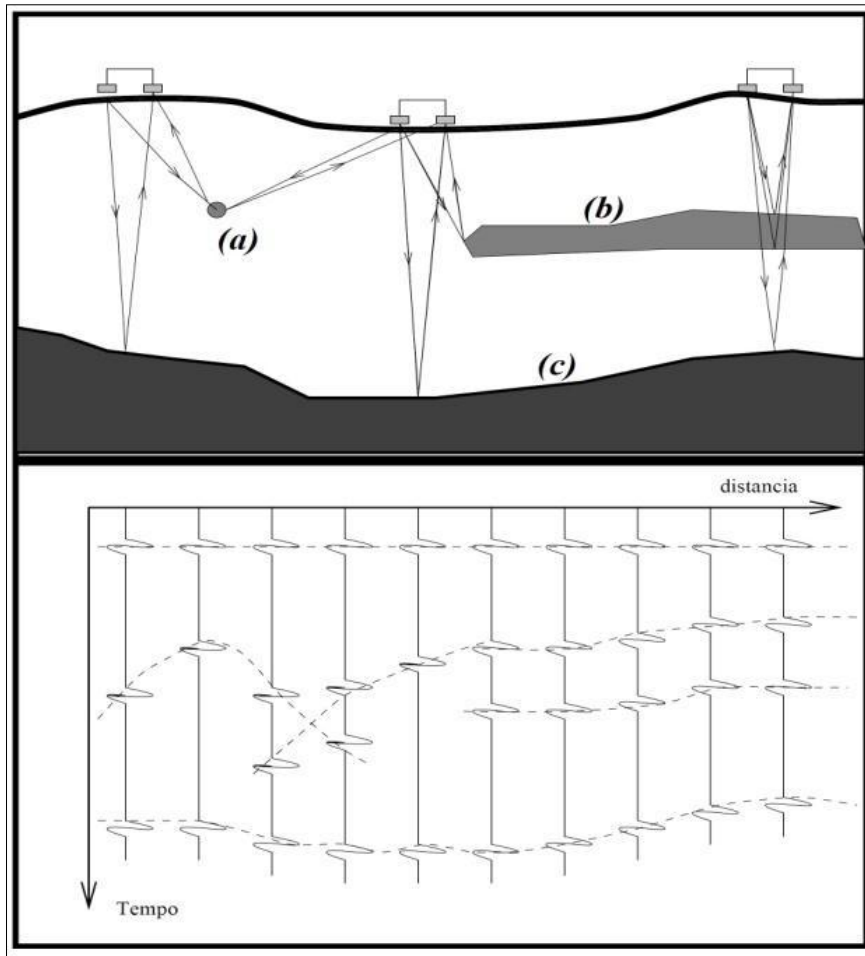


Figura 3.1 - Esquema de registro da captação dos sinais refletidos em uma escala vertical baseada no tempo.

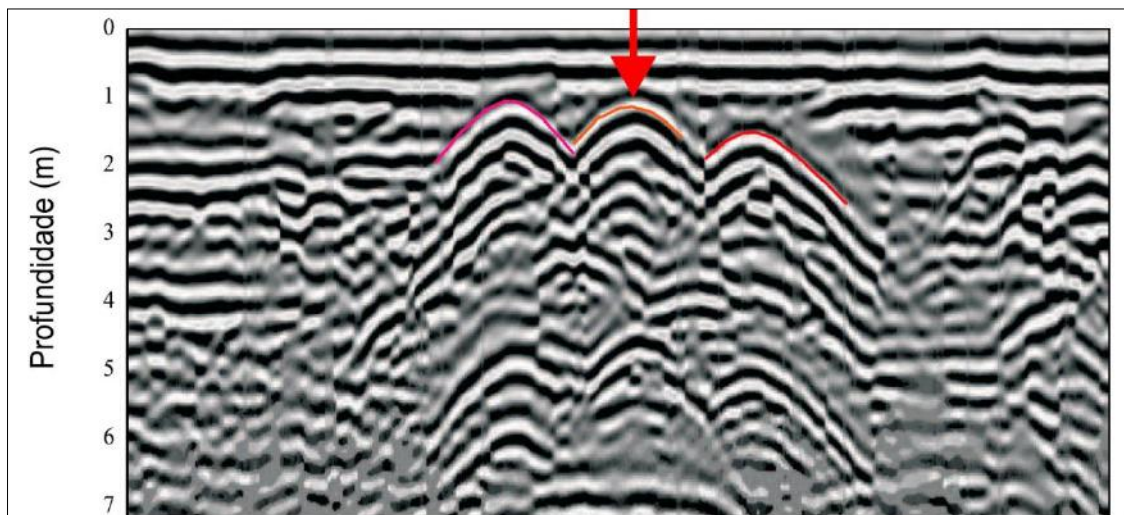


Figura 3.2 - Exemplos de Radargramas, com hipérboles geradas pela presença de dutos.

3.1 Princípios físicos do método GPR

Os princípios físicos do GPR estão fundamentados nas equações de Maxwell. Essas equações descrevem o comportamento das interações dos campos elétricos e magnéticos em todas as situações macroscópicas e em qualquer meio com base em cinco campos vetoriais: \vec{D} é o vetor deslocamento elétrico (C/m^2); \vec{H} é a intensidade do campo magnético (A/m); \vec{J} é a densidade de corrente (A/m^2); \vec{E} é a intensidade do campo elétrico (V/m) e \vec{B} é a densidade de fluxo magnético ($Weber/m^2$). Esses cinco campos vetoriais estão relacionados através das seguintes equações: Lei de Gauss (eq. 3.1), Lei de Ampère (eq. 3.2), Lei de Gauss (eq. 3.3) e Lei de Faraday (eq. 3.4).

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = \rho \quad (3.3)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.4)$$

3.2 Propriedades elétricas e magnéticas dos materiais geológicos

As equações de Maxwell não fornecem as características físicas do meio, ou seja, as propriedades físicas que são essenciais para os métodos eletromagnéticos. Assim, para incluí-las devemos associá-las às relações constitutivas, empíricas, do meio. As relações constitutivas traduzem as interações entre os campos eletromagnéticos de uma determinada fonte com um meio através basicamente de três propriedades físicas bem conhecidas na teoria eletromagnética: condutividade elétrica (σ), permissividade dielétrica (ϵ) e permeabilidade magnética ou constante dielétrica (μ).

A primeira relação constitutiva, também conhecida como Lei de Ohm (eq. 3.5), relaciona a densidade de corrente de condução (\vec{J}) ao campo elétrico (\vec{E}), mostrando como as cargas livres (condutividade elétrica) de um meio se comportam na presença de um campo elétrico externo, ou seja, expressa quantitativamente a capacidade que um meio material tem de conduzir corrente elétrica. A condutividade é expressa em Siemens por metro (S/m), porém no caso do GPR é comum trabalhar em mS/m , por se tratar de investigações rasas (Porsani, 2001).

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3.5)$$

São vários os fatores que contribuem na condutividade elétrica de um meio geológico, os principais são: teor de água, presença de minerais condutivos, porosidade, salinidade e a concentração de argila (Keller, 1987). Esta propriedade é o maior impecilho das operações com o GPR, porque o aumento da condutividade elétrica do meio geológico implica em uma maior atenuação do sinal da onda GPR e diminuição da profundidade de penetração da onda eletromagnética.

A segunda relação constitutiva do meio relaciona diretamente o vetor campo elétrico (\vec{E}) ao vetor deslocamento elétrico ou polarização (\vec{D}), e a constante de proporcionalidade é a permissividade dielétrica do material (ϵ) (eq. 3.6), expressa em farad/metro (F/m). O deslocamento é caracterizado pela movimentação dos elétrons, núcleos e moléculas polares da posição de equilíbrio neutro para outra (polarizada), devido à influência de um campo elétrico externo (Keller, 1987).

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (3.6)$$

No método GPR, a atenuação e a propagação das ondas de radar são afetadas diretamente pela condutividade elétrica e pela permissividade dielétrica, respectivamente (Annan, 1992). Os efeitos da permissividade se sobrepõem aos efeitos das condutividade para ondas eletromagnéticas (EM) baixas frequências (menores de 1 MHz), enquanto que, para as altas frequências (maiores que 1 MHz), a permissividade é dominante.

Neste método trabalha-se com um termo chamado de permissividade dielétrica relativa ou constante dielétrica (ϵ_r) (eq. 3.7), que leva em consideração a razão entre a permissividade absoluta do material (ϵ) e a permissividade do vácuo ($\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} F/m$) (Annan, 1992). No ambiente terrestre, este parâmetro é fortemente controlado pela presença de água, podendo apresentar variações de quase duas ordens de grandeza (variando de 1 a 80). A tabela 3.1 mostra valores de permissividade dielétrica relativa de alguns dos materiais mais comuns no ambiente geológico.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (3.7)$$

Material		Constante dielétrica (K) (Adimensional)	Condutividade elétrica (σ) (mS/m)	Velocidade (v) (m/ns)	Atenuação (α) (dB/m)	Fonte
Termo utilizado na Engenharia Geotécnica	Termo Original					
Água do Mar	<i>Sea water</i>	81	3000	-	-	Porsani, 1999
Água doce	<i>Fresh water</i>	81	0,5	-		Porsani, 1999
Ar	<i>Air</i>	1	0	0,3	0	Davis and Annan, 1989
Areia abaixo do NA	<i>Sand wet</i>	20 - 30	0,1 - 1	0,06	0,03 - 0,3	Davis and Annan, 1989
Areia acima do NA	<i>Sand dry</i>	3 - 5	0,01	0,15	0,01	Davis and Annan, 1989
Areia acima do NA e cascalho	Areia seca e cascalho	2 - 6	0,01	-		Porsani, 1999
Arenito abaixo do NA	Arenito saturado	20 - 30	40	0,067		Porsani, 1999
Arenito acima do NA	<i>Sandstone dry</i>	2 - 5	0,001 - 0,01	-	2 - 10	Daniels, 2004
Argila abaixo do NA	Argila satura	40	1000	-		Porsani, 1999
Argila acima do NA	<i>Clay dry</i>	2 - 6	100 - 1000	-	10 - 50	Daniels, 2004
Asfalto	Asfalto	3 - 5	0	-		Porsani, 1999
Basalto abaixo do NA	Basalto saturado	8	10	-		Porsani, 1999
Basalto acima do NA	Basalto seco	6	1	-		Porsani, 1999
Calcário abaixo do NA	Calcário saturado	8	2	-		Porsani, 1999
Calcário acima do NA	Calcário seco	4	0,5	-		Porsani, 1999
Concreto abaixo do NA	Concreto saturado	12,5	0	0,085		Porsani, 1999
Concreto acima do NA	Concreto seco	5,5	0	-		Porsani, 1999
Diabásio abaixo do NA	Diabásio saturado	8	100	-		Porsani, 1999
Diabásio acima do NA	Diabásio seco	7	10	-		Porsani, 1999
Folhelho abaixo do NA	Folhelho saturado	7	100	-		Porsani, 1999
Folhelho acima do NA	Folhelho seco	5	1	-		Porsani, 1999
Gelo de água do mar	<i>Sea water ice</i>	4 - 8	10 - 100	-	1 - 30	Daniels, 2004
Gelo de água doce	<i>Fresh water ice</i>	4	0,1 - 1	-	0,1 - 2	Daniels, 2004
Granito abaixo do NA	Granito saturado	7	1	-		Porsani, 1999
Granito acima do NA	Granito seco	5	0,01	-		Porsani, 1999
Metal	Metal	300	10000000000	0,017	950000000	Rodrigues, 2004
Neve	<i>Snow firm</i>	6 - 12	0,001 - 0,01	-	0,1 - 2	Daniels, 2004
PVC	PVC	8	0	-	-	Porsani, 1999
Silte acima do NA	<i>Silt</i>	5 - 30	1 - 100	0,07	1 - 100	Davis and Annan, 1989
Silte abaixo do NA	Silte saturado	10	1 - 10	0,093		Porsani, 1999
Siltito abaixo do NA	Siltito saturado	30	100	-		Porsani, 1999
Siltito acima do NA	Siltito seco	5	1	-		Porsani, 1999
Solo arenoso abaixo do NA	Solo arenoso saturado	25	6,9	-		Porsani, 1999
Solo arenoso acima do NA	Solo arenoso seco	2,6	0,14	-		Porsani, 1999
Solo argiloso abaixo do NA	Solo argiloso saturado	15	50	0,077		Porsani, 1999
Solo argiloso acima do NA	Solo argiloso seco	2,4	0,27	-		Porsani, 1999
Solo siltoso abaixo do NA	<i>Soil loamy wet</i>	10 - 30	10 - 100	-	1 - 6	Daniels, 2004
Solo siltoso acima do NA	<i>Soil loamy dry</i>	4 - 10	0,1 - 10	-	0,5 - 3	Daniels, 2004

Tabela 3-1 - Valores típicos de propriedades eletromagnéticas para diferentes tipos de materiais.

Fonte: Porsani (1999), Daniels (2004), Davis & Annan (1989) e Rodrigues (2004).

A terceira relação constitutiva, relaciona o vetor campo magnético (\vec{H}) ao vetor indução magnética (\vec{B}), por meio de um fator de proporcionalidade (μ), denominado permeabilidade magnética do meio (eq. 3.8), que é expresso em henry/metro (H/m). A permeabilidade magnética expressa à quantidade de energia armazenada através do surgimento da indução magnética, ou seja, descreve como os momentos magnéticos moleculares e atômicos respondem a um campo magnético.

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \quad (3.8)$$

Uma característica importante é que o seu efeito para a maioria dos materiais geológicos, excetuando os materiais ferromagnéticos, não varia significativamente com a frequência da onda eletromagnética em relação a do espaço livre, então podendo ser, considerado que o valor da permeabilidade magnética relativa é aproximadamente 1 (Keller, 1987), logo, é comum desconsiderar o efeito da permeabilidade magnética ao se efetuar medidas EM na Terra (Topp *et al.*, 1980).

A permeabilidade magnética relativa (eq. 3.9) é a razão entre a permeabilidade magnética absoluta do material μ e a permeabilidade magnética do vácuo ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H/m$). Contudo, segundo Anann (1992), os efeitos de uma forte permeabilidade magnética não podem ser totalmente ignorados no método GPR.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (3.9)$$

3.3 Propagação de ondas eletromagnéticas

As considerações a respeito da propagação de ondas eletromagnéticas têm como fundamentos as equações de Maxwell, como já foi explicado anteriormente. Como ponto de partida, podemos representar essa propagação pela equação da onda plana para um campo elétrico unidimensional. No caso de meios isotrópicos e homogêneos, ela é expressa matematicamente pela equação:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (3.10)$$

A propagação é dada ao longo do eixo z , com os vetores campo elétrico (\vec{E}) e campo magnético (\vec{H}) perpendiculares entre si, como mostra a Figura 3.3.

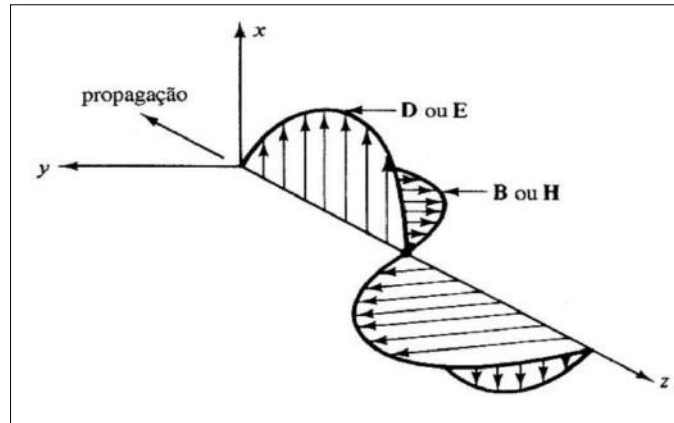


Figura 3.3 - Propagação das ondas eletromagnéticas.

A profundidade de penetração e as perdas associadas à propagação das ondas eletromagnéticas no meio geológico podem ser mensuradas pela profundidade pelicular ou “*skin depth*” (δ). O *skin depth* (eq. 3.11) é definido como a profundidade de penetração na qual a amplitude da onda eletromagnética reduz-se a $1/e = 36,79\%$ do seu valor inicial.

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{1}{\sigma f}} \quad (3.11)$$

A equação 3.11, aplica-se a meios não magnéticos, isto é, $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ e $\omega = 2\pi f$, com f igual à frequência central de operação do GPR. Analisando a equação 3.11, pode-se concluir que quanto maior a condutividade elétrica do meio geológico, menor será o *skin depth*, ou seja, menor será a penetração da onda no solo. O mesmo efeito é observado quando aumenta-se a frequência da onda eletromagnética, e quanto maior a frequência menor o comprimento de onda.

Conhecer o valor da velocidade de propagação da onda GPR no meio geológico, constitui um fator de extrema relevância, pois é através dele que pode-se estimar a profundidade dos objetos. No vácuo, a onda GPR propaga-se com velocidade de $0,3 \text{ m/ns}$ e no meio geológico com valores, geralmente, compreendidos entre $0,06 \text{ m/ns}$ e $0,16 \text{ m/ns}$. As variações nas propriedades eletromagnéticas de alguns materiais geológicos mais comuns podem ser observadas na tabela 3.1. Observando-a, é possível verificar que a permissividade dielétrica relativa da água possui um valor muito superior aos demais materiais geológicos. Isso faz o GPR extremamente sensível ao conteúdo de água do solo.

3.4 Aplicações do método

A análise de alguns trabalhos citados comprova a eficácia do GPR em obter informações detalhadas de estruturas presentes em profundidade rasas, de forma rápida e econômica. As principais aplicações dessa técnica são para:

- Aplicações militares - Localização de minas explosivas;
- Exploração mineral - Localização de depósitos de "placers", zonas mineralizadas, desenvolvimento de minas;
- Meio ambiente - Localização de plumas de contaminação; Localização de tanques e barris enterrados contendo rejeito de petróleo;
- Geologia - Estudo estratigráfico detalhado em escala de afloramentos, localização de estruturas tectônicas (diques, zonas de falhas, fraturas);
- Planejamento urbano - Localização de tubulares e dutos metálicos enterrados;
- Investigações arqueológicas - Localização de sítios arqueológicos;
- Geotecnia - Localização de cavernas e vazios em estruturas de concreto;
- Hidrogeologia - Determinação da profundidade do nível freático, localização de paleocanais, estudos de intrusão salina em áreas litorâneas e de assoreamentos;
- Investigação criminal - Localização de cadáveres;

4 Aquisição de dados

Há inúmeros sistemas de GPR desenvolvidos no mercado mundial. As três maiores empresas fornecedoras do equipamento são: Geophysical Survey Systems Incorporated (GSSI) (Norte-Americana), Sensors and Softwares (Canadense) e Mala Geosciences (Sueca). Estas empresas produzem modelos de sistemas de radar que podem operar em diferentes faixas de frequências. Um sistema de radar consiste basicamente de quatro partes: um gerador de sinal (unidade transmissora), a unidade receptora, a unidade de controle digital e a unidade de visualização (display) (Fig. 4.1).



Figura 4.1 - Equipamento TerraSIRch SIR System-3000.

4.1 Planejamento da aquisição

Segundo Annan (1992), o passo mais importante antes de começar uma pesquisa com GPR é a definição do problema. Para isso, é necessário saber quatro principais questões antes de decidir se o trabalho será ou não eficiente.

Questão 1: Qual a profundidade aproximada do alvo? Logicamente, se o alvo está além do intervalo de detecção do sinal do radar, então o GPR deve ser descartado como método viável.

Questão 2: Qual a geometria do alvo? Fatores geométricos como altura, largura e comprimento do alvo devem ser avaliados, a fim de saber se o alvo é fisicamente grande o suficiente para refletir ou espalhar uma quantidade detectável de energia. Se o alvo não for esférico, é importante saber algumas informações de sua orientação espacial, como por exemplo, mergulho e direção.

Questão 3: Quais são as propriedades elétricas do alvo e do meio geológico? A constante dielétrica e a condutividade elétrica devem ser estimadas, porque precisamos dessa informação do alvo para saber se terá contraste suficiente entre as propriedades elétricas do alvo e do ambiente encaixante, que também deve ser avaliado com relação às suas propriedades elétricas e à sua homogeneidade espacial.

Questão 4: Qual é o ambiente do levantamento? A presença de possíveis fontes de ruídos eletromagnéticos, tais como torres de alta-tensão, antenas de FM, estruturas metálicas (cercas) devem ser previamente identificadas. A logística do levantamento, a facilidade de acesso, a topografia, também devem ser levadas em consideração.

4.2 Técnicas de aquisição

Para a aquisição de dados GPR existem três principais arranjos: perfis de reflexão com afastamento constante ou “*common offset*”, sondagens de velocidade que pode ser “*common mid point*” (CMP) ou “*wide angle reflection and refraction*” (WARR) e transiluminação ou tomografia de radar (Annan, 2001).

4.2.1 Afastamento Constante ou Common Offset

Os perfis de reflexão com afastamento constante são os mais comuns em levantamentos GPR. Esta técnica foi a aplicada na elaboração deste trabalho. Neste tipo de aquisição, o espaçamento entre o ponto de transmissão e recepção mantém-se constante durante a movimentação das antenas ao longo de uma linha (Fig. 4.2). Obtém-se como resultado um perfil, cujos eixos horizontal e vertical correspondem, respectivamente, às distâncias (posição das antenas) e ao tempo duplo de reflexão do sinal de GPR (ida e volta).

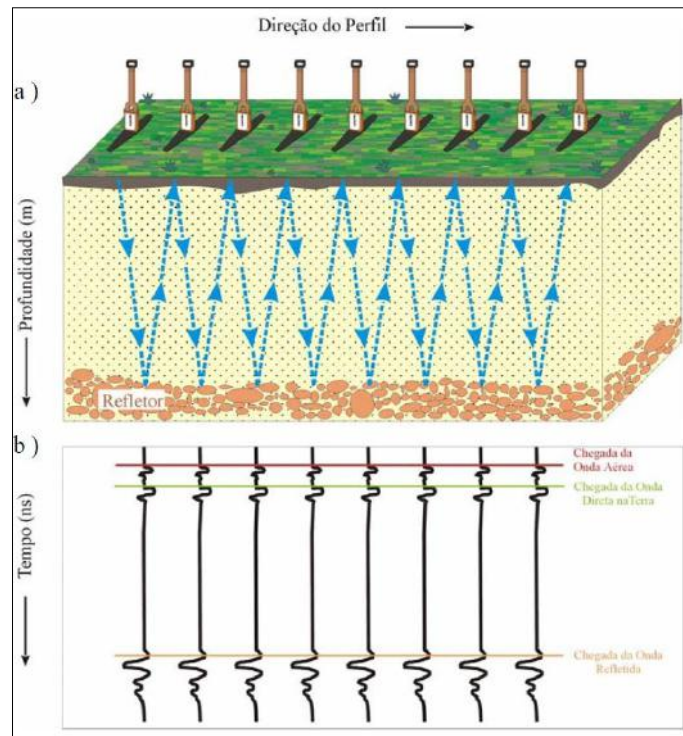


Figura 4.2 - Perfil com espaçamento constante. Fonte: Borges, 2007.

4.2.2 *CMP (Common Mid Point) e WARR (Wide Angle Reflection and Refraction)*

As sondagens de velocidade servem para estimar a velocidade da onda de radar no meio, a fim de se converter o tempo duplo dos perfis de reflexão em profundidade, e verificar se o refletor de subsuperfície é proveniente de alvo geológico ou de interferências superficiais.

As formas mais sofisticadas e não destrutivas de sondagem de velocidade são as técnicas CMP (Common Mid Point) e WARR (Wide Angle Reflection and Refraction). Ambas as técnicas são usadas para se obter uma estimativa da velocidade da onda de radar através da variação do espaçamento das antenas e do tempo duplo das reflexões em subsuperfície para uma dada localização fixa.

Na técnica CMP, a abertura entre as antenas (transmissora e receptora) são deslocadas em sentidos contrários, mantendo-se, a cada nova posição de leitura, equidistantes de um ponto localizado no centro do alinhamento entre elas (Fig. 4.3.a). As leituras são feitas para cada posição das antenas, de modo que havendo um ponto em profundidade pertencente a uma interface entre camadas, este será imageado várias vezes com diversos afastamentos transmissora-receptora, gerando um perfil de múltiplo-afastamento.

Já na técnica WARR, uma das antenas é mantida fixa enquanto a outra é sucessivamente afastada da primeira num mesmo alinhamento (Fig. 4.3.b), caracterizando, assim como o perfil CMP, uma aquisição múltiplo-afastamento.

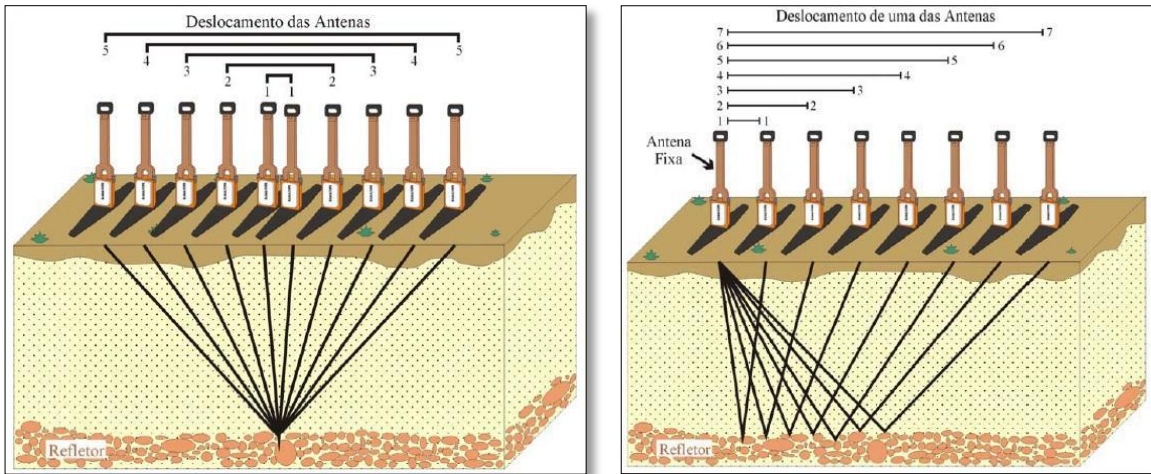


Figura 4.3 - a) Arranjo CMP mostrando o deslocamento lateral das antenas. b) Arranjo WARR mostrando o deslocamento lateral da antena. Fonte: Borges, 2007.

4.2.3 Transiluminação e tomografia de radar

A tomografia de radar e transiluminação é método de aquisição onde as antenas (transmissora e receptora) são colocadas em lados opostos de um meio investigado. Aplica-se nas investigações de poços, estruturas feitas pelo homem e exploração de minas, neste último caso, a transmissora é deixada nas paredes internas de galerias e as receptoras em posições externas à mesma. De acordo com a figura 4.4, podemos verificar que a técnica possui quatro diferentes possíveis tipos de arranjos: (a) Transiluminação *common offset*, (b) Tomografia direta, (c) *Vertical Radar Profiling* - VRP e (d) transiluminação variável (Borges, 2007).

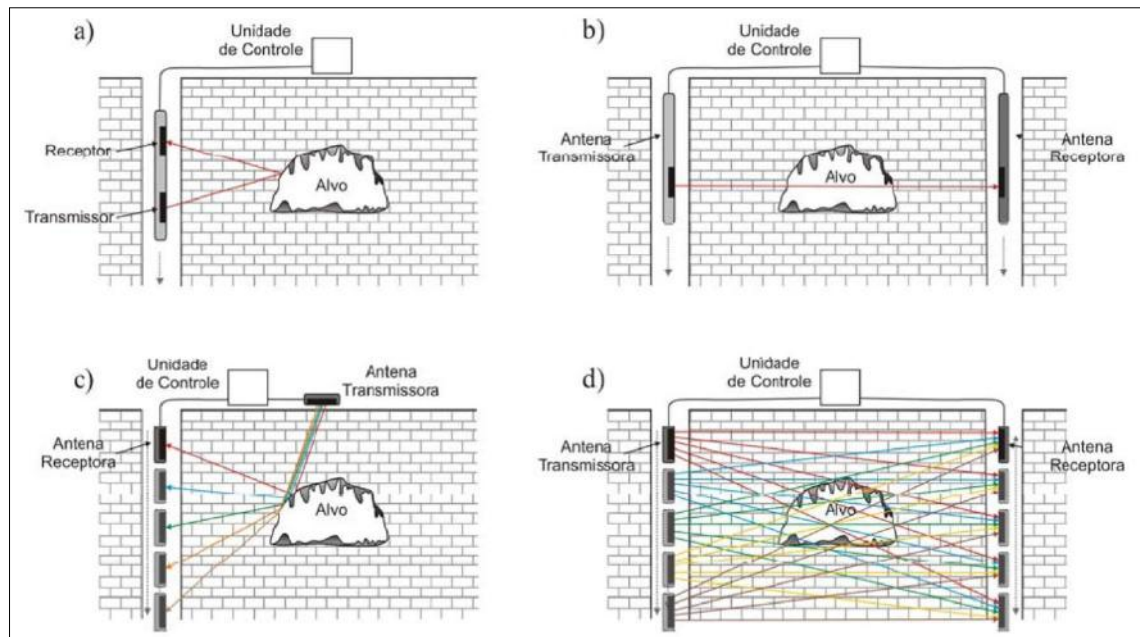


Figura 4.4 - Modelos esquemáticos dos tipos de arranjos mais comuns no método de transiluminação.
Fonte: Borges, 2007.

4.3 Parâmetros da aquisição

Uma vez caracterizada a viabilidade da utilização do GPR e escolhido o melhor arranjo de aquisição a fim de atingir os alvos propostos, de acordo com Annan (2000), é necessário definir e ajustar alguns parâmetros no equipamento e na forma de aquisição a serem utilizados para definir um levantamento de reflexão de afastamento único e cobertura simples. Esses parâmetros são a frequência, a janela de tempo, o intervalo de amostragem temporal, o espaçamento entre estações, o espaçamento entre antenas, o posicionamento e o espaçamento da linha e a orientação da antena.

4.3.1 Frequência

A escolha adequada da frequência central da antena está relacionada diretamente com o alvo, pois o aumento da frequência melhora a resolução, entretanto, reduz a profundidade de penetração da onda. A profundidade de investigação do GPR é determinada pelas características de suas antenas e o sinal empregado. Em geral, para obter uma resolução aceitável são necessárias antenas de alta frequência, em compensação, há uma perda na profundidade. No caso de antenas com baixa frequência, há uma alta profundidade de penetração, mas a perda agora é na resolução das imagens obtidas (Tabela 4.1).

Frequência Central (MHz)	Profundidade de Penetração Máxima (m)
1000	1
500	1,5
400	2
200	4
100	25
50	30
25	40
10	50

Tabela 4-1 - Frequência vs Profundidade de Penetração (Porsani, 2001).

4.3.2 Janela

A janela temporal corresponde ao intervalo temporal em que a janela de tempo deve ser deixada aberta para que o sinal seja transmitido, refletido e captado pela antena receptora. Quando o objetivo for atingir profundidade mais elevadas, deve-se ter uma maior abertura da janela temporal, a fim de que uma maior quantidade de dados possa ser registrada. A tabela 4.2 mostra valores de tempo duplo, em *ns*, para alguns materiais.

Profundidade (m)	Rocha (ns)	Solo molhado (ns)	Solo seco (ns)
0,5	12	24	10
1	25	50	20
2	50	100	40
5	120	250	100
10	250	500	200
20	500	1000	400
50	1250	2500	1000
100	2500	5000	2000

Tabela 4-2 - Valores médios da janela temporal em função da profundidade. Fonte: Annan (2000).

4.3.3 Intervalo de amostragem

O intervalo de amostragem temporal corresponde ao intervalo de tempo entre duas amostragens seguidas, que a unidade de controle realiza sobre a antena de recepção com a finalidade de mensurar a energia refletida.

4.3.4 Espaçamento entre antenas

O espaçamento entre as estações é a distância entre as estações de medida (Δx), em metros. Segundo o princípio da amostragem espacial de *Nyquist* o seu valor tem que ser equivalente a um quarto do comprimento da onda do pulso GPR emitido. Já o espaçamento

entre as antenas transmissora e receptora deve corresponder a 20% da profundidade do alvo (Annan, 1992), geralmente é recomendada pelos próprios fabricantes no manual de instruções do equipamento. Este estudo representa a teoria da amostragem quanto maior o espaçamento no espaço entre as amostra menor o espaçamento entre as frequências no intervalo estudado.

4.3.5 Posicionamento e espaçamento entre linhas

No que diz respeito ao posicionamento e ao espaçamento da linha sempre que possível, deve-se orientar o perfil de aquisição perpendicularmente às estruturas de subsuperfície que se deseja mapear e distribuí-las equidistantemente. Existem várias maneiras possíveis de orientação das antenas, mas costumam-se realizar os levantamentos de radar com ambas as antenas perpendiculares à direção do perfil, pois dessa forma o pulso é irradiado com o campo elétrico transversal à direção do perfil, o que maximiza a relação das antenas com o alvo em subsuperfície (Annan, 2000).

4.4 Modo de Aquisição do Estudo

Para este trabalho foram realizados dezenove perfis com um equipamento do modelo TerraSIRch SIR (*Subsurface Interface Radar*) System-3000 fabricado pela Geophysical Survey Systems, Inc (GSSI), com antena blindada monoestática de 200 MHz, o equipamento pertence ao Laboratório de Métodos de Modelagem e Geofísica Computacional (LAMEMO) da COPPE-UFRJ. Os parâmetros adotados na aquisição foram: número de amostras por *scan* (traço): 512; *range* (janela temporal): 100ns; intervalo entre *scans* (traços): 64scans/s; resolução: 16bits; número de pontos de ganhos: 5; filtro passa-alta vertical: 50MHz; filtro passa-baixa vertical: 600MHz; taxa de transmissão: 100MHz.

Foram realizados dois perfis longitudinais com direção N30W, com um espaçamento de 5 metros. A posição zero está localizada a 1,30 m do piso de concreto do depósito de testemunhos. O perfil L01 passa a cerca de 2,50 m e está disposto paralelamente ao meio-fio mais próximo ao Departamento de Geografia. Os perfis latitudinais com direção N60E foram realizados com um espaçamento médio de 3,54 m. A posição zero do perfil L03 possui coordenadas UTM (7471076N - 681185E) está no meio-fio do Departamento de Geografia. O primeiro perfil latitudinal (L03) passa a cerca de 1,30 m do piso de concreto do depósito de testemunhos e está disposto perpendicularmente ao meio-fio mais próximo ao Departamento de Geografia (Fig. 4.5). O modelo esquemático da distribuição dos perfis ao longo da área em relação aos departamentos de Geologia e Geografia está representado na figura 4.6.



Figura 4.5 - Localização aproximada das linhas dentro da área de estudo.

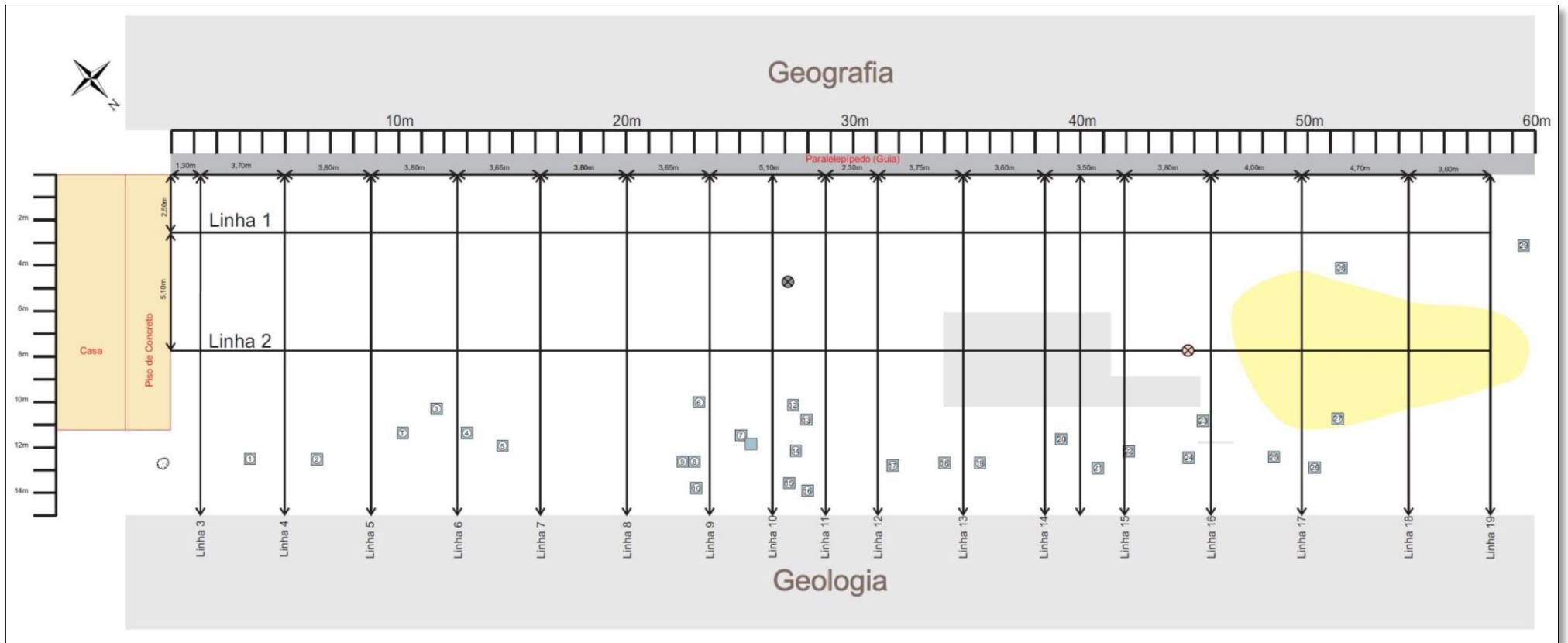


Figura 4.6 - Modelo esquemático da distribuição dos perfis de GPR.

5 *Processamento dos Dados de GPR*

O processamento de dados do GPR consiste no conjunto de técnicas de tratamentos de sinais aplicados aos dados digitalizados, com o objetivo de torná-los adequados à interpretação visual, produzindo seções mais nítidas e com melhor resolução temporal das camadas em subsuperfície. O processamento pode ser básico ou avançado, segundo Annan (2000), o processamento básico de dados refere-se a algumas etapas fundamentais aplicadas aos dados a fim de gerar um produto mais aceitável para a interpretação e a avaliação iniciais dos dados. Geralmente, nos equipamentos mais novos, este tipo de processamento já é aplicado em tempo real gerando uma imagem também em tempo real. A vantagem do processamento após a aquisição é que o processamento básico pode ser feito mais sistematicamente e operadores não-causais para remover ou realçar certas feições podem ser aplicados. Já o avançado refere-se aos tipos de processamento que requerem um certo controle do operador para ser aplicado e que irá resultar em um dado substancialmente diferente do dado bruto de entrada para o processamento. Tais processos incluem conhecidas operações do processamento sísmico tais como, análise de atributos, Filtragem FK, corte seletivo, correção NMO (Normal Move Out), filtragem de mergulho, deconvolução e análise de velocidade por semelhança, bem como operações mais específicas para o GPR tais como, remoção de fundo (background), mistura de antenas de frequências múltiplas e mistura de polarização (Tillard & Dubois, 1992). Ambos os procedimentos seguem etapas, as quais são determinadas pela disponibilidade de recursos, objetivo do levantamento, qualidade dos dados, tempo disponível, disponibilidade e capacidade de processamento (software e hardware) e, principalmente, experiência do intérprete (Dourado, 2004).

5.1 *Edição*

Nessa etapa também é feita a edição de dados, sendo possível corrigir erros do cabeçalho, melhorar a apresentação e mudar a polaridade dos traços, reverter a direção do perfil, e acrescentar informações sobre a topografia (Borges, 2007).

Ainda nesta primeira etapa escolhe-se ainda como serão apresentados os radargramas. Existem três modos distintos, são eles: *Winggle Trace*, o qual indica a amplitude do sinal em função do tempo (Fig.5.1.a); *Gray scale* é o segundo modo de exibição e refere-se à aplicação da escala de cinza a seção do GPR (Fig.5.1.b) e o terceiro modo é *Color coding*, o qual usa uma escala de cores (Fig.5.1.c). A escolha fica a critério do intérprete (Duarte, 1997).

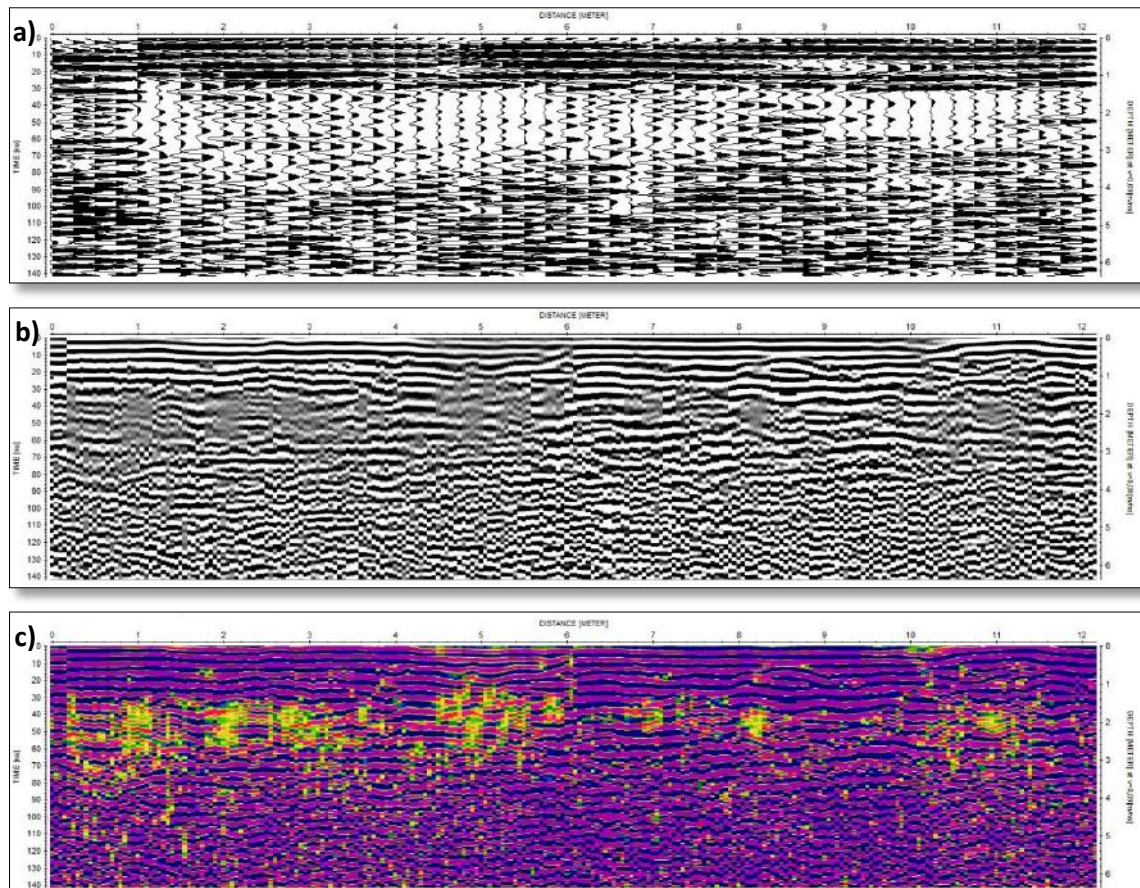


Figura 5.1 - Tipos de apresentação de radargramas.
a) *Winggle Trace*, b) *Gray scale* e c) *Color coding*. Fonte: Reflexw 4.2 (Sandmeier, 2006)

5.2 Filtragem DC (*dewowing*)

O passo inicial do processamento básico é usualmente uma filtragem temporal (1D) para remover as componentes de baixíssima frequência dos dados (WOW), que são iguais ou inferiores a 4 Hz, associados à saturação eletrônica do receptor, devido à alta energia das ondas aérea e terrestre, enfim, eliminando os ruídos eletrônicos e estáticos inerentes ao sistema, podemos citar como exemplo, cercas metálicas, árvores de grande porte, muros, postes de iluminação. Neste trabalho foi aplicado o filtro 1D denominado *Subtract-mean (Dewow)*, este passo é frequentemente conhecido como “*dewowing*” os dados. O filtro efetua a média entre os valores de cada traço (subtraindo o valor obtido de um valor central). Este filtro atua em cada traço independentemente, resultando em um registro “mais limpo”. Os componentes de frequência muito baixa dos dados são associados ou com fenômenos indutivos ou com possíveis limitações do intervalo dinâmico dos instrumentos.

5.3 *Aplicação de Ganhos*

Para compensar a rápida atenuação do sinal de radar, à medida que se propagam no subsolo, faz-se necessário aplicar algum tipo de função de ganho no tempo ("*time gain*") para realçar as amplitudes correspondentes aos refletores posicionados a profundidade mais elevadas, e conseqüentemente com o tempo de propagação mais longo, melhorando assim sua visualização, ou seja, sua aplicação objetiva é melhorar a visualização de refletores "fracos". Sinais oriundos de altas profundidades são menores quando comparados aos mais rasos, tornando a visualização ao mesmo tempo mais difícil, além do que, eventos mais profundos podem ficar invisíveis ou não diferenciáveis (Annan, 2000).

Existem os muitos tipos de ganho que podem ser aplicados no processamento de dados de GPR, mas é preciso saber o que se está querendo, conservar a fidelidade de amplitude ou simplesmente visualizar todos os sinais nos dados?

Se escolhermos pela visualização dos sinais, independente da amplitude real, podemos aplicar o controle de ganho automático (*Automatic Gain Control - AGC*), que equaliza, atenuando ou amplificando, todas as amplitudes dos traços, mantendo assim a continuidade de horizontes estratigráficos. Esse método é bastante útil para definir lineamentos e feições estruturais, pois todas as anomalias serão representadas como tendo a mesma amplitude. O filtro AGC, normalmente, apresenta os melhores resultados quando aplicado aos dados de gradiente vertical do campo magnético.

Já com a compensação de ganhos esféricos e exponenciais (*Spherical and Exponential Compensation - SEC*) ou também conhecido como decaimento de energia (*Energy Decay*), que é simplesmente a aplicação de uma função de ganho linear, para corrigir o efeito de diminuição de energia com o afastamento da fonte e aumento do tempo (espalhamento geométrico), e de uma função de ganho exponencial, que atua compensando o efeito da perda de amplitude por absorção. Atuando da mesma forma em todo o espectro de amplitudes, preservando a hierarquia de amplitude do sinal, e não corrigindo seletivamente a perda de componentes de altas frequências do sinal (Neto, 2003).

É importante ressaltar que na aplicação de ganhos, todo sinal refletido é amplificado, ainda que se trate de ruído. Um ganho excessivo para um grande intervalo de tempo de propagação no qual o sinal tem uma amplitude similar à do ruído, pode-se amplificar o ruído eletrônico do aparelho, do cabeamento ou emissão das mesmas frequências que estão sendo registradas, dando lugar a registros confusos (Pinto, 2010). Então o ganho deve ser

selecionado baseado em algum modelo físico, não a escolha do usuário. O objetivo deve ser modificar os dados, porém mantendo sua total utilidade sem introduzir artefatos.

5.4 Deconvolução

Os pulsos eletromagnéticos do GPR são coletados no domínio do tempo, resultado da ação do subsolo sobre a fonte utilizada (*wavelet*). A convolução é o processo físico que descreve como a *wavelet* de propagação interage com o filtro da terra. A deconvolução é o filtro inverso que opera tentando retirar dos dados registrados a *wavelet*, aumentando a resolução temporal dos dados, melhorando a interpretação dos perfis de radar.

A eficácia da aplicação da etapa de deconvolução no processamento de dados de GPR é matéria controversa entre os pesquisadores, por não ser tão direta e fácil, e por não fornecer alguma grande melhora na resolução, já que para os dados de radar, a abordagem convencional de deconvolução não pode ser utilizada, uma vez que esta leva em consideração o caráter de fase mínima do sinal, enquanto que o pulso de radar é de fases mistas. Técnicas de deconvolução de fase mista estão atualmente sendo testadas nos dados de radar, mas os resultados ainda não são conclusivos (Araújo, 1997).

A rápida diminuição da amplitude do sinal de GPR significa que artefatos da deconvolução podem mascarar eventos fracos no fundo se um ganho no tempo não for aplicado antes da deconvolução e a natureza não linear do ganho em tempo pode alterar substancialmente as características da “*wavelet*” se o ganho é aplicado antes da decon. Como resultado esse processo pode ser difícil de ser aplicada sistematicamente e de mostrar alguma melhora na resolução. Situações em que a deconvolução tem mostrado ser benéfica ocorrem quando reverberações estão envolvidas. A deconvolução pode então fornecer benefícios substanciais à compressão do pulso.

5.5 Filtragem Espacial e Temporal

Embora simples, a filtragem temporal é uma ferramenta poderosa no processamento e interpretação dos dados de GPR, permitindo remover frequências corrompidas do sinal, aumentando a relação sinal-ruído. Pode ser aplicada através de filtros passa-alta ou passa-baixa (que servem para eliminar as frequências baixa e alta respectivamente), utilizando-se a transformada de Fourier rápida (FFT) ou até mesmo filtros de convolução lineares e não lineares no domínio do tempo. A determinação da banda de frequência onde estão contidos os

sinais de maior amplitude pode ser feita visualmente a partir da exibição, em um gráfico, do espectro de amplitudes do sinal em função da frequência (Annan, 2000).

A exemplo da filtragem temporal, operações similares de filtragem podem ser aplicadas no domínio espacial em dados de GPR para remover vários tipos de variações espaciais. Filtragens passa-baixa, do tipo "média-móvel", servem para reter apenas os comprimentos de onda mais longos, reforçando os eventos horizontais e filtrando os com mergulho, ou seja, enfatizando assim a continuidade lateral dos refletores. Já filtragens passa-alta, do tipo "remoção do *background*", fazem o oposto, mantêm eventos com mergulho e filtra eventos horizontais, tendo como função basicamente para realçar os eventos localizados, tais como refletores pontuais e/ou inclinados (Neto, 2003).

Além desses filtros existem àqueles que podem ser aplicados tanto no domínio temporal quanto espacial, por exemplo, os filtros de corte pela mediana e pela média alfa, que como utilidade a remoção dos ruídos do tipo "*Spike*". Estes filtros podem ser aplicados antes e depois do ganho em tempo, mas são mais úteis se utilizados antes do ganho em tempo ou de qualquer outra filtragem do dado.

5.6 Migração

A migração é um processo que procura corrigir o posicionamento dos refletores nos radargramas, desfazendo os efeitos associados à propagação da frente de onda em subsuperfície, mas para isso, é necessário um conhecimento da seção de velocidades e quase sempre com dados de GPR com cobertura simples esta informação não está disponível. Assim como a deconvolução, a migração pode ser vista como um processo inverso que tenta recuperar as relações geométricas das feições em subsuperfície, principalmente no que diz respeito aos ângulos de mergulho, dimensões, curvaturas e correto posicionamento em relação à superfície, das interfaces, transferindo os dados processados no domínio (x,t) para o domínio (x,z) , e ainda, realizar o colapso de difrações (Annan, 2000).

5.7 Dados processados

As etapas de processamentos adotadas nesse trabalho têm como propósito destacar os refletores contidos no solo, reduzindo a interferência provocada pela onda direta pelo ar, pela onda direta pelo solo e possíveis interferências geradas por estruturas que possam interagir com o pulso eletromagnético. Cada um desses passos foi monitorado individualmente no software utilizado, com o objetivo do melhor ajuste da seção a ser produzida. No final do

processamento foram geradas imagens no formato (*.jpeg) para a apresentação dos dados (Fig. 5.2).

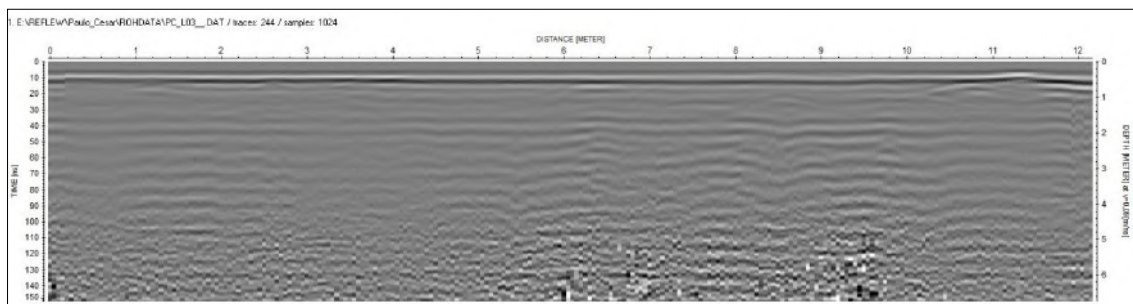


Figura 5.2 - Dado Bruto, adquirido diretamente do equipamento.

Os arquivos de dados, no formato de aquisição (*.dzt) receberam processamentos dentro do software REFLEXW, versão 4.2 da empresa Sandmeier (Sandmeier, 2006). A rotina de processamento consistiu em conversão de formato do arquivo, ajuste do tempo zero (*Move starttime*), filtros temporal (*Dewow* e *Bandpassfrequency*), ganhos (*AGC-Gain* e *Energy decay*), filtragem espacial (*Background Removal*) e deconvolução (*Predictive*). As etapas de processamento citadas estão demonstradas nas figuras 5.3 à 5.10. Os parâmetros aplicados nas etapas de processamento são valores próximos de: *Move starttime* (6,0), *Dewow* (30,0), *Background Removal* (140,0), *Energy Decay* (1,44), *Bandpassfrequency* (120, 150, 250, 280), *Deconvolution* (20, 70, 50, 25), *Background Removal* (140,0). Não foi necessária a realização da correção topográfica, devido à baixa inclinação do terreno. Abaixo, segue fluxo das etapas de processamento com atributos utilizados, para que possam ser repetidos em futuros trabalhos na área de estudo.

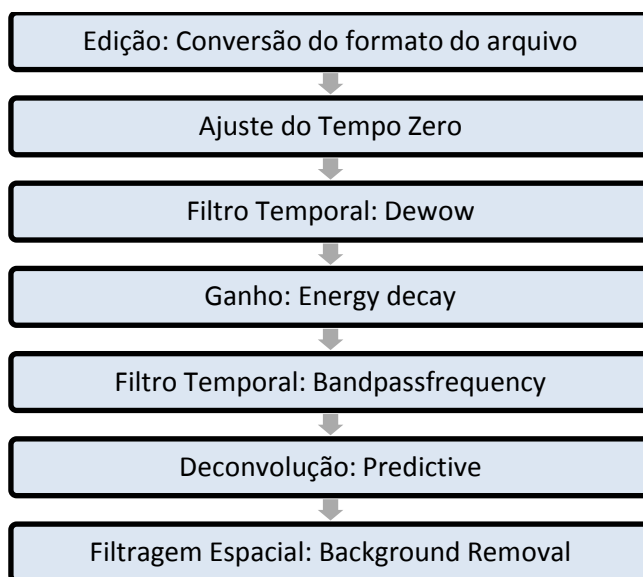


Tabela 5-1 - Fluxograma com as etapas do processamento de dados.

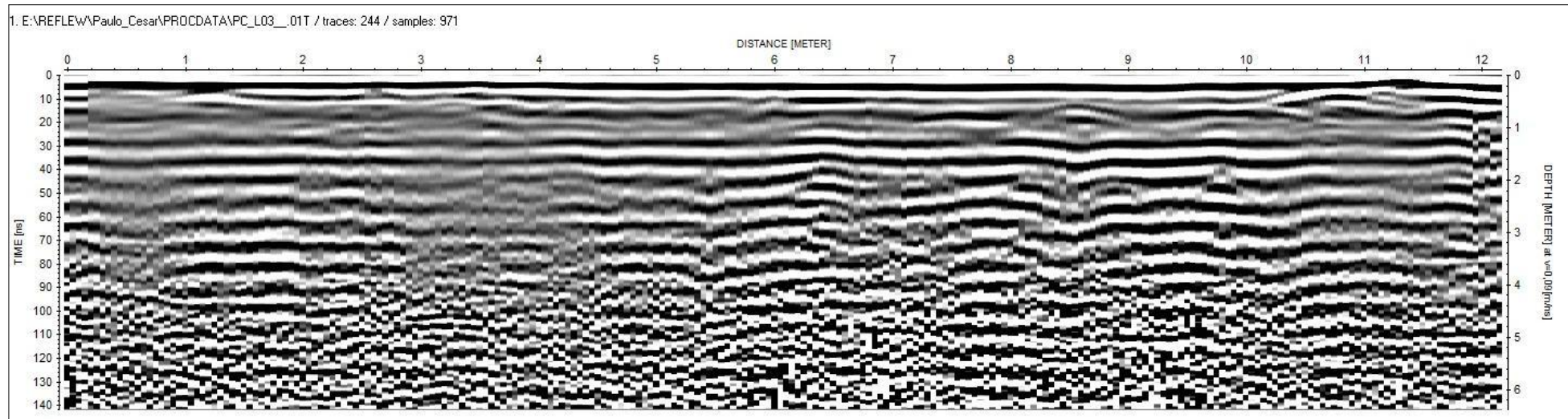


Figura 5.3 - Resultado do Ajuste do Tempo Zero (Move Startime).

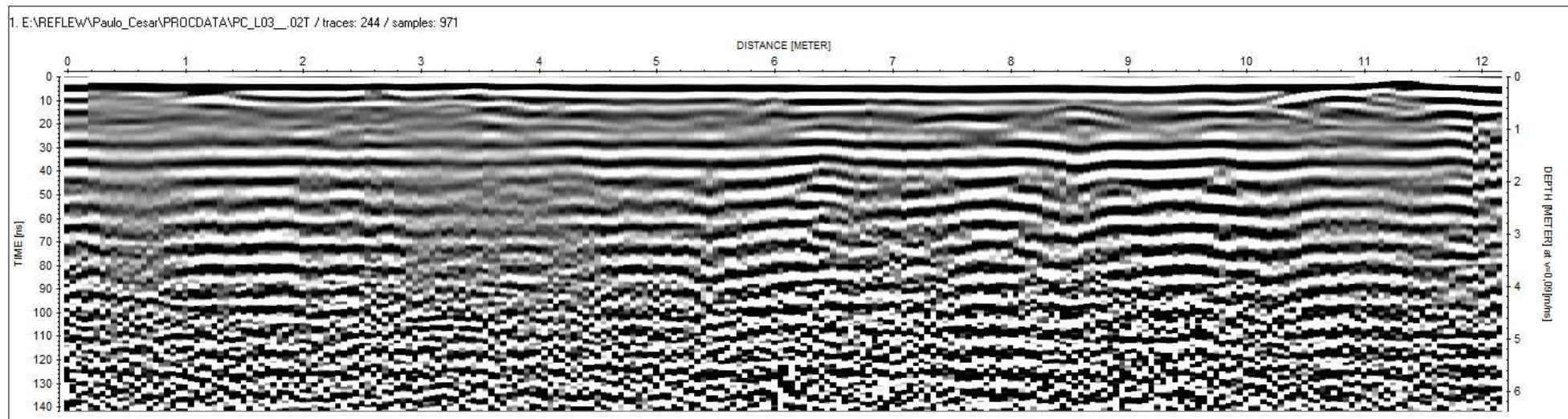


Figura 5.4 - Resultado do Filtro 1D (Subtract Mean - Dewow).

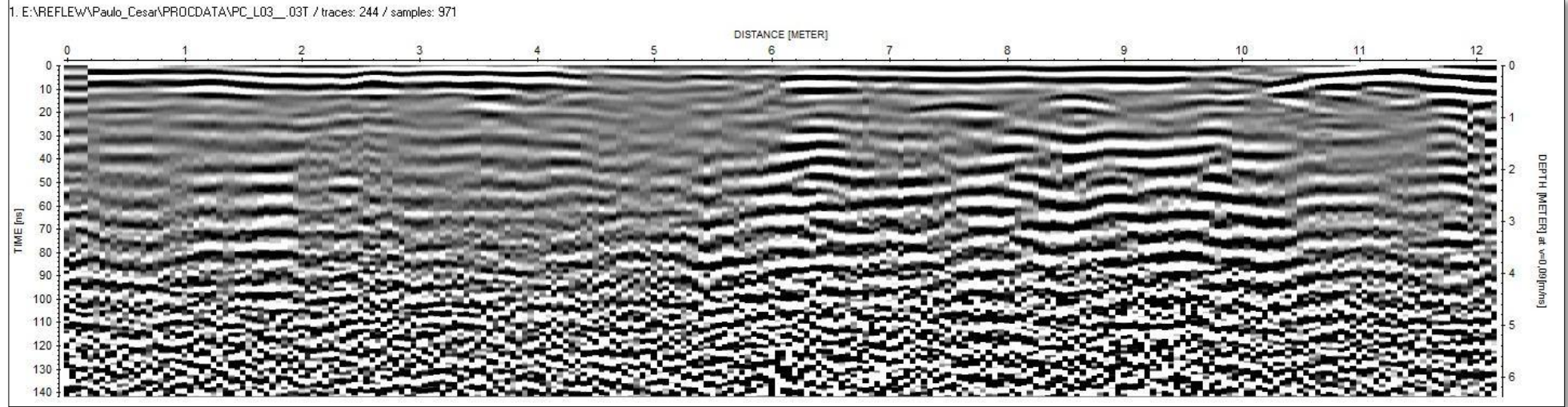


Figura 5.5 - Resultado do Filtro 2D (Background Removal).

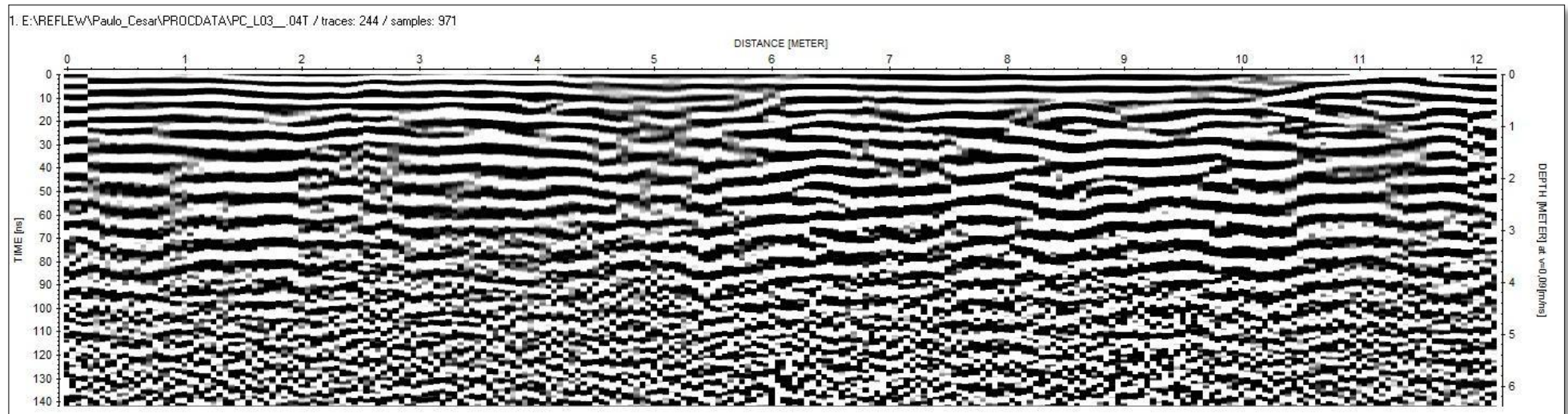


Figura 5.6 - Resultado do Ganho (Energy Decay).

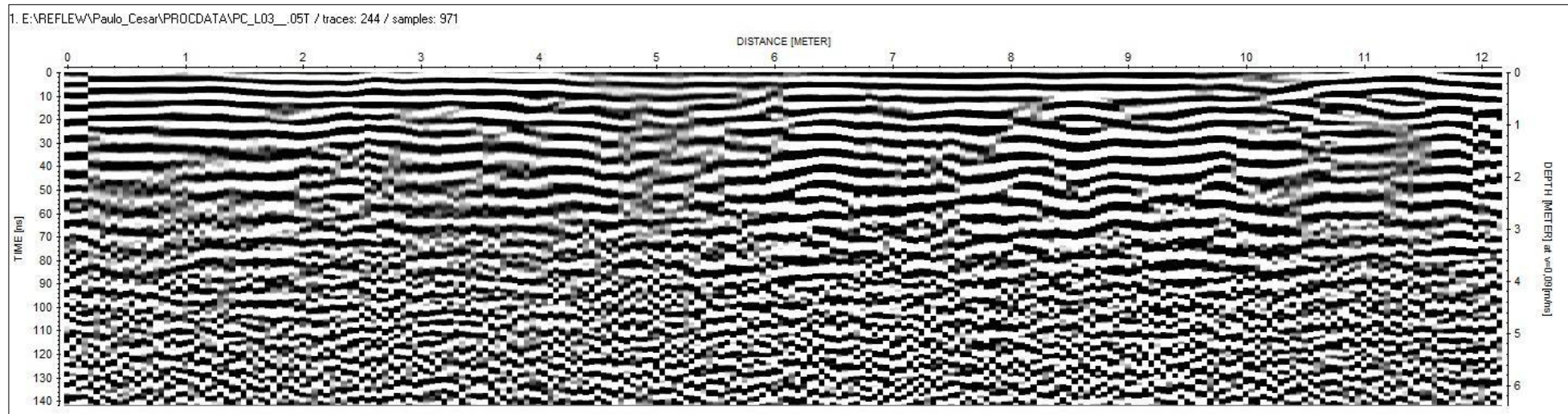


Figura 5.7 - Resultado do Filtro 1D (Bandpassfrequency).

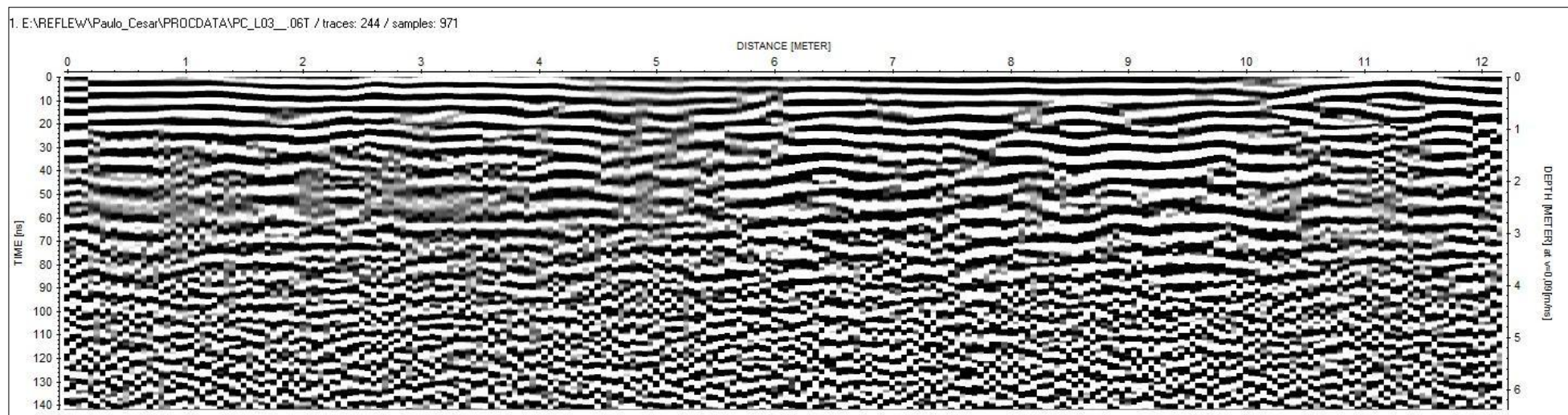


Figura 5.8 - Resultado do Filtro 1D (Deconvolution predictive) na janela inferior.

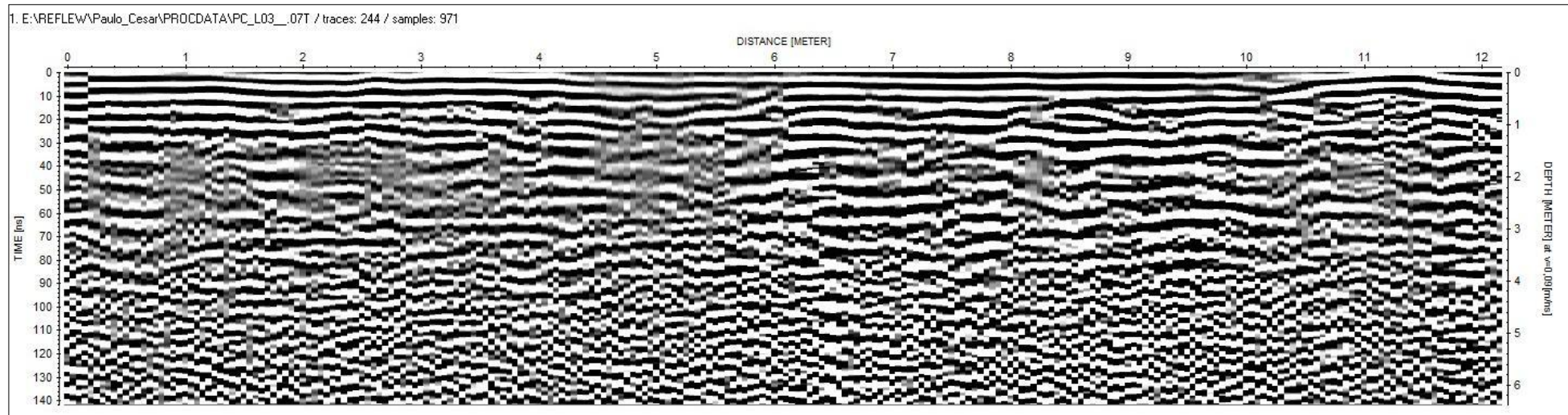


Figura 5.9 - Resultado do Filtro 1D (Deconvolution predictive) na janela superior.

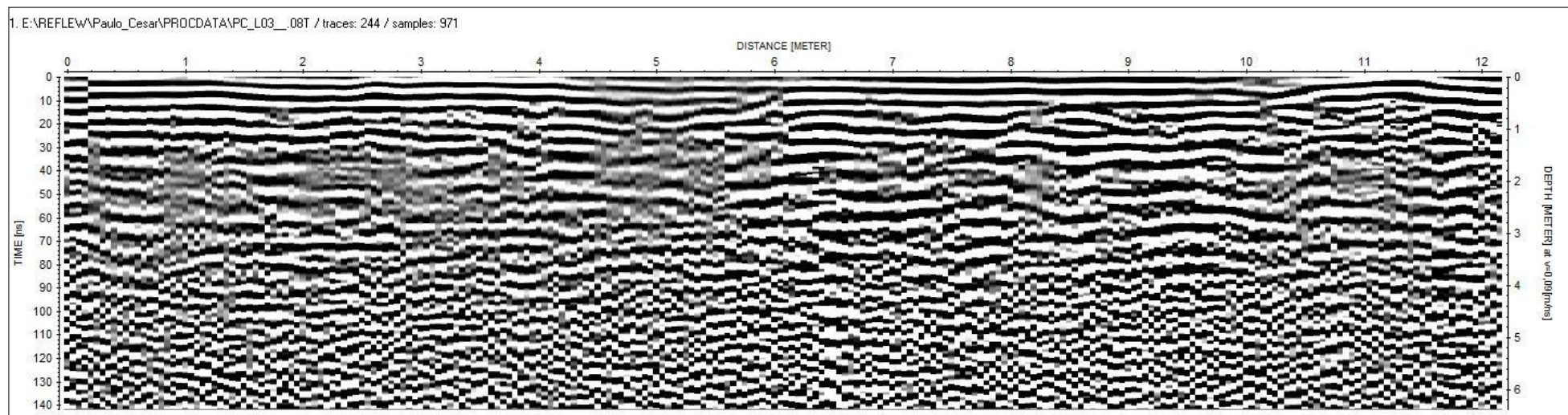


Figura 5.10 - Resultado do Filtro 2D (Background Removal).

6 *Análise e Interpretação dos dados de GPR*

Para a interpretação dos perfis de radar, objetivo final de qualquer levantamento com GPR, é necessário que sejam sempre levados em consideração alguns detalhes. Possuir um modelo geológico inicial, se possível com informações prévias sobre a geologia e as feições estruturais presentes na área do levantamento, pode facilitar o trabalho de interpretação. É importante também identificar algumas possíveis fontes de interferência (redes de alta tensão, postes, construções, antenas de rádio, etc), capazes de inviabilizar ou dificultar a posterior interpretação dos dados. Levando-se em consideração esses fatores, neste trabalho foi possível dispor previamente de algumas informações da área, resultantes da observação do terreno onde foram feitas as aquisições, tais como, pisos de concreto, bolsões de areia, tampas de bueiros (verificou-se o azimute e o material das tubulações em subsuperfície). Não havia uma planta da distribuição tubulações ao longo da área de estudo.

Nas figuras 6.1 e 6.2, correspondentes ao perfil 03 e 04 respectivamente, é possível observar algumas feições hiperbólicas cujos ápices se encontram a aproximadamente 1,40m, 8,60m, 9,80m, 10,20m e 11,70m de distância do início do perfil. Nessa figura também é possível observar um forte refletor horizontal contínuo, situado a aproximadamente 3,80 m de profundidade (80 ns), que pode corresponder a um contato aterro-solo. Esses são os perfis que obtivemos uma melhor resolução, podendo visualizar todas as tubulações pré-mapeadas da área, duas tubulações de água pluvial (PVC e ferro) e uma de esgoto (concreto). Vale ressaltar que no perfil 04, suas feições hiperbólicas deslocadas para a direita do perfil.

1. F:\REFLEW\Paulo_Cesar\PROCDATA\PC_L03__10T / traces: 244 / samples: 971

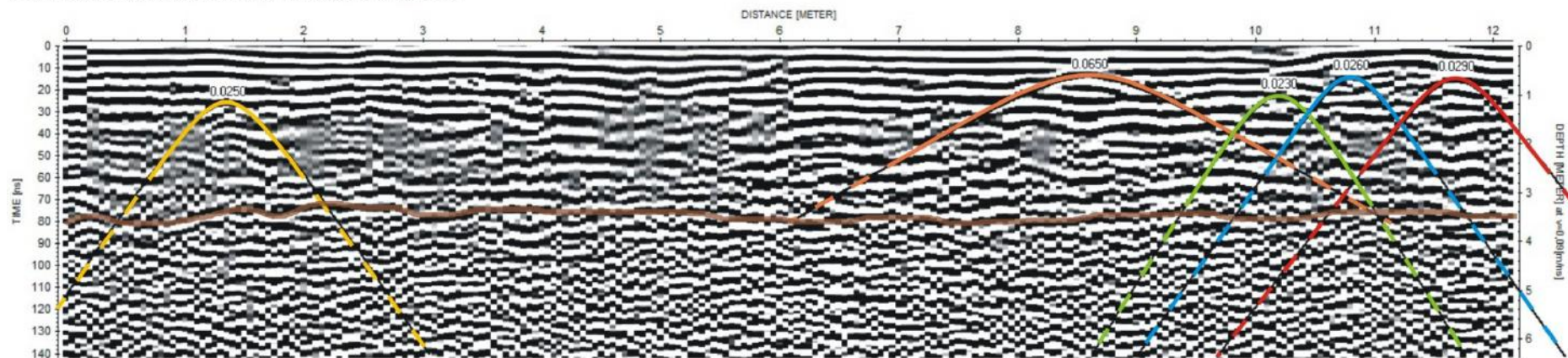


Figura 6.1 - Feições hiperbólicas e contato aterro-solo na interpretação do perfil L03.

1. F:\REFLEW\Paulo_Cesar\PROCDATA\PC_L04__09T / traces: 254 / samples: 989

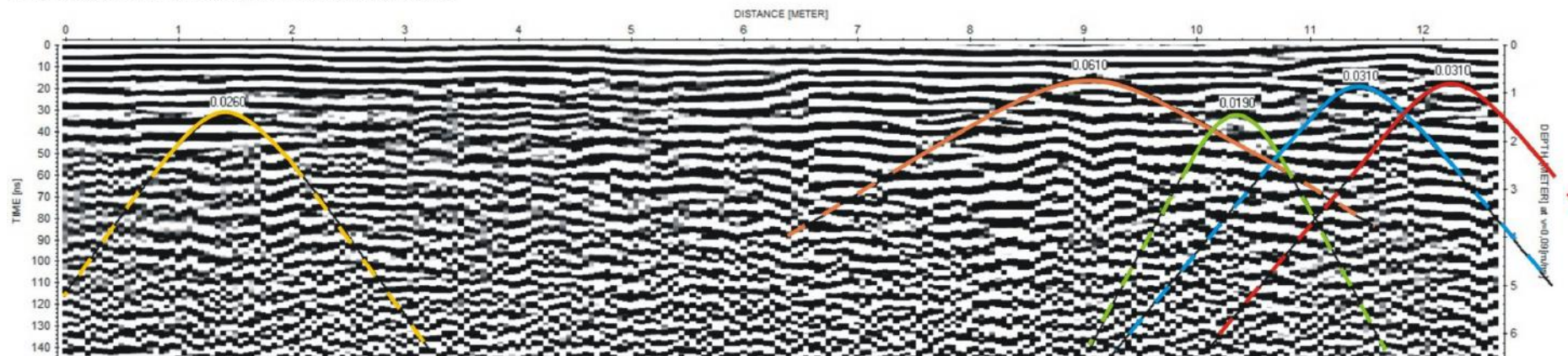


Figura 6.2 - Interpretação do perfil L04, reforçando as marcações no perfil L03.

Podemos identificar nos perfis 07 e 08 (Figs. 6.3 e 6.4), que as feições hiperbólicas referentes às tubulações paralelas ao bloco da Geologia continuam bem marcadas e que apenas sofrem algum deslocamento lateral. Além disso, foi possível observar a presença de uma nova hipérbole nos dois perfis, que têm ápices a 9,60m e 2,40m, a tubulação intercepta os perfis L07 e L08 em diferentes posições, logo concluímos que a mesma está com o azimute maior quando comparado ao dos perfis transversais.

Na figura 6.5, referente ao perfil L12, podemos observar a continuidade das feições hiperbólicas, referente às três tubulações paralelas ao bloco da Geologia, cujos ápices neste perfil estão a aproximadamente 10,10m, 11,40m, 12,40m.

Através dos perfis L16, L17, L18 e L19 (Figs. 6.6, 6.7, 6.8 e 6.9), e das observações realizadas em campo, foi possível verificar um deslocamento lateral de uma das tubulações de água. Nessa mesma tubulação (hipérbole em azul mostrada nos radargramas L16, L17 e L18), foi possível verificar que alguns segmentos são materiais diferentes (PVC e metal), por apresentar velocidades de propagação diferentes (em torno de 0,017 para o metal e 0,031 para o PVC) (Tab. 3.1), isto fica bem visível pela diferença da forma das hipérboles das figuras 6.6 e 6.8. Além disso, verificou-se a presença de outra tubulação, localizada a aproximadamente 5,60m do início do perfil e cerca de 2,00m de profundidade.

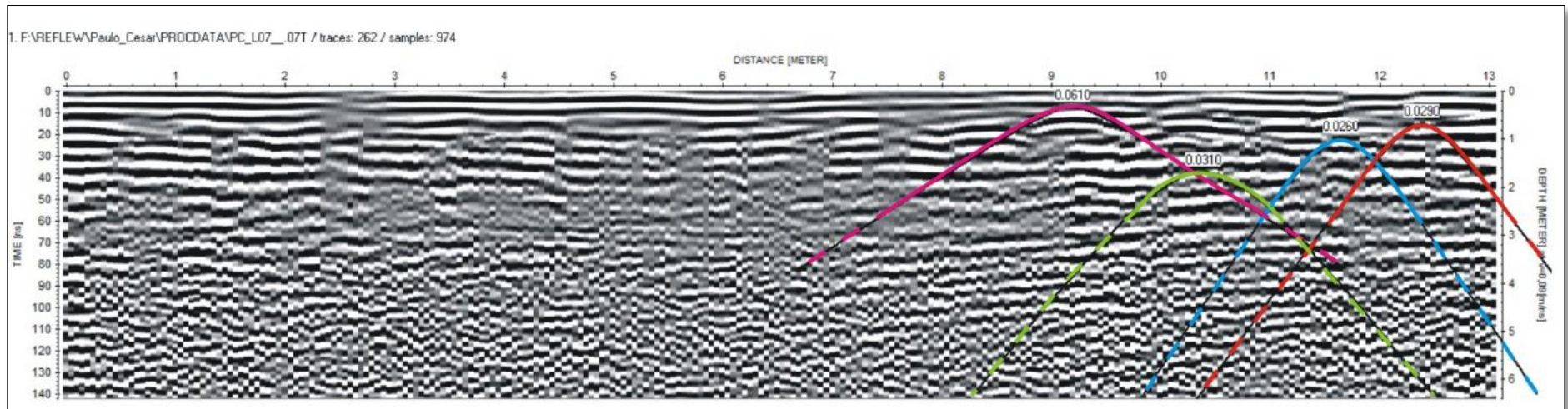


Figura 6.3 - Interpretação do Perfil L07.

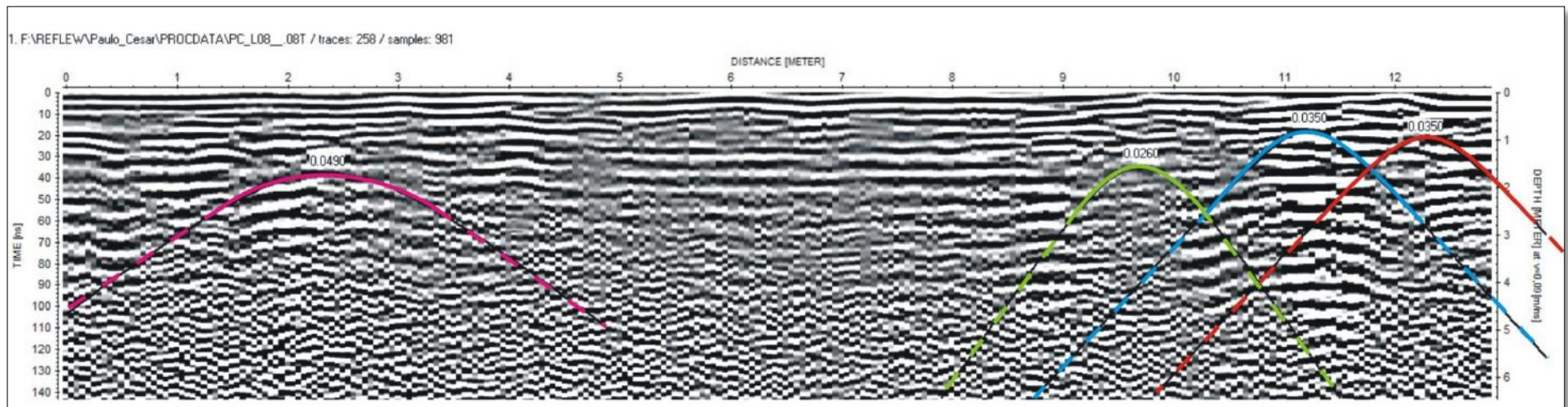


Figura 6.4 - Perfil L08 com o deslocamento aparente da tubulação.

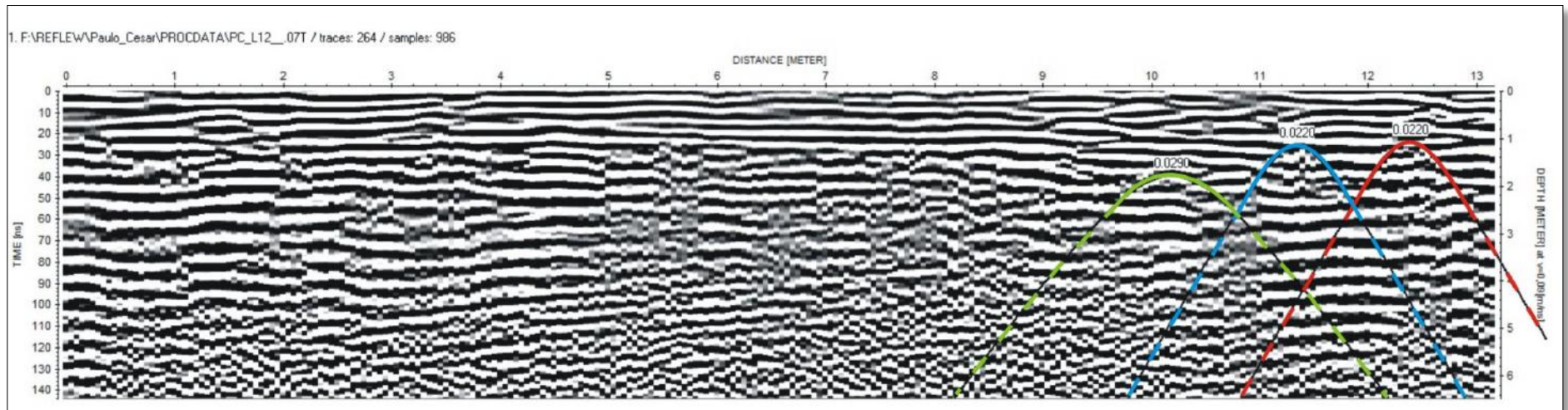


Figura 6.5 - Perfil L12 mostrando a continuidade das tubulações paralelas ao bloco da Geologia.

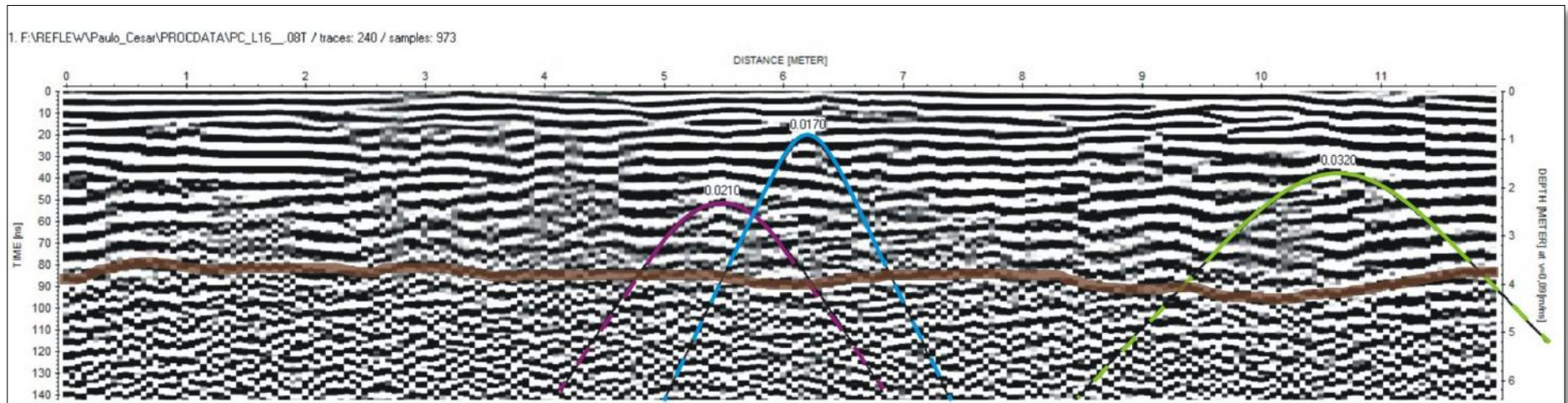


Figura 6.6 - Interpretação do perfil L16, onde foi possível identificar o deslocamento lateral da tubulação (trecho de metal).

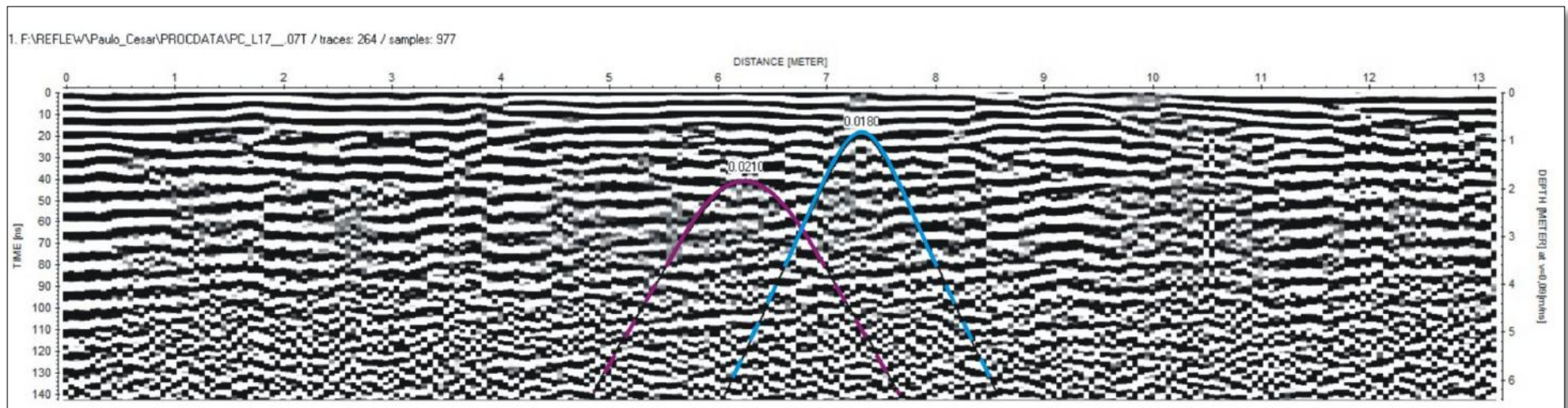


Figura 6.7 - Interpretação do perfil L17.

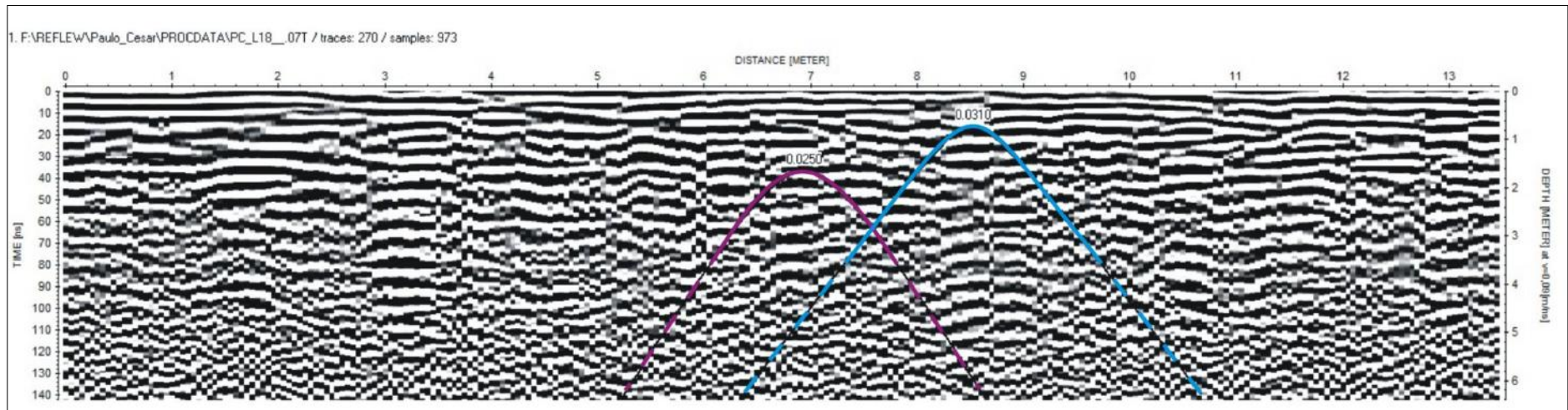


Figura 6.8 - Mudança do tipo de material da tubulação (PVC), caracterizada pela abertura da hipérbole, relacionada à velocidade de propagação.

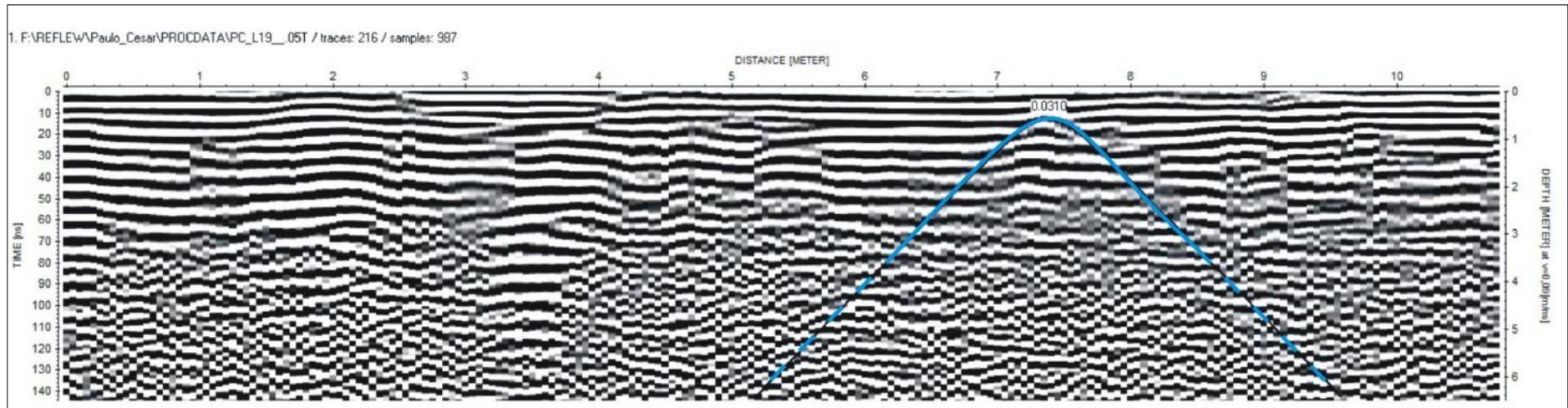


Figura 6.9 - Interpretação do perfil L19, continuidade do tipo de material da tubulação.

Com base nos dados de radar adquiridos através do método GPR 2D e na interpretação de todos os radargramas supra apresentados, foi possível confeccionar um modelo esquemático 3D (Fig. 6.10, 6.11, 6.12 e 6.13) mostrando o posicionamento das tubulações.

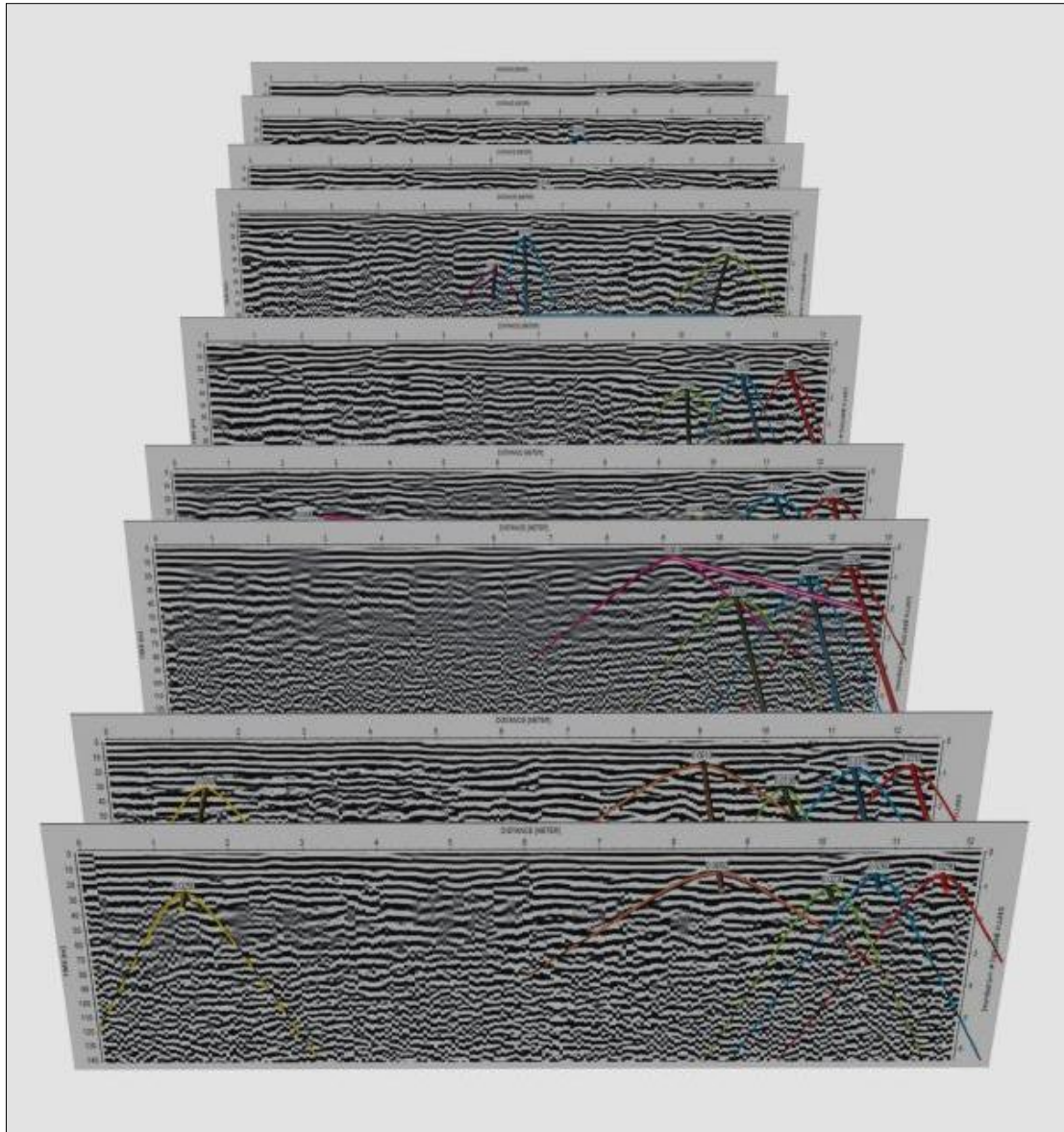


Figura 6.10 - Modelo esquemático 3D com os perfis e as tubulações que foram identificadas.

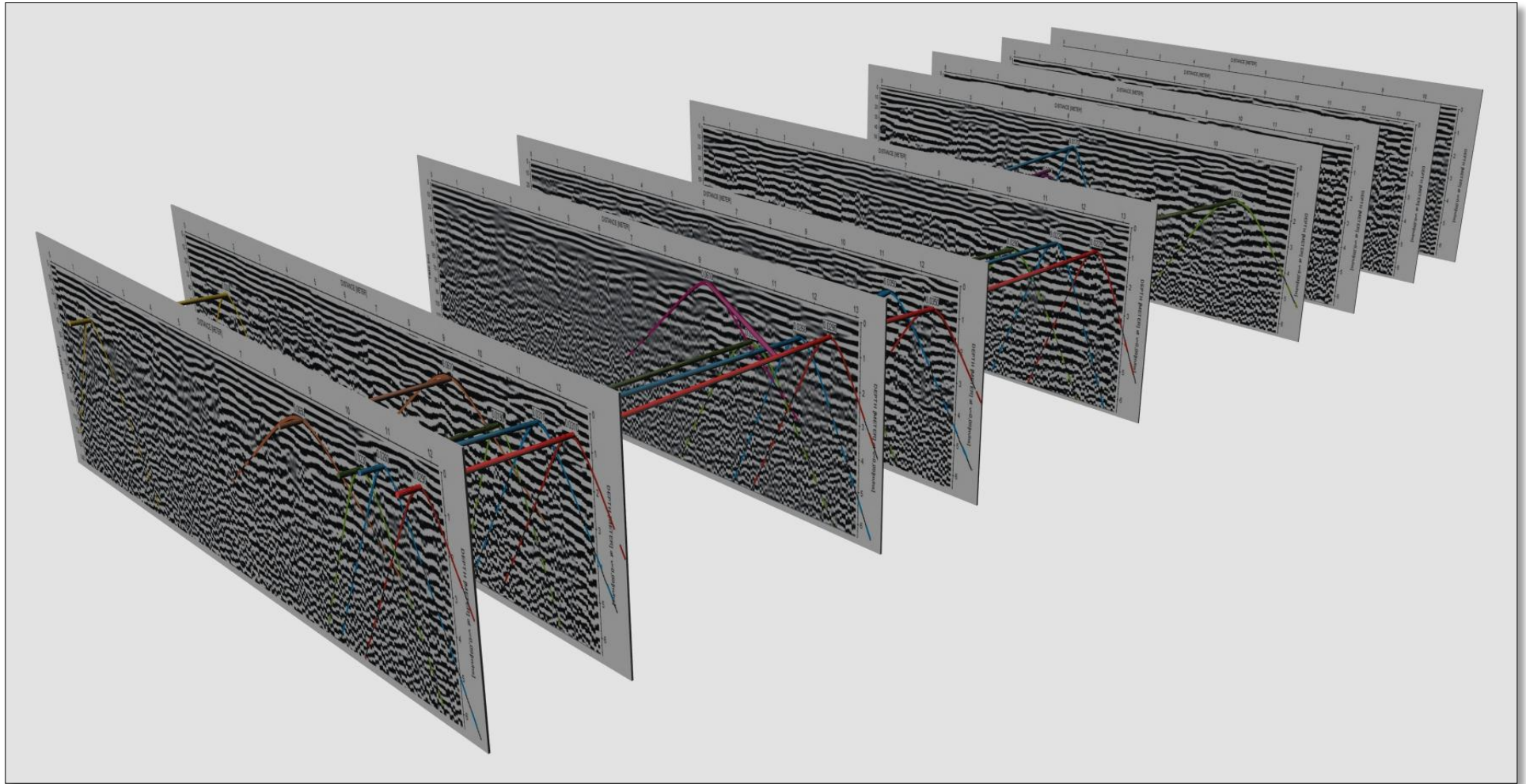


Figura 6.11 - Outro ângulo de visualização do modelo 3D confeccionado a partir das interpretações.

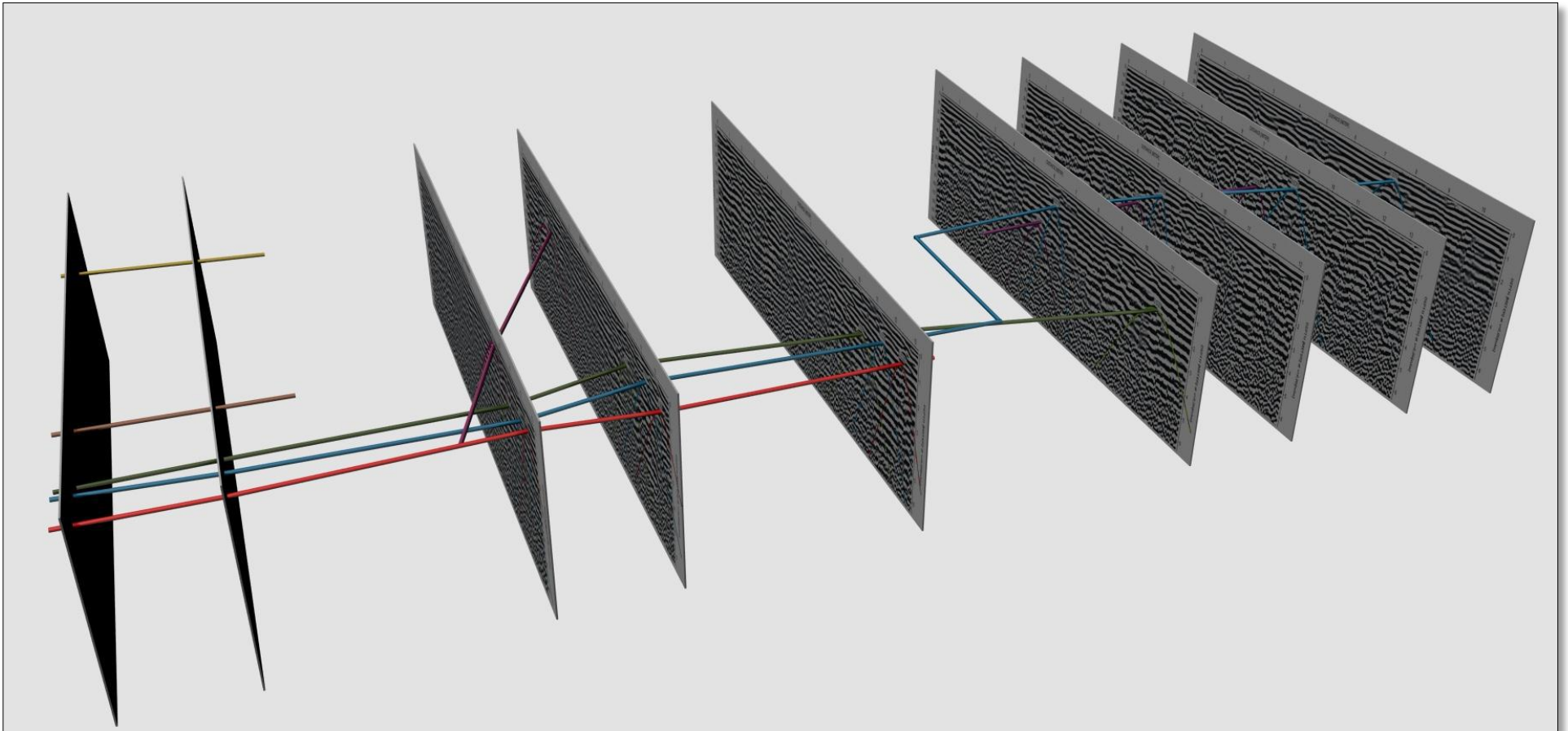


Figura 6.12 - Modelo com foco na visualização das tubulações através dos perfis.

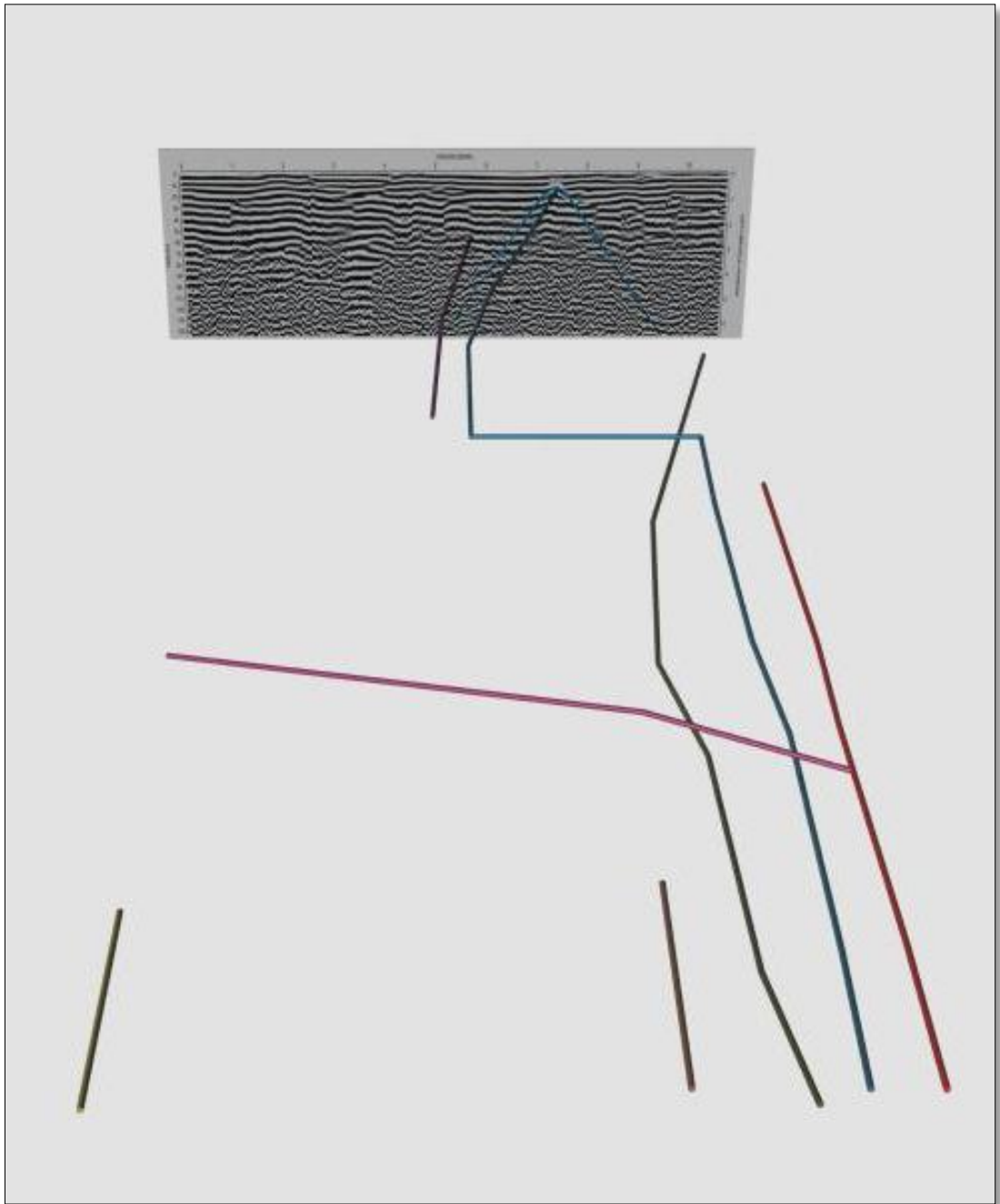


Figura 6.13 - Disposição das tubulações em subsuperfície.

7 Conclusões e Recomendações

A partir das informações apresentadas no capítulo inicial deste trabalho foi possível entender porque o radar vem se tornando atualmente a ferramenta geofísica de maior empregabilidade, sendo solicitada por diversas áreas do conhecimento humano, permitindo a avaliação de grandes áreas em curto período de tempo, chegando a informações precisas a partir da integração com perfis de poços geotécnicos, ganhando produtividade e definição das informações.

Dentre as principais vantagens do método GPR em relação a outros métodos geofísicos é o fato de ser uma técnica geofísica não destrutiva, podendo ser utilizada em áreas de risco e/ou ambientalmente sensíveis. Além disso, os custos de aquisição de dados de radar são relativamente baixos, e o trabalho pode ser executado de maneira prática e rápida.

A partir da análise dos levantamentos de campo efetuados com o Georadar (GPR), pode-se tirar algumas conclusões a respeito dos resultados obtido. Primeiramente, é importante ressaltar que, embora a aquisição de dados do GPR seja bastante simples, o mesmo não se pode dizer de sua interpretação. É necessário que o usuário dessa ferramenta tenha um conhecimento dos princípios físicos e matemáticos do equipamento e, mais que isso, deve estar ciente dos objetivos do levantamento e deve ter conhecimento sobre as propriedades elétricas do alvo e do meio ambiente. A experiência demonstra que quanto maior o conhecimento das propriedades do solo, maiores as probabilidade de sucesso nos resultados do levantamento efetuado com o Georadar. O uso de outras fontes de informações geológicas e geofísicas que complementem os dados adquiridos pelo GPR aumenta a confiabilidade da interpretação dos dados, além de garantir um bom uso desta metodologia.

A análise de todos os radargramas em geral apresentou alguns bons resultados, e com isso pode-se concluir que o GPR é um método eficaz na detecção de contrastes bruscos. Isso é comprovado com os resultados obtidos nos perfis, onde foi possível detectar a existência de tubulações subsuperficiais de PVC e de concreto, representadas nos radargramas pelas hipérbolas, formadas pela difração das ondas EM nestes materiais. Dentre os perfis realizados, aqueles que mais se destacam são L03 e L04. A antena utilizada, de 200 MHz, não se apresentou tão nítida, devido à presença de um forte ruído causado pela reverberação do sinal nas antenas (*ringing*). Esse ruído pode estar relacionado com o tipo de solo (aterro) e/ou com o comprimento de onda utilizado.

Para trabalhos futuros, é aconselhável realizar aquisições utilizando outras frequências, por exemplo, com a antena de 400 MHz, que proporcionará uma maior resolução, a fim de comparar a nitidez das imagens que serão geradas e assim facilitando a identificação do topo dos alvos, já que a identificação torna-se mais precisa com as antenas de altas frequências e as antenas de frequências mais baixas permitem caracterizar os alvos dispostos em maiores profundidades. Também acredito que diminuir o espaçamento entre os traços em cada família CMP melhorará a definição das hipérbolas. Ambas as indicações, fornecerão informações complementares às obtidas por meio da presente pesquisa.

Além disso, os resultados finais deste trabalho podem ser utilizados como demonstração prática do método geofísico GPR, como uma extensão do Museu da Geodiversidade, aumentando assim a área de visitação do museu e divulgando os diferentes ramos existentes dentro da Geologia.

8 Referências Bibliográficas

- ALMEIDA, F.F.M. de. (1976). The system of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 48 (suplemento), p. 15-26. (Proceedings of the International Symposium on Continental Margins of Atlantic Type, October 1975). 1976.
- AMADOR, E. S. (1980) - Unidades sedimentares cenozóicas do recôncavo da Baía de Guanabara. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. Rio de Janeiro, v.52, n.4, p.756-761. 1980.
- AMADOR, E. S. (1982). Taxas de Assoreamento da Baía de Guanabara (Variação por tempo e por área). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 13., 1982. *Anais do XIII Congresso Brasileiro de Geologia*, v. 4, p. 1474-1488. 1982.
- AMADOR, E. S. (1996). Baía de Guanabara e Ecossistemas Periféricos: Homem e Natureza. 1996. 539f. Tese (Doutorado em Geografia). Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1996.
- ANNAN, A. P.; DAVIS, J. L. (1976). Impulse radar sounding in permafrost. *Radio Sci* v. 11, p. 383-394. 1976.
- ANNAN, A. P., COSWAY, S. W., REDMAN, J. D. (1991). Water table detection with ground penetration radar. *International Congress of Society of Exploration Geophysical*, nº 61, pp. 494-496. 1991.
- ANNAN, A. P. (1992). Transmission dispersion and GPR. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. v.0, n.2, 1992. p. 125-136.
- ANNAN, A. P. (2000). Ground penetration radar workshop notes. Sensors & Software, Inc., Internal Report, 130 pp. 2000.
- ARAÚJO, F. F. S. (1997). Uso de GPR e IP-Espectral na avaliação da contaminação industrial numa área do Pólo Petroquímico de Camaçari. 1997. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, Curso de Pós Graduação em Geofísica, Salvador, 1997.

- BENSON, A. K. (1995). Applications of ground penetration radar in assessing some geologia Hazards: examples of groundwater contamination, faults, cavities. *Journal of Applied Geophysics*. Vol. 33, pp. 177-193. 1995.
- BORGES, W. R. (2007). Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicação no planejamento urbano e meio ambiente: estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP. 2007. 260f. Tese (Doutorado em Geofísica) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- CAMPBELL, K.J.; ORANGE, A. S. (1974). A Continuous profile of sea ice and freshwater ice thickness by impulse radar. *Polar Record* 17, p. 30-42. 1974.
- DANIELS, D. J. (2004). *Ground Penetration Radar*. 2ª ed. The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 300p. 2004.
- DAVIS, J. L. and ANNAN, A. P. (1989). Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting* 37, 531-551. 1989
- DOURADO, Tiago C. (2004). Aplicação de Técnicas Clássicas do Processamento Sísmico de Reflexão em Dados de Radar (GPR) para Detecção de Hidrocarbonetos em Sedimentos Arenosos. 2004. 132f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, Curso de Pós Graduação em Geofísica, Salvador, 2004.
- DUARTE, O. O. (1997). *Dicionário enciclopédico inglês-português de geofísica e geologia*. São Paulo: SBGf, 1997. 352 p.
- FAIRBRIDGE, R.W. (1962). World sea-levels and climatic changes. *Quaternaria*, 6:111-134.
- FERRARI, A. L. (1990). A geologia do "Rift" da Guanabara (RJ) na sua porção Centro-Occidental e sua relação com o embasamento Pré-Cambriano. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36, Natal, 1990. *Anais do Congresso Brasileiro de Geologia, 1990, v.6, p. 2858 - 2872*. 1990.
- FURTADO, V. V.; BONETTI FILHO, J.; CONTI, L. A. (1996). Paleo river valley morphology and sea level changes on the southeastern Brazilian Continental Shelf. *Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 68 (suplemento 1), p. 163-169*. Rio de Janeiro. 1996.
- GEOBANK - CPRM, Banco de dados de Geoinformações - Serviço Geológico do Brasil, Folha SF.23-Z-B-IV - Baía de Guanabara - escala 1:100.000 - parceria com universidades (UERJ). Disponível em: <<http://geobank.sa.cprm.gov.br>>. Acesso em: 07 jul. 2012, 20:30:00.

- HARRISSON, C. (1970). Reconstruction of subglacial relief from radio echo sounding records, *Geophysics*, v. 35, p. 1109-1115. 1970.
- HELMBOLD, R.; VALENÇA, J.G.; LEONARDOS JUNIOR, O. H. (1965). Mapa geológico do Estado da Guanabara: folhas Baía da Guanabara - Ilha Rasa, Vila Militar - Pontal de Sernambetiba, Santa Cruz - Restinga de Marambaia. Rio de Janeiro: DGM: DNPM, 1965. mapas color. Escala 1: 50.000. 1965.
- KELLER, G. V. (1987). Rock and mineral properties. *Investigations in Geophysics, n3. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*. Society of Exploration Geophysicists, Ed. Misac N. Nabighian, v.1, p.13-51, 1987.
- KNIGHT, R. (2001). Ground penetrating radar for environmental applications. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 29, p. 22-255. 2001.
- NETO, P. X.; MEDEIROS, W. E. (2003). Uma abordagem prática para corrigir os efeitos de propagação no sinal do GPR, e sua importância na melhoria da qualidade do imageamento. In: Eighth International Congress of The Brazilian Geophysical Society. SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica. Rio de Janeiro. 2003.
- OLHOEFT, G. R. (1981). "Electrical Properties of Rocks", In: *Physical Properties of Rocks and Minerals*, in Touloukian, Y. S.; Judd, W. R. and Roy, R. F., eds.: New York, McGraw-Hill, pp. 257-330. 1981.
- OLHOEFT, G. R. (1984). Application and limitations of ground penetrating radar. *Annual International Meeting and Exploration os Society of Exploration Geophysicists, Atlanta*, nº 54, pp. 147-148. 1984.
- OLHOEFT, G. R. (1996). Application of ground penetrating radar. *International Conference on Ground Penetrating Radar. 6ª. Sendai, Japan*, pp. 1-3. 1996.
- PINTO, G. P. (2010). O Método GPR aplicado a localização de tubulações utilizadas no abastecimento de água na região urbana do município de Belém-Pará. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.
- PORSANI, J. L. (1999). Ground Penetration Radar (GPR): Proposta Metodológica de Emprego em Estudos Geológico-geotécnico nas Regiões de Rio Claro e Descalvado - SP. Tese de

- Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro - SP. 145p. 1999.
- PORSANI, J. L. (2001). Método GPR: Aplicações em geologia, geotecnia, meio ambiente e planejamento urbano. III Escola de Verão de Geofísica, Versão 2.0, IAG/USP, 30p. 2001.
- PORSANI, J. L. (2002). Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no planejamento urbano, meio ambiente e arqueologia: estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP. Projeto de Pesquisa. Processo FAPESP Nº 02/07509-1, São Paulo - SP. 2002.
- PORSANI, J. L. (2008). Método GPR: Aplicações em geologia, geotecnia, meio ambiente e arqueologia. Apostila. Belém, PA. 2008.
- REYNOLDS, J. M. (1997). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. 1ª ed. Chichester, England: John Wiley & Sons. 795p. 1997.
- RODRIGUES, S. I. (2004). Caracterização GPR de Tambores Metálicos e Plásticos: Estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil. 2004.
- RUELLAN, F. (1944). A evolução geomorfológica da baía da Guanabara e das regiões vizinhas. Revista Brasileira de Geografia, ano VI, n. 4, p. 445-508. 1944.
- SANDMEIER KJ. (2006). REFLEXW Version 4.2 for Windows 9x/2000/ NT/XP. Program for the processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction and transmission data. Manual do Software, 192 pp. 2006.
- SANTOS, R. D. dos *et al.* (2000). Projeto Parque Frei Veloso: levantamento detalhado dos solos campus da Ilha do Fundão - UFRJ. 2000. Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa, n. 19, p. 69. Embrapa Solos, Rio de Janeiro, 2000.
- SIBI - UFRJ, Sistema de Bibliotecas e Informações da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.sibi.ufrj.br/Projeto/exposicao_memoria.html>. Acesso em: 31 jun. 2012, 15:25:00.
- SUGUIO, K. & MARTIN, L. (1975). Brazilian coastline quaternary formations: The States of Sao Paulo and Bahia litoral zone evolutive schemes. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 48(suplemento), p.325-334. Rio de Janeiro. 1975.

- TILLARD, T. & DUBOIS, J.C., (1992). Influence and lithology on radar echoes: analysis with respect to electromagnetic parameters and rock anisotropy, Fourth International Conference on Ground Penetrating Radar June 8-13, 1992, Rovaniemi, Finland. Geological Survey of Finland, Special Paper 16 365 pages. 1992.
- TOPP, G. C., DAVIS, J. L. e ANNAN, A. P. (1980). Eletromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines: Water Resources Research, 16, 574-582. 1980.
- ULRIKSEN, C. P. F. (1982). Application of Impulse Radar to Civil Engineering. Doctoral Thesis Lund University of Technology. 179p. 1982.
- ZALÁN, P. V.; OLIVEIRA, J. A. B. (2005). Origem e evolução estrutural do Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste do Brasil. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 13, n. 2, p. 269-300, maio/nov. 2005.