



**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E
CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA**



Dissertação de Mestrado

Mapeamento GPR 2D/3D de interferências enterradas no SCGR-II do IAG: Aplicações no planejamento urbano

Bruno Poluha

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo para a obtenção do Título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Geofísica

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Porsani

“Versão Corrigida. O original encontra-se disponível na Unidade.”

São Paulo

2017

*“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos
não é senão uma gota de água no mar.
Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”*

Madre Teresa de Calcutá

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado saúde, determinação e força de vontade para ter chegado até aqui.

Agradeço ao meu orientador Dr. Jorge L. Porsani pela oportunidade, confiança e paciência durante todos esses anos que trabalhamos juntos.

Agradeço a minha noiva Camila Rabelo por ter apoiado meu trabalho e entender as inúmeras horas que estive na frente do meu computador para escrever esta dissertação. Dedico esse trabalho a você meu amor.

Agradeço aos meus amigos e companheiros de pesquisa que fizeram parte desta trajetória, são eles: Vitor Cavenaghi, Emerson, Vinicius, Cassiano, Rodrigo Rangel, Luiz Hamada, Marcão, Aruã, Janine.

Aos amigos Marcelo Stangari, Ernande Costa e Scott Allen, pela amizade e apoio nas atividades de campo.

Agradeço a todos os professores do Departamento de Geofísica, por todo ensinamento, paciência e dedicação aos alunos.

Agradeço as secretárias do Departamento de Geofísica e aos funcionários da secretária de pós – graduação do IAG.

Agradeço ao CNPq pela bolsa concedida para a realização deste trabalho.

Sumário

Índice de figuras	i
Índice de tabelas	iv
Resumo	v
Abstract	vi
Capítulo 1	
Introdução e objetivos	1
1.1. Organização da dissertação	4
Capítulo 2	
Estudos geofísicos em ambientes controlados	6
2.1. Levantamento bibliográfico	6
2.2. O Sítio Controlado de Geofísica Rasa - II	8
2.3. A construção do SCGR – II	12
2.4. Aspectos litológicos da área de estudos	17
Capítulo 3	
Fundamentos teóricos do método GPR	18
3.1. Histórico	18
3.2. Aspectos teóricos	19
3.2.1. Propagação de ondas eletromagnéticas	19
3.2.2. Velocidade de propagação e coeficiente de atenuação	21
3.2.3. Coeficiente de reflexão	23
3.2.4. Técnicas de aquisição de dados GPR	25
3.3. Modelagem Numérica	26
3.3.1. Revisão bibliográfica	26
3.3.2. Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo	28

Capítulo 4

Aquisição e processamento de dados	32
4.1. Equipamentos e softwares	32
4.2. Aquisição dos dados	33
4.3. Processamento dos dados	35

Capítulo 5

Discussão dos resultados	38
5.1. Resultados reais	38
5.2. Resultados sintéticos	48

Capítulo 6

Conclusões e recomendações	62
6.1. Resultados reais	62
6.2. Resultados sintéticos	63
Referências bibliográficas	65

Índice de figuras

Figura 2.1. Localização dos sítios controlados SCGR – I e SCGR – II. L1, L2 e L3 são as linhas de referência onde os alvos estão enterrados. Instituto de Astronomia Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG); Instituto de Física (IF); Instituto de Oceanografia (IO); Instituto de Matemática e Estatística (IME). (Adaptado de Google Maps, 2017).....	9
Figura 2.2. Croqui com a localização das 3 linhas de estudos no SCGR-II do IAG/USP (Porsani, 2015).....	9
Figura 2.3. Croqui da Linha 1 do SCGR-II do IAG/USP (Porsani, 2015).....	10
Figura 2.4. Croqui da Linha 2 do SCGR-II do IAG/USP (Porsani, 2015).....	11
Figura 2.5. Croqui da Linha 3 do SCGR-II do IAG/USP (Porsani, 2015).....	12
Figura 2.6. Registro fotográfico do background geológico do SCGR-II utilizando o equipamento GPR SIR-4000 com a antena blindada de 270 MHz.....	13
Figura 2.7. Mapa do contorno dos buracos e valar que foram abertas para o posicionamento dos alvos em subsuperfície.....	14
Figura 2.8. Principais etapas da construção do SCGR – II. Demarcação das valas, abertura dos buracos, colocação dos alvos, medida da profundidade dos alvos e recuperação da paisagem....	15
Figura 2.9. Alvos posicionados ao longo da Linha 1 do SCGR – II. (a) Tambores metálicos. (b) Tambores de PVC preenchidos com diferentes fluidos. (c) Manilhas de concreto horizontais. (d) Manilha de concreto vertical.....	15
Figura 2.10. Alvos posicionados ao longo da Linha 2 do SCGR – II. (a) Vasos de cerâmica. (b) Muro circular de tijolos. (c) Caixa com areia e um tubo de PVC com entrada para água (alvo dinâmico). (d) Tubos de PEAD vazios.....	16
Figura 2.11. Alvos posicionados ao longo da Linha 3 do SCGR – II. (a) Manilha de cerâmica. (b) Tubo de polietileno. (c) Tubos de PVC. (d) Tubos metálicos, PVC e de polietileno.....	16
Figura 2.12. Horizontes litológicos identificados no SCGR-II do IAG/USP. Horizonte A corresponde a camada de húmus. Horizonte B corresponde à camada de aterro argilo – arenoso.....	17
Figura 3.1. Croqui para aquisição de um traço GPR. O traço GPR (b) contem as amplitudes de reflexões das interfaces ilustradas em (a) em função do tempo. As diferentes interfaces são definidas pelos contrastes das propriedades elétricas e magnética ϵ , σ e μ	19
Figura 3.2. Esquema da aquisição de um perfil de reflexão com afastamento constante. Tx e Rx são as antenas transmissora e receptora, respectivamente, rebocadas por um operador com offset constante (d).....	25
Figura 4.1. Sistema de aquisição de dados GPR SIR – 4000 (GSSI).....	32
Figura 4.2. Aquisição GPR com antenas de 200 MHz (a), 270 MHz (b), 400 MHz (c), 900 MHz (d) e 300 – 800 MHz (Dual frequency) (e).....	34
Figura 4.3. Modo 3D de aquisição de dados. Os perfis são espaçados de 0,2 m entre si indo da posição de 6 m até 10 m.....	34
Figura 4.4. Rotina de processamento de dados GPR.....	35
Figura 5.1. Resultados GPR sobre os alvos instalados em 0,5 m de profundidade para o trecho entre 0 e 17 m da Linha 3 do SCGR-II do IAG/USP, adquiridos com espaçamento de 1 traço a	

cada 2 cm. a) croqui com a disposição dos alvos. b) 200 MHz. c) 270 MHz. d) 400 MHz. e) 800 MHz.....	39
Figura 5.2. Resultados GPR sobre os alvos instalados em 0,5 m de profundidade para o trecho entre 0 e 16 m da Linha 3 do SCGR - II do IAG/USP, com espaçamento entre os traços de 1 traço / 1 cm. a) croqui com a disposição dos alvos. b) 200 MHz. c) 400 MHz. d) 900 MHz.....	41
Figura 5.3. Resultados GPR sobre os alvos instalados em 1,0 m de profundidade para o trecho entre 16 e 37 m da Linha 3 do SCGR-II do IAG/USP, com espaçamento entre os traços de 1 traço/ 2 cm. a) croqui com a disposição dos alvos. b) 200 MHz. c) 270 MHz. d) 400 MHz. e) 800 MHz.....	43
Figura 5.4. Resultados GPR sobre os alvos instalados em 1,5 m de profundidade para o trecho entre 37 e 50 m da Linha 3 do SCGR-II do IAG/USP, com espaçamento entre os traços de 1 traço/ 2 cm. a) croqui com a disposição dos alvos. b) 200 MHz. c) 270 MHz. d) 400 MHz. e) 800 MHz.....	44
Figura 5.5. Resultados GPR sob a forma pseudo - 3D para frequência de 200 MHz. Cano metálico guia (a) sob a perspectiva do diagrama de cercas (b) e do corte em profundidade em 0,47 m (depth slice) (c).....	46
Figura 5.6. Resultados GPR para frequência de 200 MHz sob a perspectiva Depth Slices. (a) profundidade de 0,6 m; (b) profundidade de 1,09 m; (c) profundidade de 1,49 m.....	47
Figura 5.7. Resultados GPR e simulações numéricas sobre os alvos instalados em 0,5 m de profundidade para o trecho entre 0 e 17 m da Linha 3 do SCGR-II do IAG/USP com espaçamento entre os traços de 1 traço/1 cm. a) croqui com a disposição dos alvos. b) Perfil GPR real de 270 MHz. c) Perfil GPR sintético de 270 MHz.....	48
Figura 5.8. Resultado sintético GPR de 400 MHz para um tubo de polietileno de 2 cm de diâmetro vazio para diferentes espaçamentos entre os traços. a) croqui com a disposição do alvo. b) 1 traço/5cm. c) 1 traço/1cm. d) 1 traço/0,5cm. e) 1 traço/0,1cm.....	50
Figura 5.9. Resultados sintéticos GPR para diferentes frequências referente ao modelo de tubo de polietileno localizado em profundidade de 0,5 m com 1 traço/ 1cm. a) Croqui com a disposição do alvo. b) 100 MHz. c) 200 MHz. d) 400 MHz. e) 900 MHz.....	51
Figura 5.10. Resultados sintéticos GPR referentes às simulações numéricas de um tubo de polietileno disposto em diferentes background, para frequência de 400 MHz e espaçamento de 1 traço/ 1 cm. (a) Tubo hospedado em solo argilo - arenoso. (b) Tubo hospedado em solo arenoso. (c) Tubo hospedado em concreto.....	52
Figura 5.11. Resultados GPR de 400 MHz referentes às simulações numéricas de tubos de polietileno com diferentes tamanhos hospedados em um solo argilo – arenoso, para o espaçamento de 1 traço/ 1 cm. a) Tubo com 2 cm de diâmetro. b) Tubo com 4 cm de diâmetro. c) Tubo com 8 cm de diâmetro.....	53
Figura 5.12. Resultado GPR sintético de 400 MHz com espaçamento de 1 traço/ 1 cm sobre tubos de polietileno de 2 cm de diâmetro dispostos em solo argilo – arenoso em profundidades de 0,2 m, 0,5 m e 1,0 m.....	54
Figura 5.13. Resultados GPR sintéticos de 400 MHz com espaçamento de 1 traço / 1 cm para tubos constituídos de diferentes materiais e mesmo diâmetro, localizados em profundidades de 0,5 m. a) Tubo de polietileno. b) tubo de PVC. c) Tubo de ferro.....	55
Figura 5.14. Comparação entre radargrama real e sintético para frequência de 200 MHz para o trecho entre 16 e 37 m, com espaçamento entre os traços de 1 traço/ 1 cm. A seta vermelha indica o topo do alvo e a seta amarela a base.....	56
Figura 5.15. Radargrama sintético referente ao tubo de PVC preenchido por água e localizado	58

em profundidade de 0,5 m dentro de um background argilo – arenoso (a) e o respectivo traço central (b).....

Figura 5.16. Radargrama real e sintético para frequência de 270 MHz para o trecho entre 37 e 50 m com espaçamento entre os traços de 1 traço/ 1 cm. a) Croqui com a disposição dos alvos. b) Radargrama real. c) Radargrama sintético. As setas vermelhas e amarelas indicam o topo e a base, respectivamente, referente aos tubos de PVC das posições de 39 e 47 m.....

59

Figura 5.17. Resultados GPR reais e sintéticos para 270 MHz sobre os três trechos da Linha 3 onde estão localizados os tubos de PVC preenchidos parcialmente com água de diâmetros de 15 e 20 cm. Radargramas reais (a1), (b1) e (c1) e radargramas sintéticos (a2), (b2) e (c2) para os alvos localizados nas posições de 14 e 15 m, 34 e 35 m, 47 e 48 m, respectivamente. As setas vermelhas são as indicações dos topos e as amarelas das bases dos alvos.....

60

Índice de tabelas

Tabela 3.1. Propriedades elétricas de alguns materiais. (Annan, 2003; Porsani, 1999; Daniels, 2006; Borges, 2007).....	24
Tabela 3.2. Coeficientes de reflexão para alguns objetos enterrados em um tipo de solo argiloso seco.....	24
Tabela 3.3. Propriedades elétricas e magnética utilizadas para a construção dos modelos numéricos. (Adaptado de SVORČÍK et. al, 2000; Daniels, 2004; Rodrigues, 2004; Borges, 2007; Yang et. al, 2014).....	30
Tabela 3.4. Geometria dos alvos enterrados ao longo da Linha 3 do SCGR – II e as respectivas profundidades.....	30
Tabela 4.1. Velocidade da onda eletromagnética obtida para alvos metálicos da Linha 3.....	37

Resumo

Nesta pesquisa implantou-se um laboratório de testes geofísicos, denominado **Sítio Controlado de Geofísica Rasa II (SCGR – II)** no campus da USP em São Paulo. Neste local, foram enterrados diferentes alvos, com objetivo de simular as principais interferências encontradas nos contextos de planejamento urbano, arqueologia e meio ambiente. Os alvos são tubulações, manilhas, cabos, tambores, artefatos arqueológicos, entre outros, e estão enterrados ao longo de 3 linhas de estudos, situados em posições e profundidades diferentes. O objetivo deste estudo é caracterizar os alvos enterrados ao longo da linha 3 do SCGR – II por meio do método geofísico GPR (**G**round **P**enetrating **R**adar). O solo do SCGR – II é predominantemente argilo – arenoso com condutividade elétrica elevada, sendo, portanto, um ambiente desafiador para o método GPR. A aquisição dos dados foi feita nos modos 2D e pseudo - 3D utilizando as frequências de 200, 270, 400 e 800 MHz. Para comparar com os resultados GPR, elaboraram-se modelos numéricos com o método FDTD. Esses modelos reproduzem os alvos instalados ao longo da linha 3 e tem como produto final radargramas sintéticos. A comparação entre os resultados reais e sintéticos permite uma melhor compreensão dos padrões de reflexões referentes aos alvos estudados, aumentando desta forma a confiabilidade na interpretação dos resultados e diminuindo as eventuais ambiguidades. Os resultados 2D mostraram que o GPR é capaz de mapear os alvos estudados em profundidades de 0,5, 1,0 e 1,5 m, apresentando diferentes padrões de reflexão, que dependem da profundidade, tamanho, tipo de material que compõe o alvo e tipo de fluido que os preenche. A análise 3D permitiu verificar a orientação dos alvos em relação à área de estudo, além de permitir estimar o tamanho das interferências. Os resultados obtidos servem de aprendizado e podem ser extrapolados para fora do contexto controlado, i.e, dentro do ambiente urbano, auxiliando na interpretação dos resultados e minimizando as possíveis ambiguidades.

Palavras chave: Ground Penetrating Radar, GPR, Sítio Controlado de Geofísica Rasa – II, SCGR – II, Tubos, Polietileno, PVC, Ferro, Cerâmica, Planejamento urbano.

Abstract

This research project implemented a geophysical test laboratory called the Sítio Controlado de Geofísica Rasa – II (SCGR – II; Shallow Geophysics Control Site) on the campus of the Universidade de São Paulo (USP) in São Paulo – Brazil. Several objects were buried along 3 investigative transects, located at different positions and depths to simulate typical targets found in the contexts of urban planning, archaeology and environment, such as pipes, shackles, cables, drums, archaeological artefacts, among others. The objective of this study is to characterize the targets buried along line 3 of SCGR - II by mean of the geophysical method GPR (**G**round **P**enetrating **R**adar). The soil of the SCGR - II is predominantly sandy clay with high electrical conductivity, being, therefore, a challenging environment for the GPR method. Data acquisition was obtained in 2D and pseudo - 3D modes using frequencies of 200, 270, 400 and 800 MHz. Numerical models were elaborated using the FDTD method for comparison with the in-field GPR data and analyses. These models reproduce the targets installed along line 3 in a computational environment and provides synthetic GPR results as a final product. The comparison between real and synthetic results allows a better understanding of reflections patterns related to the studied targets, thus increasing the reliability of interpretation of the results and reducing ambiguities. The 2D results showed that the GPR could map the targets at depths of 0,5, 1,0 and 1,5 m, showing different patterns of reflection, which depend on depth, size and type of material that composes the target and type of fluid contained within them. The 3D analysis allowed the determination of the targets' orientation in relation to the study area, as well as estimation of the target size. The results obtained serve instructive purposes and can be extrapolated out of the controlled context, i.e, within an urban environment, aiding in the interpretation of the results and minimizing the ambiguity.

Key words: Ground Penetrating Radar, GPR, SCGR – II, IAG test site – II, Polyethylene pipes, Iron pipes, Urban Planning.

Capítulo 1

Introdução e objetivos

O intenso fluxo migratório da população rural para as cidades a partir da segunda metade do século XX culminou no crescimento acentuado e desordenado das grandes cidades. Com um maior número de pessoas habitando os centros urbanos, houve a apropriação desenfreada do subsolo por parte de serviços essenciais, como a instalação de redes de gás, água, telefonia, energia elétrica e esgoto, com o mínimo de planejamento urbano e controle geográfico dessas redes (Campos et al., 2006).

Segundo Ferraz (2011), estima-se que haja cerca de 115 mil km de tubulações e cabos enterrados no subsolo da capital paulista, divididas entre as concessionárias, tais como, Companhia de Gás de São Paulo (Comgas), SABESP, AES ELETROPAULO, Telefônica Vivo dentre outras, responsáveis pelas redes subterrâneas na cidade de São Paulo. Essas concessionárias são encarregadas em gerenciar as redes enterradas no subsolo, instalando novas redes, removendo ou reparando as redes pré - existentes. Essas intervenções são feitas de forma direta por meio de retroscavadeiras e ferramentas como enxadas, picaretas, e dentre outras, que podem romper acidentalmente as próprias redes enterradas ou as redes de outras concessionárias, uma vez que nem sempre se tem informações a respeito das posições verdadeiras das interferências, i.e., tubulações no subsolo, aumentando desta forma, o risco de acidentes. Esses acontecimentos geram maiores custos para as concessionárias durante as obras de instalação de novas interferências ou reparo das já existentes, podendo ser potenciais riscos à vida das pessoas.

Em 2007, na cidade de Colombo, localizada na região metropolitana de Curitiba (PR). O acidente aconteceu, quando uma retroscavadeira danificou a rede de abastecimento de água, comprometendo o fornecimento de água para cerca de 65 mil pessoas (Gazeta do Povo, 2007).

Em 2011, uma retroscavadeira atingiu acidentalmente uma rede de Gás da CEG (Gas Natural Fenosa) no estado do Rio de Janeiro, causando um vazamento de gás, onde os técnicos responsáveis pela obra foram obrigados a isolar a área em torno para conter o problema (O globo, 2011).

Em 2012, um operador de retroescavadeira da empresa de abastecimento de água de São Paulo (SABESP) perfurou uma rede de gás da concessionária (COMGAS), gerando risco de explosão, cheiro forte de gás pelas ruas, onde foi interrompido o abastecimento de gás local até que fosse feito o reparo (G1, 2012).

Em 2014, a Companhia de Gás do Amazonas (Cigás) foi responsável pela ruptura da rede de água de Manaus (AM), gerando a interrupção do abastecimento de água para cinco áreas do bairro Distrito Industrial (Neto, 2014).

Estes acidentes mostram que a falta de informação a respeito das interferências enterradas no subsolo é o maior problema que as concessionárias e outras empresas do ramo enfrentam ao fazer as intervenções no subsolo para instalação de novas interferências ou reparo das já existentes.

Neste contexto, os métodos geofísicos podem ser empregados para fornecer informações da subsuperfície de forma indireta, não-invasiva e não-destrutiva. Dentre os métodos geofísicos, o que recebe maior destaque dentro do contexto de planejamento urbano é o método GPR, acrônimo do inglês, **Ground Penetrating Radar**.

O GPR é capaz de mapear interferências no subsolo fazendo uso do princípio de transmissão e reflexão de ondas eletromagnéticas em altas frequências (10 MHz – 2,6 GHz) (Porsani, 1999; Daniels, 2007; Jol, 2009). Por meio do GPR, pode-se identificar e estimar a profundidade das interferências no subsolo. Os resultados são apresentados na forma de radargrama, que consiste numa série de traços adquiridos ao longo de um perfil, que contém as informações de tempo de chegada e amplitude, associados aos eventos de reflexão das ondas em subsuperfície. As reflexões ocorrem quando a onda eletromagnética que se propaga no subsolo encontra algum contraste de propriedades elétricas nos materiais em subsuperfície, i.e., permissividade dielétrica e/ou condutividade elétrica, que podem estar associados a corpos hospedados no meio em questão, como as redes de interferências urbanas.

Em 2012, Porsani et al., utilizaram o GPR com antena de 200 MHz para auxiliar as obras de construção da linha amarela do metrô de São Paulo, mapeando as possíveis interferências enterradas em subsuperfície. Os resultados permitiram identificar tubulações associados ao transporte de gás e água, cabos elétricos e telefônicos, e estruturas de concreto. Este trabalho serviu como guia para a equipe responsável por construir o túnel do metrô, evitando assim, problemas associados à ruptura acidental das redes de interferências no

subolo na rota do túnel do metrô, atestando a importância do uso do GPR em trabalhos de planejamento urbano, antes de obras de grande porte.

Em 2013, na cidade de Hong Kong (China), Cheng et al., adquiriram dados GPR em três áreas urbanas utilizando as antenas de 270 e 400 MHz, visando o mapeamento de drenos de concreto associado a redes de esgoto, tubulações de água e cabos elétricos com profundidades variando entre 0,3 e 2 m. O objetivo do trabalho foi de comparar as informações fornecidas pelo GPR referente aos artefatos enterrados no subsolo com o mapa dessas interferências fornecidas pelas concessionárias que gerenciam as redes de água, esgoto e energia elétrica do local, e então, verificar a aplicabilidade do GPR para mapear interferências no subsolo urbano. A conclusão foi que o GPR mapeou os três tipos de alvos com boa concordância em relação às informações técnicas disponíveis.

Em 2015, na cidade de Meca (Arábia Saudita), Metwaly, adquiriu perfis GPR utilizando antena de 400 MHz com intuito de obter as informações geotécnicas de uma rua da cidade. Os resultados permitiram identificar cabos elétricos, estruturas de concreto, interfaces sedimentares, galerias de esgoto e tubulações de água. Além de mapear estes alvos, por meio dos diferentes tipos de reflexões encontrados nos radargramas, o autor concluiu que a estrutura de concreto era feita com armaduras de ferro, distinguiu as galerias de esgoto dos tubos de PVC, e determinou a orientação das tubulações encontradas.

Outros trabalhos mostrando aplicações GPR dentro do contexto de planejamento urbano podem ser encontrados em Tong, (1993); Cist & Schutz, (2005); Wahab, (2013), dentre outros.

Com intuito de aprimorar conhecimento a respeito das assinaturas geofísicas provenientes de objetos enterrados no subsolo, em 2004 criou-se o primeiro laboratório de testes geofísicos do Brasil, denominado Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG/USP (SCGR - I). Este sítio abrange uma área de 1500 m² e está localizado no campus da USP em São Paulo (SP), nesta área, diversos objetos foram enterrados ao longo de 7 linhas de estudos. Os alvos são tubulações e tambores, metálicos e plásticos preenchidos com fluidos como água doce e salgada, manilhas de concreto, vasos de cerâmica e muros de tijolos, simulando ambientes de planejamento urbano, arqueologia e estudos ambientais (Porsani et al., 2006, Borges, 2007).

Os alvos estão enterrados em posições, profundidades e configurações conhecidas, informações que possuem grande importância em interpretações de dados geofísicos, permitindo que as assinaturas de cada alvo com características específicas sejam calibradas para cada método aplicado na área, e então, utilizadas em interpretações fora do sítio controlado. Alguns trabalhos realizados dentro do SCGR – I podem ser consultados em Rodrigues (2004), Borges (2007), Porsani & Sauck (2007) e Porsani et al., (2010).

Em 2015, a prefeitura do campus da USP aprovou a construção de um restaurante setorial sobre a área do SCGR-I. Para que as atividades de pesquisa, ensino e extensão não sejam interrompidas, foi proposta a construção de outro sítio controlado com área de 500 m², denominado Sítio Controlado de Geofísica Rasa-II (SCGR – II), com características semelhantes ao SCGR – I, porém, com alvos distribuídos em apenas 3 linhas, ao invés de 7, contando com alvos semelhantes aos enterrados no SCGR – I e 1 alvo dinâmico.

A presente pesquisa tem como objetivos a instalação do SCGR-II e o mapeamento GPR 2D e 3D dos alvos enterrados na linha-3 do SCGR-II do IAG/USP. Os alvos são caracterizados por tubulações de polietileno, tubulações metálicas e de PVC e manilhas de cerâmica, preenchidos totalmente ou parcialmente com água de torneira ou vazias. Todos os alvos foram enterrados em profundidades que variam entre 0,5, 1,0 e 1,5 m, simulando as principais redes de passagem de gás e água, encontrados no subsolo da cidade de São Paulo. Para o mapeamento GPR dos alvos no subsolo foram utilizadas as antenas de 200, 270, 400 e 800 MHz com intuito verificar a potencialidade de cada antena para mapear os alvos instalados em diferentes profundidades.

Simulações numéricas GPR 2D também foram feitas utilizando método numérico Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD), visando um estudo comparativo com os resultados reais e minimizar as ambiguidades presentes na interpretação.

1.1. Organização da dissertação

No Capítulo 2 é apresentado o Sítio Controlado de Geofísica Rasa - II do IAG/USP, mostrando as etapas envolvidas na sua construção do sítio e os alvos enterrados ao longo das linhas de estudo, bem como a discussão sobre os aspectos pedológicos da área. O Capítulo 3 é dividido em dois tópicos: i) Introdução ao método GPR, que apresenta os princípios físicos e

matemáticos envolvidos no método e ii) Introdução a modelagem numérica GPR, onde é apresentado o embasamento matemático do método numérico FDTD, e como as linhas do SCGR – II podem ser modeladas para que se obtenha os chamados resultados sintéticos. No Capítulo 4 é apresentada a técnica utilizada para aquisição dos dados, logísticas de campo, equipamentos e antenas utilizadas, bem como as principais etapas usadas no processamento dos dados adquiridos. No Capítulo 5 os resultados obtidos são apresentados e discutidos em dois tópicos: i) dados GPR reais; ii) dados GPR sintéticos. E por último no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas nesta pesquisa e recomendações.

Capítulo 2

Estudos geofísicos em ambientes controlados

2.1. Levantamento bibliográfico

O primeiro laboratório de estudos geofísicos sob condições controladas foi construído em Nova Jersey (EUA) visando estudos geofísicos dentro do contexto ambiental (Bowders & Koerner, 1982). Para isso, foram enterrados tambores metálicos e plásticos, preenchidos com água fresca ou salina e lixos domésticos. Os tambores foram enterrados em posições e configurações (horizontal ou vertical) conhecidas, separados ou em montes, com intuito de simular um tipo de lixão, onde os lixos são descartados dentro de tambores. Esse tipo de lixão, geralmente é clandestino, e são encontrados por todo o mundo, onde muitas vezes os lixos já estão enterrados e recobertos por solo, dificultando assim, a identificação dos lixos e então verificar os potenciais riscos de contaminação.

A Universidade Western Michigan (WMU), localizada em Michigan (EUA) construiu um sítio controlado, i.e., um ambiente para testes geofísicos numa área onde ficava instalado um antigo manicômio. Numa área de 800 m² foram enterrados diferentes alvos, tais como, tambores de plásticos, barris e canos metálicos. Os alvos com diferentes geometrias e configurações foram enterrados em diferentes profundidades, sendo distribuídos ao longo de 3 linhas de estudos usadas em atividades didáticas dos alunos da graduação e da pós-graduação (Sauck, 1996).

Na cidade de Nantes (França) foi construído um sítio controlado para testes geofísicos (*Le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées - LCPC*) com dimensões de 26 m x 20 m x 4 m, sendo a área dividida em compartimentos, nas quais foram preenchidos com diferentes materiais geológicos, tais como, silte, areia carbonática e gnáisse triturado. Os materiais simulam diversos ambientes geológicos em um mesmo sítio controlado. Dentro dos compartimentos foram enterrados alvos como tubulações de metal, PVC ou concreto preenchidos com ar ou água, fragmentos de rochas com diâmetros de 300 e 500 mm, espaços vazios, blocos de calcário, muros de alvenaria e vigas de ferro. Esses alvos simulam ambientes com importantes aplicações em engenharia civil (Chazelas *et al.*, 1997).

Dentro do contexto arqueológico, foi construído em Ilinóis (EUA) um sítio de testes geofísicos em uma área de 2500 m² (*Controlled Archaeological Test Site - CATS*) (Hildebrand et al., 2002). Os alvos enterrados como fundações de casas, fogueiras, conchas de moluscos, criptas com cadáveres de animais (porcos e cachorros), espigas de milho carbonizadas, dentre outros, simulam diversos ambientes arqueológicos. O CATS foi bastante usado como local ideal para o treinamento de arqueólogos com métodos geofísicos.

Em Frankfurt (Alemanha) foi implantado uma área de testes geofísicos que se destaca pela alta tecnologia de suas instalações (Naser & Junge, 2008). Semelhante ao LCPC, esse sítio é dividido em compartimentos preenchidos por diferentes materiais geológicos, tais como: areia misturada com cascalho, cascalhos, cascalhos misturados com restos de construções, solo siltoso, misturas de areia com silte e restos de construções, e somente areia. O grande diferencial desse sítio controlado, é que os compartimentos possuem controle do nível de água e ainda, sabe-se com precisão o grau de mistura do solo em cada compartimento. Os alvos enterrados são constituídos por tubulações de plástico, concreto e metal, cabos elétricos, de telecomunicações e fibra óptica. Os alvos estão arranjados em diversas configurações e variam até 3 m de profundidade. Essas características do sítio permitem verificar a influência dos parâmetros, litologia do solo, concentração de água e dos alvos propriamente ditos em dados geofísicos.

As vantagens associadas aos estudos em sítios controlados para fins de exploração geofísica atinge também a área forense, na qual tem crescido nos últimos anos de acordo com a ascensão da geofísica para tais fins. Em Orlando (EUA) foi construído o sítio controlado de criminalística (*Lawon Lamar Firearms and Tactical Training Center*) (Rezos et al., 2010). Este sítio compreende uma área de aproximadamente 400 m², e os alvos enterrados são armas de fogo, facas, objetos pontudos e objetos metálicos variados, simulando ferramentas que geralmente são utilizadas em crimes.

No Brasil, o primeiro sítio controlado para testes geofísicos, denominado de Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG/USP (SCGR-I) foi construído em 2004. O SCGR-I está instalado dentro do campus da Universidade de São Paulo, em frente ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) e compreende uma área de 1500 m² (Porsani et al., 2006; Borges, 2007). Este sítio é formado por 7 linhas de estudos com 30 m de comprimento cada. Os alvos enterrados ao longo das linhas são tubos e tambores metálicos e plásticos, manilhas de concreto, cabos e conduítes, vasos de cerâmicas e muros de tijolos. O SCGR-I vem sendo utilizado para pesquisas geofísicas, ensino e atividades de extensão

universitária. Alguns dos resultados das pesquisas realizadas no SCGR-I do IAG USP podem ser encontrados em Rodrigues & Porsani, 2006; Borges, 2007; Porsani & Sauck, 2007; Porsani et al., 2017, 2017; Santos et al., 2014, 2017; Poluha et al., 2017.

Semelhantemente ao SCGR-I do IAG/USP, um campo de testes geofísicos foi construído pela Universidade Federal do Pará (UFPA) em parceria com a Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) dentro do campus da UFRA em Belém – PA (Alves, 2013). Nesse sítio foram enterrados tubos e tambores plásticos e metálicos em profundidades distintas. Atividades de pesquisa e ensino tem sido o principal objetivo desse sítio.

Em Brasília (DF), foi instalado pelo Departamento da Polícia Federal o primeiro sítio controlado de criminalística do Brasil (SITCRIM) (Blum *et al.*, 2013). Os alvos enterrados, tais como: armas, munições, drogas, dinheiro, tubos e tambores, ossadas bovinas, dentre outros, visam estudos forenses. A área do SITCRIM corresponde a 625 m² e vem sendo utilizada em estudos geofísicos e treinamento de profissionais da área de criminalística.

Em Dezembro de 2012 o Departamento de Geofísica do IAG/USP enterrou um animal (Porco) dentro do campus da USP na cidade de Pirassununga, visando estudos ambientais e forenses. Os estudos fizeram parte de uma pesquisa de doutorado (Almeida, 2016) e tiveram como foco principal o monitoramento da decomposição da massa corpórea do porco, bem como no mapeamento da sua ossada, na qual simulou o enterro de um homem num cemitério clandestino. Os resultados desta pesquisa estão apresentados em Almeida et al., (2016).

2.2. O Sítio Controlado de Geofísica Rasa - II

O Sítio Controlado de Geofísica Rasa - II (SCGR-II) do IAG/USP compreende uma área de 500 m² e está instalado em frente às edificações do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da Universidade de São Paulo (USP) (Figura 2.1). Este novo sítio controlado é composto por 3 linhas de estudos e os alvos são semelhantes aos encontrados no SCGR-I, simulando ambientes de planejamento urbano, meio ambiente e arqueologia.

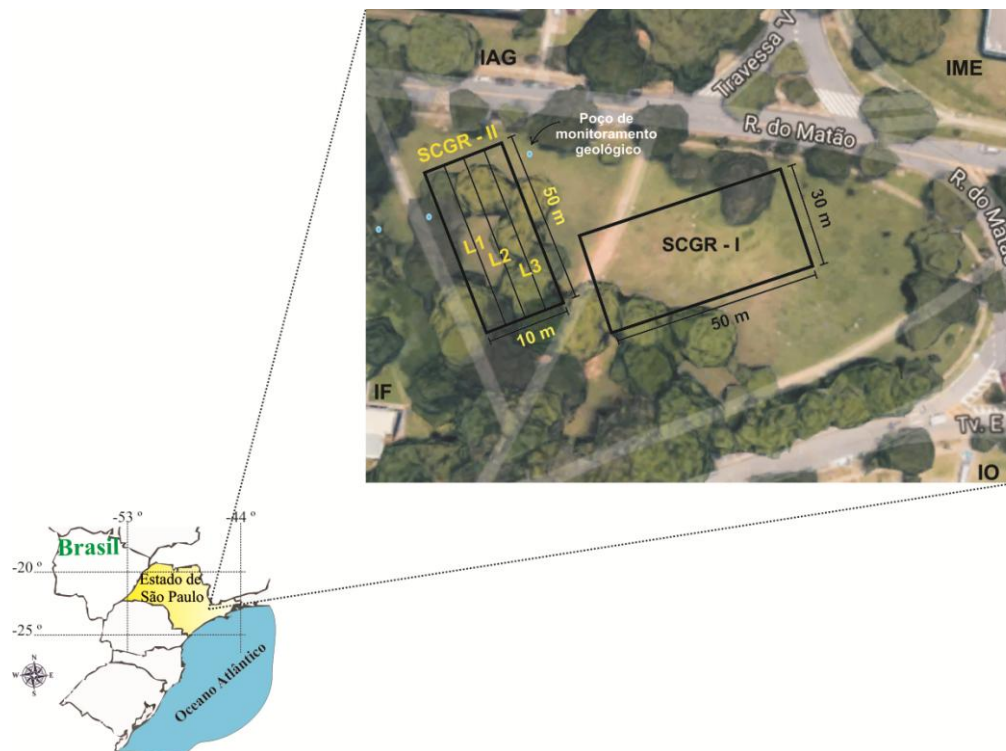


Figura 2.1. Localização dos sítios controlados SCGR – I e SCGR – II. L1, L2 e L3 são as linhas de referência onde os alvos estão enterrados. Instituto de Astronomia Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG); Instituto de Física (IF); Instituto de Oceanografia (IO); Instituto de Matemática e Estatística (IME). (Adaptado de Google Maps, 2017).

Na Figura 2.2 é apresentado o mapa base com a localização das linhas de estudos no SCGR-II, marcas de controle e a posição do cano metálico guia.

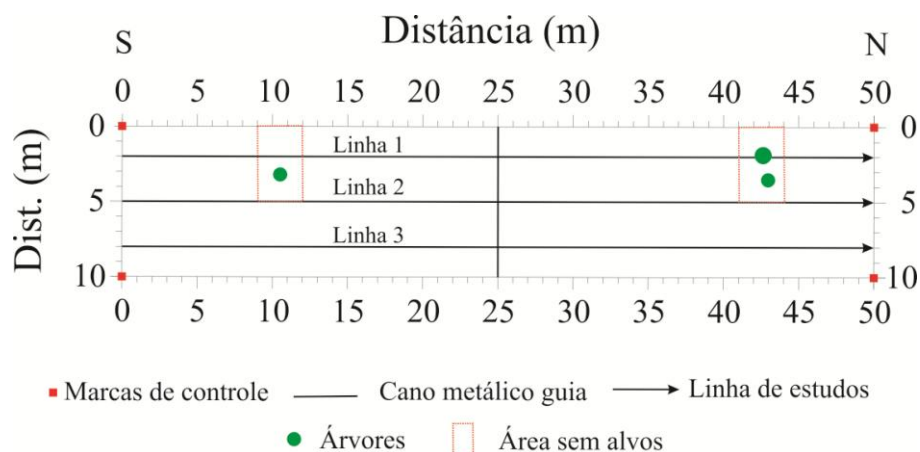


Figura 2.2. Croqui com a localização das 3 linhas de estudos no SCGR-II do IAG/USP (Porsani, 2015).

A Linha 1 é constituída por tambores plásticos e metálicos, tubulações de ferro e manilhas de concreto (Figura 2.3). Os tambores plásticos estão preenchidos por água doce, salgada e ar, e enterrados na vertical em buracos individuais. Esses tambores têm como

objetivo simular ambientes de descartes de resíduos químicos e outros tipos de contaminantes armazenados dentro de tambores, onde os diferentes fluidos que os preenche simulam os resíduos condutores (água salgada e água de torneira) e resíduos resistores (ar). Ainda dentro do contexto de descarte de resíduos, há os tambores metálicos vazios que estão enterrados na horizontal, i.e, paralelos a superfície, que simulam depósitos de lixos, onde os lixos recorrentemente são depositados dentro desses tambores e posteriormente enterrados. Os tubos metálicos visam simular as redes de passagem de gás. As manilhas de concreto com diferentes tamanhos representam as redes de passagem de esgoto e água pluviais, e estão enterradas na horizontal, i.e, paralelas a superfície. As manilhas de concreto enterradas na vertical simulam as fossas sépticas que podem ser encontradas em casas.

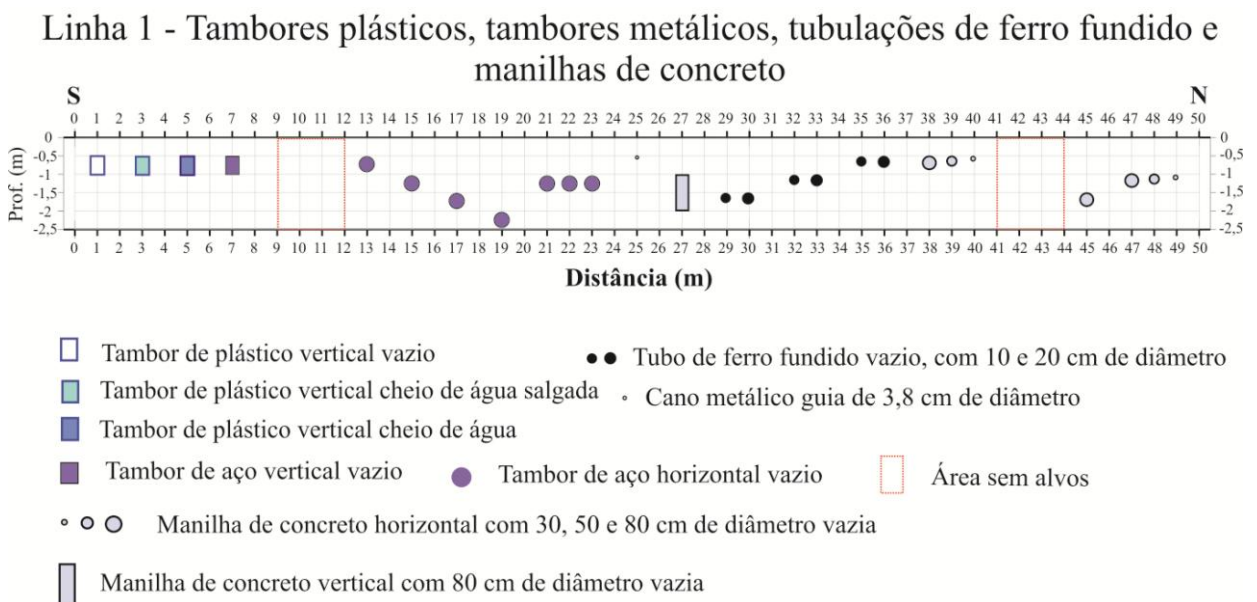


Figura 2.3. Croqui da Linha 1 do SCGR-II do IAG/USP (Porsani, 2015).

A Linha 2 é caracterizada por cabos elétricos não energizados, conduítes de PVC e fibra óptica, visando simular as redes elétricas e telefônicas enterradas no subsolo das cidades (Figura 2.4). Além das redes de comunicação e energia, tubulações de PEAD e tubulações de PVC em forma de “U” que são utilizadas para o transporte de água nas cidades são enterradas paralelamente ao subsolo. Dentro do contexto arqueológico, foi enterrado 1 m³ de material carbonático, simulando um amontoado de conchas carbonáticas, muros de tijolos representando restos de construções enterradas, e vasos de cerâmica, alvos, que são recorrentemente encontrados em sítios arqueológicos.

Linha 2 - Cabos elétricos, conduítes de PVC, muro de tijolos, tubulações metálicas e de PVC vazias, vasos cerâmicos, caixas com areia e brita de granito

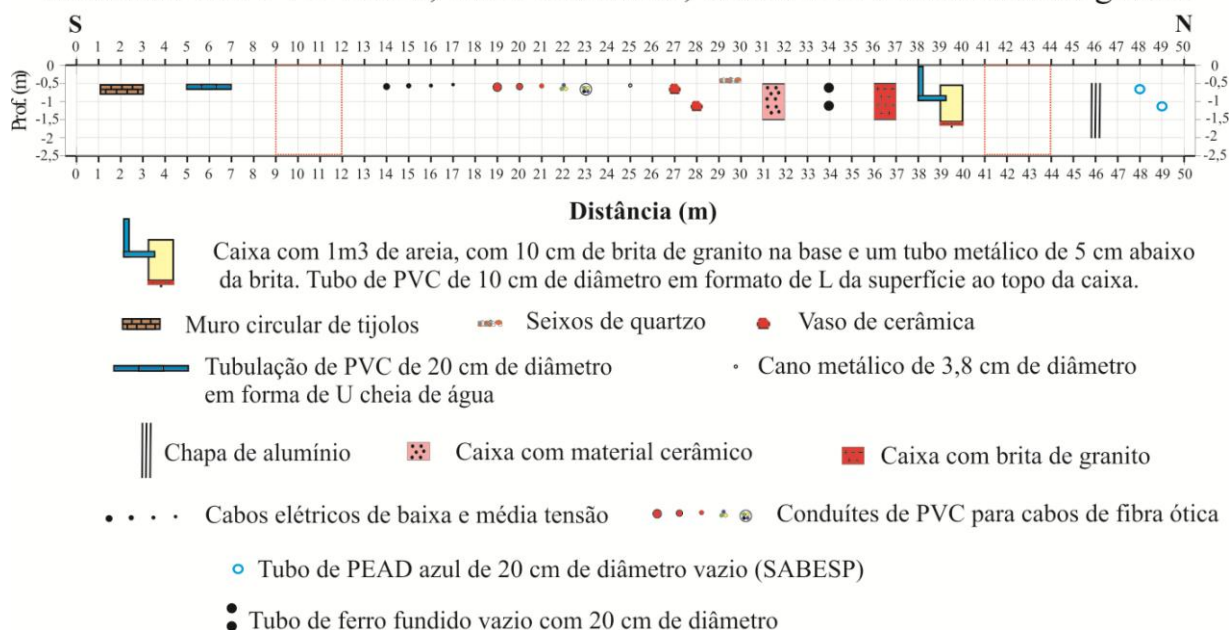
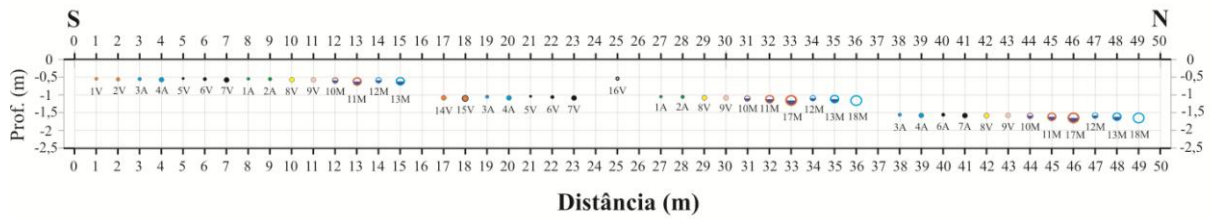


Figura 2.4. Croqui da Linha 2 do SCGR-II do IAG/USP (Porsani, 2015).

A Linha 3 é caracterizada pelos principais ramais e redes de passagem de gás, água e coleta de esgotos utilizados pelas principais concessionárias de abastecimento da cidade de São Paulo, como COMGAS e SABESP. Os alvos, tais como, tubulações de polietileno, PVC e metálicos, bem como as manilhas cerâmicas estão dispostos em 0,5 m, 1,0 m e 1,5 m de profundidades (Figura 2.5). Alguns alvos estão preenchidos totalmente ou parcialmente com água, objetivando simular as situações reais do contexto de planejamento urbano, tais como as redes de passagem de água, gás e esgoto. Os tubos de polietileno e ferro representam as redes de passagem de gás, e os tubos de PVC e as manilhas de cerâmica, vazios, parcialmente e totalmente preenchidos por água simulam as redes de passagem de água e esgoto das cidades.

Esta linha de estudos será utilizada nesta pesquisa, que tem como objetivo mapear estes alvos por meio do emprego do método GPR. Os resultados serão comparados com estudos de modelagem numérica. Os conhecimentos adquiridos por meio desta pesquisa poderão ser úteis em aquisições GPR fora do SCGR-II no mapeamento de redes de abastecimento de gás, água e coleta de esgotos na cidade de São Paulo ou outros centros urbanos.

Linha 3 - Principais ramais e redes de passagem de gás, água e coleta de esgotos



- Cano metálico guia de 3,8 cm de diâmetro
 - Tubo de PVC de 10 cm de diâmetro vazio
 - Manilha cerâmica de 10 cm de diâmetro vazia
 - Tubo de polietileno de 20, 32, 40 e 63 mm de diâmetro vazio
 - Tubo de PVC branco de 75 mm de diâmetro cheio de água
 - Tubo de PVC marrom de 100 mm de diâmetro cheio de água
 - Ferro fundido de 50, 75 e 100 mm de diâmetro vazio
 - Tubo de polietileno de 20 e 32 mm de diâmetro cheio de água
 - Tubo de PVC de 150, 200 e 300 mm de diâmetro metade de água
 - Tubo de PVC de 300 mm de diâmetro vazio
 - Manilha cerâmica de 150, 200 e 300 mm de diâmetro metade de água
- A - Água V - Vazio M - Metade água

Figura 2.5. Croqui da Linha 3 do SCGR-II do IAG/USP (Porsani, 2015).

2.3. A Construção do SCGR-II

A construção do SCGR-II seguiu 3 etapas: mapeamento do background geológico da área de estudos por meio do método GPR, construção do SCGR-II e por último, a recuperação da paisagem.

Antes de qualquer intervenção no solo, foram adquiridos perfis GPR com as antenas blindadas de 200 e 270 MHz com a técnica perfil de reflexão com afastamento constante, com espaçamento de 2 cm entre os scans GPR, tendo como objetivo mapear a litologia do solo e de verificar a possível presença de algum artefato urbano enterrado, tais como, tubulações, manilhas de concreto, etc. (Figura 2.6).



Figura 2.6. Registro fotográfico do background geológico do SCGR-II utilizando o equipamento GPR SIR-4000 com a antena blindada de 270 MHz.

Na sequência deu-se início aos trabalhos de demarcação das valas, abertura dos buracos, posicionamento dos alvos e por último o fechamento dos buracos com os alvos dentro. Todas essas etapas contaram com o apoio de alunos de graduação e pós-graduação do IAG, professores do Departamento de Geofísica, apoio da Prefeitura do Campus da USP, além de todo suporte da empresa COMGÁS - Companhia de Gás de São Paulo.

Para as linhas 1 e 2 os alvos foram dispostos dentro de buracos individuais e para a Linha 3 os alvos foram dispostos ao longo de 3 valas, correspondendo as profundidades de 0,5 m, 1,0 m e 1,5 m, uma vez que têm-se um grande número de alvos posicionados próximos lateralmente entre si e em mesma profundidade.

Os buracos e as valas foram abertas com auxílio de uma retroescavadeira cedida pela Prefeitura da USP. Com as valas e buracos abertas, demarcou-se a geometria de cada uma, visando um maior controle a respeito dos locais onde foram feitas as intervenções no solo (Figura 2.7). O posicionamento espacial em relação às linhas de controle e a profundidade dos alvos foram feitas por meio de trenas e um teodolito e então anotadas em planilhas que estão disponíveis na Tabela 3.4 do Capítulo 3.

Após a colocação dos alvos nas valas, utilizou-se a mesma terra proveniente da abertura das valas para o fechamento das mesmas. E por último, foi feito replantio da grama na área sobre o SCGR-II. Na Figura 2.8 são apresentadas as principais etapas da construção do novo sítio controlado.

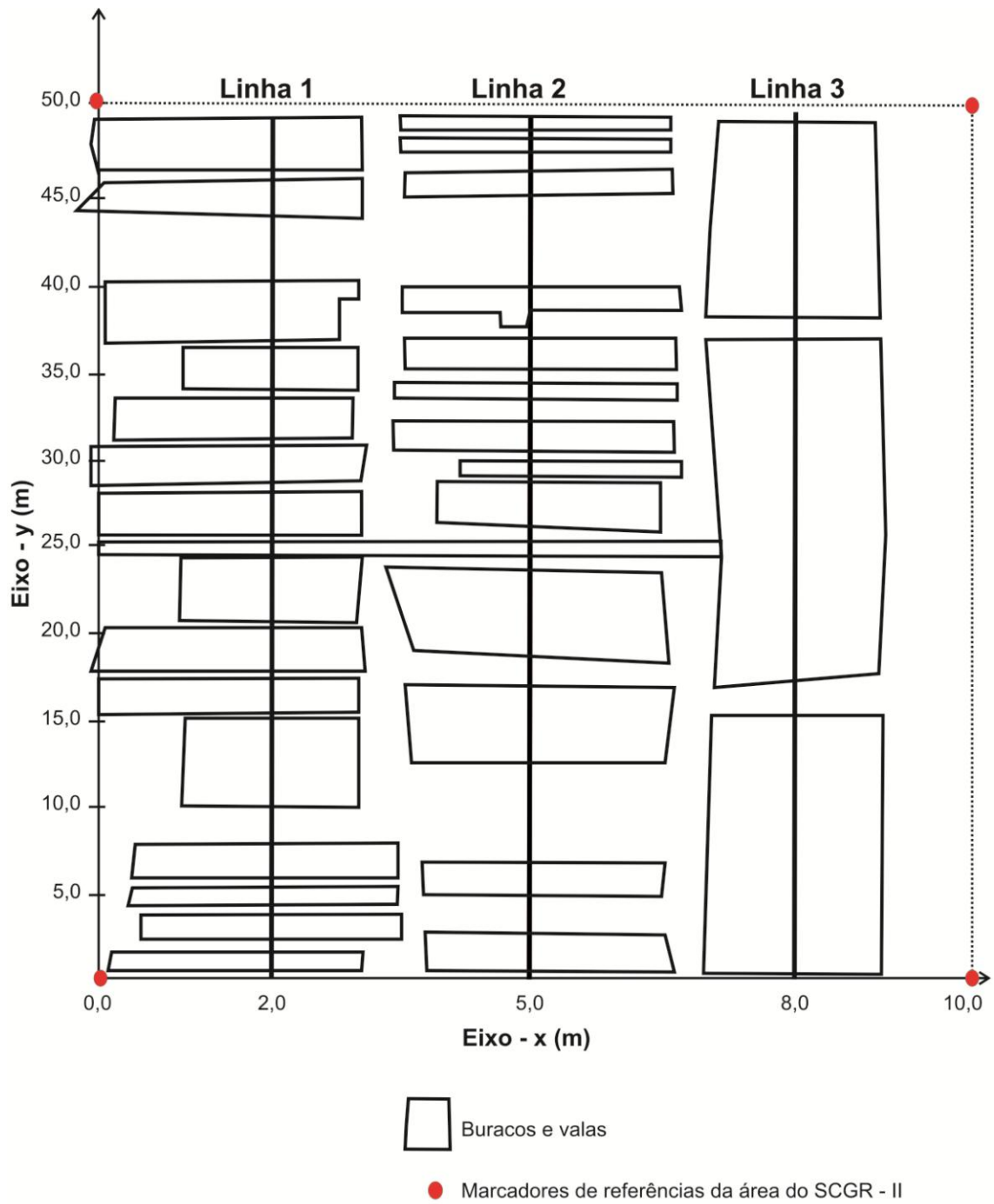


Figura 2.7. Mapa do contorno dos buracos e valas que foram abertos para o posicionamento dos alvos em subsuperfície.



Figura 2.8. Principais etapas da construção do SCGR – II. Demarcação das valas, abertura dos buracos, colocação dos alvos, medida da profundidade dos alvos e recuperação da paisagem.

Na Figura 2.9 são apresentadas as fotos de alguns dos alvos presentes na Linha 1 do SCGR – II posicionados nos buracos antes do soterramento.



Figura 2.9. Alvos posicionados ao longo da Linha 1 do SCGR – II. (a) Tambores metálicos. (b) Tambores de PVC preenchidos com diferentes fluidos. (c) Manilhas de concreto horizontais. (d) Manilha de concreto vertical.

Na Figura 2.10 são apresentadas as fotos de alguns dos alvos presentes na Linha 2 do SCGR – II posicionados nos buracos antes do soterramento.

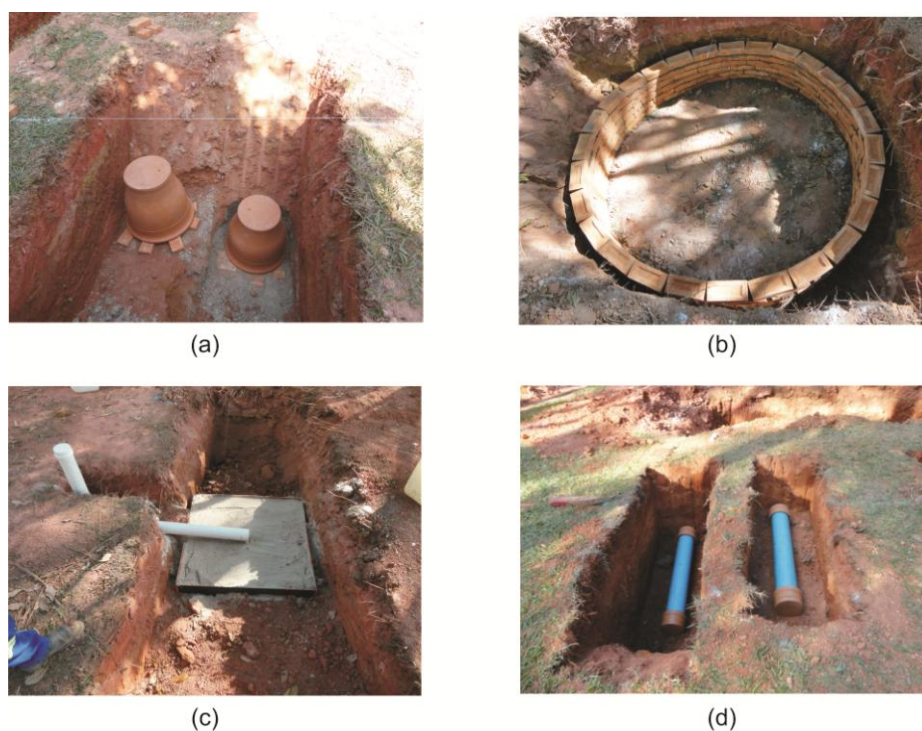


Figura 2.10. Alvos posicionados ao longo da Linha 2 do SCGR – II. (a) Vasos de cerâmica. (b) Muro circular de tijolos. (c) Caixa com areia e um tubo de PVC com entrada para água (alvo dinâmico). (d) Tubos de PEAD vazios.

Na Figura 2.11 são apresentadas as fotos de alguns dos alvos presentes na Linha 3 do SCGR – II posicionados nos buracos antes do soterramento.



Figura 2.11. Alvos posicionados ao longo da Linha 3 do SCGR – II. (a) Manilha de cerâmica. (b) Tubo de polietileno. (c) Tubos de PVC. (d) Tubos metálicos, PVC e de polietileno.

2.4. Aspectos litológicos da área de estudos

A área de estudos é constituída por um aterro argilo - arenoso de coloração vermelha escura, com aproximadamente 3 m de espessura. Logo abaixo do aterro, há a predominância de sedimentos areno - argiloso das formações Resende e São Paulo de idade terciária, com espessura que pode chegar até 53 m aproximadamente, passando para o embasamento granítico-gnáissico de idade pré - cambriana Porsani et al., (2004); Borges, (2007).

Durante a abertura das trincheiras para a posterior colocação dos alvos foi realizado um estudo pedológico com intuito de caracterizar o solo do SCGR-II. As valas alcançaram profundidades de até 2,5 m, onde foram identificados 3 horizontes geotécnicos (Figura 2.12). O primeiro horizonte corresponde a uma camada de húmus (matéria orgânica) de coloração marrom escura, com espessura variando de 0,15 a 0,4 m em relação à superfície. A segunda camada observada é interpretada como uma zona de aterro areno - argiloso, com coloração que varia entre alaranjado e vermelho com porções amareladas, com a presença de fragmentos de restos de materiais de construção civil. Esse horizonte como um todo se mostra bastante heterogêneo e com granulometria variada de tamanho silte-argiloso. A base deste aterro alcança até cerca de 1,0 m de profundidade. A terceira camada é composta por um solo avermelhado silto - argiloso, homogêneo, sem a presença de materiais alóctones, com granulometria de tamanho silte-argiloso com grânulos sub - milimétricos de quartzo.

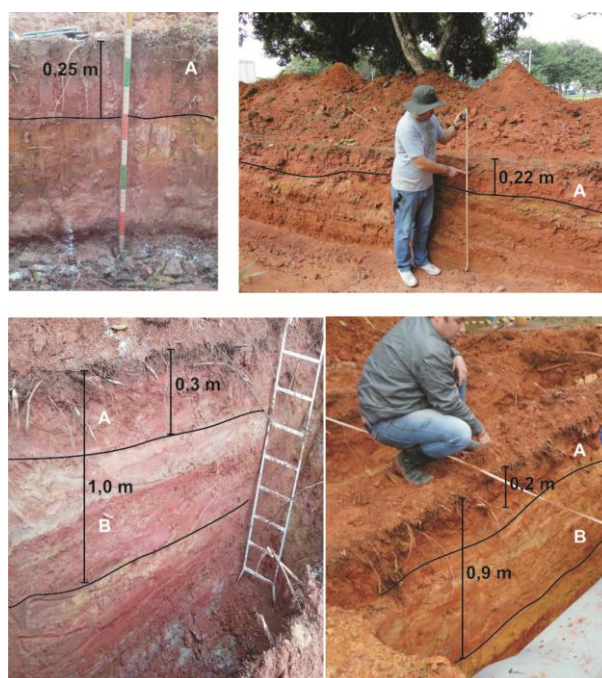


Figura 2.12. Horizontes litológicos identificados no SCGR-II do IAG/USP. Horizonte A corresponde a camada de húmus. Horizonte B corresponde à camada de aterro argilo – arenoso.

Capítulo 3

Fundamentos Teóricos do Método GPR

3.1. Histórico

Segundo Daniels (2007) o primeiro trabalho relacionado à utilização de ondas eletromagnéticas para determinar a presença de objetos metálicos remotos foi de Hülsmeier (1904), mas a primeira descrição do uso de ondas eletromagnéticas para detectar objetos enterrados aparece somente 6 anos depois na patente de Leimbach & Löwy (1910), que utilizaram um par de antenas sobre a superfície com objetivo de mapear nível d'água e depósitos minerais.

Em 1926, Hülsenbeck (1926) surge como o pioneiro na utilização da técnica de transmissão de ondas eletromagnéticas pulsadas para mapear objetos enterrados no subsolo e a perceber que contrastes de constante dielétricas em subsuperfície produziam reflexões do sinal transmitido.

A partir de 1930 a técnica de transmissão pulsada de ondas eletromagnéticas para a subsuperfície ganhou força e diferentes aplicações surgiram, tais como determinar a espessura de calotas de gelo (Stern, 1929).

Já na década de 70 o GPR foi aplicado em terreno lunar, passando a ganhar mais visibilidade dentre os pesquisadores, e com a ascensão dos computadores e dispositivos eletrônicos, o número de trabalhos envolvendo GPR aumentou consideravelmente, consolidando – o como método geofísico.

Nos dias atuais, o método GPR possui aplicações dentro de diversos contextos, que passam por planejamento urbano, estudos geológicos e ambientais, arqueologia, estudos forenses, exploração de recursos naturais, e entre outros, consagrando-se como o método geofísico de ampla aplicabilidade.

No Brasil, segundo Borges (2007) os primeiros trabalhos envolvendo o GPR foram realizados por Bevan et al. (1986) e pelo Centro de Pesquisa da Petrobrás (Porsani et. al, 1994a; 1994b, 1995; Porsani & Rodrigues, 1995a, 1995b). Desde então o método GPR tem sido empregado em diferentes contextos dentro do território brasileiro: Arqueologia (Allen et al. 2017; Porsani et al. 2010; Luiz & Pereira, 2013), meio ambiente (Bano et al., 2009;

Moreira & Dourado, 2006; Castro & Branco, 2003), exploração de água subterrânea (Santos et al., 2009; Silva et al., 2004), geologia (Nogueira et al., 2005; Pereira et al. 2003); forense (Nascimento, 2009; Almeida, 2016); planejamento urbano (Porsani et al. 2012), entre outros.

3.2. Aspectos teóricos

O método GPR é baseado no princípio de transmissão e reflexão de ondas eletromagnéticas com frequências entre (10 MHz – 2,6 GHz). As ondas eletromagnéticas são emitidas na forma de pulsos por uma antena transmissora, as ondas se propagam em subsuperfície e sofrem reflexão ao encontrar algum contraste de propriedades elétricas (condutividade elétrica e/ou constante dielétrica) em relação ao solo, onde as ondas refletidas são recebidas por uma antena receptora (Figura 3.1). Ambas as antenas são posicionadas sobre a superfície e rebocadas ao longo de perfis. Os sinais refletidos são armazenados em um computador (data log) e apresentados em tempo real na forma de radargrama, que consiste em uma série espacial de traços com as informações de reflexão da onda refletida em subsuperfície (Porsani, 1999; Daniels, 2007; Jol, 2009).

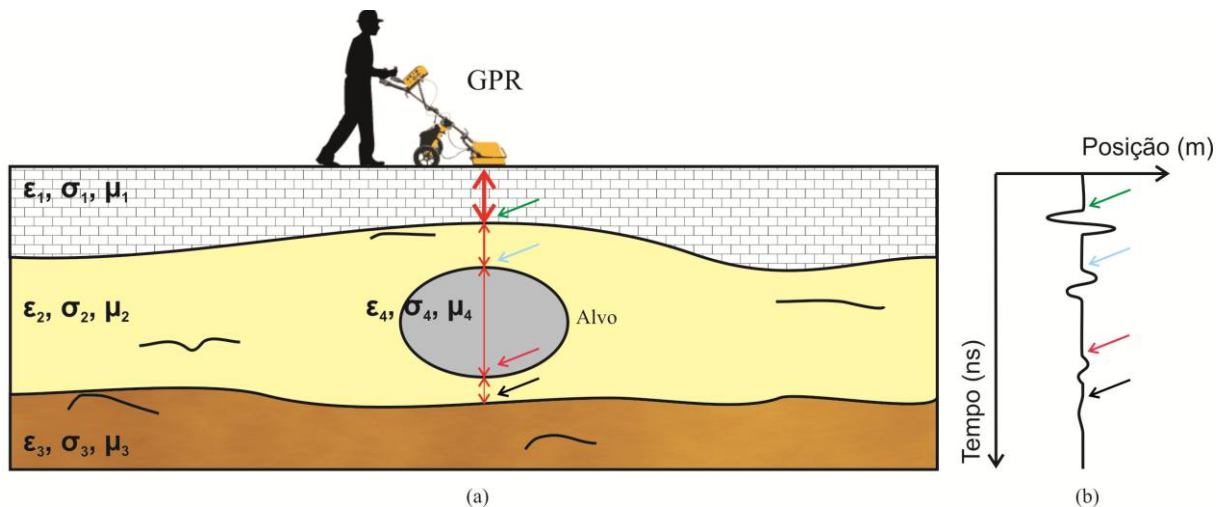


Figura 3.1: Croqui para aquisição de um traço GPR. O traço GPR (b) contém as amplitudes de reflexões das interfaces ilustradas em (a) em função do tempo. As diferentes interfaces são definidas pelos contrastes das propriedades elétricas e magnética ϵ , σ e μ .

3.2.1. Propagação de ondas eletromagnéticas

Os fundamentos teóricos do método GPR são baseados na teoria eletromagnética de Maxwell. As equações de Maxwell descrevem como cargas e correntes elétricas se

relacionam com campos elétricos e magnéticos que podem se propagar em qualquer meio (Nussenzveig, 1977).

As leis de Faraday (Equação 1) e Ampère-Maxwell (Equação 2) descrevem o comportamento da propagação dos campos eletromagnéticos em quaisquer meios, sendo as bases para o desenvolvimento teórico dos métodos eletromagnéticos.

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad \text{Lei de Faraday} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad \text{Lei de Ampère – Maxwell} \quad (2)$$

\vec{E} - campo elétrico (V/m)

\vec{H} - campo magnético (A/m²)

μ – permeabilidade magnética (H/m)

ε – permissividade elétrica (F/m)

σ – condutividade elétrica (S/m)

Com um pouco de álgebra obtém-se a equação da onda eletromagnética na subsuperfície. Aplicando-se o operador rotacional na lei de Faraday (equação 1), tem-se que:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\mu \nabla \times \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (3)$$

E por meio da identidade vetorial $\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \nabla \cdot (\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E}$, chega-se na equação (4).

$$\nabla \cdot (\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \nabla \times \vec{H} \quad (4)$$

Considerando-se um meio condutor, logo não há acúmulo de cargas elétricas em tal meio, ou seja, $(\nabla \cdot \vec{E}) = 0$. Ainda, substituindo a equação (2) na equação (4), obtém-se a equação (5).

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu \frac{\partial}{\partial t} \left(\sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (5)$$

Assumindo que os campos elétricos e magnéticos variam harmonicamente na forma $\vec{H} = \vec{H}_0 e^{i\omega t}$ e $\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i\omega t}$, e calculando as derivadas presentes na equação (5), obtém-se a equação (6.)

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu(\sigma i\omega \vec{E} - \varepsilon \omega^2 \vec{E}) \quad (6)$$

Manipulando algebricamente a equação (6), obtém-se a equação de Helmholtz para o campo elétrico:

$$(\nabla^2 + \omega^2 \mu \varepsilon - i\omega \mu \sigma) \vec{E} = 0 \quad (7)$$

As propriedades físicas do meio e a frequência angular da onda presentes na equação (7) podem ser agrupadas em um único termo, denominado número de onda (Equação 8).

$$k^2 = \omega^2 \mu \varepsilon - i\omega \mu \sigma \quad (8)$$

E então a equação de Helmholtz (Equação 7), assume a forma da equação (9).

$$(\nabla^2 + k^2) \vec{E} = 0 \quad (9)$$

Conhecida como equação da onda para o campo elétrico.

De maneira análoga para o campo magnético tem-se a (Equação 10).

$$(\nabla^2 + k^2) \vec{H} = 0 \quad (10)$$

3.2.2. Velocidade de propagação e coeficiente de atenuação

Admitindo que a onda eletromagnética seja originada em $z = 0$ (em um sistema de coordenadas cartesianas, onde z aponta para o centro da Terra) e em um instante de tempo $t = 0$, a solução da onda para o campo elétrico (equação 9) que se propaga na direção z em um dielétrico, assume a forma da equação (11) (Daniels, 2007) e (Jol, 2009).

$$\vec{E}(z, t) = \vec{E}_0 e^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (11)$$

Onde o termo ($e^{-\alpha z}$) representa a atenuação do campo em função da profundidade e o termo ($e^{i(\omega t - \beta z)}$) representa a propagação da onda.

Para profundidade $z = \frac{1}{\alpha}$ a amplitude do campo elétrico decai 1/e de \vec{E}_0 . Esta distância é conhecida como “Skin Depth”, que fornece uma ideia da atenuação da onda eletromagnética em profundidade.

Os parâmetros “ α ” e “ β ” são conhecidos como coeficiente de atenuação (dB/m) e de propagação (rad/m), respectivamente, e são dados pelas equações (12) e (13) (Porsani, 1999).

$$\alpha = \omega \left[\frac{\mu\varepsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \right)^2} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$\beta = \omega \left[\frac{\mu\varepsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \right)^2} + 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

Aplicando sobre o termo $\left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \right)^2$ a expansão em séries de potências e assumindo que para frequências muito altas ($\omega\varepsilon \rightarrow \infty$), os coeficientes de atenuação e de propagação podem ser escritos para meios de baixa perdas, como as equações (14) e (15).

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (14)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\mu\varepsilon} \quad (15)$$

Na equação (14) se observa que o coeficiente de atenuação é diretamente proporcional a condutividade elétrica do meio, ou seja, pode-se esperar que para ambientes mais condutivos, há mais atenuação da onda eletromagnética em subsuperfície comparados com meios mais resistentes.

Sabendo que ($v = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}}$), a equação (15), assume a forma da equação (17).

$$v = \frac{\omega}{\beta} \quad (17)$$

Da mesma forma, a velocidade da luz é definida como:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} \cong 0,3 \text{ m/ns} \quad (18)$$

Onde μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{H}{m}$) e ε_0 é a permissividade elétrica do vácuo ($\varepsilon_0 \cong 8,85 \times 10^{-12} \frac{F}{m}$).

Assumindo que $\mu \cong \mu_0$, pode-se escrever a velocidade de propagação da onda sob a forma da equação (19).

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (19)$$

Onde c é a velocidade da luz ($c \approx 0,3 \text{ m/ns}$) e ε_r é a constante dielétrica do meio, definida pela equação (20).

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (20)$$

Também, define-se o comprimento de onda como sendo:

$$\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (21)$$

Onde f é a frequência da onda (MHz).

3.2.3. Coeficiente de reflexão

Ao incidir uma onda eletromagnética sobre uma interface que divide dois meios com propriedades elétricas diferentes, parte da energia da onda sofre reflexão e a outra parte sofre refração.

A porcentagem de energia que sofre reflexão é quantificada por meio do coeficiente de reflexão, dado pela equação (22) (Porsani 1999).

$$r = \frac{\sqrt{\sigma_1 + i\omega\varepsilon_1} - \sqrt{\sigma_2 + i\omega\varepsilon_2}}{\sqrt{\sigma_1 + i\omega\varepsilon_1} + \sqrt{\sigma_2 + i\omega\varepsilon_2}} \quad (22)$$

Para um meio isolante e assumindo que a onda eletromagnética tenha apenas uma frequência de radiação, pode-se reescrever a equação (22) sob a forma da equação (23).

$$r = \frac{\sqrt{\varepsilon_{1r}} - \sqrt{\varepsilon_{2r}}}{\sqrt{\varepsilon_{1r}} + \sqrt{\varepsilon_{2r}}} \quad (23)$$

Onde ε_{1r} e ε_{2r} são as constantes dielétricas de dois meios distintos, como mostrado na Figura 3.1.

Na Tabela 1 são apresentados alguns valores das propriedades elétricas dos materiais geológicos que são encontrados em aplicações de GPR

Tabela 3.1. Propriedades elétricas de alguns materiais. (Annan, 2003; Porsani, 1999; Daniels, 2007; Borges, 2007).

Material	Constante dielétrica (ϵ_r)	Condutividade elétrica (mS/m)
Ar	1	0,0
Água doce	81	0,5
Água salgada	81	3000
Solo argiloso saturado	10 - 30	0,001 - 1
Solo arenoso saturado	10 - 30	0,01 - 0,1
Granito	4 - 6	0,01 - 1
Basalto	8	0,01
Ferro	1	10^9
PVC	3 - 4	0,0
Concreto seco	4 - 10	0,001 - 0,01
Cerâmica	8	0

Por meio da equação 22, para frequência de 200 MHz calculou-se o coeficiente de reflexão para alguns objetos enterrados em um solo argilo – arenoso semelhante ao do SCGR – II ($\epsilon = 18$, $\sigma = 0,001$ S/m e $\mu = 1$), apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Coeficientes de reflexão para alguns objetos enterrados em um tipo de solo argilo – arenoso (SCGR – II).

De	Para	r %
Solo argilo - arenoso	PVC	18
Solo argilo - arenoso	Cerâmica	20
Solo argilo - arenoso	Água	80
Solo argilo - arenoso	Ferro	100

3.2.4. Técnicas de aquisição de dados GPR

A aquisição de dados GPR pode ser feita com diferentes técnicas, que consistem em diferentes orientações e/ou afastamento das antenas em relação ao perfil a ser adquirido. A técnica mais utilizada para a aquisição dos dados é conhecida como “perfil de reflexão com afastamento constante, ou “common offset”. Essa técnica consiste em rebocar um par de antenas transmissora (Tx) e receptora (Rx) com espaçamento fixo entre elas ao longo de perfis, sendo a técnica utilizada para a aquisição dos dados dessa pesquisa (Figura 3.3).

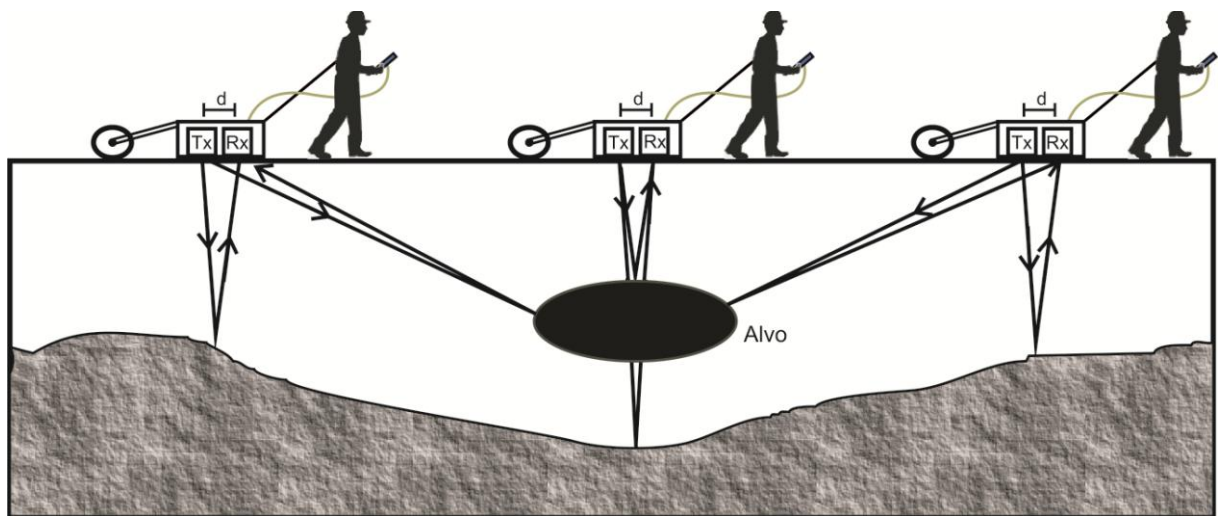


Figura 3.2: Esquema da aquisição de um perfil de reflexão com afastamento constante (d). Tx e Rx são as antenas transmissora e receptora, respectivamente, rebocadas por um operador.

Outras técnicas, como Wide Angle Reflection and Refraction (WARR) e Common Mid Point (CMP) (Porsani, 1999; Annan, 2003; Daniels, 2007) são técnicas usadas para se estimar a velocidade de propagação da onda no subsolo. Para essa pesquisa, as técnicas de sondagem de velocidades não foram utilizadas, visto que se conhecem todas as profundidades dos alvos, i.e, calculou-se a velocidade da onda no subsolo por meio da expressão ($v = 2h/t$), onde h é a profundidade dos alvos e t é o tempo duplo de percurso da onda obtido pelo GPR.

3.3. Modelagem numérica GPR

3.3.1. Revisão bibliográfica

Interpretar dados geofísicos pode ser uma tarefa difícil, pois de uma forma geral, os resultados fornecidos pelos métodos geofísicos contam com ambiguidades, i.e, pode haver mais de uma interpretação para o mesmo resultado. Para contornar este problema, recorrentemente, faz-se uso de modelos numéricos que auxiliam na validação das interpretações dos resultados. Estes modelos são inseridos em ambientes computacionais e representam estruturas geológicas ou artefatos antrópicos presentes em subsuperfície. Uma vez que os modelos são definidos, simulam-se as respostas geofísicas de determinado método para o modelo criado, obtendo-se assim, um resultado sintético. Este resultado sintético pode ser comparado com resultados obtidos em campo e, caso haja concordância entre eles, pode-se dizer que aquela situação geológica previamente modelada explica o resultado obtido em campo e, desta forma, minimiza-se as ambiguidades que podem ocorrer nas interpretações. A modelagem numérica também é utilizada para prever resultados que podem ser encontrados nas situações reais, auxiliando desta forma, o planejamento de campo.

Para o método GPR, os estudos de modelagem numérica estão presentes na literatura com diferentes aplicações, que incluem o suporte para análise de dados e planejamento de campo. Em 2006, Rodrigues et al., (2006) caracterizaram as respostas GPR de tambores plásticos enterrados no subsolo, preenchidos com água doce, água salgada e ar (vazio). Para isso, foram feitas aquisições de dados sobre o sítio controlado do IAG/USP (SCGR-I) utilizando antenas de 100, 200 e 500 MHz. Para validar os resultados obtidos, foram feitos modelos numéricos referentes aos tambores enterrados na área e, então, comparou-se os resultados reais e sintéticos. As conclusões foram que os resultados de modelagem numérica tiveram grande concordância com os resultados reais, auxiliando na interpretação dos dados, além de ajudar a caracterizar as assinaturas das reflexões GPR dos tambores preenchidos com diferentes fluidos.

Em 2008, Diamanti et al., (2008) estudaram os espaços entre tijolos em pontes do tipo “ring”, na Inglaterra. As pontes datam de idades muito antigas e servem como rota para o tráfego de automóveis e, por estes motivos, esses espaços podem fazer com que as pontes rompam-se e causem acidentes perigosos. Para uma análise mais acurada sobre o problema, os autores recriaram a ponte dentro de um laboratório e utilizaram o GPR para identificar os

espaços entre os tijolos. Os resultados se mostraram complexos e de difícil interpretação. Para auxiliar nesta tarefa, os pesquisadores fizeram também modelos numéricos das pontes para facilitar a interpretação dos dados e planejar futuras aquisições nas pontes localizadas nas cidades.

Em 2012, Diamanti & Redman (2012) caracterizaram rachaduras em asfalto por meio do método GPR. Para isto, os autores utilizaram as antenas de 250 e 1000 MHz, e compararam os resultados com modelagem numérica. Os modelos numéricos simularam diferentes tipos de rachaduras no asfalto em termos de geometria e tipo de fluido que permeia a fissura. Ao comparar os dados reais com os dados sintéticos, os autores verificaram que as rachaduras aparecem como hipérboles de difração em radargramas. Também, os modelos numéricos forneceram estimativas da variação de amplitude das reflexões referentes aos diferentes tipos de fissuras modelados, mostrando que a frequência de 250 MHz é mais sensível para maiores aberturas no asfalto em relação à frequência de 1000 MHz.

Também em 2012, Valerio et al., (2012), utilizaram a modelagem numérica GPR para prever a detectabilidade de rochas em solo marciano. Os autores criaram modelos de rochas enterradas em ambientes característicos de Marte, baseado nas informações obtidas na Missão ExoMars. A ideia do trabalho foi de tentar prever quais tipos de resposta o GPR pode obter em solo marciano. Para isto, utilizaram diferentes modelos, variando parâmetros como frequência da onda eletromagnética, geometria das rochas enterradas e diferentes tipos de mistura do solo. Além da abordagem numérica, os autores criaram dois experimentos em laboratório, onde o primeiro consistiu em colocar basaltos dentro de recipientes com água e então adquirir os dados GPR sobre este tipo de situação. O objetivo principal da água é o de estudar os efeitos dispersivos de um material com alta permissividade elétrica. Já no segundo experimento, os basaltos foram colocados dentro de um recipiente com uma mistura de sílica, visando reproduzir o solo marciano. Por fim, os autores, compararam os resultados reais e modelados, onde foi gerada uma série de expectativas dos desafios que o GPR iria encontrar em solo marciano para mapear as rochas enterradas em subsuperfície.

Em 2014, Yang et al., (2014) utilizaram modelagem numérica GPR 2D para analisar a potencialidade do método GPR para mapear tubos enterrados no subsolo dentro do contexto urbano. Os autores compararam as reflexões referentes a tubulações metálicas e cerâmicas enterrados em profundidades distintas, e verificaram que em maiores profundidades as amplitudes das reflexões sofrem maiores atenuações. Também verificaram que a amplitude

reflexão dos alvos metálicos são superiores ao dos alvos cerâmicos, podendo ser um parâmetro capaz de distinguir os dois alvos em subsuperfície. Outro ponto discutido foi a respeito espessura do material, onde os autores concluíram que este parâmetro geométrico possui uma pequena influência na amplitude da reflexão.

Em 2016, Giannakis et al., (2016) utilizaram o método das diferenças finitas no domínio do tempo FDTD para simular aquisições GPR que visam o mapeamento de minas explosivas. Os modelos foram construídos utilizando ferramentas matemáticas avançadas, como fractais para topografia e distribuição estocástica para o solo, fazendo com que os modelos sejam os mais próximos da realidade possível, incluindo detalhes tais como vegetação e poças de água. As simulações foram feitas para diferentes configurações de antenas, frequências e distância das antenas em relação ao solo. As conclusões foram que o GPR tem potencial para mapear as minas e que as poças de água, vegetação e composição complexa do solo podem afetar no desempenho do GPR para este fim.

3.3.2. Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo

Na presente pesquisa, simulações GPR dos alvos enterrados na Linha 3 do SCGR-II foram elaboradas utilizando o software ReflexW® (Sandmeier, 2016). O objetivo da simulação numérica é obter o padrão de reflexão GPR sobre cada alvo e comparar com os resultados reais, visando melhorar o conhecimento das reflexões GPR sobre alvos conhecidos.

O software utilizado para as simulações numéricas tem como base o método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (Finite Difference Time Domain – FDTD), que se trata de um método numérico utilizado para discretizar equações diferenciais (Yee, 1966). A discretização das derivadas temporais e espaciais é feita por meio de diferenças finitas centrais, o que possibilita trabalhar com as equações de Maxwell na forma discreta e com isso descrever o comportamento de campos eletromagnéticos em meios 1D, 2D e 3D, em ambiente computacional.

Os modelos são construídos de forma interativa, onde o usuário cria um *background geológico*, e insere diferentes feições geológicas ou utilitários (i.e. alvos ou interferências) dentro deste background. O espaço onde são construídos os modelos devem possuir dimensões bem definidas, tal como as propriedades elétricas / magnética e geometria dos

materiais envolvidos modelo (Tabelas 3.3 e 3.4). Por último, escolhe-se a frequência da onda eletromagnética que irá interagir com os materiais inseridos e os incrementos espaciais e temporal (Δx , Δy e Δt) que definem a malha de Yee (1966), base do método FDTD.

Os incrementos espaciais e temporal devem obedecer o critério de estabilidade de Courant (equação 24) para que o método FDTD funcione sem problemas numéricos, onde o software fornece os valores críticos para que o usuário não tenha problemas numéricos para a simulação.

$$\Delta t \leq \frac{1}{v_p} \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}}} \quad (24)$$

Onde v_p é a velocidade de propagação do campo eletromagnético.

Para a abordagem mais aprofundada do método FDTD, recomenda-se a leitura de Innan & Marshall (2001) e Taflov (1998).

Na presente pesquisa, o modelo criado tem como objetivo simular perfis GPR 2D sobre a Linha 3 do SCGR – II para diferentes frequências, para posterior comparação com os perfis GPR adquiridos sobre este local. Os resultados sintéticos são comparados com os resultados reais e são apresentados no Capítulo 5.

Tabela 3.3. Propriedades elétricas e magnética utilizadas para a construção dos modelos numéricos. (Adaptado de SVORČIK et. al, 2000; Daniels, 2007; Rodrigues, 2004; Borges, 2007; Yang et. al, 2014).

Material	ϵ	σ (S/m)
Ar	1	0
Água doce	81	0,0005
Água salgada	81	3
PVC	3,5	0
Polietileno	2,25	0
Concreto	7	10^{-5}
Ferro	1	10^{+9}
Cerâmica	6	10^{-7}
Solo argilo – arenoso (SCGR – II)	18	0,01

Tabela 3.4. Geometria dos alvos enterrados ao longo da Linha 3 do SCGR – II e as respectivas profundidades.

Posição (m)	Material	Fluido	Diâmetro interno (mm)	Diâmetro externo (mm)	Profundidade (m)
1	Polietileno	Ar	14,4	20,0	0,46
2	Polietileno	Ar	26,0	32,0	0,45
3	PVC	Água	71,6	75,0	0,51
4	PVC	Água	95,0	100,0	0,47
5	Ferro	Ar	43,0	50,0	0,47
6	Ferro	Ar	68,0	75,0	0,46
7	Ferro	Ar	90,0	100,0	0,52
8	Polietileno	Água	14,4	20,0	0,42
9	Polietileno	Água	26,0	32,0	0,42
10	PVC	Ar	95,0	100,0	0,44
11	Cerâmica	Ar	70,0	100,0	0,47
12	Cerâmica	Ar/Água	110,0	150,0	0,45
13	Cerâmica	Ar/Água	156,0	200,0	0,43
14	PVC	Ar/Água	145,0	150,0	0,45
15	PVC	Ar/Água	194,4	200,0	0,45

17	Polietileno	Ar	34,0	40,0	0,95
18	Polietileno	Ar	55,4	63,0	0,91
19	PVC	Água	71,6	75,0	0,93
20	PVC	Água	95,0	100,0	0,95
21	Ferro	Ar	43,0	50,0	1,02
22	Ferro	Ar	68,0	75,0	1,06
23	Ferro	Ar	90,0	100,0	1,04
25	Ferro	Ar	38,0	42,0	0,51
27	Polietileno	Água	14,4	20,0	1,08
28	Polietileno	Água	26,0	32,0	1,07
29	PVC	Ar	95,0	100,0	0,97
30	Cerâmica	Ar	70,0	100,0	0,98
31	Cerâmica	Ar/Água	110,0	150,0	0,93
32	Cerâmica	Ar/Água	156,0	200,0	0,96
33	Cerâmica	Ar/Água	256,0	300,0	1,02
34	PVC	Ar/Água	145,0	150,0	0,99
35	PVC	Ar/Água	194,4	200,0	0,92
36	PVC	Ar	293,0	300,0	0,95
38	PVC	Água	71,6	75,0	1,47
39	PVC	Água	95,0	100,0	1,50
40	Ferro	Ar	68,0	75,0	1,49
41	Ferro	Ar	90,0	100,0	1,47
42	PVC	Ar	95,0	100	1,48
43	Cerâmica	Ar	70,0	100	1,46
44	Cerâmica	Ar/Água	110,0	150,0	1,46
45	Cerâmica	Ar/Água	156,0	200,0	1,44
46	Cerâmica	Ar/Água	256,0	300,0	1,46
47	PVC	Ar/Água	145,0	150,0	1,50
48	PVC	Ar/Água	194,4	200,0	1,47
49	PVC	Ar	293,0	300,0	1,49

Capítulo 4

Aquisição e processamento de dados

4.1 Equipamentos e softwares

Para as aquisições dos dados foram utilizados os equipamentos SIR- 3000 e SIR – 4000 da empresa GSSI. Ambos são compostos por pares de antenas transmissoras e receptoras, computador (unidade de controle) e hodômetro. As conexões entre antenas, computador e hodômetro são por meio de cabos elétricos. Na Figura 4.1 é apresentada uma foto do sistema GPR SIR-4000 utilizado nesta pesquisa.



Figura 4.1: Sistema de aquisição de dados GPR SIR – 4000 (GSSI)

A antena transmissora transmite a onda eletromagnética que se propaga pelo subsolo, e ao encontrar algum contraste de propriedades elétricas e/ou magnética, ocorre o fenômeno de reflexão que é captado pela antena receptora. Essa informação é transmitida por meio de um cabo elétrico para o computador, onde o resultado é armazenado e pode ser visualizado em tempo real. Os dados são apresentados na forma de um radargrama, que corresponde a

uma série de traços contendo as amplitudes dos eventos de reflexões, adquiridos ao longo de perfis em tempo. A distância entre cada traço é ajustada de acordo com o objetivo do trabalho proposto, onde o hodômetro é responsável por enviar sinais eletrônicos à antena transmissora a cada intervalo de traço (Δx) ajustado nos parâmetros de campo no computador.

Após a aquisição, os dados são processados em ambiente computacional, com intuito de aprimorar a visualização dos alvos e/ou feições geológicas. Para isso, utilizou-se o software ReflexW® (Versão 7.0) (Sandmeier, 2016). Neste software é possível fazer o processamento dos dados e visualizá-los nos modos 2D e 3D.

4.2. Aquisição dos dados

Foram adquiridos dados GPR nos modos 2D e 3D utilizando antenas de 200, 270, 400 e 800 (Dual Frequency) MHz sobre a área do SCGR – II com intuito de mapear as interferências no subsolo (Figura 4.2). O modo 3D consiste na aquisição dos dados ao longo de perfis paralelos. Visto que o foco do presente trabalho é a Linha 3, escolheu-se um grid 3D com espaçamento dos perfis de 0,2 m ($\approx 1/4$ do tamanho dos alvos) entre si iniciando da posição de 6 m e indo até 10 m para cobrir toda a área de influência da Linha 3 (Figura 4.3). A aquisição dos dados para todas as antenas foi feita utilizando espaçamentos entre os traços de 2 cm, e para as frequências de 270, 400 e 800 MHz utilizou-se também o espaçamento de 1 cm entre os traços com intuito de obter maior resolução lateral.



Figura 4.2. Aquisição GPR com antenas de 200 MHz (a), 270 MHz (b), 400 MHz (c), 800 MHz (d) (Dual frequency).

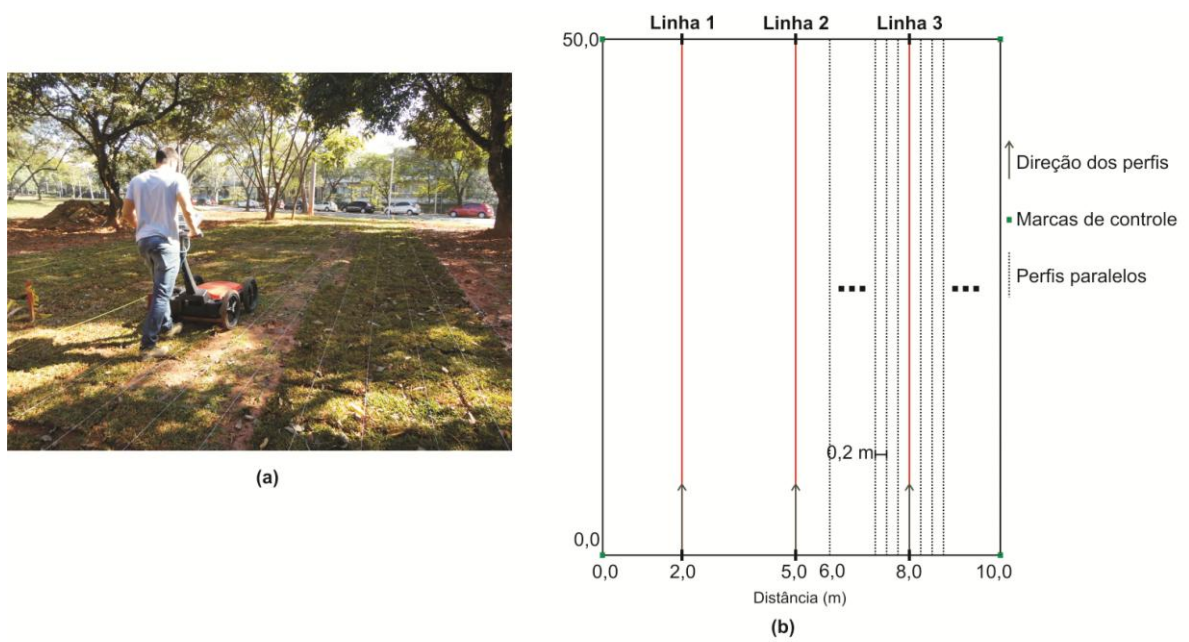


Figura 4.3. Modo 3D de aquisição de dados. Os perfis são espaçados de 0,2 m entre si da posição de 6 m até 10 m.

4.3. Processamento dos dados

O processamento dos dados tem como objetivo melhorar a razão sinal/ruído, visando realçar as reflexões provenientes dos alvos em subsuperfície. Para isto, utilizou-se uma rotina de processamento de dados conforme a Figura 4.4.



Figura 4.4. Rotina de processamento de dados GPR.

Uma das primeiras etapas do processamento dos dados adquiridos é a correção do tempo – zero. Esta correção remove os primeiros nanosegundos de um traço de GPR que não contem informações a respeito da subsuperfície. Esse gap de falta de informação é o intervalo de tempo que o computador (data log) demora pra receber o primeiro sinal emitido pela antena transmissor, ajustado no inicio da aquisição dos dados. Essa correção tem por finalidade ajustar o tempo inicial de cada traço a primeira chegada identificada. Esta correção é importante para a conversão do tempo em profundidade, pois uma vez que o tempo duplo associado a cada evento de reflexão está atrasado, isto causará um erro no cálculo da profundidade associado aos eventos.

Durante a aquisição dos dados em campo, aplica-se ganhos de tela para melhorar visualização dos dados em tempo real. No ambiente computacional esse ganho é removido para que o dado obtido fique como dado bruto, i.e, sem ganhos. Então, inicia-se o processo de remoção de ruídos por meio de filtros e aplicação de ganhos para realçar as anomalias de interesse.

A filtragem nos dados GPR ocorre no domínio do tempo, espaço e de frequência, para que os ruídos sejam removidos ou ao menos minimizados. O filtro de frequência utilizado é do tipo passa banda que tem por objetivo remover os ruídos de baixa e alta frequência, tomando como base a frequência central da antena utilizada. Já o filtro temporal aplicado aos dados é conhecido como “background removal”. Este filtro calcula a média das amplitudes dos traços em uma janela temporal definida e posteriormente subtrai-se dos traços originais a média obtida. Este filtro tem como característica remover os refletores horizontalizados e com isso realçar os refletores pontuais. E por último, utilizou-se o filtro espacial “média móvel” com objetivo de suavizar a continuidade lateral dos refletores, realçar as anomalias e remover pontos espúrios localizados.

Além dos efeitos dos ruídos que dificultam a visualização das anomalias de interesse, outros efeitos como espalhamento geométrico da onda e atenuação do sinal no subsolo também dificultam a visualização adequada dos alvos de interesse. Para contornar este problema, aplicou-se uma função “ganho” no domínio do tempo que tem como objetivo aumentar a amplitude das reflexões com a profundidade. Tal função conta com parâmetros lineares e exponenciais que são ajustados de acordo a necessidade.

Após os dados serem processados, é necessário converter o perfil GPR de tempo em profundidade. Para isto, é necessário conhecer a velocidade da onda eletromagnética no subsolo, que pode ser obtida por meio de técnicas discutidas no Capítulo 3. Para o presente trabalho, apenas uma das técnicas foi empregada, que faz uso da equação ($v = 2h/t$), onde v é a velocidade do meio, h é a profundidade de algum alvo enterrado na área de estudos e t é o tempo trânsito da onda associada à reflexão da onda sobre o alvo. Visto que a aquisição dos dados foi realizada sobre um ambiente controlado, onde se sabe com precisão o tipo e a profundidade dos alvos enterrados, calibrou-se a velocidade por meio desta técnica, justificando assim esta escolha. Uma vez que a velocidade é calculada, transforma-se o eixo vertical do radargrama de tempo em profundidade.

Os perfis adquiridos ao longo da Linha 3 possuem 50 m de comprimento, i.e, uma área relativamente extensa, podendo contar com variações laterais e verticais de concentração de água, litologia e/ou compactação do solo, que podem influenciar significativamente a velocidade da onda eletromagnética. Para que o processamento, visualização dos dados e conversão do tempo em profundidade seja feito de forma adequada, dividiu-se os perfis em 3 partes, onde o critério escolhido foi a profundidade real dos alvos enterrados. Para o trecho

entre 0 e 16 m os alvos estão enterrados em profundidades próximas de 0,5 m; entre 16 e 37 m estão enterrados em profundidades próximas de 1,0 m; e entre 37 – 50 m em 1,5 m, conforme já apresentado na Figura 2.5. Em cada trecho utilizou-se os tubos metálicos com 10 cm de diâmetro como referencia para a conversão do tempo em profundidade. Na Tabela (4.1) é apresentado as informações utilizadas para calibrar a velocidade em cada trecho dos perfis.

Tabela 4.1. Velocidade da onda eletromagnética obtida para alvos metálicos da Linha 3.

Posição do alvo (m)	Profundidade real (m)	Tempo duplo (ns)	Velocidade (m/ns)
7	0,52	10,109	0,100
23	1,04	27,570	0,075
41	1,47	38,138	0,077

Aplicando as velocidades calculadas em cada trecho dos perfis, converte-se o tempo duplo em profundidade e, desta forma, correlaciona-se com a profundidade do topo das hipérboles dos alvos identificadas nos radargramas com as respectivas profundidades reais, aumentando a confiabilidade na interpretação dos resultados.

Uma alternativa para o cálculo das velocidades no subsolo e, portanto, para a conversão do tempo em profundidade, pode ser feita com base no conceito de velocidade intervalar de Dix (1966), empregado por Poluha et al., (2017) em dados GPR adquiridos no SCGR – I do IAG/USP, onde foi proposto uma metodologia baseada neste conceito com objetivo de estimar a profundidade dos alvos com maior precisão. Embora essa metodologia tenha sido empregada para um perfil de 30 m, ela se torna interessante quando se deseja converter o eixo temporal em profundidade em áreas extensas com poucas hipérboles de difração identificadas em radargramas. Para o caso do SCGR – II, a Linha 3 possui 50 m de extensão e a análise dos dados foi feita para três trechos, i.e, perfis pequenos, onde se espera pequenas variações na velocidade da onda em subsuperfície, justificando desta forma a escolha da conversão do tempo em profundidade por meio das velocidades apresentados na Tabela 4.1.

Capítulo 5

Discussão dos Resultados

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados GPR reais e sintéticos, divididos em 2 tópicos. No primeiro são analisados e discutidos os radargramas reais para três trechos da Linha 3 do SCGR – II do IAG/USP. No segundo tópico são apresentados e discutidos os resultados sintéticos em comparação com os resultados reais.

5.1. Resultados reais

Os perfis GPR ao longo da Linha 3 do SCGR-II do IAG/USP foram adquiridos com espaçamento de traços a cada 2 cm e possuem 50 m de comprimento. Devido ao grande número de alvos enterrados nesta linha, os resultados são apresentados em 3 partes, baseadas no critério de profundidade em que os alvos foram instalados. O primeiro trecho do perfil se estende de 0 a 17 m, o segundo de 16 a 37 m e o terceiro de 37 a 50 m, onde os alvos estão enterrados em 0,5 m, 1,0 m e 1,5 m de profundidade, respectivamente.

A Figura 5.1 mostra um croqui com a disposição dos alvos instalados em 0,5 m de profundidade para o primeiro trecho da Linha 3, seguido dos resultados GPR para as frequências de 200, 270, 400 e 800 MHz.

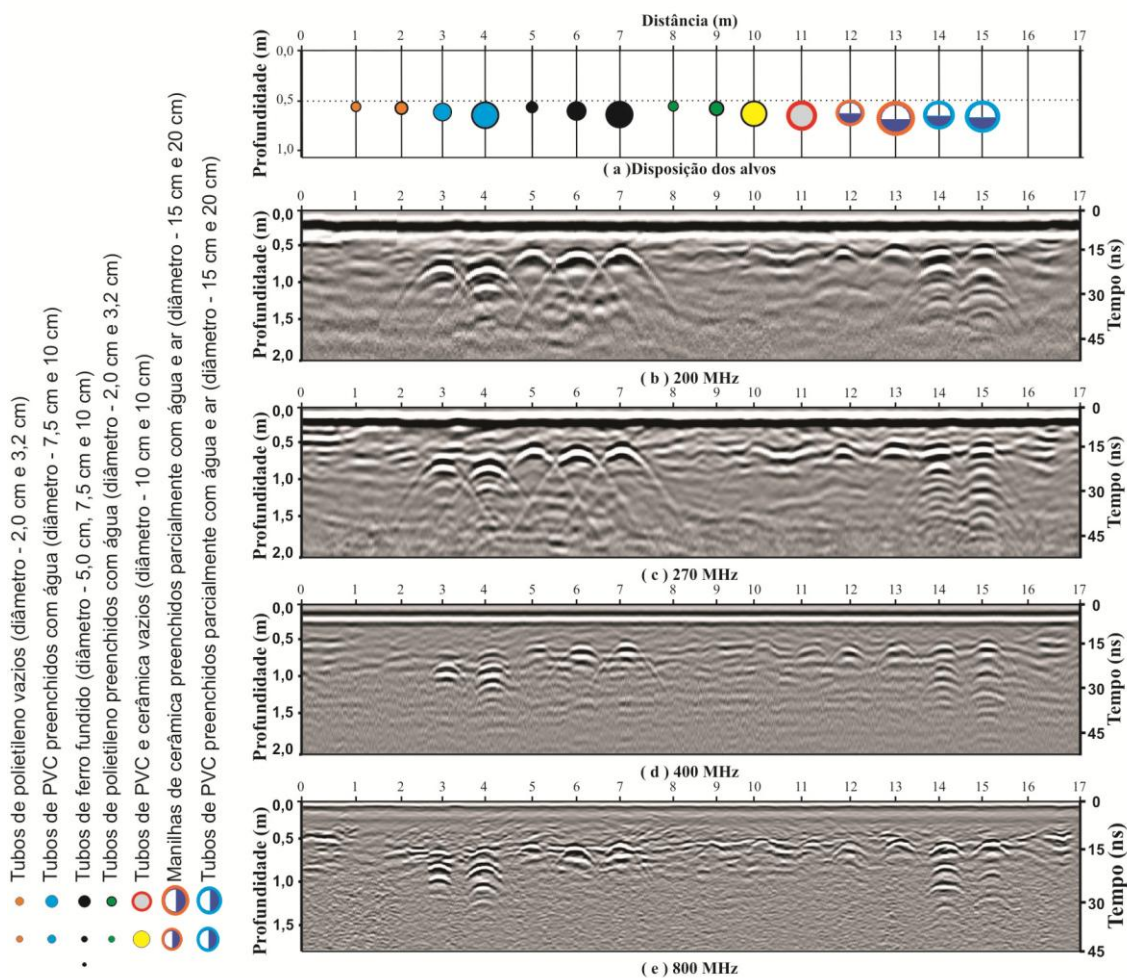


Figura 5.1. Resultados GPR sobre os alvos instalados em 0,5 m de profundidade para o trecho entre 0 e 17 m da Linha 3 do SCGR-II do IAG/USP, adquiridos com espaçamento de um traço a cada 2 cm. a) croqui com a disposição dos alvos. b) 200 MHz. c) 270 MHz. d) 400 MHz. e) 800 MHz.

As interferências no subsolo são caracterizadas por hipérbolas, que apresentam características diferentes, sendo um indicativo de que o tipo de material, fluido que os preenche e tamanho dos alvos definem as assinaturas hiperbólicas sobre cada alvo.

O tubo de PVC preenchido com água (posição 4 m) apresenta um padrão de reverberação de hipérbolas, observado para as frequências de 200, 270, 400 e 800 MHz, sendo que em 0,5 m de profundidade tem-se a reflexão referente ao topo do tubo, seguido pela reflexão da base do tubo e as reverberações do sinal aprisionado dentro do tubo. Para as frequências de 400 e 800 MHz, observam-se mais hipérbolas, devido à reverberação da onda dentro do tubo preenchido por água. Para o mesmo tubo de PVC de 10 cm de diâmetro, porém vazio, i.e., preenchido com ar (posição 10 m), apresenta maiores dificuldades para identificá-lo em comparação com o mesmo tubo preenchido com água (posição de 4 m), não sendo possível identificar a reflexão referente à base do tubo. As diferenças observadas para

este alvo com água e com ar podem ser explicadas com base nos valores de constante dielétrica para a água ($\epsilon = 81$) e ar ($\epsilon = 1$), i.e, onde se tem água tem-se um maior contraste de propriedade elétrica com o solo em relação ao ar, justificando desta forma a maior amplitude da hipérbole para o tubo preenchido com água, sendo assim, um indicativo de que tubos de PVC preenchidos com água são mais fáceis de serem detectados do que os preenchidos com ar.

Nas posições 7, 10 e 11 m, têm-se tubos metálicos, PVC e de cerâmica, respectivamente, preenchidos com ar e de diâmetros internos de 10 cm cada. As amplitudes das hipérbolas de difração referente aos alvos são maiores para o tubo metálico e cerâmico em comparação com o tubo de PVC, indicando que além do fluido que preenche o alvo, o tipo de material que compõe o alvo também possui grande influência na resposta GPR. Observa-se que a reflexão referente ao tubo metálico apresenta a maior amplitude, sendo facilmente identificado por todas as frequências estudadas. Isto ocorre devido ao fato de que o tubo metálico possui alta condutividade elétrica ($\sigma = 10^{+9}$ S/m) estar hospedado em um solo argilo – arenoso ($\sigma = 10^{-2}$ S/m), causando um grande contraste de impedância elétrica e consequentemente gerando uma forte reflexão (eq. 22). Seguindo a mesma linha de raciocínio, observa-se que o tubo cerâmico apresenta reflexões de maior amplitude, quando comparado ao tubo de PVC, sendo um indicativo de que o tubo cerâmico apresenta maior contraste de propriedades elétricas em relação ao solo do que o tubo de PVC.

Nas posições de 12, 13, 14 e 15 m, tem-se as manilhas de cerâmica e tubos de PVC, respectivamente, preenchidos parcialmente com 1/2 ar e 1/2 água. Observa-se que os tubos de PVC (posições 14 e 15 m) são facilmente detectados e fornecem reflexões referentes ao topo do alvo, base do alvo e reverberações do sinal, indicando a presença de água. Porém, o mesmo não ocorre com os tubos de cerâmica.

Comparando os tubos de PVC de 7,5 cm e 10 cm de diâmetro e, cheios de água, das posições 3 e 4 m, com os tubos das posições 14 e 15 m com diâmetros de 15 e 20 cm, respectivamente, nota-se uma grande semelhança entre as respostas, indicando uma possível ambiguidade para interpretar se os alvos estão preenchidos totalmente ou parcialmente com água. Essa ambiguidade pode ser esclarecida levando-se em conta a polaridade das hipérbolas referentes a cada alvo, onde os tubos preenchidos totalmente por água (posições 3 e 4 m) apresentam uma sequência de polaridade (branco/preto/branco), e os tubos preenchidos

parcialmente com água (posições 14 e 15 m) apresentam a sequência de polaridade (preto/branco/preto).

Embora as frequências de 200 e 270 MHz identifiquem boa parte dos alvos, as frequências de 400 e 800 MHz fornecem maior resolução, tanto para identificar as tubulações quanto para distinguir as reflexões do topo e base dos alvos, assim como as reverberações, indicando que a aquisição dos perfis GPR com diferentes antenas podem fornecer informações complementares a respeito das interferências no subsolo.

Nas posições 1, 2, 8 e 9 m têm-se os tubos de polietileno preenchidos por ar (1 e 2 m) e água (8 e 9 m), respectivamente, que não foram detectados com clareza nos radargramas da Figura 5.1, podendo estar associado ao pequeno diâmetros dos alvos (2 e 3,2 cm) e o espaçamento entre os traços usado na aquisição dos dados (1 traço/ 2 cm). Para verificar essa questão, a Figura 5.2 mostra os resultados GPR de 200, 400 e 900 MHz adquiridos com espaçamento de 1 traço / 1 cm.

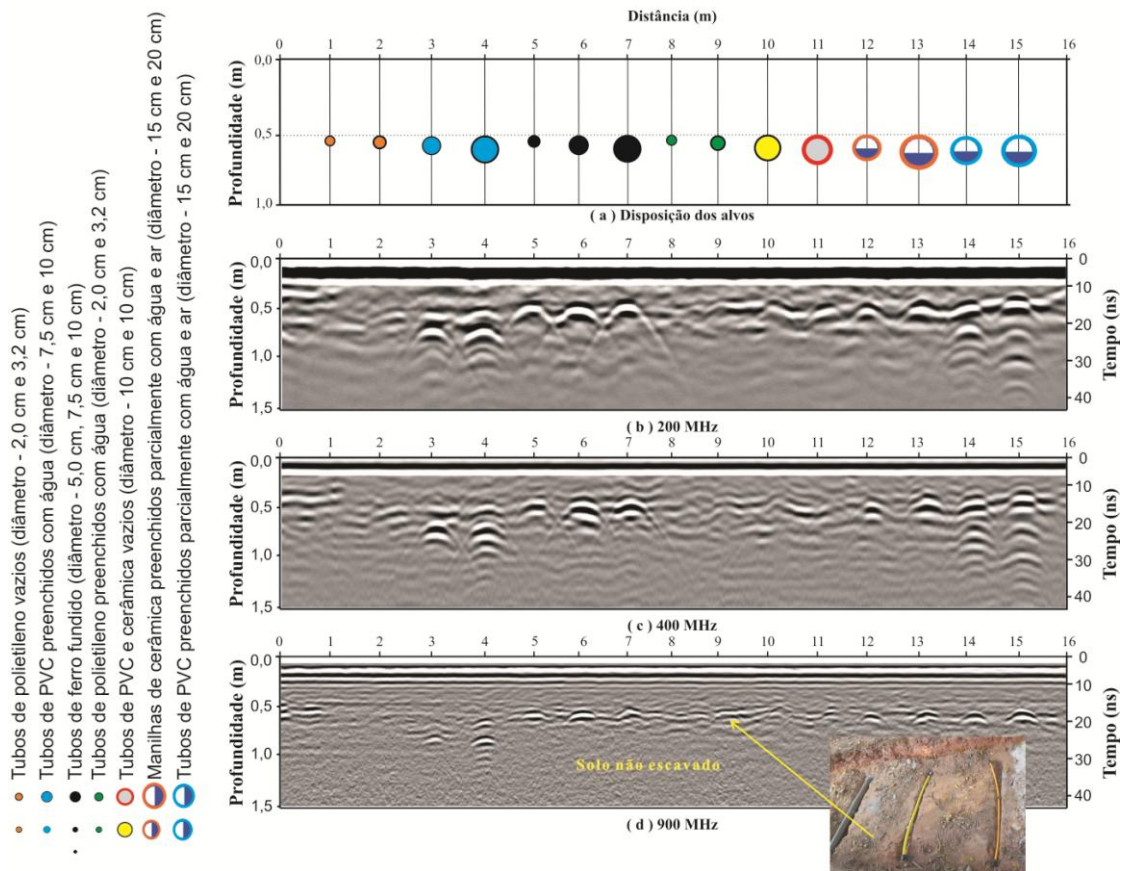


Figura 5.2. Resultados GPR sobre os alvos instalados em 0,5 m de profundidade para o trecho entre 0 e 16 m da Linha 3 do SCGR - II do IAG/USP, com espaçamento entre os traços de 1 traço / 1 cm. a) croqui com a disposição dos alvos. b) 200 MHz. c) 400 MHz. d) 900 MHz.

Comparando os resultados da Figura 5.1 com a Figura 5.2, observa-se que alguns refletores são mais bem definidos, como por exemplo, os alvos das posições 14 e 15 m. Na posição de 9 m encontra-se posicionado o tubo de polietileno preenchido por água com 3,2 cm de diâmetro, onde na Figura 5.2d tem-se um refletor localizado nesta mesma posição, podendo ser interpretado como sendo o tubo de polietileno. Por outro lado, a fotografia apresentada na Figura 5.2d mostra os tubos de polietileno de 2 e 3,2 cm e um tubo de PVC com 10 cm de diâmetro posicionados sobre o solo não escavado (0,5 m de profundidade) em pequenas trincheiras perpendiculares a vala, onde o topo dos tubos de polietileno praticamente coincide com a base do solo não escavado. Além disso, a forma da reflexão é horizontalizada, o que sugere que o refletor tenha aspecto também horizontal, e para os tubos em geral espera-se que a reflexão tenha forma hiperbólica. Portanto, interpreta-se o refletor da posição 9 m como sendo base da vala, i.e, o solo não escavado.

Mesmo com a densidade dos traços maior, os resultados da Figura 5.2 não permitem identificar os tubos de polietileno com clareza. Para entender os motivos pelo qual esses tubos não são identificados nos radargramas apresentados, gerou-se 6 modelos sintéticos para diferentes situações: i) utilizando diferentes espaçamentos entre os traços; ii) tubo de polietileno de mesmo diâmetro hospedado em diferentes backgrounds; iii) tubo de polietileno com diferentes diâmetros; iv) tubo de polietileno, PVC e de ferro com 2 cm de diâmetro dispostos em mesma profundidade; v) tubo de polietileno de mesmo diâmetro e diferentes frequências; vi) tubo de polietileno dispostos em diferentes profundidades. Esses resultados serão apresentados a seguir no tópico 5.2.

A Figura 5.3 mostra um croqui com a disposição dos alvos instalados em 1,0 m de profundidade para o segundo trecho da Linha 3 (posição de 16 à 37 m), seguido dos resultados GPR para as frequências de 200, 270, 400 e 800 MHz.

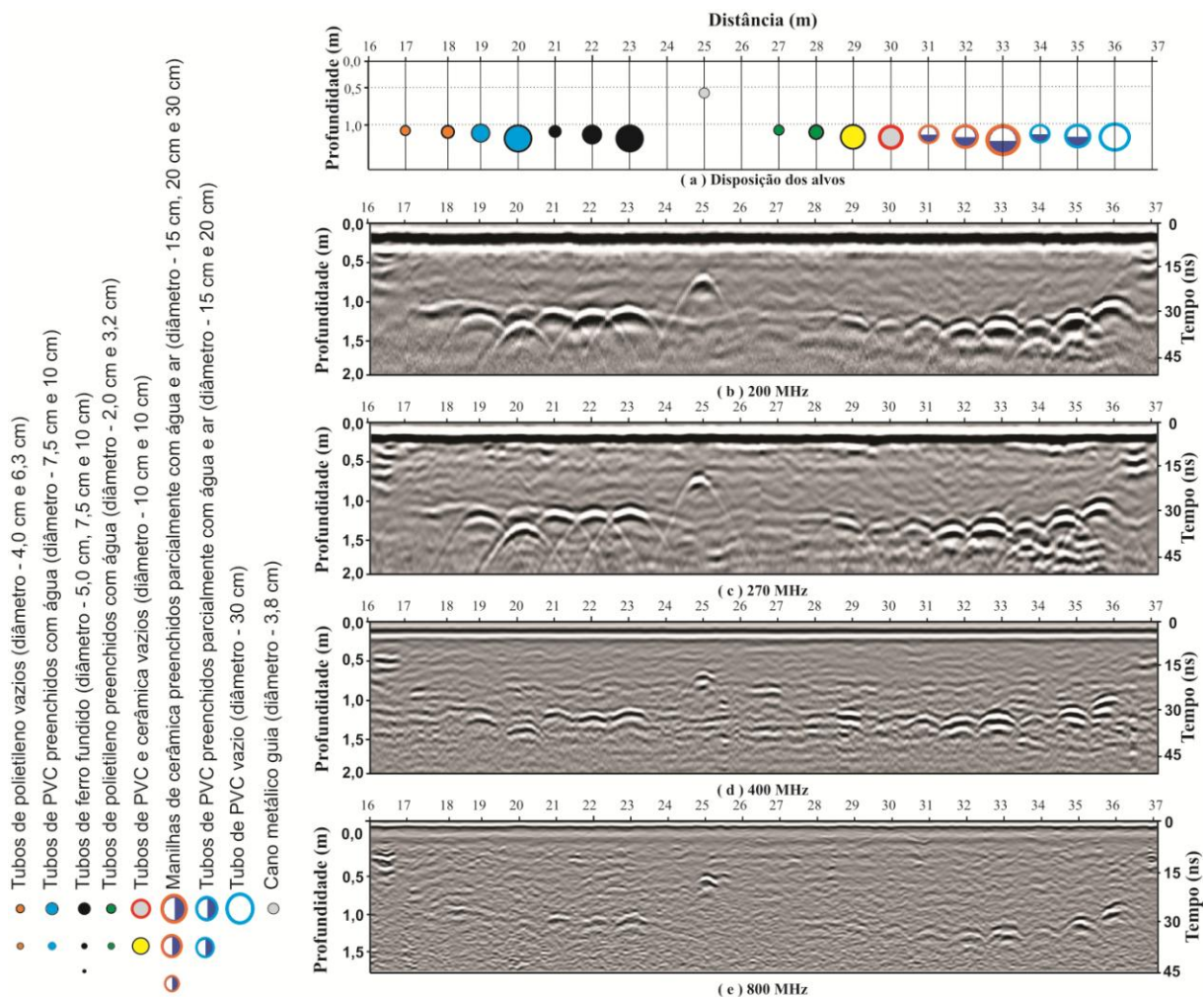


Figura 5.3. Resultados GPR sobre os alvos instalados em 1,0 m de profundidade para o trecho entre 16 e 37 m da Linha 3 do SCGR-II do IAG/USP, com espaçamento entre os traços de 1 traço/ 2 cm. a) croqui com a disposição dos alvos. b) 200 MHz. c) 270 MHz. d) 400 MHz. e) 800 MHz.

Na Figura 5.3 é possível detectar praticamente todos os alvos para as frequências de 200 MHz (b) e 270 MHz (c), com exceção dos tubos de polietileno, assim como no primeiro trecho da Linha 3. Comparando os resultados das Figuras 5.1 e 5.3, nota-se que o padrão de reflexão dos alvos é praticamente o mesmo, com a diferença de que é mais difícil identificar as reverberações da onda eletromagnética dos alvos preenchidos com água que estão em 1,0 em relação aos que estão em 0,5 m. O motivo pode estar associado ao fato de que como os tubos estão mais profundos, o sinal sofre mais atenuação no solo e com isso a amplitude do sinal é reduzida, tornado mais difícil identificar o mesmo padrão de reflexão encontrado para os alvos mais rasos.

Comparando os radargrama adquiridos para frequência de 200, 270 e 400 MHz (Figura 5.3b, 5.3c e 5.3d), observa-se que por meio das frequências de 200 e 270 MHz é possível identificar os alvos de interesse com maior facilidade e trazer mais informações

inclusive acerca do padrão de reflexão de cada tubo. Já a frequência de 400 MHz permite também identificar os alvos, porém as hipérboles não são definidas com clareza, provavelmente devido à atenuação do sinal no subsolo. Para frequência de 800 MHz (Figura 5.3e) é possível identificar parte dos alvos e trazer poucas informações acerca deles, portanto, não sendo indicada para mapear os alvos enterrados nesta profundidade.

A Figura 5.4 mostra um croqui com a disposição dos alvos instalados em 1,5 m de profundidade para o terceiro trecho da Linha 3 (posição de 37 à 50 m), seguido dos resultados GPR para as frequências de 200, 270, 400 e 800 MHz.

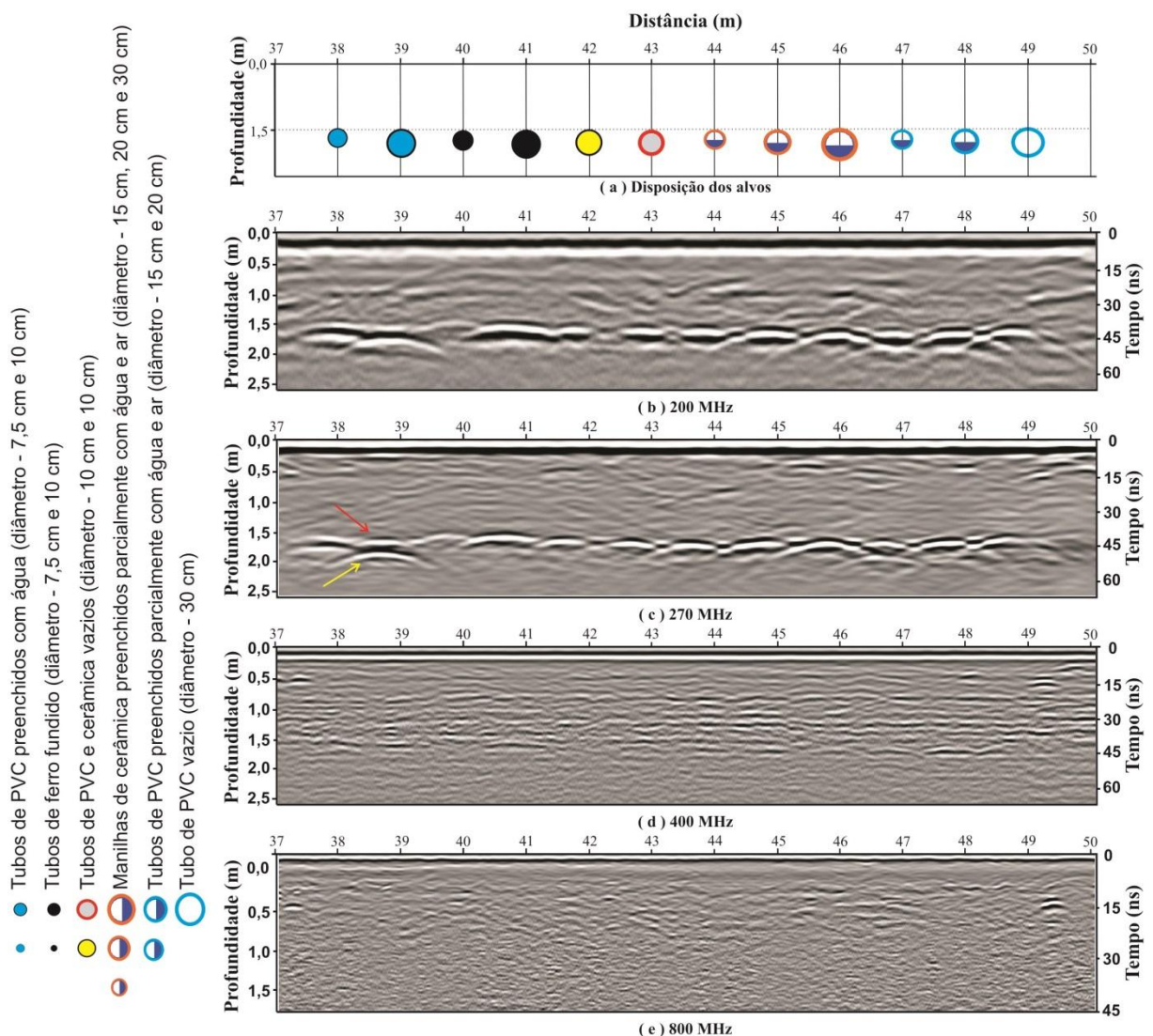


Figura 5.4. Resultados GPR sobre os alvos instalados em 1,5 m de profundidade para o trecho entre 37 e 50 m da Linha 3 do SCGR-II do IAG/USP, com espaçamento entre os traços de 1 traço/ 2 cm. a) croqui com a disposição dos alvos. b) 200 MHz. c) 270 MHz. d) 400 MHz. e) 800 MHz.

Comparando os alvos enterrados em 0,5 m (Figura 5.1), 1,0 m (Figura 5.3) e 1,5 m (Figura 5.4), nota-se que em 1,5 m as hipérboles não são tão bem definidas como em 0,5 e 1,0

m, podendo estar associado ao fato do solo conter alta concentração de argila, atenuando o sinal, fazendo com que as hipérbolas não sejam definidas por completo. Outro aspecto importante é que as reflexões identificadas referentes aos alvos em 1,5 m são parecidas, aumentando a ambiguidade para a interpretação, tornando-se difícil distinguir se o alvo está vazio, com água, parcialmente com água ou se é metálico, concreto ou PVC. Porém, a análise da polaridade da reflexão dos alvos pode contribuir para minimizar tal ambiguidade. Os alvos preenchidos totalmente com água (posições 38 e 39 m) apresentam hipérbolas com a sequência de polaridade branco/preto/branco, já tubos metálicos (posições 40 e 41 m) apresentam a sequência preto/branco/preto, assim como os tubos preenchidos parcialmente com água (47 e 48 m).

Na posição de 38 e 39 m da Figura 5.4 estão posicionados os tubos de PVC cheios de água com diâmetros de 7,5 e 10 cm, respectivamente. Na Figura 5.4c é possível identificar a reflexão referente ao topo do tubo da posição de 39 m (seta vermelha) e sua base (seta amarela). O mesmo não ocorre para tubo da posição 38 m, onde é possível identificar apenas uma hipérbole.

Outro aspecto que pode ser observado é que para alvos localizados em aproximadamente 1,5 m de profundidade, as antenas de 200 e 270 MHz se mostram mais adequadas do que as antenas de 400 e 800 MHz (Figura 5.4), pois as maiores frequências têm dificuldades de mapear grande parte dos alvos devido a profundidade que os mesmos se encontram.

Após a análise 2D dos dados reais sobre a Linha 3 do SCGR – II do IAG/USP, é apresentado e discutido os resultados sob a perspectiva tridimensional (pseudo – 3D) para a frequência de 200 MHz. A análise 3D dos dados GPR pode ser feita por meio da análise simultânea dos perfis paralelos que foram adquiridos no entorno da linha principal dos alvos (Linha 3), ou por meio da interpolação destes perfis, que podem ser visualizados sob a forma de um cubo de dados.

Na Figura 5.5 é apresentado o diagrama de cercas (Figura 5.5b) que consiste na visualização simultânea de alguns perfis paralelos e perpendiculares (resultado da interpolação), permitindo desta forma analisar o comportamento das reflexões referentes às interferências enterradas ao longo de uma área. Já o volume de dados (Figura 5.5c) consiste

na análise da seção transversal aos dados interpolados em profundidade (*depth slice*), para essa figura a profundidade apresentada é de 0,47 m.

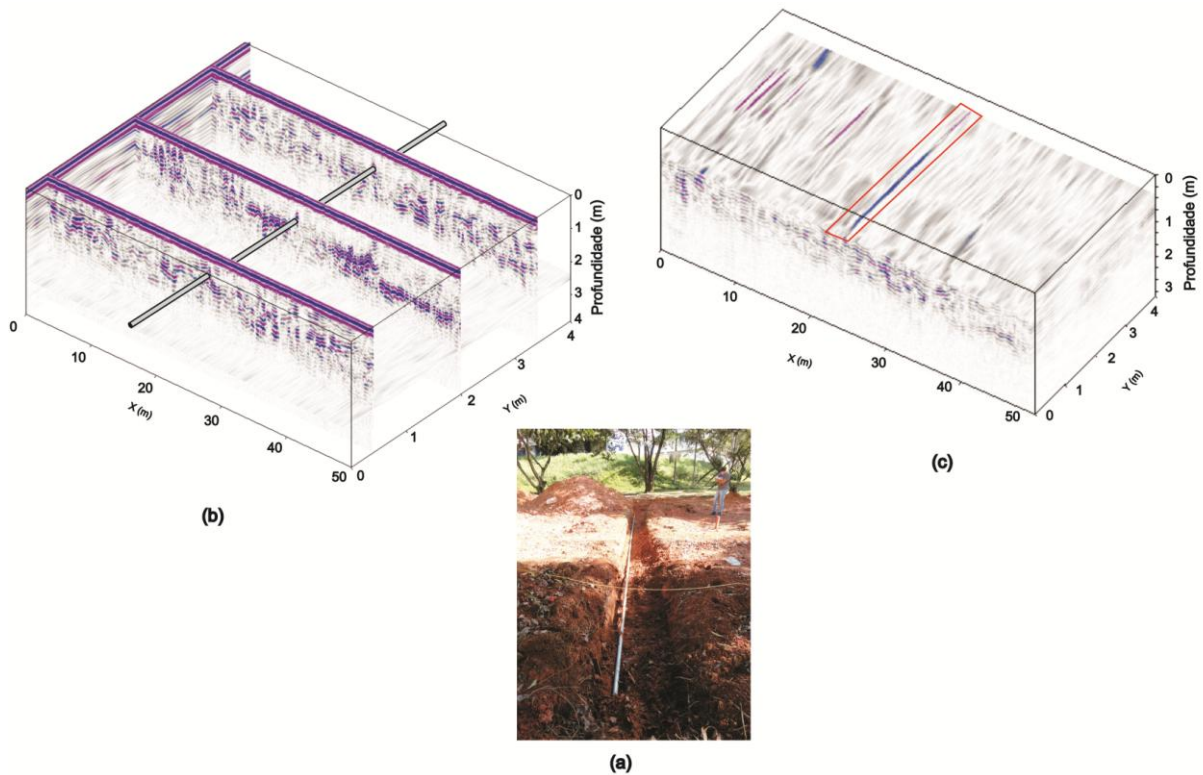


Figura 5.5. Resultados GPR sob a forma pseudo - 3D para frequência de 200 MHz. Cano metálico guia (a) sob a perspectiva do diagrama de cercas (b) e do corte em profundidade em 0,47 m (*depth slice*) (c).

Na Figura 5.5a mostra o cano metálico guia disposto em 0,47 m de profundidade, que corta perpendicularmente a Linha 3. A Figura 5.5b mostra o diagrama de cercas e a Figura 5.5c mostra um corte na profundidade de 0,47 m (*Depth Slice*). O diagrama de cercas é a visualização de perfis 2D paralelos de forma simultânea, onde a posição de $Y = 2$ m corresponde a Linha 3. Observa-se que na posição de 25 m (Figura 5.3) é identificado uma hipérbole em aproximadamente 0,47 m de profundidade, que se repete sempre na mesma posição em todos os perfis paralelos (Figura 5.5b), sendo um indicativo de que o alvo possui uma extensão que abrange todo o bloco de dados. Nesta posição foi enterrado o cano metálico de aço galvanizado com 3,8 cm de diâmetro (Figura 5.5a), com comprimento de 12 m, cortando perpendicularmente à direção dos perfis adquiridos. Na Figura 5.5c o cano metálico guia é identificado pelo retângulo vermelho delimitado, indicando a orientação perpendicular à direção dos perfis adquiridos em campo. Esse resultado mostra que a análise 3D de dados GPR pode fornecer informações acerca da orientação do alvo em relação à área de estudo.

Na Figura 5.6 é apresentado o resultado 3D para antena de 200 MHz sob a forma de depth slices, que correspondem à seções transversais em profundidades dos perfis paralelos interpolados (volume de dados) para 3 profundidades diferentes, que correspondem a profundidade média dos alvos enterrados nos trechos discutidos nas Figuras 5.1, 5.3 e 5.4.

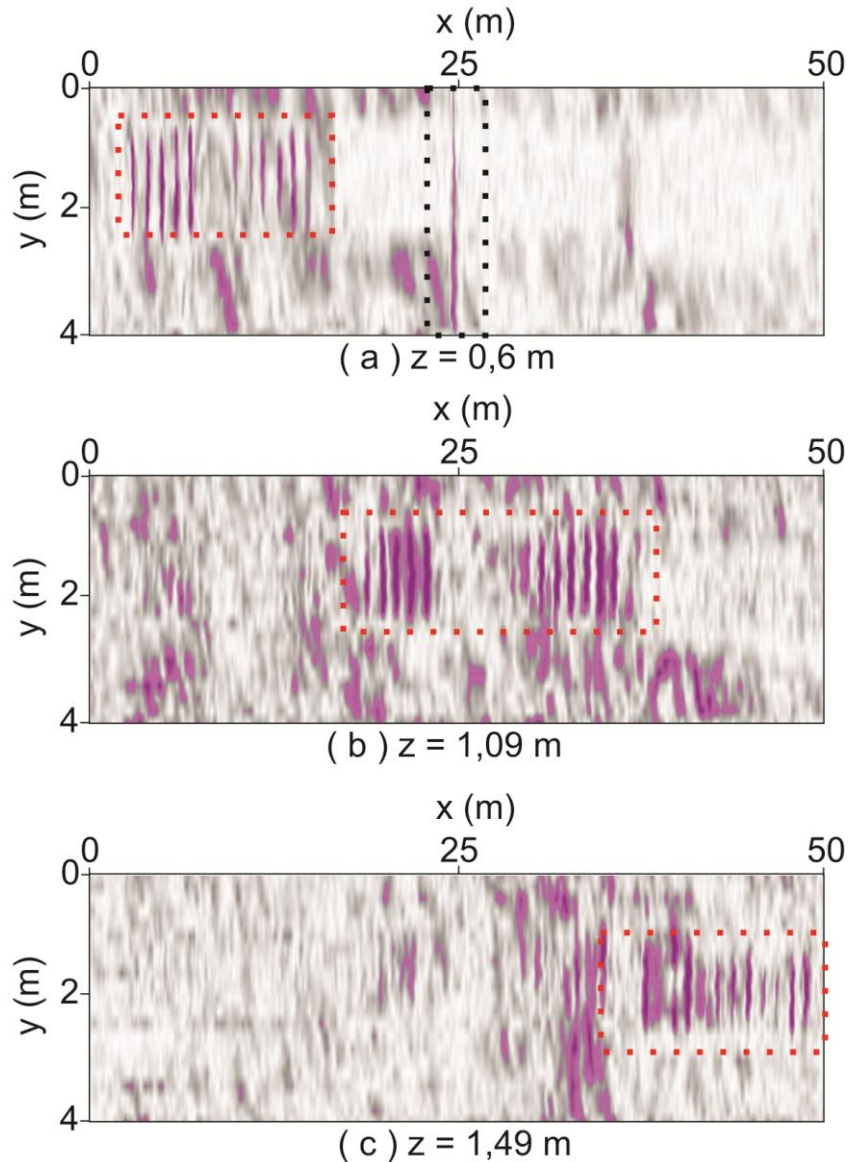


Figura 5.6. Resultados GPR para frequência de 200 MHz sob a perspectiva Depth Slices. (a) profundidade de 0,6 m; (b) profundidade de 1,09 m; (c) profundidade de 1,49 m. Os retângulos vermelhos evidenciam os alvos localizados nos 3 horizontes de profundidades. O retângulo preto evidencia o cano metálico guia.

Analisando os resultados apresentados na Figura 5.6, observa-se que os tubos enterrados (retângulos pontilhados em vermelho) possuem menores dimensões em comparação ao cano metálico guia (retângulo pontilhado em preto), mostrando a diferença

entre as respostas GPR em profundidade referente à interferências com maior e menor dimensão, podendo ser utilizada para estimar a o tamanho do alvo em relação à área de estudo.

5.2. Resultados sintéticos

A Figura 5.7 mostra um croqui com a disposição dos alvos para o primeiro trecho da Linha 3 do SCGR-II, seguido de um perfil GPR real de 270 MHz e o resultado da simulação numérica de 270 MHz para o mesmo trecho. O objetivo aqui é fazer uma comparação entre o perfil GPR real e o resultado sintético para a mesma frequência, gerado por meio de modelagem numérica FDTD.

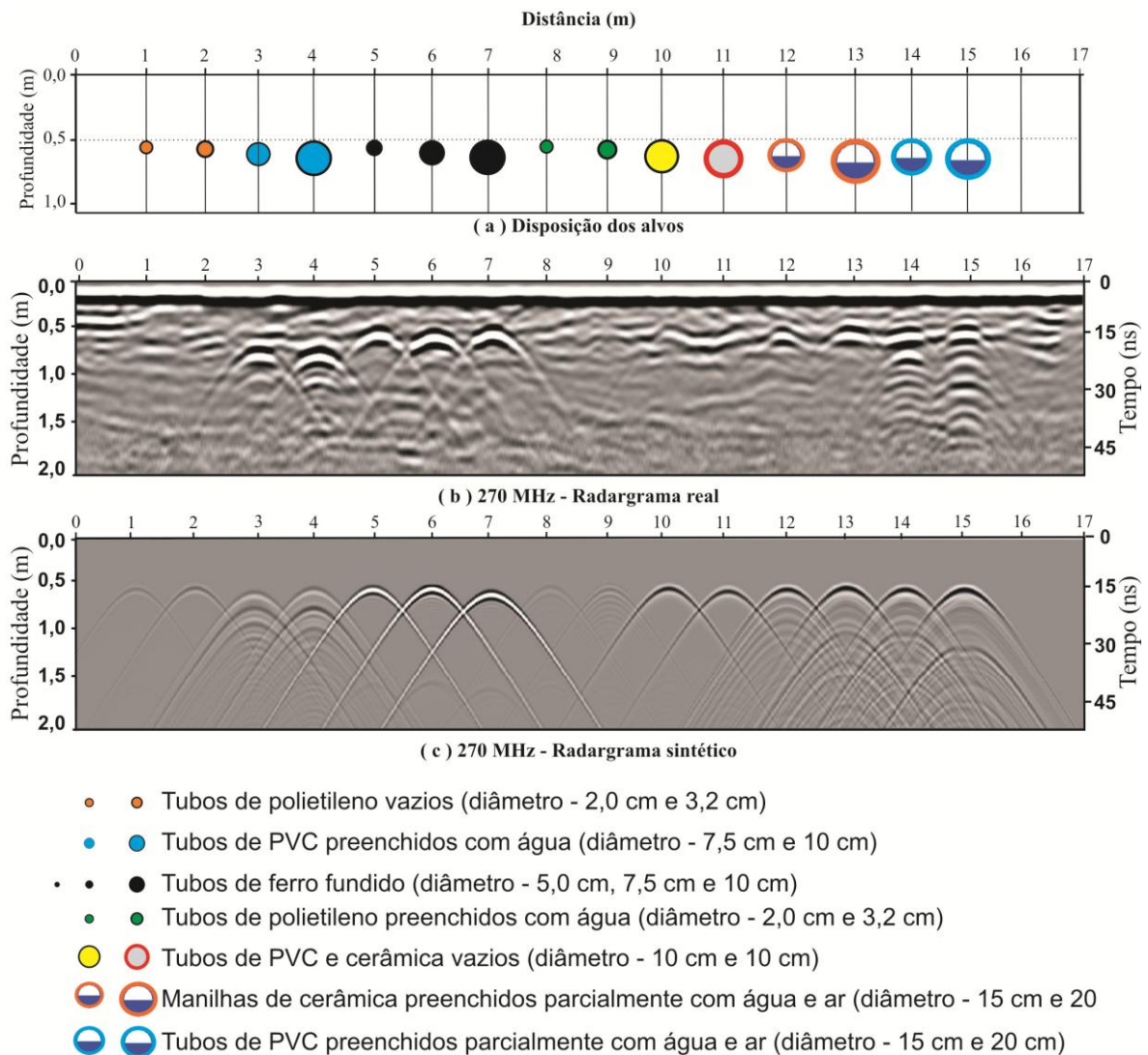


Figura 5.7. Resultados GPR e simulações numéricas sobre os alvos instalados em 0,5 m de profundidade para o trecho entre 0 e 17 m da Linha 3 do SCGR-II do IAG/USP com espaçamento entre os traços de 1 traço/1 cm. a) croqui com a disposição dos alvos. b) Perfil GPR real de 270 MHz. c) Perfil GPR sintético de 270 MHz.

A comparação dos resultados da Figura 5.7 (b) e (c) mostra uma boa concordância entre os padrões de reflexões. Os alvos preenchidos com totalmente ou parcialmente com água (posições 3, 4, 14 e 15 m) fornecem hipérbolos referentes ao topo, base e reverberações do sinal. As reflexões referentes aos tubos metálicos possuem maiores amplitudes em relação os demais alvos. Na Figura 5.7b (radargrama real), nota-se que os tubos cerâmicos preenchidos parcialmente com água (posições 12 e 13 m) não apresentam reflexões da base e nem reverberações. Por outro lado, na Figura 5.7c (radargrama sintético) os alvos nas posições 12 e 13 m são caracterizados por reflexões no topo, na base e reverberações. Esse padrão de reflexão também foi identificado nos tubos de PVC parcialmente preenchidos com água (posições 14 e 15 m). O fato observado na Figura 5.7b pode ser explicado pelo motivo de que no momento em que os tubos cerâmicos foram preenchidos com água, colocou-se um tampão de cerâmica e cimento-cola para vedar as extremidades dos tubos para evitar o vazamento de água. O radargrama sintético indica que as reflexões da base e as reverberações deveriam aparecer no radargrama real. Portanto, entende-se que a água presente nos tubos de cerâmica tenha vazado para o subsolo, restando apenas ar dentro dos mesmos, explicando dessa forma o resultado apresentado na Figura 5.7b para os alvos das posições 12 e 13 m.

Para os tubos de polietileno das posições 1, 2, 8 e 9 m da Figura 5.7c, observa-se que as amplitudes das reflexões referentes a esses alvos são bastante reduzidas em relação às demais, justificando a dificuldade de se identificar tais tubos nos resultados reais das Figuras 5.1 e 5.2.

A seguir são feitas algumas simulações numéricas GPR 2D, visando aprofundar os conhecimentos para explicar com mais detalhes as razões pelo qual os tubos de polietileno enterrados no subsolo do SCGR-II não puderam ser mapeados com clareza pelo GPR. Neste sentido, seis modelos sintéticos foram elaborados com intuito de verificar qual seria a resposta GPR sobre tubos de polietileno, variando parâmetros como:

i) diferentes espaçamentos entre os traços; ii) diferentes background; iii) diferentes diâmetros; iv) materiais diferentes do tubo de polietileno, PVC e de ferro; v) diferentes frequências; e vi) diferentes profundidades.

A Figura 5.8 mostra o primeiro modelo formado por um tubo de polietileno vazio de 2 cm de diâmetro hospedado em solo argilo – arenoso típico do SCGR – II, onde os

radargramas sintéticos foram simulados com diferentes espaçamentos entre os traços e frequência de 400 MHz (Modelo - i).

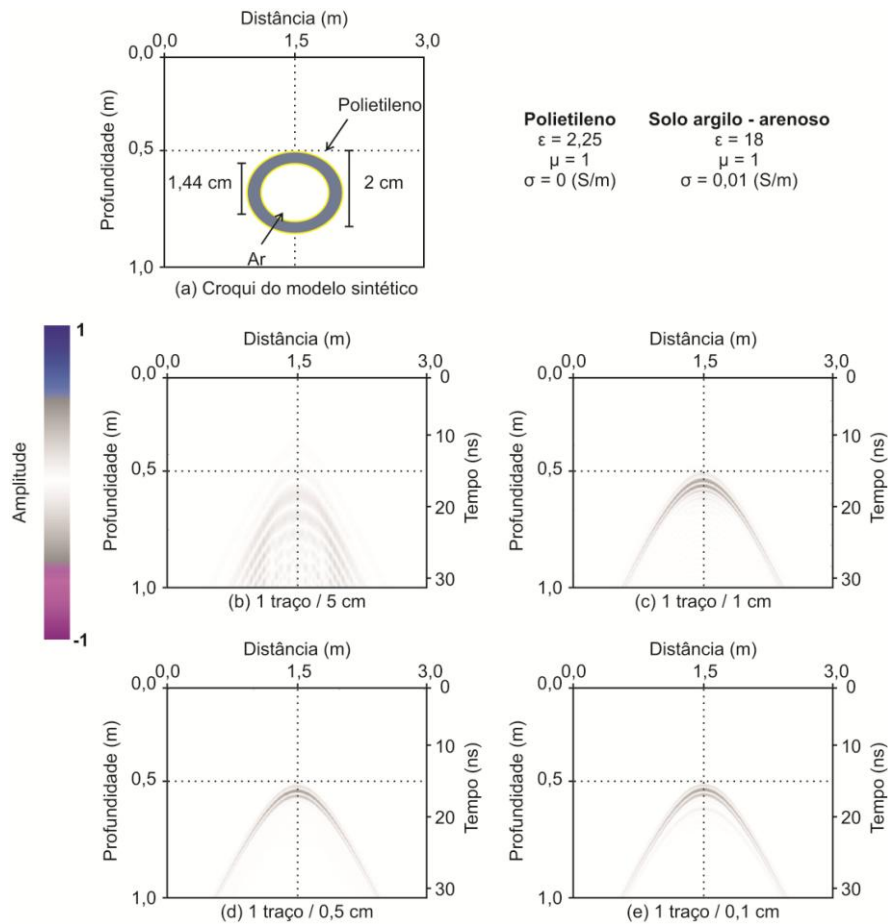


Figura 5.8. Resultado sintético GPR de 400 MHz para um tubo de polietileno de 2 cm de diâmetro vazio para diferentes espaçamentos entre os traços. a) croqui com a disposição do alvo. b) 1 traço/5cm. c) 1 traço/1cm. d) 1 traço/0,5cm. e) 1 traço/0,1cm.

Observa-se que na Figura 5.8b a hipérbole de difração referente ao tubo de polietileno é mal definida e que as Figuras 5.8 (c), (d) e (e) mostram que as hipérbolas são melhores definidas de acordo com o menor espaçamento entre os traços, indicando que quanto menor o espaçamento entre os traços ao longo do perfil GPR, a hipérbole de difração referente ao alvo pontual é melhor definida. Já em relação à amplitude de reflexão, observa-se que mesmo para maiores densidades de traços ao longo de um perfil não há melhoras significativas neste sentido, ou seja, a densidade dos traços tem influência apenas na resolução lateral do alvo e não na amplitude de reflexão.

Visto que a densidade dos traços por si só não justifica a dificuldade de identificar os tubos de polietileno enterrados na Linha 3 do SCGR – II, foi construído um modelo que conta com o mesmo tubo de polietileno hospedado no solo argilo - arenoso, onde os radargramas

sintéticos foram simulados com espaçamento de 1 traço / 1 cm e diferentes frequências para a onda eletromagnética (Modelo - ii). Os resultados são apresentados na Figura 5.9.

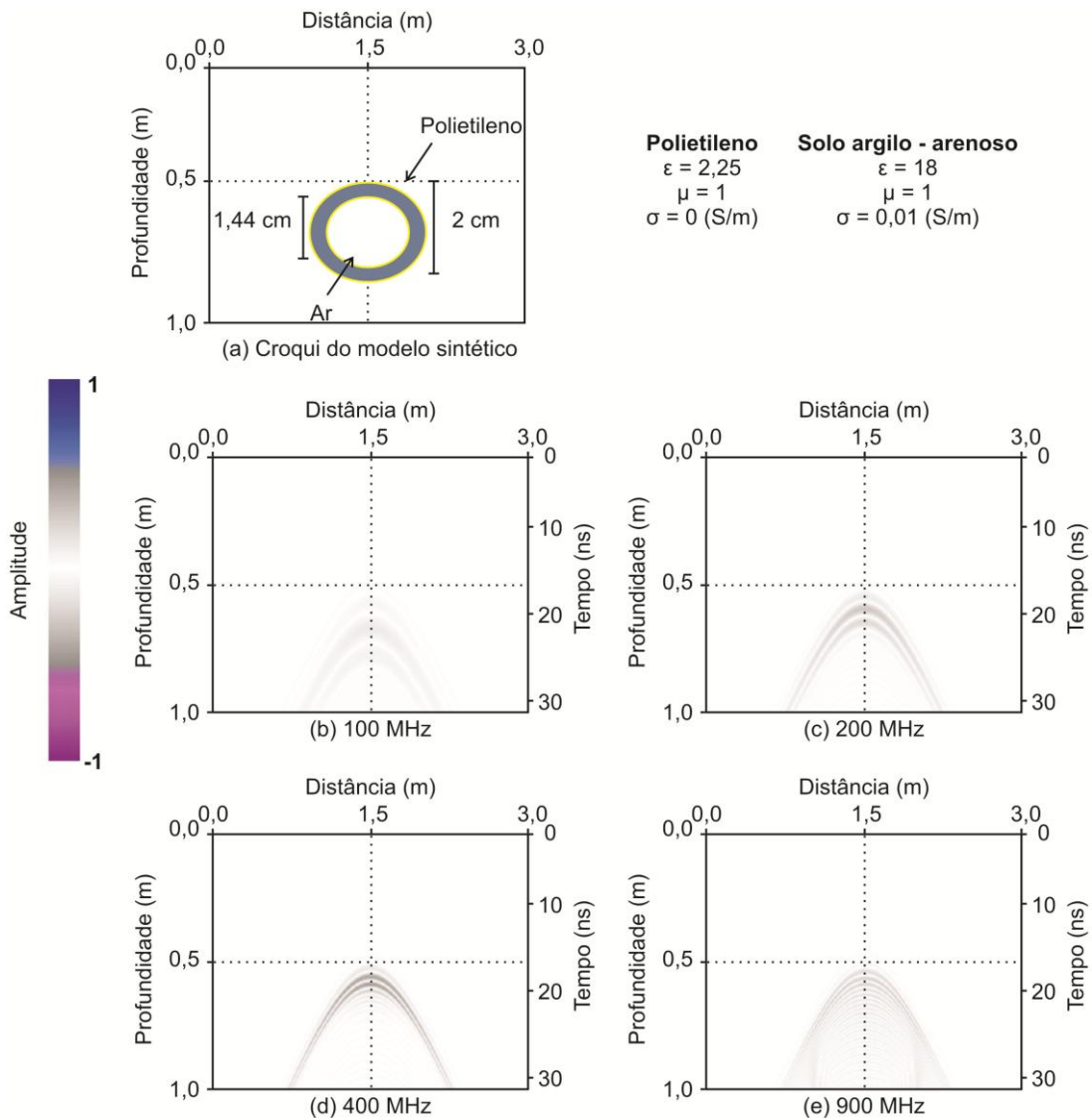


Figura 5.9. Resultados sintéticos GPR para diferentes frequências referente ao modelo de tubo de polietileno localizado em profundidade de 0,5 m com 1 traço/ 1cm. a) Croqui com a disposição do alvo. b) 100 MHz. c) 200 MHz. d) 400 MHz. e) 900 MHz.

Os resultados da Figura 5.9 mostram que a frequência de 400 MHz (Figura 5.9d) é a que fornece o melhor resultado para mapear o tubo de polietileno hospedado em solo argilo – arenoso. Portanto os resultados obtidos nas Figuras 5.8 e 5.9 sugerem que os parâmetros ótimos para mapear o tubo de polietileno são: Espaçamento entre os traços de (1 traço/ 1 cm) e frequência de 400 MHz. O resultado real adquiridos com esses parâmetros foi apresentado na Figura 5.2c, na qual não é possível identificar os alvos discutidos com clareza, i.e, a análise da densidade dos traços e a frequência utilizada por si só, não justificam a dificuldade para identificar os tubos de polietileno nos radargramas reais.

Desta forma, elaborou-se outros modelos sintético onde diferentes tipos de background hospedam um tubo de polietileno de 2 cm de diâmetro, com intuito de verificar como seria a resposta GPR caso o tubo fosse enterrado em diferentes tipos de backgrounds (Modelo - iii). Para isso, utilizou-se o espaçamento entre os traços de 1 traço/ 1 cm e frequência de 400 MHz, onde os resultados são apresentados na Figura 5.10.

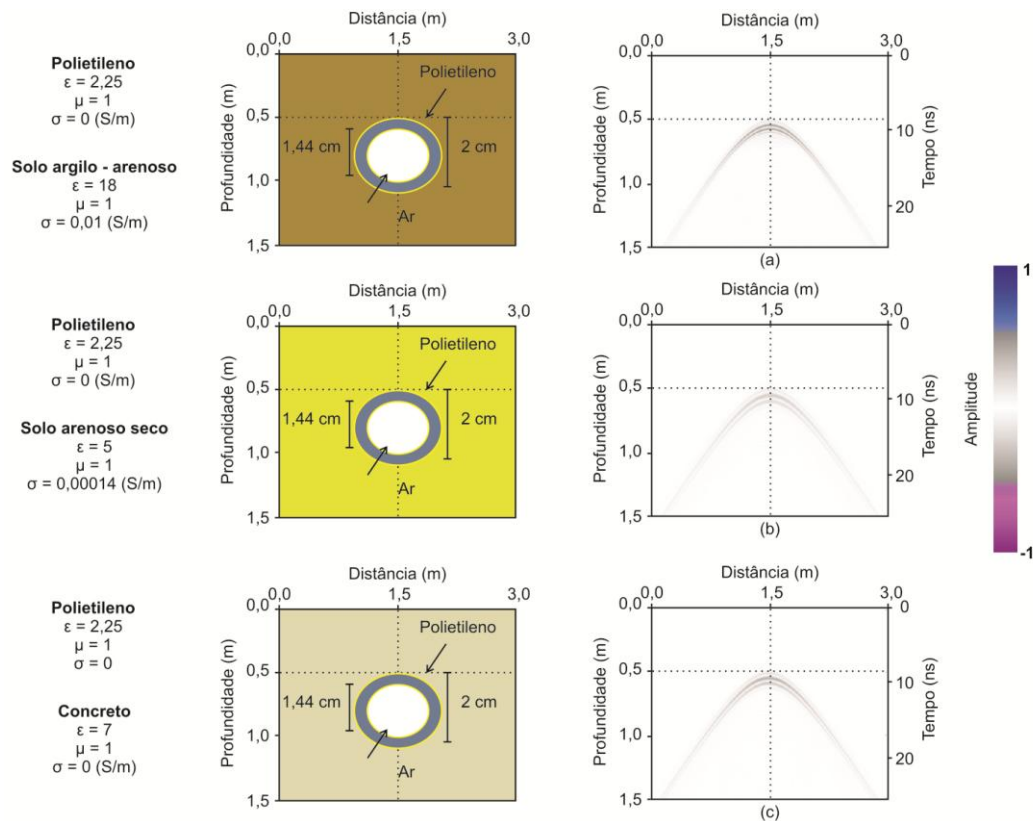


Figura 5.10. Resultados sintéticos GPR referentes às simulações numéricas de um tubo de polietileno disposto em diferentes background, para frequência de 400 MHz e espaçamento de 1 traço/ 1 cm. (a) Tubo hospedado em solo argilo - arenoso. (b) Tubo hospedado em solo arenoso. (c) Tubo hospedado em concreto.

Na Figura 5.10, observa-se que para os três tipos de background as amplitudes de reflexão são parecidas, onde a maior amplitude observada é para a situação (b), onde o solo argilo – arenoso semelhante ao do SCGR – II, hospeda o tubo de polietileno, pois é nessa situação onde há maior contraste de propriedades elétricas entre alvo e background. Ou seja, embora o background hospedeiro do alvo tenha influência sobre a amplitude referente à reflexão do alvo enterrado e, caso os tubos de polietilenos fossem enterrados nos background modelados, a expectativa é de que ainda haveria dificuldade para identificá-los em radargramas, descartando, portanto, a possibilidade de que o solo do SCGR – II seja o causador da dificuldade para mapear os tubos de polietileno. Como observado na Figura 5.10,

os diferentes tipos de background analisados tem poucas implicações na amplitude da reflexão referente ao tubo de polietileno de pequenos diâmetros e localizados em profundidades de 0,5 m.

Na Figura 5.11 são apresentados os radargramas sintéticos referentes ao modelo de tubo de polietileno com diferentes tamanhos, i.e., diferentes diâmetros e dispostos em 0,5 m de profundidade (Modelo - iv), utilizando a frequência de 400 MHz e espaçamento entre os traços de 1 traço/1cm.

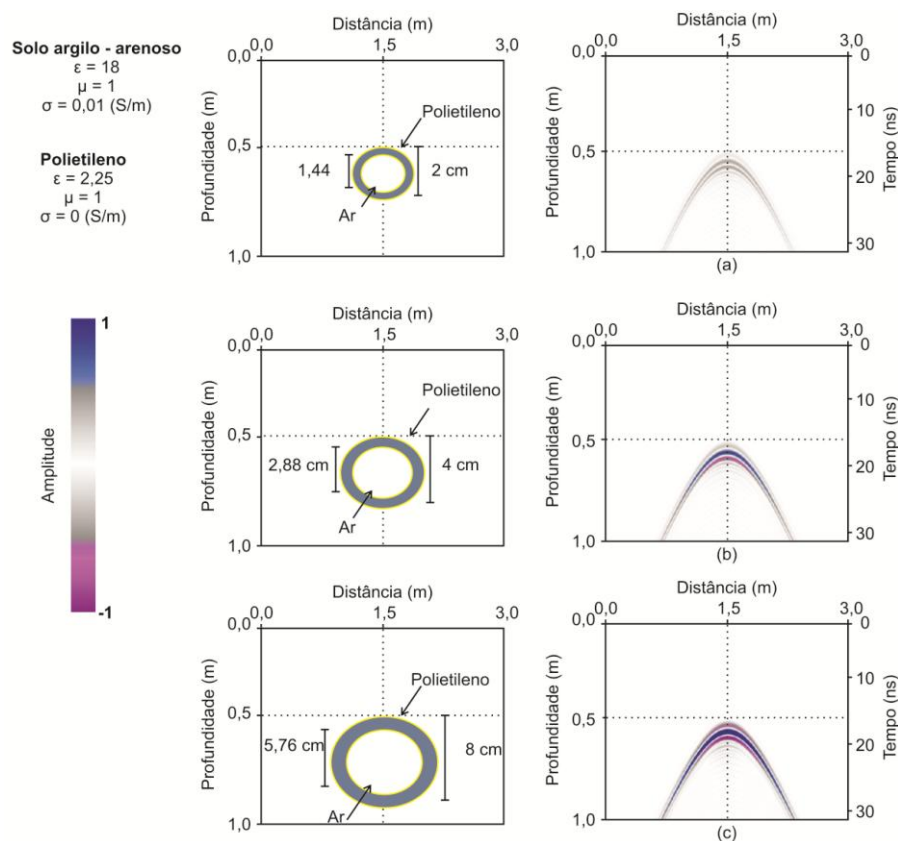


Figura 5.11. Resultados GPR de 400 MHz referentes às simulações numéricas de tubos de polietileno com diferentes tamanhos hospedados em um solo argilo – arenoso, para o espaçamento de 1 traço/ 1 cm. a) Tubo com 2 cm de diâmetro. b) Tubo com 4 cm de diâmetro. c) Tubo com 8 cm de diâmetro.

Observa-se que na Figura 5.11 o tamanho do alvo possui grande influência na amplitude da hipérbole de difração, sendo um indicativo de que a dificuldade de mapear os tubos de polietileno pode estar associada principalmente ao pequeno tamanho do alvo, e secundariamente ao material e ao espaçamento dos traços. Adicionalmente, tanto o material quanto o espaçamento entre os traços são parâmetros importantes para a detectabilidade do alvo enterrado. Este resultado não significa que alvos pequenos não podem ser detectados pelo GPR. Para esclarecer este ponto, foi feita outra simulação para o tubo de polietileno de 2 cm de diâmetro enterrado em diferentes profundidades (Modelo – v) (Figura 5.12).

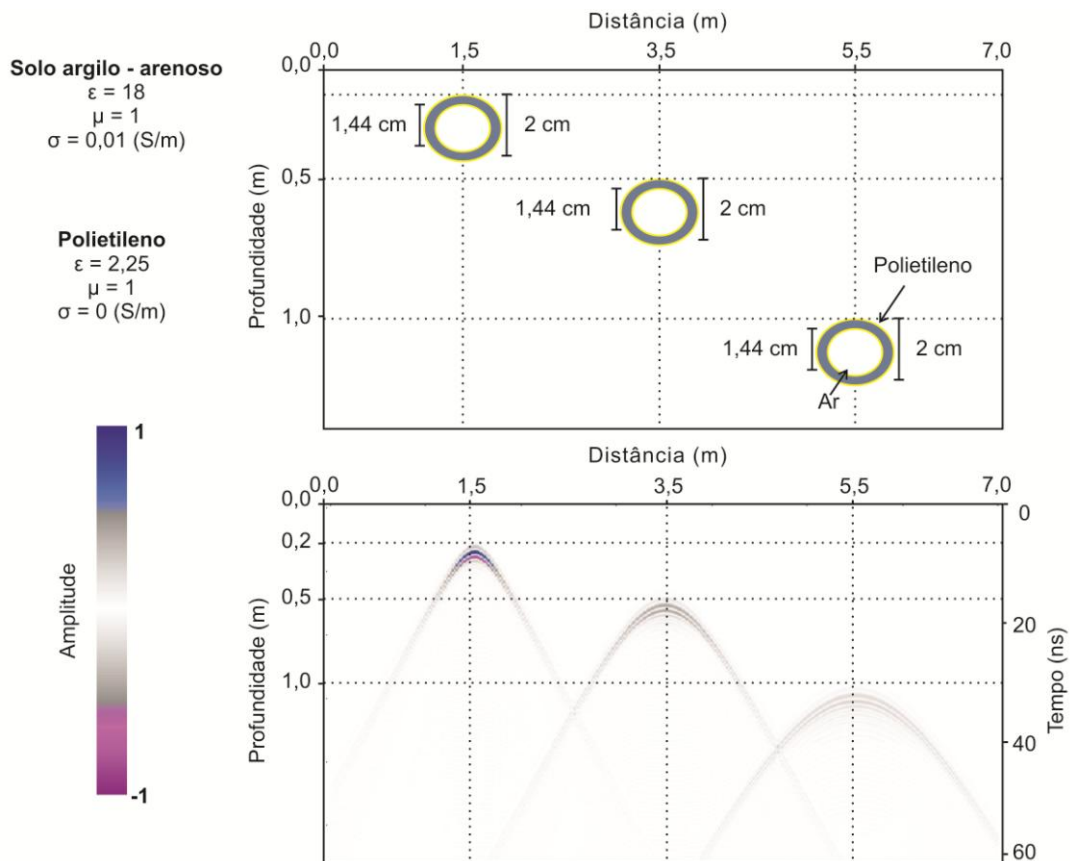


Figura 5.12. Resultado GPR sintético de 400 MHz com espaçamento de 1 traço/ 1 cm sobre tubos de polietileno de 2 cm de diâmetro dispostos em solo argilo – arenoso em profundidades de 0,2 m, 0,5 m e 1,0 m.

Nota-se nesta figura que a amplitude da reflexão referente ao tubo de polietileno de 2 cm de diâmetro apresenta maiores amplitudes para o tubo localizado em 0,2 m, i.e., 20 cm de profundidade do que os tubos localizados em 0,5 m e 1,0 m. Este resultado é um indicativo de que a amplitude da reflexão decai com a profundidade, que pode estar associado com a atenuação do sinal na subsuperfície. Em outras palavras, os resultados sintéticos mostraram que o GPR é capaz de mapear tubos de polietileno de pequenos diâmetros, i.e., 0,02 m (2 cm). Porém, os mesmos precisam estar localizados em profundidades da ordem de 20 cm, caso contrário, a reflexão referente ao alvo será atenuada e haverá dificuldades para mapeá-los.

A Figura 5.13 mostra os resultados GPR sintéticos considerando 3 tubos com diâmetros de 2 cm, sendo constituídos de polietileno, PVC e o ferro, preenchidos com ar e disposto em profundidades de 0,5 m (Modelo – vi). O objetivo desta simulação numérica foi de verificar se haveria dificuldades para detectar outros tipos de alvos com diferentes propriedades elétricas e igual geometria ou se isto ocorre apenas para os tubos de polietileno.

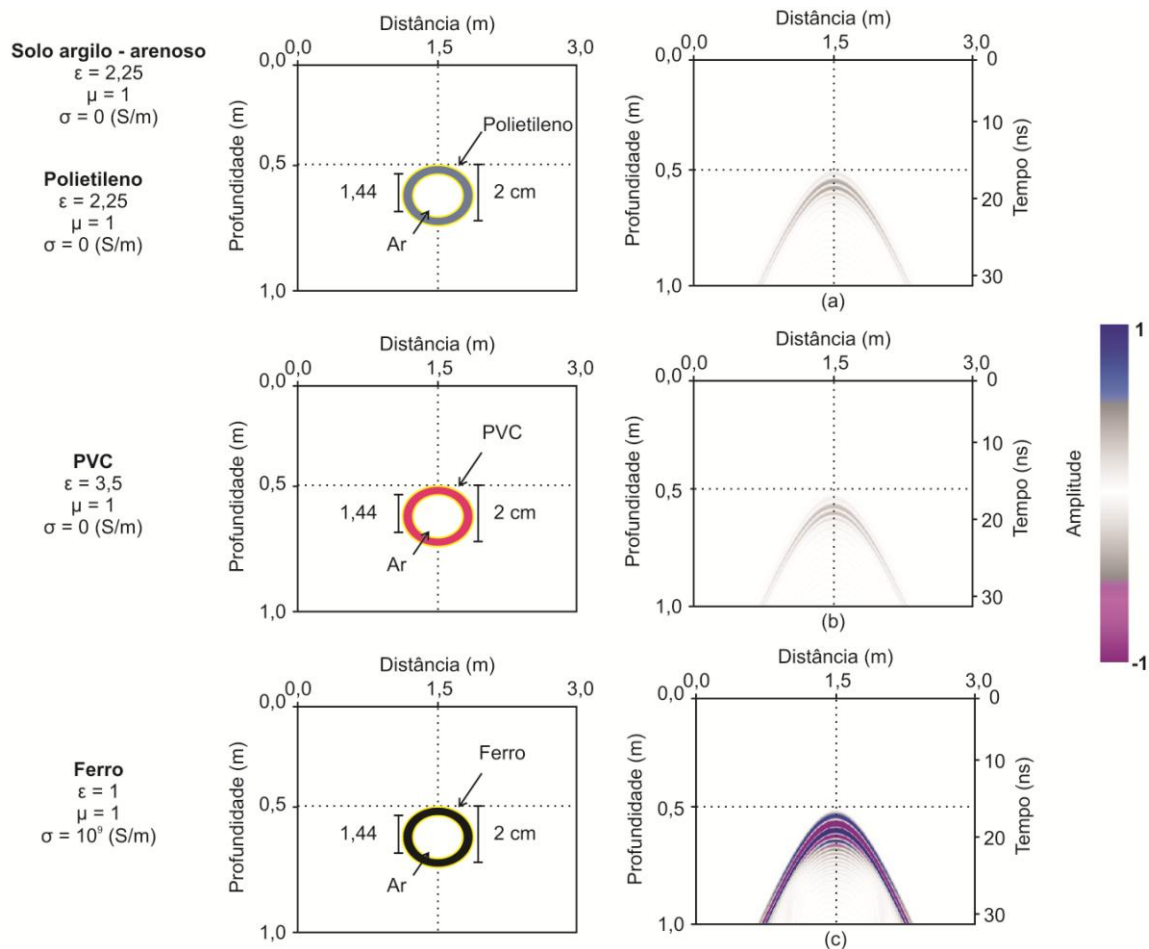


Figura 5.13. Resultados GPR sintéticos de 400 MHz com espaçamento de 1 traço / 1 cm para tubos constituídos de diferentes materiais e mesmo diâmetro, localizados em profundidades de 0,5 m. a) Tubo de polietileno. b) Tubo de PVC. c) Tubo de ferro.

Os tubos de polietileno e PVC de mesmo tamanho e em profundidades de 0,5 m apresentam amplitudes de reflexão semelhantes (Figura 5.13 a e b), indicando que tubos com essa geometria e de propriedades elétricas semelhantes ao polietileno ou PVC apresentariam a mesma dificuldade para serem identificados em radargramas. Por outro lado, o tubo metálico da Figura 5.13c, seria facilmente detectado, visto que alvos metálicos apresentam alta condutividade elétrica e que o coeficiente de reflexão entre os solos em geral e esse tipo de alvo é da ordem de 100 %, i.e, tubos metálicos com pequenos diâmetros (~2 cm) enterrados no subsolo em profundidades de 0,5 m podem ser detectados em radargramas com mais facilidade do que os tubos de polietileno e PVC.

Portanto, a dificuldade de identificar os tubos de polietileno na Linha 3 do SCGR – II está associado principalmente ao pequeno diâmetro do alvo e a profundidade que estão enterrados, e secundariamente ao espaçamento entre os traços e ao tipo de material (com exceção de tubos metálicos). Adicionalmente, tanto o material quanto o espaçamento entre os

traços e a frequência da antena são parâmetros importantes para a detectabilidade do alvo enterrado.

Na Figura 5.14 é apresentado o comparativo entre o radargrama real e o radargrama sintético, ambos para frequência de 200 MHz para o segundo trecho da Linha 3, de 16 até 37 m.

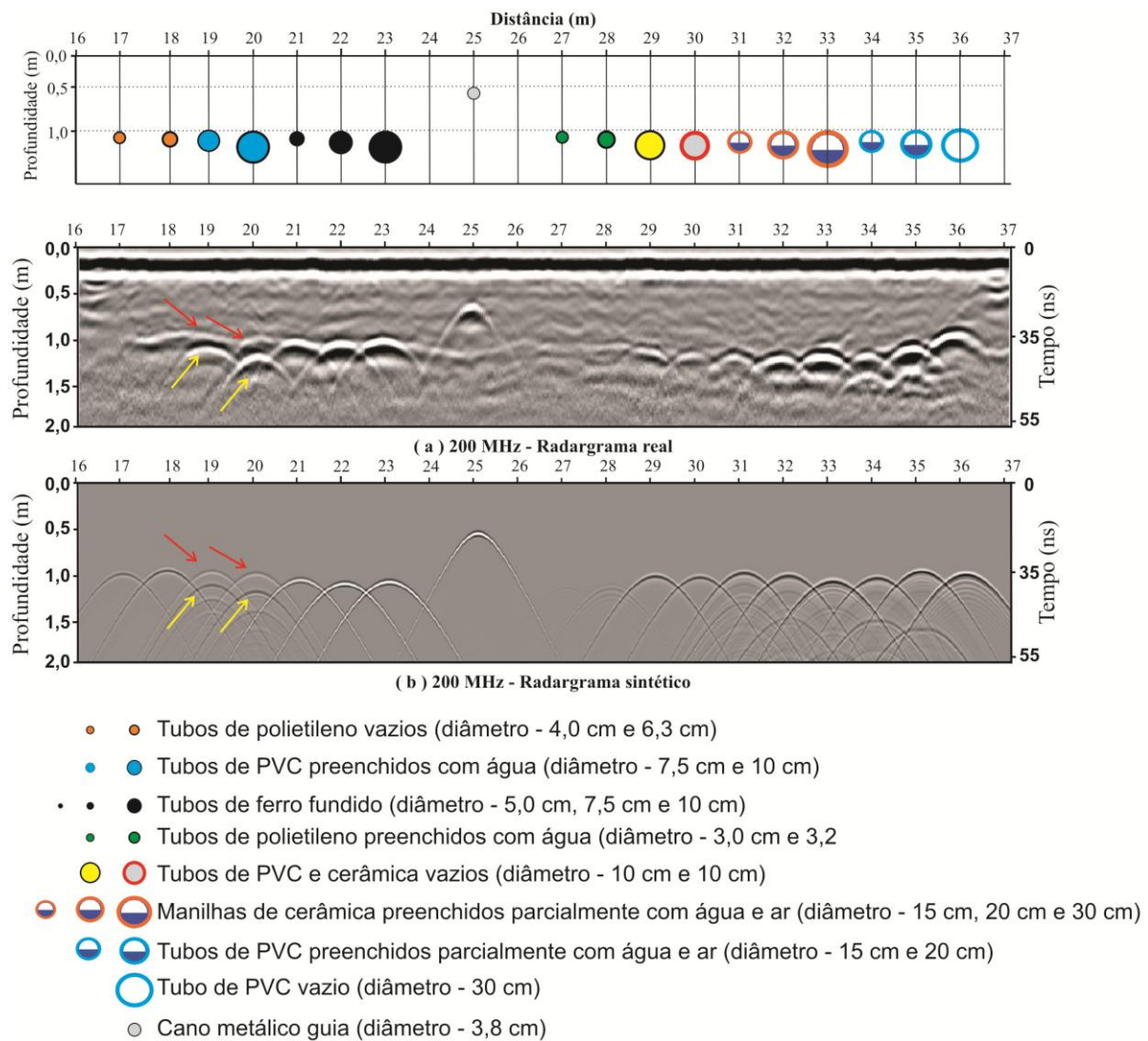


Figura 5.14: Comparação entre radargrama real e sintético para frequência de 200 MHz para o trecho entre 16 e 37 m, com espaçamento entre os traços de 1 traço/ 1 cm. A seta vermelha indica o topo do alvo e a seta amarela a base.

Comparando os resultados sintético e real GPR na Figura 5.14a e 5.14b, observa-se boa concordância entre os padrões das reflexões referentes aos alvos instalados no segundo trecho da Linha 3. As manilhas de concreto das posições 31, 32 e 33 m apresentam as reflexões referentes à base e ao topo do alvo no radargrama sintético (b), porém o mesmo não é observado no radargrama real (a), onde se interpreta de forma análoga ao primeiro trecho,

onde se aferiu que a água presente nas manilhas tenha vazado para o solo, restando apenas ar dentro dos alvos, sendo possível, portanto, apenas identificar o topo das manilhas.

Outro aspecto importante do resultado da Figura 5.14, é que na posição de 25 m e profundidade de aproximadamente de 0,5 m identifica-se uma hipérbole de difração de grande amplitude. Nessa posição está localizado o cano metálico guia de 3,8 cm de diâmetro.

Nas posições de 29 e 36 m têm-se tubos de PVC com diâmetros de 10 e 30 cm vazios, respectivamente. Observa-se na Figura 5.14a que a amplitude da hipérbole para o alvo de 36 m é maior do que a hipérbole referente ao tubo da posição de 29 m, indicando que o tamanho do alvo tem grande influencia na sua detectabilidade.

Comparando a profundidade dos topos das hipérbolas referentes aos tubos de PVC preenchidos com água das posições 19 e 20 m nos radargramas reais e sintéticos da Figura 5.14, observa-se que no radargrama real (Figura 5.14a) a profundidade das hipérbolas estão deslocadas para baixo em relação ao radargrama sintético (Figura 5.14b), efeito análogo ocorreu para os mesmos tubos das posições 3 e 4 (Figura 5.7). Além disto, nota-se que as hipérbolas dos alvos 19 e 20 (Figura 5.14b) referentes às bases dos alvos são mais nítidas do que as referentes aos topos, portanto, interpretam-se as hipérbolas indicadas pelas setas amarelas na Figura 5.14a como sendo as reflexões referentes à base dos tubos de PVC e não ao topo como se esperava. Esse resultado mostra que aferir a profundidade de tubos de PVC preenchidos com água requer certo cuidado por parte do intérprete.

Para entender os motivos por que a amplitude de reflexão referente a base do tubo de PVC preenchido por água seja maior do que a amplitude referente ao topo, elaborou-se um modelo sintético de um tubo de PVC preenchido com água com objetivo de se analisar o traço central referente a hipérbole de difração resultante. O tubo modelado possui 0,3 m de diâmetro, posicionado em profundidade de 0,5 m dentro de um background que simula um solo argilo – arenoso ($\epsilon = 18$, $\sigma = 0,01$ S/m e $\mu = 1$). A simulação numérica foi feita utilizando a frequência de 270 MHz e a fonte “exploding reflector”. Na Figura 5.15 é apresentado o radargrama sintético referente ao modelo mencionado e o respectivo traço central do radargrama.

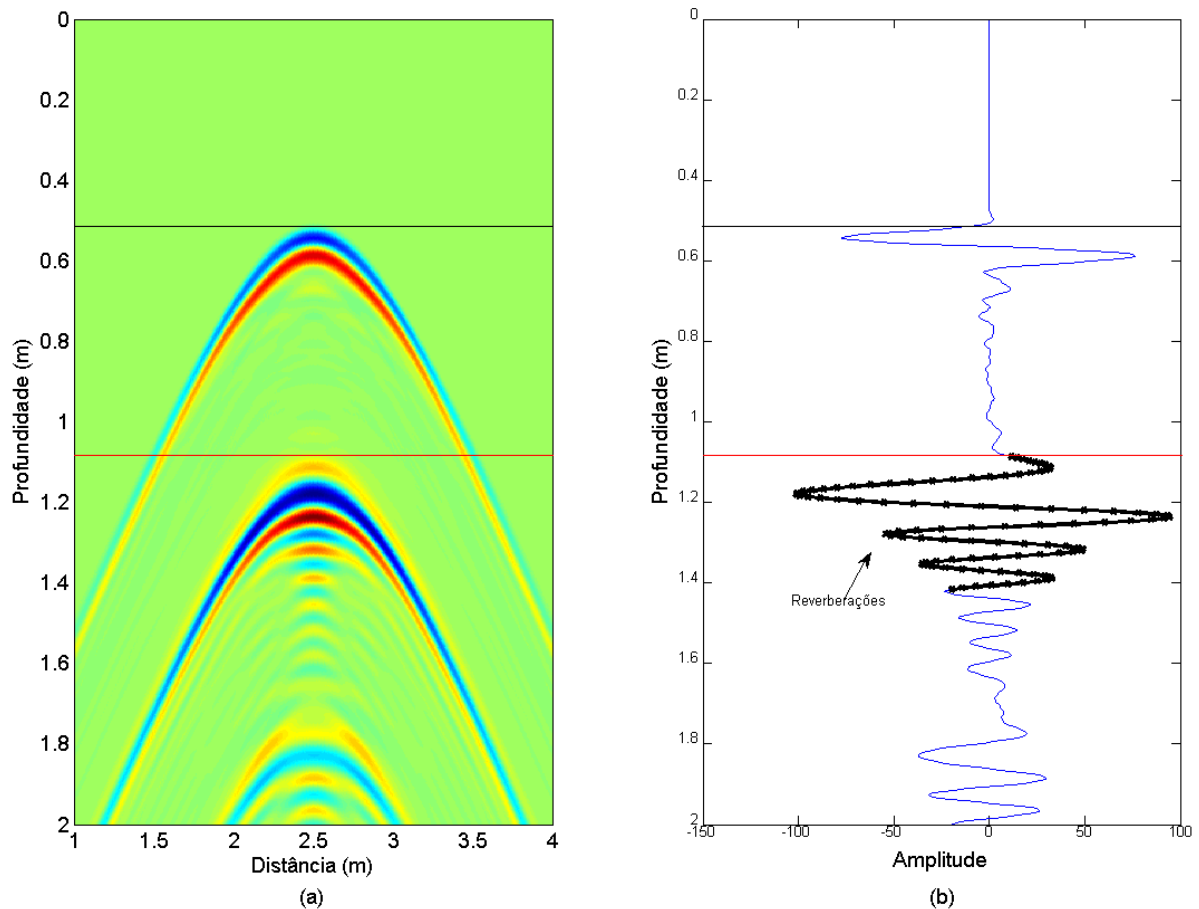


Figura 5.15. Radargrama sintético referente ao tubo de PVC preenchido por água e localizado em profundidade de 0,5 m dentro de um background argilo – arenoso (a) e o respectivo traço central (b).

O radargrama apresentado na Figura 5.15a mostra 2 hipérboles de difração. A 1a (superior) representa o topo e a 2a (inferior) representa a base do tubo. Observe que a hipérbole da base é mais espessa que a hipérbole do topo, indicando um maior conteúdo de frequência. Essa maior espessura é justificada com base na análise do traço (Figura 5.15b). A linha vermelha horizontal marca a reflexão da base, e a parte do traço em preto são as reverberações da onda eletromagnética causados pelo aprisionamento da onda dentro do tubo (Annan, 2003). Essas reverberações causam o espessamento da reflexão da base, dando-a maior nitidez no radargrama, sendo, portanto, um aspecto importante, que contribui para que a reflexão referente à base dos tubos de PVC preenchidos por água seja mais nítida do que a do topo. Outro aspecto que deve ser levado em conta é a amplitude das reflexões, sendo maior para a base e menor para o topo. Esse efeito pode ser entendido, assumindo que a reflexão da base é formada pela superposição das reverberações da onda eletromagnética, explicando desta forma a maior amplitude.

Na Figura 5.16 é apresentado o comparativo entre o radargrama real e radargrama sintético para o terceiro trecho da Linha 3 compreendido entre 37 e 50 m, adquiridos com frequência de 270 MHz.

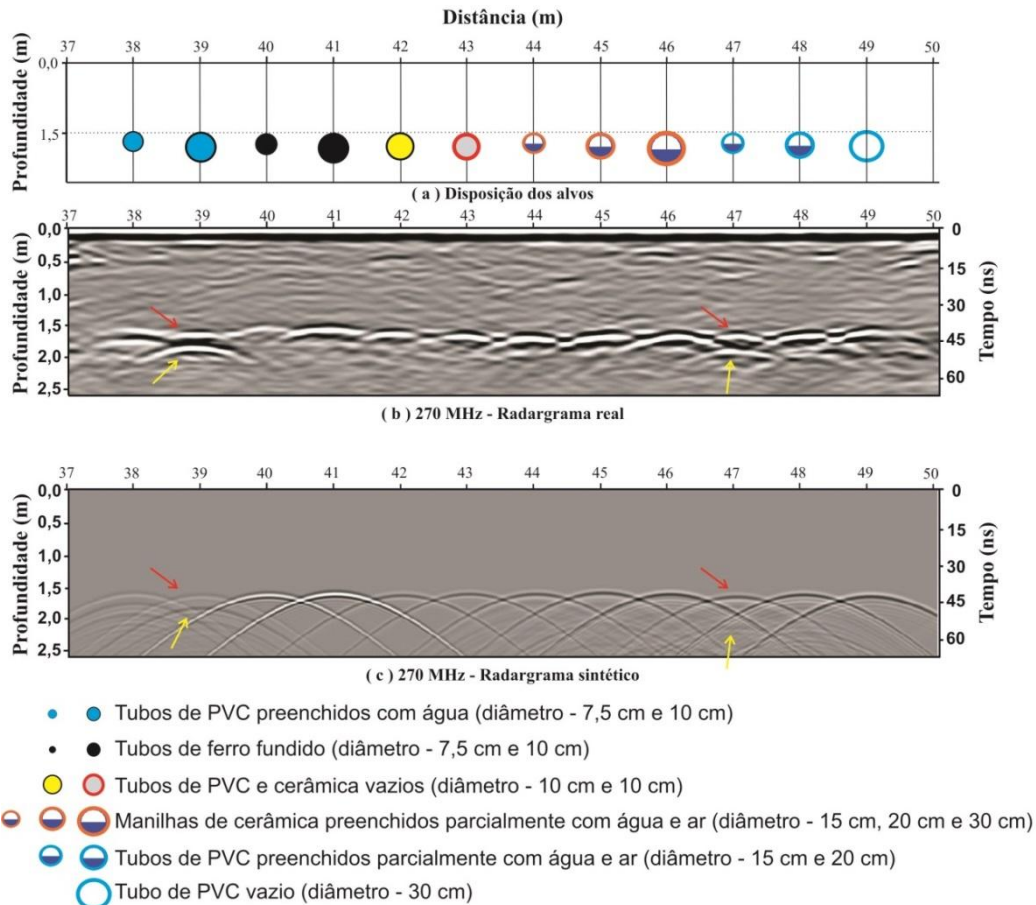


Figura 5.16. Radargrama real e sintético para frequência de 270 MHz para o trecho entre 37 e 50 m com espaçamento entre os traços de 1 traço/ 1 cm. a) Croqui com a disposição dos alvos. b) Radargrama real. c) Radargrama sintético. As setas vermelhas e amarelas indicam o topo e a base, respectivamente, referente aos tubos de PVC das posições de 39 e 47 m.

O radargrama sintético da Figura 5.16c mostra que, com exceção dos tubos metálicos, e dos tubos de PVC preenchidos por água, as hipérboles identificadas para os demais alvos são similares, sendo um indicativo de que para interpretar os radargramas da Figura 5.16b haveria problemas de ambiguidade, onde não é possível distinguir um alvo do outro com base apenas no aspecto da hipérbole em termos de formato e amplitude de reflexão.

Na Figura 5.16c observa-se que as hipérboles referentes a base e ao topo dos alvos das posições 38 e 39 m são relativamente próximas, e que no resultado real (Figura 5.16b) ocorre a sobreposição dessas hipérboles para o alvo da posição de 38 m, não sendo possível

distinguir o topo da base. Para o alvo da posição 39 m é possível identificar o topo e a base com uma ligeira diferença de profundidade, havendo praticamente a sobreposição. Além disto, a hipérbole referente à base (seta amarela) é mais nítida do que a hipérbole referente ao topo (seta vermelha), onde este efeito também ocorre no resultado sintético (Figura 5.16c), sendo semelhante ao ocorrido com os alvos das posições 19 e 20 m discutidos anteriormente.

Para o alvo da posição de 47 m (Figura 5.16b), identifica-se duas hipérbolas que podem estar associados ao topo e base do tubo. Porém, pelo radargrama sintético (Figura 5.16c) não é esperado que houvesse a reflexão da base, uma vez que a amplitude desta reflexão é pequena em comparação ao topo. Visto que os alvos da posição de 47 e 48 m são tubos de PVC preenchidos parcialmente com água e com diâmetros de 15 e 20 cm, e que estão presentes nos 3 trechos da Linha 3 (14, 15, 34, 35, 47 e 48 m), é apresentado na Figura 5.17 o comparativo entre as respostas destes alvos para os três trechos da Linha 3 com frequência de 270 MHz e os respectivos radargramas sintéticos.

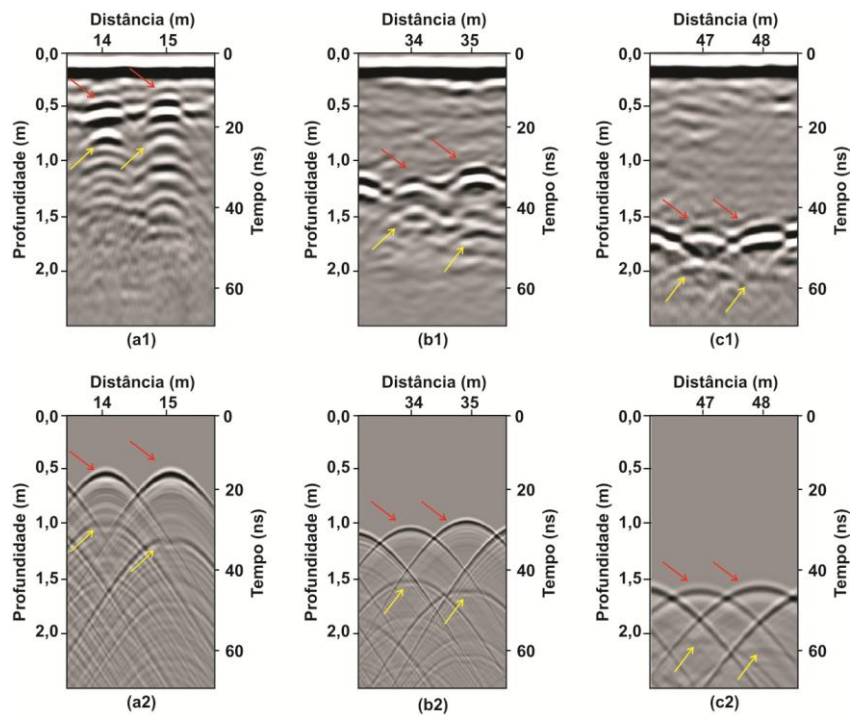


Figura 5.17. Resultados GPR reais e sintéticos para 270 MHz sobre os três trechos da Linha 3 onde estão localizados os tubos de PVC de diâmetros de 15 e 20 cm preenchidos parcialmente com água. Radargramas reais (a1), (b1) e (c1) e radargramas sintéticos (a2), (b2) e (c2) para os alvos localizados nas posições de 14 e 15 m, 34 e 35 m, 47 e 48 m, respectivamente. As setas vermelhas são as indicações dos topos e as amarelas das bases dos alvos.

Observe na Figura 5.17 (a1) e (b1) que é possível identificar as reflexões do topo (setas vermelhas) e base (setas amarelas) dos alvos localizados em aproximadamente 0,5 e 1,0 m de profundidade, confirmadas pela modelagem numérica (Figura 5.17 (a2) e (b2)).

Note também que a amplitude das reflexões das bases (a1), (b1) e (c1) diminuem com a profundidade, justificando desta forma, a dificuldade para identificar a base do tubo da posição de 48 m (c1). Comparando os resultados de (c1) e (c2), observa-se que a modelagem numérica tem dificuldade para prever a reflexão da base referente ao alvo da posição de 47 m (c2), o que sugere que o valor de condutividade elétrica utilizado para os modelos numéricos (0,01 S/m) é maior do que na prática, fazendo com que a amplitude das hipérboles dos alvos mais profundos seja reduzida em relação ao radargrama real devido à atenuação do sinal em subsuperfície. Ressalta-se ainda que a condutividade elétrica possa variar de ponto a ponto ao longo do perfil da Linha 3, pois depende da condição do solo em termos de litologia, compactação e grau de saturação de água e que para este trecho o valor de condutividade pode destoar do restante do perfil, uma vez que para os modelos numéricos assumiu-se que a condutividade elétrica constante para todo o perfil.

Capítulo 6

Conclusões e Recomendações

A presente pesquisa mostra a utilização do GPR para localizar interferências urbanas enterradas na Linha 3 do SCGR – II do IAG/USP. As respostas referentes às tubulações estudadas dependem do tipo de material, tamanho e profundidade dos alvos, além do tipo de fluido que os preenche.

6.1. Resultados reais

Os tubos metálicos enterrados em 0,5 m, 1,0 m e 1,5 m foram identificados com facilidade, devido ao grande contraste de propriedades elétricas entre esses alvos e o solo hospedeiro (*background*). Tubos com diâmetros maiores e menores apresentam hipérbolos com excentricidade maiores e menores, i.e, as hipérbolos são mais abertas e fechadas, respectivamente.

Os tubos de PVC preenchidos com água são mais fáceis de serem detectados do que os vazios, apresentando amplitudes de reflexão maiores, devido ao grande contraste de constante dielétrica da água em relação ao *background*. Quando preenchidos por água, os tubos de PVC são caracterizados por hipérbolos referentes ao topo e base dos alvos, além de reverberações causadas pelo aprisionamento da onda eletromagnética no interior dos tubos. As amplitudes das hipérbolos de difração da base são maiores do que as hipérbolos referentes ao topo dos tubos, o que torna a reflexão da base mais nítida do que a do topo, requerendo desta forma, uma maior cautela por parte do intérprete para estimar a profundidade destes tubos preenchidos por água. Quando preenchidos por ar, identifica-se apenas uma hipérbole de difração, sendo referente ao topo do alvo, e de menor amplitude em comparação aos tubos preenchidos por água.

De uma forma geral, observou-se que as assinaturas GPR para os alvos localizados em profundidades de aproximadamente 1,5 m são parecidas, ou seja, a atenuação do sinal nesta profundidade não permite que os alvos sejam distinguidos entre si com base no tipo de material, aumentando desta forma, a ambiguidade para interpretar os resultados nesta profundidade em termos de tipo de material e se os alvos estão preenchidos com água.

As frequências mais altas (400 e 800 MHz) se mostraram adequadas para mapear os alvos enterrados em até 0,5 m de profundidade, fornecendo mais detalhes acerca das

assinaturas dos alvos investigados. As frequências de 200 e 270 MHz se mostram adequadas para mapear os alvos localizados em até 1,5 m porém, com menos resolução. Conclui-se desta forma que para uma análise mais completa é importante que os dados sejam adquiridos utilizando mais de uma antena, de preferência uma de menor frequência e outra de maior frequência, visando mapear os alvos mais rasos com maior resolução e identificar os alvos mais profundos.

A análise 3D dos alvos permitiu delimitar o tamanho dos alvos em relação à área de estudo, como também fornecer a direção dos alvos em subsuperfície.

6.2. Resultados sintéticos

Os estudos de modelagem numérica FDTD sugerem que as assinaturas GPR das tubulações ou manilhas de cerâmica preenchidas com água sejam semelhantes às tubulações de PVC, apresentando reflexões do topo e base do alvo, além das reverberações do sinal. Visto que os radargramas reais indicam apenas a reflexão do topo das manilhas e que as extremidades das manilhas foram vedadas com cimento – cola, conclui-se que a água que deveria estar no interior das manilhas possa ter vazado para o subsolo, explicando desta forma o resultado obtido e atestando a importância dos estudos de modelagem numérica em análise de dados GPR.

As análises das respostas sintéticas referentes aos tubos de PVC preenchidos por água contribuíram para que as hipérboles observadas nos radargramas reais fossem interpretadas como sendo referentes às bases dos tubos e não dos topos.

Os estudos numéricos permitiram compreender o motivo pelo qual os tubos de polietileno não foram detectados com clareza pelo método GPR nas condições que eles foram enterrados no subsolo do SCGR - II. A análise dos resultados sintéticos referentes aos tubos de polietileno, sugerem que alvos pequenos (~2 cm de diâmetro) e localizados em profundidades de 0,5 m apresentam baixas amplitudes de reflexão, que se misturam com as respostas do background dificultando, desta forma, a visualização desses pequenos tubos nos radargramas. Por outro lado, os estudos numéricos mostraram que o GPR pode ser capaz de detectar com nitidez os tubos de polietileno com diâmetros pequenos (~2 cm) em profundidades da ordem de 20 cm. A partir desta profundidade, a detectabilidade dos tubos de polietileno por meio do GPR depende do diâmetro e da profundidade em que os alvos estão localizados.

Por fim, conclui-se que os estudos de modelagem numérica foram importantes para a interpretação dos resultados obtidos nesta pesquisa. Os estudos permitiram esclarecer ambiguidades das reflexões referentes às manilhas de cerâmica e dos tubos de PVC, e explicar o porquê não se detectou os tubos de polietileno, além de confirmar os padrões de reflexões dos outros alvos.

Esta pesquisa mostrou que o método GPR é capaz de detectar tubulações enterradas no subsolo, fornecer indícios se as mesmas estão preenchidas com água e informações acerca da direção e tamanho das interferências em relação à área de estudo. Essas informações podem ser de grande importância para empresas de gerenciamento dos serviços essenciais das cidades, como COMGAS, SABESP, ELETROPAULO e outras, contribuindo para a eficiência e segurança das obras que visam intervir no subsolo.

Para campanhas de aquisições de dados GPR fora do ambiente controlado, i.e, no ambiente urbano que visem o mapeamento de tubulações enterradas, recomenda-se utilizar pelo menos 2 antenas, sendo uma de baixa frequência (~270 MHz) e outra de mais alta frequência (~800 MHz), onde a frequência mais baixa permite detectar os tubos mais profundos e a frequência mais alta permite uma maior resolução para alvos mais rasos. Além das antenas, recomenda-se também que o espaçamento entre os traços seja de 1 cm para aumentar a resolução espacial.

Referências Bibliográficas

- ALLEN, S. J., PORSANI, J. L., POLUHA, B. **Geofísica arqueológica no ambiente da Arqueologia Urbana**. Revista Portuguesa de Medicina Desportiva, v. 30, p. 235-254, 2017. <https://doi.org/10.24885/sab.v30i1.510>
- ALMEIDA, E.R.; PORSANI, J.L.; Catapano, I.; Gennarelli, G.; Soldovieri, F. **Microwave Tomography-Enhanced GPR in Forensic Surveys: The Case Study of a Tropical Environment**. Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, v.9, p.115 – 124, 2016.
- ALMEIDA, E. R. **Análise da tomografia de micro – ondas em dados GPR sob condições controladas: Aplicações em arqueologia e estudos forenses**. 2016. 189 f. Tese de Doutorado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG/USP). São Paulo, 2016.
- ALVES, J. W. L. **Implantação do campo de testes da UFPA para medidas geofísicas**. 2013. 77 f. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, UFPA, Belém, 2013.
- ANNAN, A. P. **GPR Principles, Procedures & Applications**. Sensors & Software, Inc., 286p, 2003.
- BANO, M., LOEFFLER, O., GIRARD, J –F. **Ground penetrating radar imaging and time-domain modelling of the infiltration of diesel fuel in a sandbox experiment**. C. R. Geoscience . v. 341: 846–858, 2009.
- BEVAN, B. W. **Geophysical Survey at Teso dos Bichos**. Report on the 1985 fieldwork on Marajo Island. 1986. DOI: 10.13140/RG.2.1.5153.5602
- BLUM, M. L. B., CAVALCANTI, M.M., RUSSO, D., BORGES, W. R. **First Brazilian Federal Police Test Site for Forensic Geophysical Research**. In: 13° CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, Rio de Janeiro, Brasil, 26 - 29 de agosto de 2013.
- BORGES, W. R. **Caracterização Geofísica de Alvos Rasos com Aplicações no Planejamento Urbano e Meio Ambiente: Estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP**. 2007. 260 f. Tese de Doutorado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG/USP), São Paulo, 2007.

- BOWDERS, J. J., KOERNER, R. M. **Buried container detection using Ground Penetrating Radar**. Journal of Hazardous Materials, vol 7, p. 1 – 17, 1982.
- CAMPOS, G. C., IYOMASA., W. S., SANTOS, A. J. G., MARTINS, J. R. S., MENEZES, M. O **“invisível” espaço subterrâneo urbano**. São Paulo em perspectiva, v.20 (2), p.147 – 157, 2006.
- CASTRO, D. L., BRANCO, R. M. G. C. **4-D ground penetrating radar monitoring of a hydrocarbon leakage site in Fortaleza (Brazil) during its remediation process:a case history**. Journal of Applied Geophysics. v. 54: 127– 144, 2003. doi:10.1016/j.jappgeo.2003.08.021
- CHAZELAS, J.L., LEPAROUX, D., HOLLIER-LAROUSSE, A. **A test site for geophysical methods**. Proc. EEGS 3rd Meet. Environ. Eng., 387–390, 1997.
- CHENG, N. F., TANG. H.W.C., CHAN, C.T. **Identification and positioning of underground utilities using Ground Penetrating Radar (GPR)**. Sustain. Environ. Res. vol. 23 (2), p. 141 – 152, 2013.
- CIST, D. B., SCHUTZ, A. E. A low-Cost GPR Gas Pipe & Leak Detector. Geophysical Survey System, INC, 2005.
- DANIELS, D.J. **Ground Penetrating Radar**. 2^a ed. The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom. 726p, 2007.
- DIAMANTI, N. & REDMAN, D. **Field observations and numerical models of GPR response from vertical pavement cracks**. Journal of Applied Geophysics, v. 81, p.106 – 116, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.09.006>
- DIAMANTI, N.; GIANNOPOULOS, A.; FORDE, M.C. **Numerical modelling and experimental verification of GPR to investigate ring separation in brick masonry arch bridges**. NDT & E International, vl.41, p 354 – 363, 2008.
- DIX, C. H. **Seismec prospecting**. In Runcorn, S. K., ed. Methods and Techniques in Geophysics. v. 2. New York: Interscience Publishers, v.2, 249 – 278, 1966.
- FERRAZ, A. **115 mil km de tubulações disputam espaço sob as calçadas paulistanas**. O Estado de S. Paulo, São Paulo, 16 out. 2011.

G1. **Retroescavadeira perfura tubulação de gás em Pinheiros**. 20 ago. 2012. Disponível em <http://g1.globo.com/sao-paulo/sptv-2edicao/videos/t/edicoes/v/retroescavadeira-perfura-tubulacao-de-gas-em-pinheiros/2098948>. Acesso em: 28 Set. 2017.

GAZETA DO POVO. **Acidente rompe rede da Sanepar e prejudica abastecimento de água**. 07 mar. 2007. Disponível em < <http://www.gazetadopovo.com.br/vida-e-cidadania/acidente-rompe-rede-da-sanepar-e-prejudica-abastecimento-de-agua> >. Acesso em: 29 Jul.2017.

GIANNAKIS, I., GIANNOPOULOS, A., WARREN, C. **A realistic FDTD numerical modeling framework of ground penetrating radar for landmine detection**. Journal of Selected topics in applied earth observations and remote sensing, v.9 (1), 2016.

GOOGLE MAPS. Google. 2017. “IAG USP”. Consultado em: 29/07/2017, disponível em < www.google.com.br/maps >.

HILDEBRAND, J.A., WIGGINS, S.M., HENKART, P.C., CONYERS, L.B. **Comparision of Seismic Reflection and Ground – Penetrating Radar Imaging at Controlled Archeological Test Site, Champaign, Illinois**. Wiley InterScience: Archaeolo. Prospect. v. 9, p. 9 – 21, 2002. doi: 10.1002/arp.177.

HÜLSMEYER, C., 1904. German patente 165546.

HülSENBECK, & CO., 1926: German patente 489 434.

INNAN, U.S., MARSHALL, R.A. **Numerical Eletromagnetics: The FDTD Method**. 1ª edição, Cambrige University Press. 2001. ISBN: 978-0-521-19069-5

JOL, H. M. **Ground Penetrating Radar: Theory and Applications**. 1ª ed. Elsevier, 509p. 2009.

LEIMBACH, G., LÖWY, H., 1910. German Patent no. 237944.

LUIZ, J. G., PEREIRA, E. S., 2013. **Archaeological prospection in southeastern Pará state, brazil using geophysical methods: a case study of sítio domingos**. Revista Brasileira de Geofísica, v. 31 (3), p. 515 – 531, 2013.

METWALY, M. **Application of GPR technique for subsurface utility mapping: A case study from urban area of Holy Mecca, Saudi Arabia**. Measurement, v. 60, p. 139 – 145, 2015. doi: 10.1016/j.measurement.2014.09.064.

MOREIRA, C. A., Dourado, J. C. **Monitoramento da atenuação natural de plume de contaminação pelo método de radar de penetração no solo (GPR)**. Revista Brasileira de Geofísica. 25 (4), p. 389 – 398, 2007. ISSN 0102-261X

NASER, M., JUNGE, A. **The Frankfurt Test Site for Utility Detection – Construction and first GPR tests**. In: 12TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND PENETRATING RADAR, Birmingham, Reino Unido, 16 – 19 de junho, 2008.

NASCIMENTO, W. G. **Investigação geofísica ambiental e forense nos cemitérios do Benguí e do Tapanã (Belém – PA)**. 2009. 153 f. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, Belém, 2009.

NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD, 2000. **Natural Gas Service Line Rupture and Subsequent Explosion and Fire**, Bridgeport, Alabama, January 22, 1999. Pipeline Accident Brief PAB – 00 – 01 (Washington D.C.: NTSB, 2000).

NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD, 2004. **Excavation damage to natural gas distribution line resulting in explosion and fire**, Wilmington, Delaware, July 2, 2003. (Washington D.C.: NTSB, 2004).

NETO, O. **Em Manaus, retroescavadeira atinge tubulação e deixa cinco áreas da Zona Sul sem água**. A crítica, Manaus, 23 Set. 2014.

NOGUEIRA, F. C., BEZERRA, F. H., CASTRO, D. L. BRANCO, R. M. G. C. **Radar de Penetração no Solo (GPR) aplicado ao estudo de estruturas tectônicas neógenas na Bacia Potiguar – NE do Brasil**. Revista de Geologia, v. 19 (1), p. 23-33, 2005.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica**, vol 3, Editora Edgard Blücher, LTDA. 1977.

O GLOBO. **Acidente com retroescavadeira causa vazamento em tubulação da CEG**. 22 Jul. 2011. Disponível em < <https://oglobo.globo.com/rio/acidente-com-retroescavadeira-causa-vazamento-em-tubulacao-da-ceg-2712330>> Acesso em: 28 Set. 2017.

PEREIRA, A. J., GAMBÔA, L. A. P. SILVA, M. A. M., RODRIGUES, A. R., COSTA, E. A **utilização do ground penetrating radar (GPR) em estudos de estratigrafia na praia de Itaipuaçu – Maricá (RJ)**. Brazilian Journal of Geophysics, v. 21 (2), p.164 – 182, 2004.

POLUHA, B.; PORSANI, J.L.; ALMEIDA, E.R.; SANTOS, V.R.N.; ALLEN, S.J. **Depth Estimates of Buried Utility Systems Using the GPR Method: Studies at the IAG/USP Geophysics Test Site**. International Journal of Geosciences (Online), v. 8(5), p. 726 – 742,

2017. doi: 10.4236/ijg.2017.85040

PORSANI, J.L. **Ground penetrating radar (GPR): Proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado-SP.** 1999. 174 f. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita (UNESP), Rio Claro, 1999.

PORSANI, J. L., RODRIGUES, A. R., CALLARI, R., ANTUNES, P. T. **O método GPR.** Comunicação Técnica Interna, Petrobrás/Cenpes/Segef, Rio de Janeiro, RJ, 1994a.

PORSANI, J. L., RODRIGUES, A. R., CALLARI, R., ANTUNES, P. T., ROSA, F. J. **Demonstração do GPR.** Comunicação Técnica Interna, Petrobrás/Cenpes/Segef, Rio de Janeiro, RJ, 1994b.

PORSANI, J. L., RODRIGUES, A. R., CALLARI, R., ANTUNES, P. T., ROSA, F. J., AIRES, J. **Uma nova ferramenta para aquisição de dados geofísicos de muito alta resolução – Experimental na bacia de São José de Itaboraí – RJ.** Comunicação Técnica Interna, Petrobrás/Cenpes/Segef, Rio de Janeiro, RJ, 1995.

PORSANI, J. L., RODRIGUES, A. R. **GPR: uma nova ferramenta para aquisição de dados geofísicos de muito alta resolução – Levantamentos experimentais.** Relatório técnico interno. Petrobrás/Cenpes/Segef, Rio de Janeiro, 1995a.

PORSANI, J. L., RODRIGUES, A. R. O método GPR aplicado à caracterização de reservatórios: um exemplo na Bacia de Potiguar – RN. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 4, 1995, Rio de Janeiro. **Resumos expandidos...**, Rio de Janeiro: SBGf. v..2, p.843 – 845, 1995b.

PORSANI JL, BORGES WR, ELIS VR, DIOGO LA, HODO FY, MARRANO A & BIRELLI CA. **Investigações Geofísicas de Superfície e de Poço no Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG-USP.** Revista Brasileira de Geofísica, v.22(3), p. 245-258, 2004.

PORSANI, J. L., ELIS, V. R., HODO, F. Y. **Geophysical investigations for the characterization of fractured rock aquifers in Itu, SE Brazil.** Journal of Applied Geophysics, v.57, p. 119-128, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2004.10.005>

PORSANI, J.L., BORGES, W.R., RODRIGUES, S.I., HIOGO, F.Y. **O sítio controlado de geofísica rasa do IAG-USP: Instalação e resultados GPR 2D-3D.** Revista Brasileira de Geofísica, v. 24(1), p. 49-61, 2006.

- PORSANI, J.L.; SAUCK, W.A. **Ground-penetrating radar profiles over multiple steel tanks: Artifact removal through effective data processing.** *Geophysics*, v.72, J77 - J83, 2007.
- PORSANI, J. L., JANGELME, G. M., KIPNIS, R. **GPR survey at Lapa do Santo archaeological site, Lagoa Santa karstic region, Minas Gerais state, Brazil.** *Journal of Archaeological Science*, v. 37 (6), p.1141 – 1148, 2010. doi:10.1016/j.jas.2009.12.028
- PORSANI, J. L., RUY, Y.B., RAMOS, F.P., YAMANOUTH, G.R.B. **GPR Applied to Mapping Utilities Along the Route of the Line 4 (yellow) Subway Tunnel Construction in São Paulo City, Brazil.** *Journal of Applied Geophysics*, v. 80, p. 25 – 31, 2012.
- PORSANI, J.L. **Avaliação de métodos geofísicos (GPR e ER) para localização de interferências no subsolo urbano.** Projeto de Pesquisa & Desenvolvimento. Convênio COMGAS/IAG/USP. 2015.
- PORSANI, J.L.; ALMEIDA, E.R.; POLUHA, B.; SANTOS, V.R.N. **GPR Tomographic Imaging of Concrete Tubes and Steel/Plastic Tanks Buried in IAG/USP Geophysical Test Site, Brazil.** *International Journal of Geosciences (online)*. v.8, p.647 – 658, 2017.
- REZOS, M. M., SCHULTZ, J. J., MURDOCK, R. A., SMITH, S. A. **Controlled research utilizing a basic all-metal detector in the search for buried firearms and miscellaneous weapons.** *Forensic Science International*, v. 195, p. 121 – 127, 2010. Doi: 10.1016/j.forsciint.2009.12.003
- RODRIGUES, S. I. **Caracterização GPR de Tambores Metálicos e Plásticos: Estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP.** 2004. 102 f. Dissertação de Mestrado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG/USP). São Paulo, 2004.
- RODRIGUES, S.I.; PORSANI, J.L. **Caracterização GPR de tambores metálicos e plásticos estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP.** *Revista Brasileira de Geofísica*, v.24 (2), p.157 – 168, 2006.
- SAUCK, W. **Controlled Site for Shallow Geophysics.** Institute for Water Sciences, Department of Geosciences, Western Michigan University. 1996.
- SANDMEIER, K.J. ReflexW Version 8.1. **Program for processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction and transmission data.** Software manual. Karlsruhe, Germany, 628p. 2016.

- SILVEIRA, A., MIGLIORINI, R. B. **Comparação entre a investigação direta da água subterrânea e radar de penetração no solo (GPR) na área do aterro sanitário de Cuiabá (MT)**. Revista Brasileira de Geosciencias. v. 39 (4), p.768 – 772, 2006.
- SANTOS, V.R.N.; AL-NUAIMY, W.; PORSANI, J.L.; HIRATA, N.S.T.; ALZUBI, H.S. **Spectral analysis of ground penetrating radar signals in concrete, metallic and plastic targets**. Journal of Applied Geophysics, v.100, p.32 – 43, 2014.
- SANTOS, V.R.N.; BORTOLOZO, C.A; PORSANI, J.L. **Joint Inversion of Apparent Conductivity and Magnetic Susceptibility to Characterize Buried Targets**. Geoscience and Remote Sensing Letters, v.14, p.1 – 5, 2017.
- SANTOS, A. A.; SHIRAIWA, S.; SILVINO, A. N. O.; SILVA, W. T. P.; SILVA, N. A.; SILVEIRA, A.; MIGLIORINI, R. B. **Comparação de investigação direta da água subterrânea e radar de penetração no solo (GPR) na área do aterro sanitário de Cuiabá-MT**. Revista Brasileira de Geociências, v. 39, p. 768- 772, 2009.
- SILVA, C. C. N., MEDEIROS, W. E., SÁ, E. F. J., NETO, P. X. **Resistivity and ground-penetrating radar images of fractures in a crystalline aquifer: a case study in Caiçara farm—NE Brazil**. Journal of Applied Geophysics, v.56, p. 295 – 307, 2004. doi:10.1016/j.jappgeo.2004.08.001
- STERN, W. **Versuch einer elektrodynamischen Dickenmessung von Gletschereis: Ger. Beitr. zur Geophysik**, v. 23, p. 292-333, 1929.
- SVORČÍK, V., EKRT, O., RYBKA, V., LIPTÁK, J., HNATOWICZ, V. **Permittivity of polyethylene and polyethyleneterephthalate**. Journal of Materials Science Letters, v.19, p. 1843 – 1845, 2000.
- TAFLOV, A. **Advances in Computational electromagnetics: The Finite-Difference Time-Domain method**. Artech House, Norwood, MA. 1998.
- TONG, L. T. **Application of Ground Penetrating Radar to locate underground pipes**. Terr. Atmos. Ocean Sci. vol. 4, p. 171-178, 1993.
- VALERIO, G., GALLI, A., BARONE, P. M., LAURO, S. E., MATTEI, E., PETTINELLI, E. **GPR detectability of rocks in a Martian – like shallow subsoil: A numerical approach**. Planetary and Space Science, v. 62, p. 31 – 40, 2012.

WAHAB, S. W. Assessing the condition of buried pipe using Ground Penetrating Radar. 2013. 227 f. Dissertação de Mestrado. School of Civil Engineering - College of Engineering and Physical Science, University of Birmingham, Birmingham – UK, 2013.

YANG, H.W., YANG, Z. K., PEI, Y.K. Ground - penetrating radar for soil and underground pipelines using the forward modeling simulation method. Optik, v. 125 (23), p. 7075 – 7079, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijleo.2014.08.099>.

YEE, K. S. Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media. Transactions on Antennas and Propagation, v. 14(3), p. 302 – 307, 1966.