



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

GERSON POMPEU PINTO

**O MÉTODO GPR APLICADO À LOCALIZAÇÃO DE TUBULAÇÕES UTILIZADAS NO
ABASTECIMENTO DE ÁGUA NA REGIÃO URBANA DO MUNICÍPIO DE BELÉM –
PARÁ.**

BELÉM
2010

GERSON POMPEU PINTO

**O MÉTODO GPR APLICADO A LOCALIZAÇÃO DE TUBULAÇÕES UTILIZADAS NO
ABASTECIMENTO DE ÁGUA NÀ REGIÃO URBANA DO MUNICÍPIO DE BELÉM –
PARÁ.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Métodos Eletromagnéticos

Orientador: Prof. Dr. Marcos Welby Correa Silva

BELÉM

2010

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação(CIP)
Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

P659m

Pinto, Gerson Pompeu

O Método GPR aplicado a localização de tubulações utilizadas no abastecimento de água na região urbana do município de Belém-Pará. / Gerson Pompeu Pinto; Orientador: Marcos Welby Correa Silva – 2010

96 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

1. Geofísica aplicada. 2. Método GPR. 3. Abastecimento de água. I. Universidade Federal do Pará II. Silva, Marcos Welby Correa, *orient.* III. Título.

CDD 20º ed.: 550

GERSON POMPEU PINTO

**O MÉTODO GPR APLICADO A LOCALIZAÇÃO DE TUBULAÇÕES UTILIZADAS NO
ABASTECIMENTO DE ÁGUA NÀ REGIÃO URBANA DO MUNICÍPIO DE BELÉM –
PARÁ.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Métodos Eletromagnéticos

Data de aprovação: ____ / ____ / 2010

Banca Examinadora:

Prof. Marcos Welby Correa Silva – Orientador
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará

Prof. José Gouvêa Luiz – Membro
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará

Prof. Leonardo Augusto Lobato Bello – Membro
Doutor em Engenharia Civil
Universidade da Amazônia

*“A grande ambição e conquista sem
contribuição é desprovida de significado”.*

O Clube do Imperador

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiramente a minha Família, pelo apoio e aconchego nos momentos de dificuldades.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcos Welby Correa Silva, pela paciência e dedicação, sobretudo pelas sugestões enriquecedoras que ajudaram no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. José Gouvêa Luiz, pela colaboração nas atividades de campo, bem como pelas aulas ministradas durante o curso.

Ao Prof. Dr. Leonardo Augusto Lobato Bello, membro da banca examinadora, pelas sugestões enriquecedoras.

Ao Prof. Dr. Cicero Roberto Teixeira Regis, por tornar os conhecimentos geofísicos mais interessantes, no transcorrer de suas aulas.

Ao professor Dr. Welitom Rodrigues Borges, pelas dicas na utilização do Software ReflexW e pelas valiosas sugestões apresentadas no transcorrer deste trabalho.

Aos colegas da Pós-Graduação: Diógenes Brasil, Diego Miranda, Gil, João Andrade, Márcio Antunes, Saulo Martins, Alex Raiol e Kimie Saito, pela socialização de idéias e pelos momentos vivenciados.

Ao colega de curso e técnico do laboratório Clístenes Pamplona Catete, pelas dicas e suporte na coleta dos dados em campo.

A José Joaquim Melo Rodrigues, engenheiro chefe de manutenção da Companhia de Saneamento do Pará (COSANPA), pela contribuição no fornecimento das informações necessárias a realização dos perfis e pelos esclarecimentos, decorrentes das dúvidas surgidas ao longo deste trabalho.

Aos meus amigos e colegas de trabalho, professores de Física da Escola Tenente Rego Barros: Alexandre Valente, Antonio Silva, Leonardo Barreto e Waldemir Nascimento, pelo apoio e incentivo demonstrados ao longo da nossa longa caminhada.

A Benildes Lopes, secretaria da Pós-graduação, pela presteza destinada aos alunos do curso e ao seu, sempre presente, bom humor que tornaram esta árdua caminhada mais amena.

Ao Paulo Magalhães, técnico do laboratório, pela valiosa contribuição na aquisição de dados.

Ao Instituto de Geociências, por proporcionar a oportunidade de realizar mais um importante passo na minha vida profissional e acadêmica. Oferecendo um espaço físico estruturado com uma excelente equipe de técnicos e professores.

Para finalizar meus agradecimentos, não poderia esquecer aquele que foi o grande inspirador dos que fazem Geofísica no Brasil, e em especial na UFPa, Luiz Rijo (in memoriam), do qual tive o privilégio de ser aluno dos seus cursos de modelagem eletromagnética.

RESUMO

Este trabalho consistiu em avaliar a viabilidade do método GPR (*Ground Penetrating Radar*) na localização de tubulações de aço, cimento-amianto, PVC e ferro fundido, de diversos diâmetros, utilizadas pela Companhia de Saneamento do Pará (COSANPA), no abastecimento de água à população da região urbana do município de Belém-Pará. Para o alcance deste objetivo foram realizados 14 perfis em 6 locais, distintos da área urbana de Belém, com o intuito de identificar 13 alvos, utilizando-se antenas de 200 MHz e 400 MHz, geralmente usadas neste tipo de levantamento. Os radargramas obtidos com o GPR permitiram identificar quase todos os alvos pesquisados. Apenas 3 dos 13 alvos, não foram plenamente identificados, ficando de fora, apenas os alvos de PVC, de pequena bitola (50 mm e 75 mm). Após o estudo concluímos que o método GPR é muito eficaz neste tipo de aplicação e que sua utilização tem grande valia na localização das redes de abastecimento de água. O que deve facilitar enormemente as obras de expansão da rede, assim como a sua manutenção.

Palavras-chaves: Geofísica aplicada. Método GPR. Abastecimento de água.

ABSTRACT

This work was carried out to evaluate the feasibility of the method GPR (Ground Penetrating Radar) method to locate steel, cement-amianthus, PVC and cast iron pipes of several diameters, used by the Companhia de Saneamento do Pará (COSANPA) for water supply to the population of the urban area of Belém-Pará. To achieve this goal 14 profiles were performed at 6 distinct sites of Belém's urban area, in order to identify 13 targets, using the of 200 MHz and 400 MHz antenna, commonly used in this type of survey. The radargrams obtained with GPR allowed to identify almost all targets surveyed. Only 3 of the 13 targets were not fully identified, leaving out only the targets of PVC of small gauge (50 mm and 75 mm). After the study, we concluded that the GPR method is very effective in this type of application and its use has great value in the location of the water supply network, what should greatly facilitate the work of expanding the network, as well as its maintenance.

Keys-Words: Applied geophysics. GPR Method, Water Supply.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 – Representação esquemática de um perfil GPR onde se observam as reflexões na interface solo-rocha e as difrações em um tubo.	19
Figura 2. 2 – Representação esquemática do registro de scans.....	20
Figura 2. 3 – Radargrama.	20
Figura 2. 4 – Diagrama ilustrativo de um GPR mono-estático.....	21
Figura 2. 5 – Diagrama ilustrativo de um GPR biestático.....	21
Figura 2. 6 – Variação da constante dielétrica em função do conteúdo de água para meios geológicos.....	24
Figura 2. 7 – Relação entre atenuação e frequência para diferentes condutividades elétricas.....	28
Figura 2. 8 – Curvas da profundidade pelicular em função da condutividade elétrica para diferentes valores de permissividade dielétrica.....	29
Figura 2. 9 – Relação entre velocidade e frequência para diferentes condutividades elétricas.....	31
Figura 2. 10 – Representação esquemática de um pulso típico de GPR.....	37
Figura 2. 11 – Representação esquemática da técnica common offset.....	38
Figura 2. 12 – Representação esquemática da técnica common mid point – CMP.....	40
Figura 2. 13 – Representação esquemática da técnica wide angle reflection and refraction – WARR.....	40
Figura 2. 14 – Representação gráfica de uma sondagem CMP ou WARR.....	41
Figura 2. 15 – Representação esquemática de: a) transiluminação <i>common offset</i> , b) tomografia direta, c) <i>Vertical Radar Profiling</i> – VRP e d) transiluminação variável.....	42
Figura 3. 1 – Distritos administrativos de Belém.....	44
Figura 3. 2 – Bairros de Belém.....	45
Figura 4. 1 – Localização geográfica de Belém.....	50
Figura 4. 2 – Mapa geológico da Região Metropolitana de Belém.....	52
Figura 5. 1 – Unidade de controle do sistema GPR da GSSI.....	54
Figura 5. 2 – Antena de 200 MHz da GSSI.....	55
Figura 5. 3 – Antena de 400 MHz da GSSI.....	55
Figura 5. 4 – Área da COSANPA no Parque Estadual do Utinga.....	58
Figura 5. 5 – Fluxograma simplificado do processamento de dados GPR.....	59

Figura 5. 6 – Representação esquemática do filtro de frequência passa banda trapezoidal.....	62
Figura 6. 1 – Restos de materiais depositados na área da COSANPA no Parque Estadual do Utinga.....	63
Figura 6. 2 – Radargrama do perfil 1. Usando antena de 200 MHz. O forte refletor hiperbólico deve representar a adutora de aço de 1000 mm.	64
Figura 6. 3 – Radargrama do perfil 2. Usando antena de 400 MHz. O forte refletor hiperbólico deve representar a adutora de aço de 1000 mm.	64
Figura 6. 4 – Escavação da adutora de aço de 1000 mm na área da COSANPA no Parque Estadual do Utinga.....	65
Figura 6. 5 – Subestação de energia elétrica na área do Parque Estadual do Utinga. ..	66
Figura 6. 6 – Radargrama do perfil 3. Usando antena de 200 MHz. Os refletores hiperbólicos devem representar a adutora de aço de 1000 mm e a tubulação de ferro fundido (FoFo) de 75 mm, usada como alimentadora do transporte de água de 75 mm.	67
Figura 6. 7 – Radargrama do perfil 3. Usando antena de 400 MHz. Os refletores hiperbólicos devem representar a adutora de aço de 1000 mm e a tubulação de ferro fundido (FoFo) de 75 mm, usada como alimentadora do transporte de água de 75 mm.	67
Figura 6. 8 – Mapa de localização dos perfis 5 e 6. Realizados no conjunto CDP, Av. Contorno no bairro da Maracangalha.....	68
Figura 6. 9 – Radargrama do perfil 5. Usando antena de 200 MHz. Os refletores hiperbólicos P1 e P2 representam, respectivamente, a tubulação FoFo – 300 mm e duas FoFo – 150 mm.	70
Figura 6. 10 – Radargrama do perfil 6. Usando antena de 400 MHz. Os refletores hiperbólicos P1 e P2 representam, respectivamente, a tubulação FoFo – 300 mm e duas FoFo – 150 mm.	70
Figura 6. 11 – Mapa de localização dos perfis 7 e 8. Realizados no conjunto CDP, na Av. Norte no bairro da Maracangalha.....	71
Figura 6. 12 – Radargrama do perfil 7. Usando antena de 200 MHz. Os refletores hiperbólicos P1, P2 e P3 representam, respectivamente, a tubulação PVC – 150 mm, manilha de esgoto e PVC – 250 mm.....	72
Figura 6. 13 – Radargrama do perfil 8. Usando antena de 400 MHz. Os refletores hiperbólicos P2 e P3 representam, respectivamente, a manilha de esgoto e PVC – 250 mm.	73
Figura 6. 14– Mapa de localização dos perfis 9 e 10. Realizados no conjunto Costa e Silva, Av. Victor da Silva no bairro da Castanheira.	74
Figura 6. 15 – Radargrama do perfil 9. Usando antena de 200 MHz. O refletor hiperbólico representa uma tubulação de cimento-amianto com 150 mm de diâmetro..	75

Figura 6. 16 – Radargrama do perfil 10. Usando antena de 400 MHz. O refletor hiperbólico representa uma tubulação de cimento - amianto com 150 mm de diâmetro.	75
Figura 6. 17 – Mapa de localização dos perfis 11, 12, 13 e 14. Realizados na Rua Antônio Everdosa e Tv. Angustura no bairro da Pedreira.	76
Figura 6. 18 – Radargrama do perfil 11. Usando antena de 200 MHz. O refletor hiperbólico representa uma tubulação FoFo – 300 mm.	77
Figura 6. 19 – Radargrama do perfil 12. Usando antena de 400 MHz.	78
Figura 6. 20 – Radargrama do perfil 13. Usando antena de 200 MHz. Os refletores hiperbólicos P1, P2, P3 e P4 representam, respectivamente, alvo indeterminado, manilha de esgoto, FoFo – 600 mm e FC – 200 mm.	79
Figura 6. 21 – Radargrama do perfil 14. Usando antena de 400 MHz. Os refletores hiperbólicos P1, P2, P3 e P4 representam, respectivamente, alvo indeterminado, manilha de esgoto, FoFo – 600 mm e FC – 200 mm.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 – Constante dielétrica (ϵ_r) e condutividade elétrica (σ_0) observadas em materiais comuns para as frequências utilizadas no GPR.	25
Tabela 2. 2 – Valores de permissividade dielétrica relativa, condutividade elétrica, velocidade média e atenuação para alguns materiais geológicos típicos. Dados obtidos usando antena de 100 MHz.	31
Tabela 2.3 – Coeficientes de reflexão para seis diferentes interfaces geológicas.	33
Tabela 2. 4 – Valores médios da janela temporal em função da profundidade para alguns materiais.	36
Tabela 3. 1– Localidades atendidas pela COSANPA.....	47
Tabela 5. 1 – Características das antenas de 200 MHz e 400 MHz.....	57
Tabela 6. 1 – Alvos pesquisados.....	80

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	O MÉTODO GPR	19
2.1	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO GPR.....	19
2.2	PRINCÍPIOS FÍSICOS DO GPR	22
2.2.1	Propriedades elétricas e magnéticas dos materiais geológicos	22
2.2.2	Propagação de ondas eletromagnéticas	26
2.3	VIABILIDADES DO MÉTODO.....	33
2.3.1	Parâmetros de aquisição	34
2.4.1	Perfis de reflexão com afastamento constante ou common offset	38
2.4.2	Sondagens de velocidade	39
2.4.3	Tomografia de radar ou transiluminação	42
3	ASPECTOS DA DISTRIBUIÇÃO DA ÁGUA EM BELÉM	43
3.1	GENERALIDADES	43
3.2	ABASTECIMENTO DE ÁGUA.....	46
4	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA.....	49
4.1	FISIOGRAFIA.....	49
4.2	GEOLOGIA.....	50
5	METODOLOGIA.....	54
5.1	AQUISIÇÃO DE DADOS	54
5.2	PROCESSAMENTO DE DADOS.....	58
6	ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS	63
6.1	PERFIS 1 E 2	63
6.2	PERFIS 3 E 4	65

6.3	PERFIS 5 E 6	68
6.4	PERFIS 7 E 8	71
6.5	PERFIS 9 E 10	73
6.6	PERFIS 11 E 12	76
6.7	PERFIS 13 E 14	78
6.8	SÍNTESE DOS ALVOS PESQUISADOS.....	80
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	82
	REFERÊNCIAS	84
	ANEXOS.....	89
	ANEXO A: POPULAÇÃO DE CADA MUNICÍPIO DO PARÁ ATENDIDA PELO ABASTECIMENTO DE ÁGUA DA COSANPA.	90
	ANEXO B: CADASTRO TÉCNICO DE REDE DE ÁGUA DA AV. CONTORNO .	93
	ANEXO C: CADASTRO TÉCNICO DE REDE DE ÁGUA DA AV. NORTE	94
	ANEXO D:CADASTRO TÉCNICO DE REDE DE ÁGUA DA AV. VICTOR DA SILVA	95
	ANEXO E: CADASTRO TÉCNICO DE REDE DE ÁGUA DA AV. ANTÔNIO EVERDOSA E AV. ANGUSTURA	96

1 INTRODUÇÃO

A possibilidade de detectar remotamente objetos enterrados no subsolo é algo que há muito tempo fascina a humanidade. A criação de uma técnica para vislumbrar a subsuperfície geológica e seu conteúdo tem concentrado esforços dos mais diversos ramos da engenharia, na busca desse propósito. Na Geofísica, os métodos sísmicos, resistividade elétrica, polarização induzida e gravimetria entre outros, têm-se revelados satisfatórios.

O Radar de Penetração no Solo (*Ground Penetrating Radar* - GPR) ou simplesmente o acrônimo GEORADAR, é um método geofísico eletromagnético cujo desenvolvimento nas últimas décadas foi tão grande que hoje é tratado separadamente dos outros métodos eletromagnéticos devido ao seu emprego nas mais variadas especializações. Trata-se de um método não invasivo, ou seja, sem a necessidade de escavações ou perfurações para a localização do alvo a ser investigado.

O GPR é um método de investigação geofísica proposto em 1904, pelo engenheiro alemão Christian Hülsmeier (REYNOLDS, 1997), fundamentada na propagação de sinais eletromagnéticos para a localização remota de objetos enterrados no solo. Entretanto, foi só em 1910 que ocorreu a primeira publicação descrevendo uma aplicação do método, feita por Gotthelf Leimbach e Heinrich Löwy, na Alemanha. Neste trabalho foi sugerido o uso de equipamentos que transmitiam ondas continuamente, porém foi só em 1926 que Hülsenbeck patenteou o primeiro equipamento que usava a emissão de pulsos de radar, com objetivo de investigar a natureza das estruturas em subsuperfícies. Em 1929, na Áustria, Stern realizou a primeira aplicação prática do GPR, com a finalidade de detectar espessuras de geleiras (OLHOEFT, 1981).

Até meados da década de 70 as aplicações do GPR resumiam-se basicamente a determinar e mapear espessuras e fissuras em geleiras. Alguns trabalhos foram realizados na Antártica e no Ártico. Entre os quais pode-se citar: Harrison (1970), Campbell & Orange (1974) e Annan & Davis (1976).

Durante a Guerra do Vietnã, ocorrida entre 1959 e 1975, o exercito americano começou aprimorar o sistema GPR com o propósito de localizar túneis escavados e usados como rota de fuga pelos vietnamitas. Ainda durante a década de 70, o GPR foi usado pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) em pesquisas da subsuperfície lunar, na missão Apollo 17 (BORGES, 2007), realizada em 11 de dezembro de 1972.

Nos estágios iniciais da aplicação do método GPR, um dos grandes empecilhos era o equipamento, pois era produzido artesanalmente, o que tornava mais difícil o acesso das universidades e empresas de pequeno porte ao equipamento. Só a partir de 1972, com a fundação da companhia Geophysical Survey Systems Incorporated (GSSI), o equipamento passou a ser disponibilizado comercialmente (MOREY, 1974).

Com os avanços tecnológicos e após anos de estudos e aprimoramentos dos equipamentos, o GPR tornou-se um dos métodos mais eficazes para sondagens e investigações em pequenas profundidades (geofísica rasa), devido aos baixos custos e à praticidade na realização dos trabalhos de campo. Hoje o método possui uma grande variedade de aplicações, tais como: aplicações forensicas, militares, engenharia civil, estudos de solos, exploração mineral, geologia básica e ambiental, geotecnia, hidrogeologia, pesquisa arqueológica, planejamento urbano, dentre outras (PORSANI, 2008).

Neste trabalho tratar-se-á da aplicação do GPR na localização de tubulações utilizadas pela Companhia de Saneamento do Pará (COSANPA) no abastecimento de água à população da região urbana de Belém-Pa. Esta aplicação é de grande relevância, pois visa contribuir nas soluções de alguns problemas decorrentes das obras de expansão e manutenção do sistema de abastecimento de água, tais como a localização exata de suas redes de abastecimento de água, pois ao longo do tempo não foram tomados os devidos cuidados com o registro e catalogação das tubulações. Atualmente a COSANPA dispõe de informações desatualizadas e muitas vezes confusas, sobre o posicionamento correto de suas redes, ocasionando um sério problema no desenvolvimento das obras de expansão e manutenção da rede. Dentro dessa perspectiva, a aplicação do método GPR na localização das tubulações, torna-se

uma alternativa viável, com custos aceitáveis, haja vista que atualmente a COSANPA não possui nenhum método de localização indireta de suas redes.

2 O MÉTODO GPR

2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO GPR

O método GPR é fundamentado na propagação de ondas eletromagnéticas de altas frequências, na faixa de 10 MHz a 2,5 GHz (DAVIS E ANNAN, 1989). Quando um pulso eletromagnético (PEM) é emitido e atinge uma interface geológica que separa propriedades eletromagnéticas diferentes, uma parcela da onda eletromagnética sofre reflexão e difração e a outra parcela continua propagando-se até ser completamente absorvida pelo meio. Parte da onda que foi refletida e difratada, em direção à superfície, é captada por antena receptora (figura 2.1). A antena receptora detecta os sinais e os envia para uma unidade de controle, onde é amplificado e armazenado em uma unidade de processamento de dados, gerando uma sequência de traços ou “scans” mostrados em registro como função do tempo de propagação (figura 2.2).

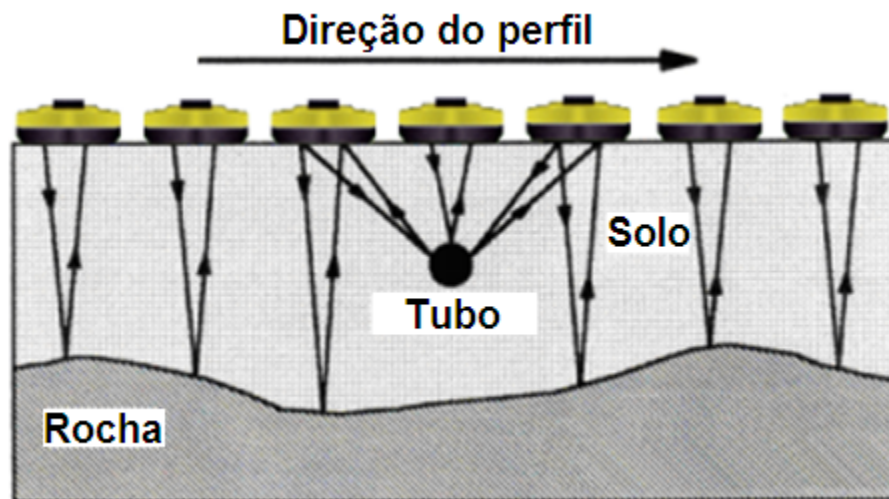


Figura 2. 1 – Representação esquemática de um perfil GPR onde se observa as reflexões na interface solo-rocha e as difrações em um tubo.

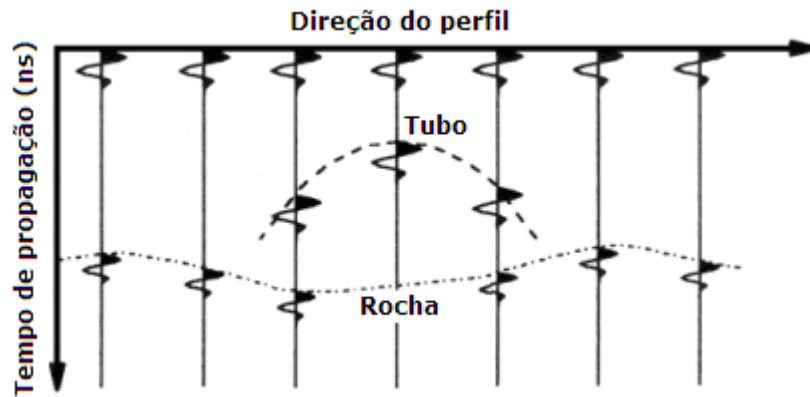


Figura 2. 2 – Representação esquemática do registro de scans.

A representação dos scans obtidos ao longo de um perfil fornece as seções 2D denominadas radargramas (Figura 2.3).

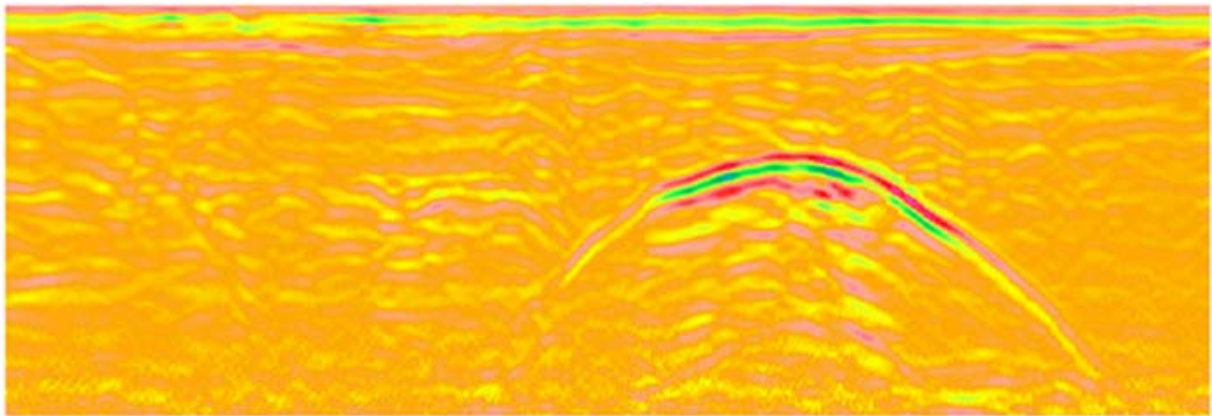


Figura 2. 3 – Radargrama.

O GPR é formado por uma caixa de controle ou gerador de pulso eletromagnético, uma antena de emissão (Tx), uma antena de recepção (Rx) e uma unidade de controle para armazenamento de dados da sondagem (datalogger). Quando o sistema é formado por uma única antena com as duas funções, emissão e recepção, o sistema é denominado mono-estático (Figura 2.4) e quando possui duas antenas, uma de emissão e outra de recepção, é denominado biestático (Figura 2.5).

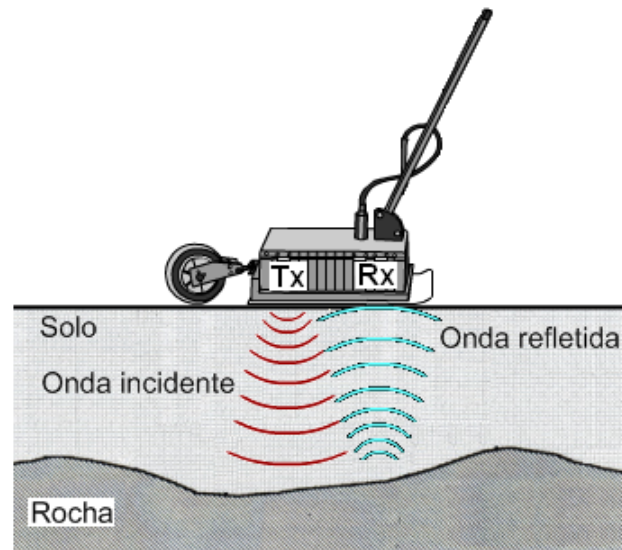


Figura 2. 4 – Diagrama ilustrativo de um GPR mono-estático.

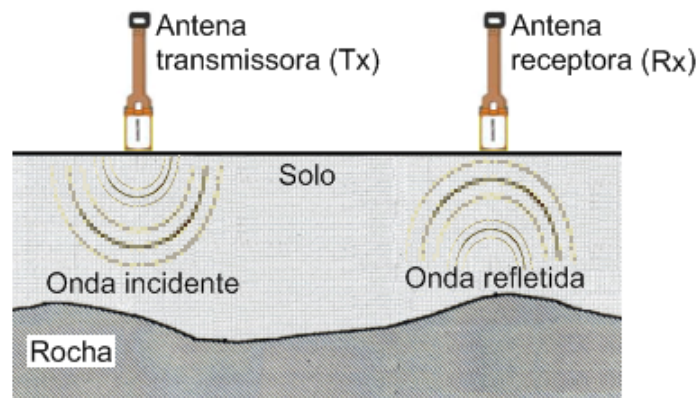


Figura 2. 5 – Diagrama ilustrativo de um GPR biestático.

Quando a antena transmissora (Tx) emite um pulso eletromagnético, este se propaga em todas as direções. No ar a velocidade de propagação é da ordem de $3 \cdot 10^8$ m/s ou 0,3 m/ns, porém, na subsuperfície esta velocidade diminui e seu valor dependerá das propriedades eletromagnéticas do meio. Essas propriedades dependem, principalmente, da quantidade de água presente no meio geológico.

A resolução do método para objetos enterrados na subsuperfície está relacionada ao seu tamanho, à orientação em relação às antenas, ao contraste entre as propriedades eletromagnéticas (condutividade elétrica, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética) dos meios geológicos, ao ruído associado à radiofrequência

e outras interferências. A condutividade elétrica e a permissividade dielétrica são importantes porque interferem na atenuação e propagação das ondas GPR, respectivamente (ANNAN, 2001). A profundidade de investigação pode variar desde centímetros, em terrenos muito argilosos, a até quilômetros no gelo polar.

2.2 PRINCÍPIOS FÍSICOS DO GPR

Os princípios físicos do GPR estão fundamentados nas equações de Maxwell. Essas equações descrevem o comportamento das interações dos campos elétricos e magnéticos em todas as situações macroscópicas e em qualquer meio. (ALONSO, 1972; REITZ *et al.*, 1982; GRIFFITHS, 1999 e NUSSENZVEIG, 1997). As referidas equações estão transcritas nas equações 2.1 a 2.4, abaixo:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = \rho \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.4)$$

onde, \vec{D} é o vetor deslocamento elétrico, \vec{H} é a intensidade do campo magnético, \vec{J} é a densidade de corrente, \vec{B} é a densidade de fluxo magnético, \vec{E} é a intensidade do campo elétrico e ρ é a densidade de cargas livres.

2.2.1 Propriedades elétricas e magnéticas dos materiais geológicos

As equações de Maxwell não fornecem as características físicas do meio, ou seja, as propriedades físicas que são essenciais para os métodos eletromagnéticos. Assim, para incluí-las devemos associá-las às relações constitutivas do meio. As relações constitutivas traduzem as interações entre os campos eletromagnéticos de

uma determinada fonte com um meio, através das propriedades físicas: condutividade elétrica (σ), permissividade dielétrica (ε) e permeabilidade magnética (μ). Tais propriedades serão descritas a seguir:

A primeira relação constitutiva, também conhecida como Lei de Ohm, mostra como as cargas livres (condutividade elétrica) de um meio se comportam na presença de um campo elétrico externo, ou seja, expressa quantitativamente a capacidade que um meio material tem de conduzir corrente elétrica.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.5)$$

Onde \vec{E} é o vetor campo elétrico externo aplicado, em newton/coulomb (N/C), σ é um fator de proporcionalidade denominado condutividade elétrica do meio, expresso em Siemens/metro (S/m) e \vec{J} é a densidade volumétrica de corrente devido as cargas livres, medido em ampère/metro² (A/m²).

São vários os fatores que contribuem na condutividade elétrica de um meio geológico, os principais são: teor de água, presença de minerais condutivos, porosidade, salinidade e a concentração de argila (KELLER, 1987). O aumento da condutividade elétrica do meio geológico implica em uma maior atenuação do sinal da onda GPR e diminuição da profundidade de penetração da onda eletromagnética.

A segunda relação constitutiva relaciona o vetor campo elétrico externo aplicado \vec{E} ao vetor deslocamento elétrico ou polarização \vec{D} , onde ε é um fator de proporcionalidade denominado permissividade dielétrica do meio, expresso em farad/metro (F/m). A permissividade dielétrica expressa a quantidade de energia armazenada através do surgimento de um campo elétrico interno, proveniente dos deslocamentos elétricos induzidos, sendo definida por:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (2.6)$$

Os efeitos da permissividade dielétrica se sobrepõem aos efeitos da condutividade elétrica para ondas eletromagnéticas a partir de 1 MHz, chegando ao

limite de saturação entre 10 GHz e 20 GHz. Quando o limite de saturação é atingido, as moléculas de água dissipam a energia armazenada em forma de calor (POWERS, 1997). Então o teor de água constitui um fator determinante na variação das propriedades elétricas do meio geológico.

A figura 2.6 ilustra os valores da constante dielétrica em função do conteúdo volumétrico de água contido nos mais variados meios geológicos. Esse gráfico foi obtido empiricamente por Topp *et al.* (1980), após diversas observações feitas em trabalhos de campo, onde foram usadas as medidas de tempo de propagação das ondas eletromagnéticas no espectro das frequências de rádio.

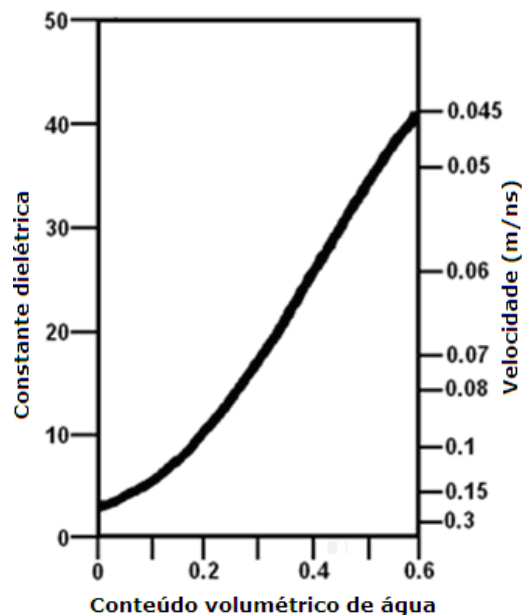


Figura 2. 6 – Variação da constante dielétrica em função do conteúdo de água para meios geológicos.
Fonte: Topp et al.(1980)

Em atividades práticas é comum o uso da permissividade dielétrica relativa ou constante dielétrica (eq. 2.7) que por definição é a razão entre a permissividade dielétrica absoluta do material (ϵ) e a permissividade dielétrica do vácuo ($\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m). A tabela 2.1 mostra valores de permissividade dielétrica relativa de alguns dos materiais mais comuns no ambiente geológico.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2.7)$$

Tabela 2. 1 – Constante dielétrica (ϵ_r) e condutividade elétrica (σ_0) observadas em materiais comuns para as frequências utilizadas no GPR.

Materiais Secos	ϵ_r	σ_0 (mS/m)	Materiais Saturados	ϵ_r	σ_0 (mS/m)
Ar	1	0	Água destilada	81	0,01
Areia e Cascalho	2 – 6	0,01	Água fresca	81	0,5
Argila	5	2	Água do mar	81	3000
Folhelho e Siltito	5	1	Areia	20 – 30	0,1 – 1
Calcário	4	0,5	Silte	10	1 – 10
Solo arenoso	2,6	0,14	Argila	40	1000
Solo argiloso	2,4	0,27	Solo arenoso	25	6,9
Sal	5 – 6	0,01 – 1	Solo argiloso	15	50
Granito	5	0,01	Arenito	20 – 30	40
Basalto	6	1	Siltito	30	100
Diabásio	7	10	Folhelho	7	100
Ferro	1	10^9	Calcário	8	2
Aço	1	10^9	Granito	7	1
PVC	3 – 5	0	Basalto	8	10
Asfalto	3 – 5	0	Diabásio	8	100
Concreto	5,5	0	Concreto	12,5	0

Fonte: Annan (2001); Daniels (1996); Porsani (1999)

A terceira relação constitutiva, relaciona o vetor campo magnético \vec{H} ao vetor indução magnética \vec{B} , por meio de um fator de proporcionalidade denominado permeabilidade magnética do meio μ e expresso em henry/metro (H/m). A

permeabilidade magnética expressa à quantidade de energia armazenada através do surgimento da indução magnética.

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.8)$$

Uma característica importante da permeabilidade magnética é que para a maioria dos materiais geológicos, excetuando os materiais ferromagnéticos, ela não apresenta variação significativa com a frequência da onda eletromagnética. Pode-se então considerar no GPR que o valor da permeabilidade magnética relativa é aproximadamente 1 (OLHOEFT, 1981; KELLER, 1987). A permeabilidade magnética relativa é a razão entre a permeabilidade magnética absoluta do material μ e a permeabilidade magnética do vácuo ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m). Porém, segundo Anann (2001), os efeitos de uma forte permeabilidade magnética não podem ser totalmente desprezados nas sondagens GPR.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.9)$$

2.2.2 Propagação de ondas eletromagnéticas

O método GPR utiliza um dipolo elétrico horizontal como fonte do campo de ondas eletromagnéticas. As frentes de ondas para uma fonte dipolar sobre a superfície da Terra são ondas esféricas e qualquer onda esférica pode ser descrita por uma superposição de ondas planas (STRATTON, 1941). A equação da onda plana para o campo elétrico, supondo o fluxo de corrente numa dada direção-x, é dada por:

$$\frac{\partial^2 \vec{E}_x}{\partial z^2} = k^2 \vec{E}_x \quad (2.10)$$

onde E_x é o campo elétrico na direção-x e k é o número de onda, expresso por:

$$k^2 = \omega^2 \mu \epsilon - i \omega \mu \sigma \quad (2.11)$$

onde $\omega^2 \mu \epsilon$ corresponde a corrente de deslocamento e $i \omega \mu \sigma$ a corrente de condução.

O método GPR utiliza altas frequências, maiores que 1 MHz, então os dois termos devem ser considerados, e a corrente de deslocamento é predominante sobre a corrente de condução (eq. 2.12). Essa é a condição favorável para o funcionamento do método GPR. Um meio com essa característica é denominado de meio dielétrico de baixa perda (ANNAN, 1992).

$$\omega^2 \mu \epsilon \gg |i \omega \mu \sigma| \quad (2.12)$$

A equação 2.11, pode ser escrita da seguinte forma:

$$k = \alpha + i\beta \quad (2.13)$$

onde α corresponde a constante de atenuação (eq. 2.14), expressa em decibel/metro (dB/b) (figura 2.7), e β a constante de propagação (eq. 2.15) (STRATTON, 1941):

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon}\right)^2} - 1 \right)} \quad (2.14)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon}\right)^2} + 1 \right)} \quad (2.15)$$

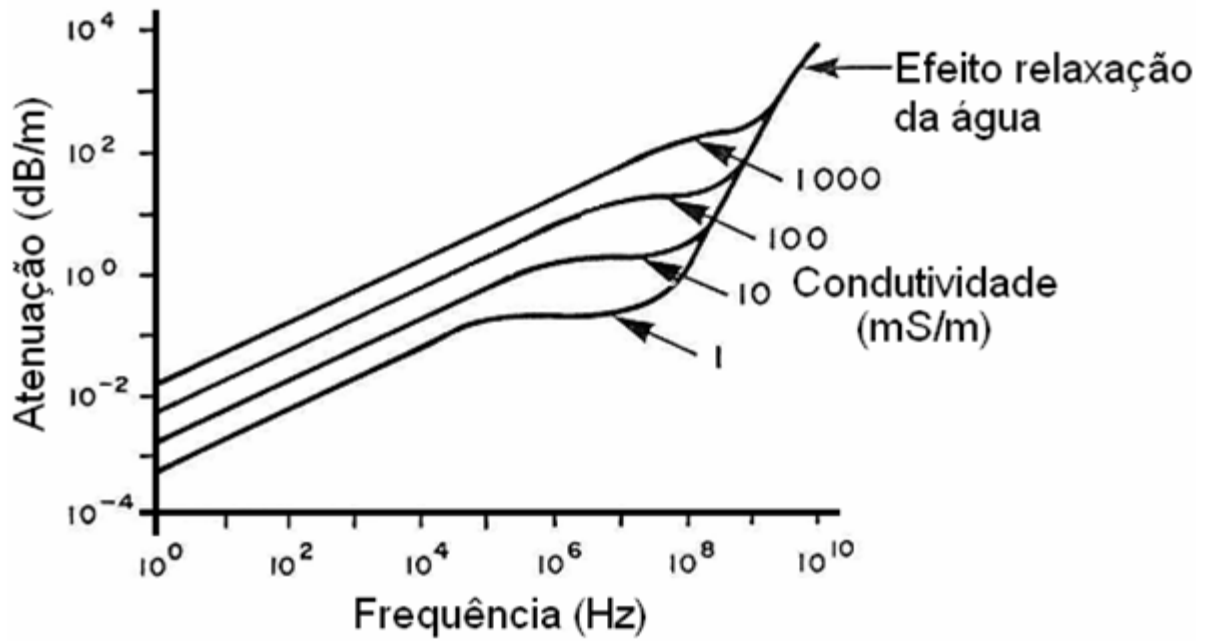


Figura 2. 7 – Relação entre atenuação e frequência para diferentes condutividades elétricas.

Fonte: Davis; Annan (1989)

A profundidade de penetração e as perdas associadas à propagação das ondas eletromagnéticas no meio geológico podem ser mensuradas pela profundidade pelicular ou “*skin depth*” (δ). O skin depth (eq. 2.16) é definido como a profundidade de penetração na qual a amplitude da onda eletromagnética reduz-se a $1/e = 36,79\%$ do seu valor inicial (RIJO, 2004).

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{1}{\sigma f}} \quad (2.16)$$

A equação 2.16, aplica-se a meios não magnéticos, isto é, $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m e $\omega = 2\pi f$, com f igual a frequência central de operação do GPR.

Analisando a equação 2.16, pode-se concluir que quanto maior a condutividade elétrica do meio geológico, menor será o skin depth, ou seja, menor será a penetração da onda no solo. O mesmo efeito é observado quando aumenta-se a frequência da onda eletromagnética (RIJO, 2004).

A figura 2.8 mostra diversas curvas da profundidade pelicular em função da condutividade elétrica para diversos valores de permissividade dielétrica relativa. Estes valores são válidos para meios geológicos de baixa perda, onde a profundidade δ não depende da frequência, ou seja, quando $\sigma \ll \omega\epsilon$.

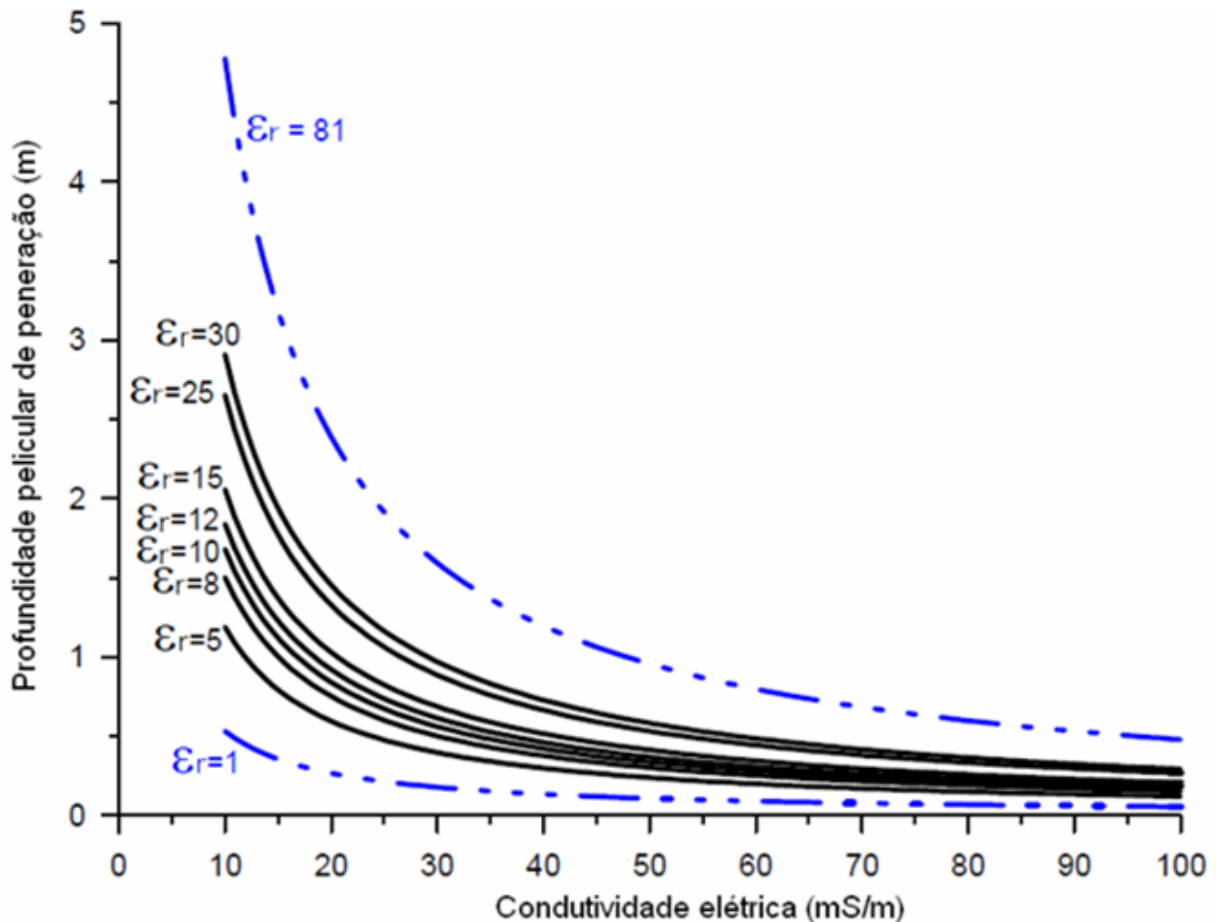


Figura 2. 8 – Curvas da profundidade pelicular em função da condutividade elétrica para diferentes valores de permissividade dielétrica.

Fonte: Gracia (2001)

Conhecer o valor da velocidade de propagação da onda GPR no meio geológico, constitui um fator de extrema relevância, pois é através dele que pode-se estimar a profundidade dos objetos. No vácuo, a onda GPR propaga-se com velocidade de 0,3 m/ns e no meio geológico com valores, geralmente, compreendidos entre 0,06 m/ns e 0,16 m/ns.

A equação 2.17 permite determinar o valor da velocidade de propagação da onda eletromagnética em um meio com permissividade dielétrica relativa (ϵ_r), condutividade elétrica (σ) e permeabilidade magnética (μ). Onde c é a velocidade da luz no vácuo, $\sigma/\omega\epsilon$ é o fator de perda e ω é a frequência (VAN DAM, 2001). Pode-se observar, através do fator de perda, que quando a condutividade aumenta a velocidade da onda diminui e vice-versa.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r \left(\frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2}}{2} \right)}} \quad (2.17)$$

Quando uma onda de alta frequência, como é o caso do GPR, propaga-se através de um meio geológico com condutividade menor que 100 mS/m, onde a perda é muito pequena, e não há presença de material ferromagnético ($\mu=1$), as equações 2.14, 2.15 e 2.17 podem ser escritas da seguinte forma:

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_r}} \quad (2.18)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\mu \epsilon_r} \quad (2.19)$$

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.20)$$

Pode-se observar através da equação 2.20, que a velocidade da onda GPR não depende da frequência GPR utilizada (figura 2.9). Depende, unicamente, da permissividade dielétrica relativa do meio de propagação do sinal GPR (DAVIS; ANNAN, 1989).

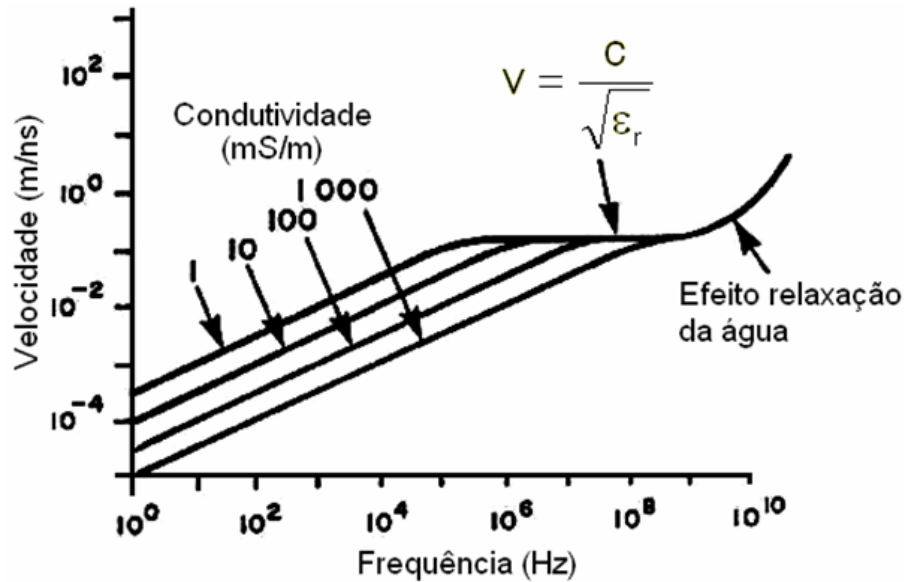


Figura 2. 9 – Relação entre velocidade e frequência para diferentes condutividades elétricas.

Fonte: Davis; Annan (1989)

As variações nas propriedades eletromagnéticas de alguns materiais geológicos mais comuns podem ser observadas na tabela 2.2.

Tabela 2. 2 – Valores de permissividade dielétrica relativa, condutividade elétrica, velocidade média e atenuação para alguns materiais geológicos típicos. Dados obtidos usando antena de 100 MHz.

Material	ϵ_r	σ (mS/m)	V(m/ns)	α (dB/m)
Ar	1	0	0,30	0
Água destilada	80	0,01	0,033	$2 \cdot 10^{-3}$
Água fresca	80	0,5	0,033	0,1
Água do mar	80	$3 \cdot 10^4$	0,01	1000
Areia seca	3 – 5	0,01	0,15	0,01
Areia saturada	20 – 30	0,1 – 1,0	0,06	0,03 – 0,3
Xisto	5 – 15	1 – 100	0,09	1 – 100
Silte	5 – 30	1 – 100	0,07	1 – 100

Argilas	3 – 40	2 – 1000	0,06	1 – 300
Granito	4 – 6	0,01 – 1,0	0,13	0,01 – 1,0
Sal seco	5 – 6	0,01 – 1,0	0,13	0,01 – 1,0
Gelo	3 – 4	0,01	0,16	0,01

Fonte: Davis; Annan (1989)

Observando a tabela 2.2, é possível verificar que a permissividade dielétrica relativa da água possui um valor muito superior aos demais materiais geológicos. Isso faz o GPR extremamente sensível ao conteúdo de água do solo.

Quando uma onda eletromagnética propaga-se no subespaço geológico ela depara-se com as variações das propriedades eletromagnéticas das diversas camadas que o constituem. Essa descontinuidade eletromagnética pode gerar uma forte impedância na interface de separação das camadas, definida a parcela de energia que será refletida. O coeficiente de reflexão (R) é a grandeza que expressa o poder de reflexão entre duas camadas distintas. O coeficiente de reflexão pode ser calculado pela equação 2.21 (REYNOLDS, 1997).

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} = \frac{1 - \sqrt{\frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}}}}{1 + \sqrt{\frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}}}} = \frac{1 - \sqrt{\frac{v_1}{v_2}}}{1 + \sqrt{\frac{v_1}{v_2}}} = \frac{\sqrt{v_2} - \sqrt{v_1}}{\sqrt{v_1} + \sqrt{v_2}} \quad (2.21)$$

Onde ϵ_{r1} , ϵ_{r2} , v_1 e v_2 , são as permissividades dielétricas relativas e as velocidades da onda nas camadas 1 e 2, respectivamente.

Observando a tabela 2.3, pode-se concluir que na interface solo-metal ocorre o fenômeno da reflexão total (R = 100%), que constitui uma excelente aplicação do GPR na detecção de objetos metálicos enterrados. O mesmo não ocorre na interface solo seco-rocha, pois a reflexão é relativamente baixa. Na interface ar-solo seco, tem-se uma forte reflexão, que é indesejada nos trabalhos de campo e uma forma de tentar reduzir esse efeito é posicionando a antena o mais próximo possível do solo.

Tabela 2.3 – Coeficientes de reflexão para seis diferentes interfaces geológicas.

Do	ϵ_r	Para	ϵ_r	Coeficiente de reflexão (%)
Ar	1	Solo seco	5	38
Solo seco	5	Água	81	80
Solo seco	5	Solo saturado	25	38
Solo seco	25	Rocha	8	12
Solo saturado	25	Rocha	8	28
Solo	3,5	Metal	∞	100

Fonte: adaptado de Annan (2001)

2.3 VIABILIDADES DO MÉTODO

Antes da execução de um perfil de GPR, devemos avaliar a viabilidade da aplicação do método, tais como: dimensão e profundidade do alvo a ser investigado, relevo da região, existência de contraste entre as propriedades elétricas do alvo (condutividade – σ , permissividade – ϵ e permeabilidade magnética – μ) e do meio geológico, se existem dados de levantamentos (geofísicos, geológicos, geotécnicos) na região e se há fontes de ruídos externos (torres de alta tensão; cercas metálicas; postes de iluminação e antenas de celular, rádio e TV).

A profundidade máxima (D_{max}) de penetração do GPR pode ser determinada pela equação 2.22. Verifica-se a eficiência do método para alvos localizados a profundidades inferiores a 50% do valor da D_{max} (ANNAN, 2001).

$$D_{max} < \frac{35}{\sigma} \quad (2.22)$$

onde a condutividade elétrica é dada em mS/m e o valor de D_{max} em metros.

2.3.1 Parâmetros de aquisição

Ainda na execução das etapas que antecedem um perfil de GPR, é importante analisar alguns parâmetros que serão usados no levantamento de campo, tais como:

Frequência

A escolha adequada da frequência central da antena está relacionada ao objetivo da sondagem, pois o aumento da frequência melhora a resolução, entretanto, reduz a profundidade de penetração da onda GPR. Três fatores estão associados à escolha da frequência central a ser utilizada no levantamento. São elas:

a) Resolução espacial

Para evitar a superposição de dois sinais relativos a eventos distintos é necessário que o tempo de propagação do pulso eletromagnético emitido seja, pelo menos, duas vezes menor que a diferença entre os tempos duplos de propagação dos respectivos eventos. A frequência que deverá ser utilizada com intuito de diferenciar os tempos de chegada oriundos de um alvo de espessura (δ_R), em metros, será dada por:

$$F^R > \frac{75}{\delta_R \sqrt{\epsilon_{meio}}} \quad (2.23)$$

onde F^R é a frequência em MHz e ϵ_{meio} a permissividade dielétrica do meio geológico (ANNAN, 2001).

b) Frequência de Clutter

A frequência Clutter define a dimensão mínima (δ_C), em metros, abaixo da qual as estruturas tornam-se imperceptíveis ao sinal GPR. O seu valor é dado por:

$$F^C < \frac{30}{\delta_C \sqrt{\epsilon_{alvo}}} \quad (2.24)$$

onde F^C é a frequência em MHz e ϵ_{alvo} a permissividade dielétrica do alvo a ser detectado (ANNAN, 2001).

c) Profundidade de exploração

Este fator relaciona a profundidade (p) estimada do alvo, em metros, com a permissividade dielétrica do meio (ϵ_{meio}) geológico para que possamos ter espalhamento da onda GPR suficiente para a identificação do alvo. Seu valor é dado por:

$$F^D < \frac{1200 \sqrt{\epsilon_{meio} - 1}}{p} \quad (2.25)$$

onde F^D é a frequência em MHz.

Portanto, para que possamos ter êxito em uma sondagem GPR, a frequência central a ser utilizada no levantamento deve obedecer à seguinte relação (ANNAN, 2001):

$$F^R < f_{central} < \min(F^D, F^C) \quad (2.26)$$

Janela temporal ou Range

É o intervalo de tempo pré-estabelecido de registro das ondas GPR que retornam após a emissão do pulso e as sucessivas reflexões provocadas pelas estruturas presentes na área da sondagem. Seu valor é expresso pela seguinte equação (ANNAN, 2001):

$$R = 1,3 \cdot \frac{2 \cdot D_{max}}{v} \quad (2.27)$$

onde D_{\max} é a profundidade máxima de investigação desejada, em metro, e v é a velocidade de propagação da onda no meio encaixante, em m/ns. A tabela 2.4 mostra valores de tempo duplo, em ns, para alguns materiais.

Tabela 2. 4 – Valores médios da janela temporal em função da profundidade para alguns materiais.

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

Fonte: Annan (2001)

Intervalo temporal de amostragem

Este parâmetro corresponde ao intervalo de tempo entre duas amostragens seguidas, que a unidade de controle realiza sobre a antena de recepção com a finalidade de mensurar a energia refletida. A escolha do intervalo temporal de amostragem (δ_T), em ns, é feita em função do valor da frequência central (f_c), em MHz, pois o pulso eletromagnético emitido pelo GPR é composto por uma faixa de frequências que variam de 0,5 a 1,5 do seu valor central, que é a região de maior concentração de energia (figura 2.10). O seu valor é dado por (ANNAN, 2001):

$$\delta_T = \frac{1000}{6 \cdot f_c} \quad (2.28)$$

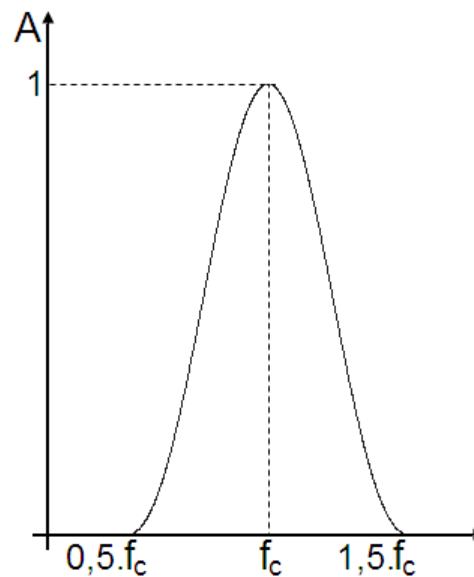


Figura 2. 10 – Representação esquemática de um pulso típico de GPR

Separação entre as marcações

É a distância entre as estações de medida (Δx), em metros. Segundo o princípio da amostragem espacial de Nyquist o seu valor tem que ser equivalente a um quarto do comprimento da onda do pulso GPR emitido. O step está relacionado com a frequência central (f_c), em MHz, e a permissividade dielétrica do meio (ϵ_{meio}) através da equação (ANNAN, 2001):

$$\Delta x = \frac{c}{4f_c\sqrt{\epsilon_{meio}}} \quad (2.29)$$

Separação entre as antenas

A distância de separação entre as antenas é recomendada pelos próprios fabricantes. Para verificar a distância sugerida para cada frequência é só consultar o manual.

2.4 AQUISIÇÃO DE DADOS

A aquisição de dados GPR pode ser realizada de três maneiras: perfis de reflexão com afastamento constante ou “common offset”, sondagens de velocidade que pode ser “common mid point” – CMP ou “wide angle reflection and refraction” – WARR e tomografia de radar ou transiluminação (ANNAN, 2001).

2.4.1 Perfis de reflexão com afastamento constante ou common offset

Os perfis de reflexão com afastamento constante são os mais comuns em levantamentos GPR (figura 2.11) e será a técnica aplicada na elaboração deste trabalho. A técnica consiste em manter as antenas de transmissão e recepção separadas de uma distância constante e transportadas ao longo de uma linha com espaçamentos regulares.

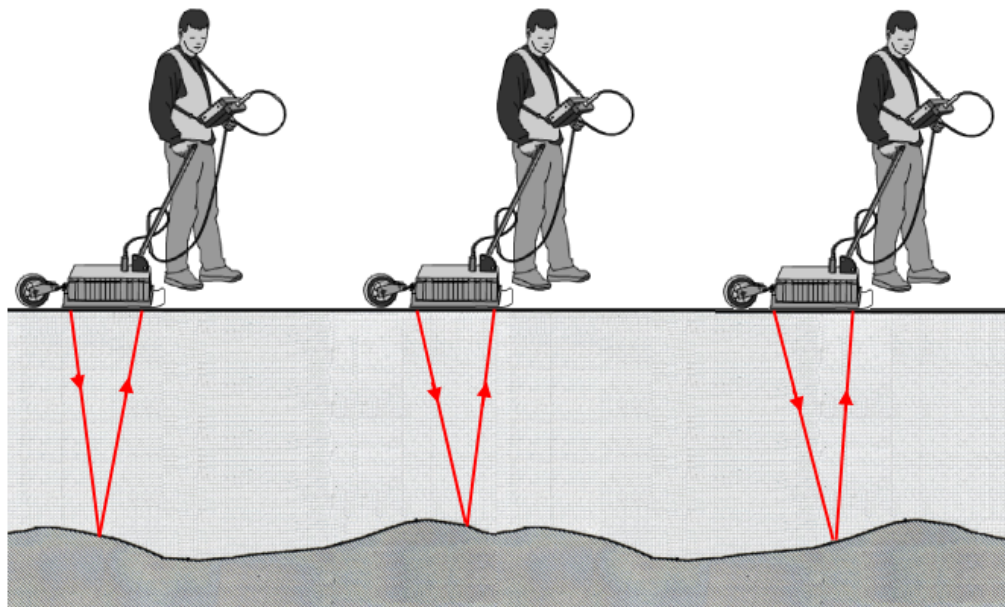


Figura 2. 11 – Representação esquemática da técnica *common offset*.

2.4.2 Sondagens de velocidade

As sondagens de velocidade devem anteceder a aquisição de dados de um perfil de GPR. Seu objetivo é determinar a velocidade da onda eletromagnética no meio geológico.

A velocidade da onda de RADAR pode ser determinada de três maneiras:

- A primeira forma consiste em determinar o valor da constante dielétrica do meio geológico e posteriormente substituí-lo na equação 2.20;
- Perfurar poços na região onde serão efetuadas as sondagens GPR. Assim, pode-se medir a profundidade do refletor localizado na base do poço e utilizando-se o radargrama pode-se determinar o tempo de propagação da onda através do meio, com esses valores é só substituí-los na equação 2.30 para determinar o valor da velocidade:

$$v = \frac{2h}{t} \quad (2.30)$$

onde: v é a velocidade da onda de radar no meio (m/ns), h é a profundidade (m) e t é o tempo duplo nos perfis GPR (ns);

- Executar uma sondagem CMP ou WARR.

A técnica CMP consiste em aumentar gradativamente o espaçamento entre as antenas de transmissão e recepção a partir de um ponto fixo central (figura 2.12).

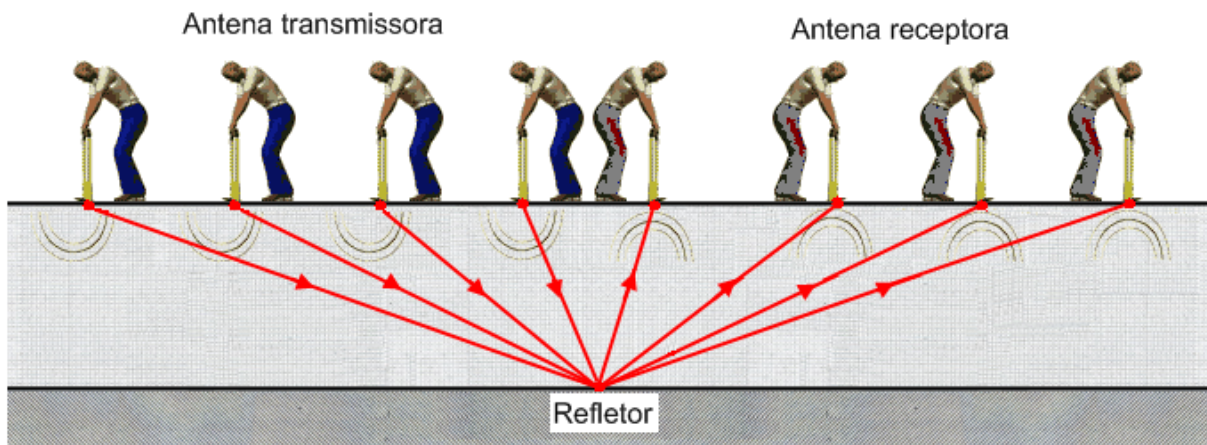


Figura 2. 12 – Representação esquemática da técnica *common mid point* – CMP.

Na técnica WARR, uma das antenas, a transmissora por exemplo, é mantida fixa, enquanto a outra antena receptora é afastada com deslocamentos constantes (figura 2.13).

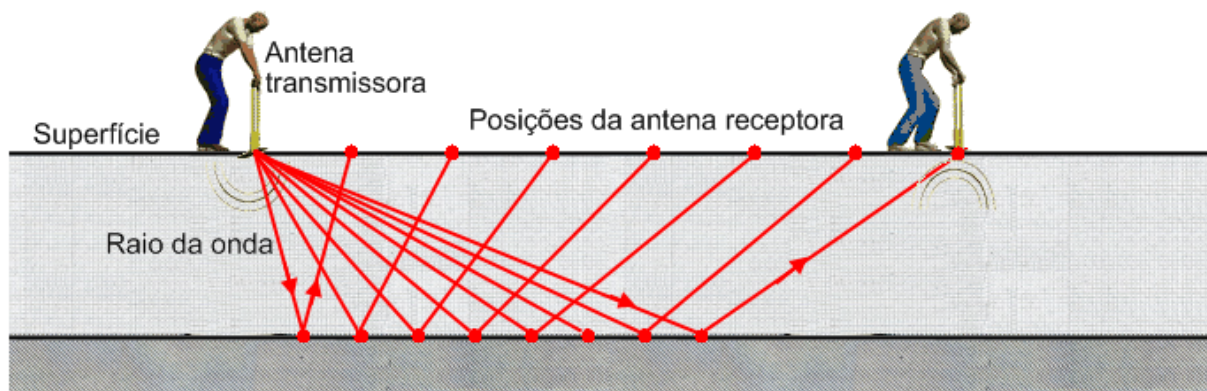


Figura 2. 13 – Representação esquemática da técnica *wide angle reflection and refraction* – WARR.

Após uma sondagem CMP ou WARR, o resultado obtido é um gráfico da distância em função do tempo (figura 2.14).

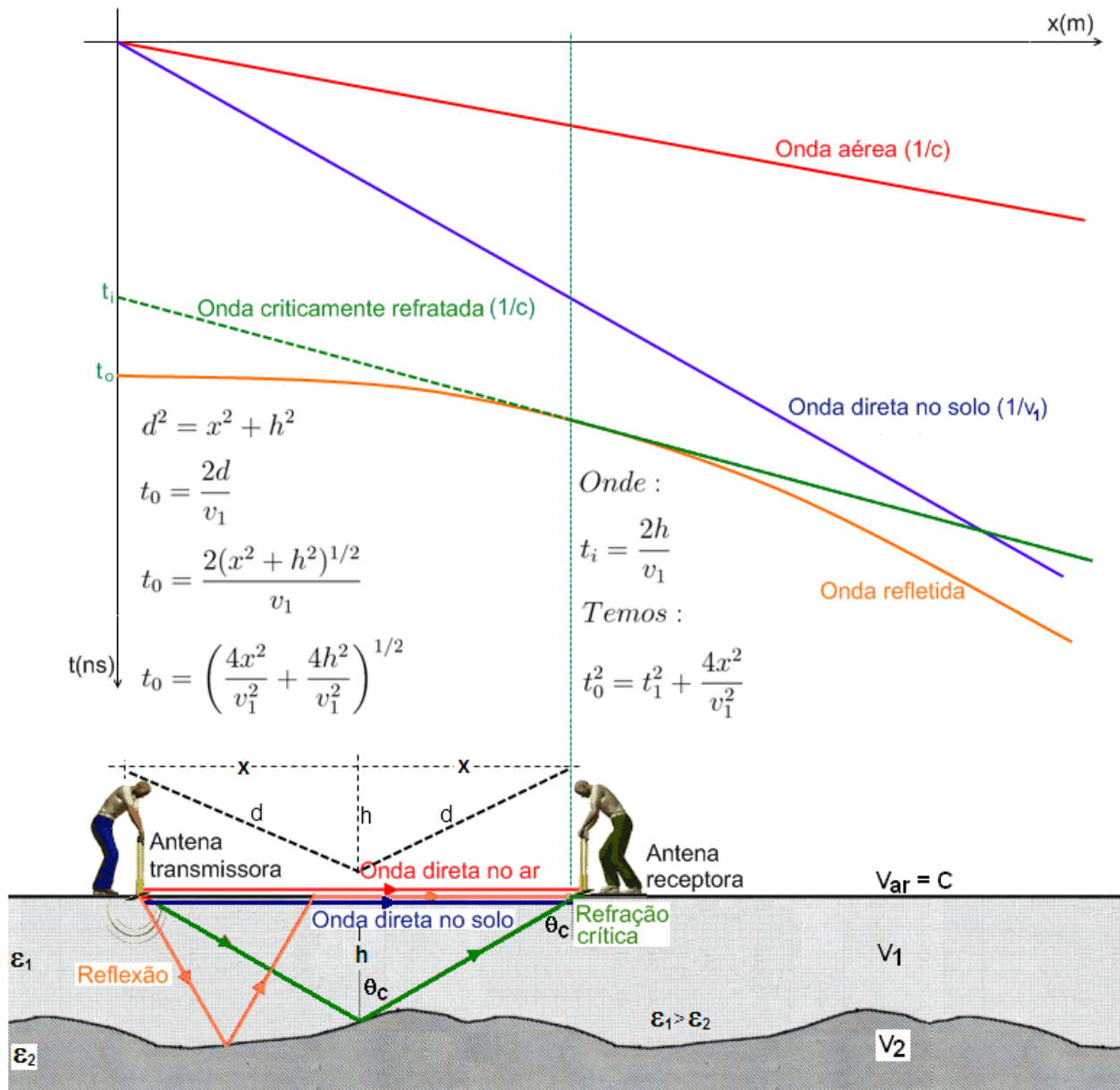


Figura 2. 14 – Representação gráfica de uma sondagem CMP ou WARR

Analisando o gradiente das curvas mostradas no gráfico acima, é possível obter as velocidades das ondas aérea e direta no solo.

Através da hipérbole de reflexão pode-se estimar o valor da velocidade da onda refletida através da equação a seguir:

$$t_0^2 = t_1^2 + \frac{4x^2}{v_1^2} \tag{2.31}$$

onde t_0 é o tempo de percurso da onda refletida no solo, x é a meia distância entre as antenas emissora e receptora, t_i é o tempo de ida e volta para o caso onde não há afastamento entre as antenas, v_1 é velocidade de propagação da onda na primeira camada e t_0 é o tempo de trânsito para uma reflexão (NETO, 2006).

2.4.3 Tomografia de radar ou transiluminação

A tomografia de radar ou transiluminação aplica-se nas investigações de poços, estruturas feitas pelo homem e exploração de minas. A técnica consiste em quatro diferentes arranjos: transiluminação *common offset* (figura 2.15a), tomografia direta (figura 2.15b), *Vertical Radar Profiling* – VRP (figura 2.15c) e transiluminação variável (figura 2.15d) (BORGES, 2007).

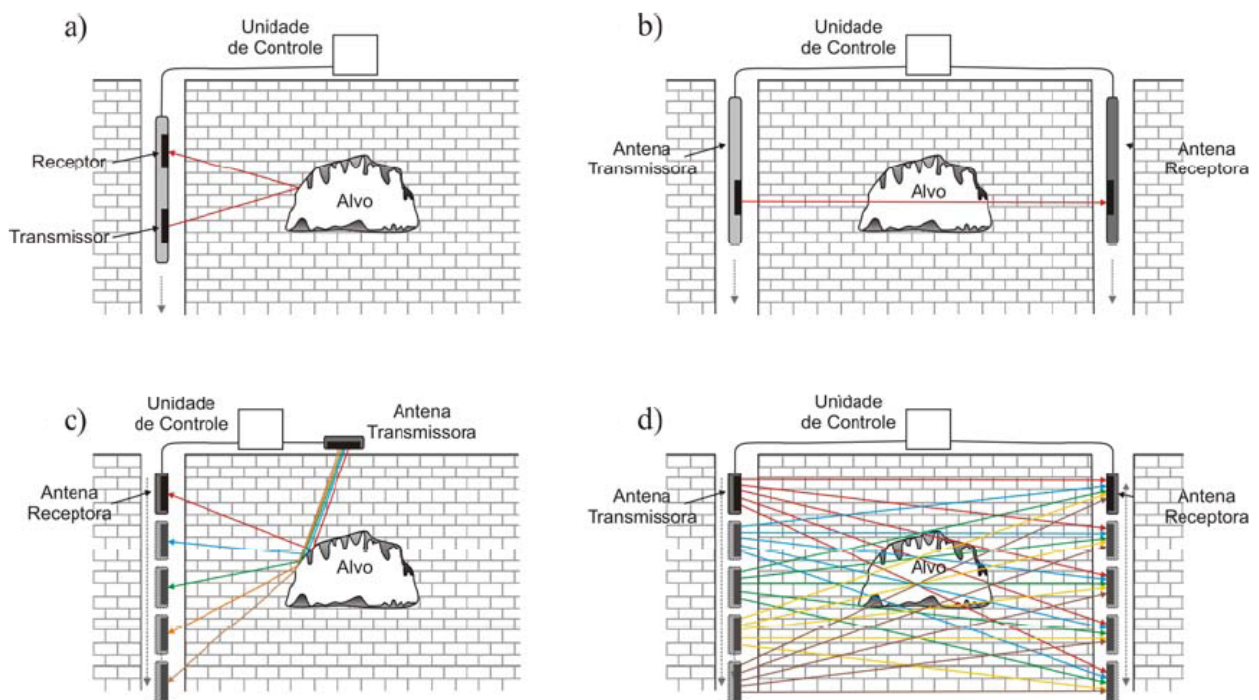


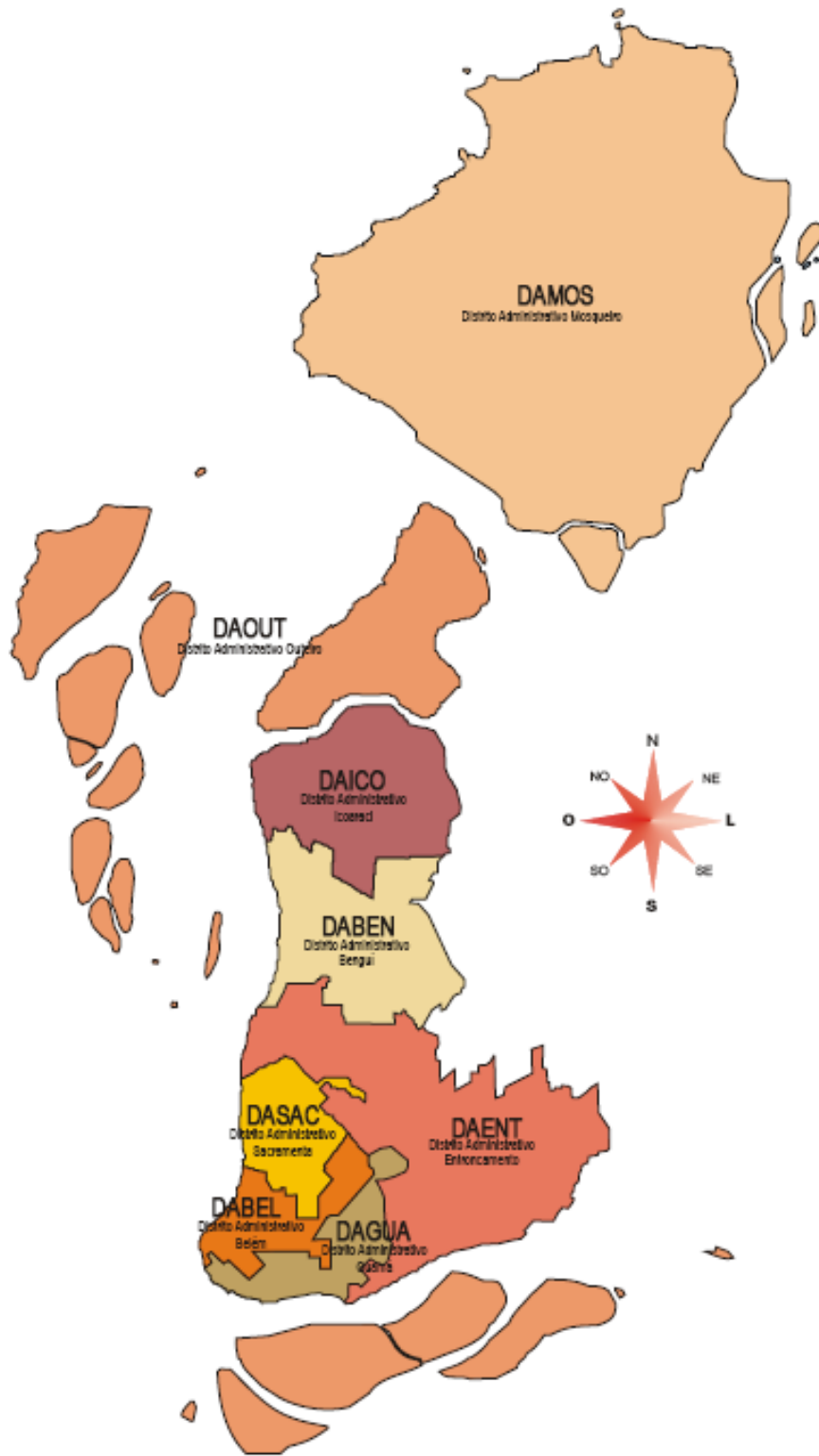
Figura 2. 15 – Representação esquemática de: a) transiluminação *common offset*, b) tomografia direta, c) *Vertical Radar Profiling* – VRP e d) transiluminação variável.

Fonte: Borges (2007)

3 ASPECTOS DA DISTRIBUIÇÃO DA ÁGUA EM BELÉM

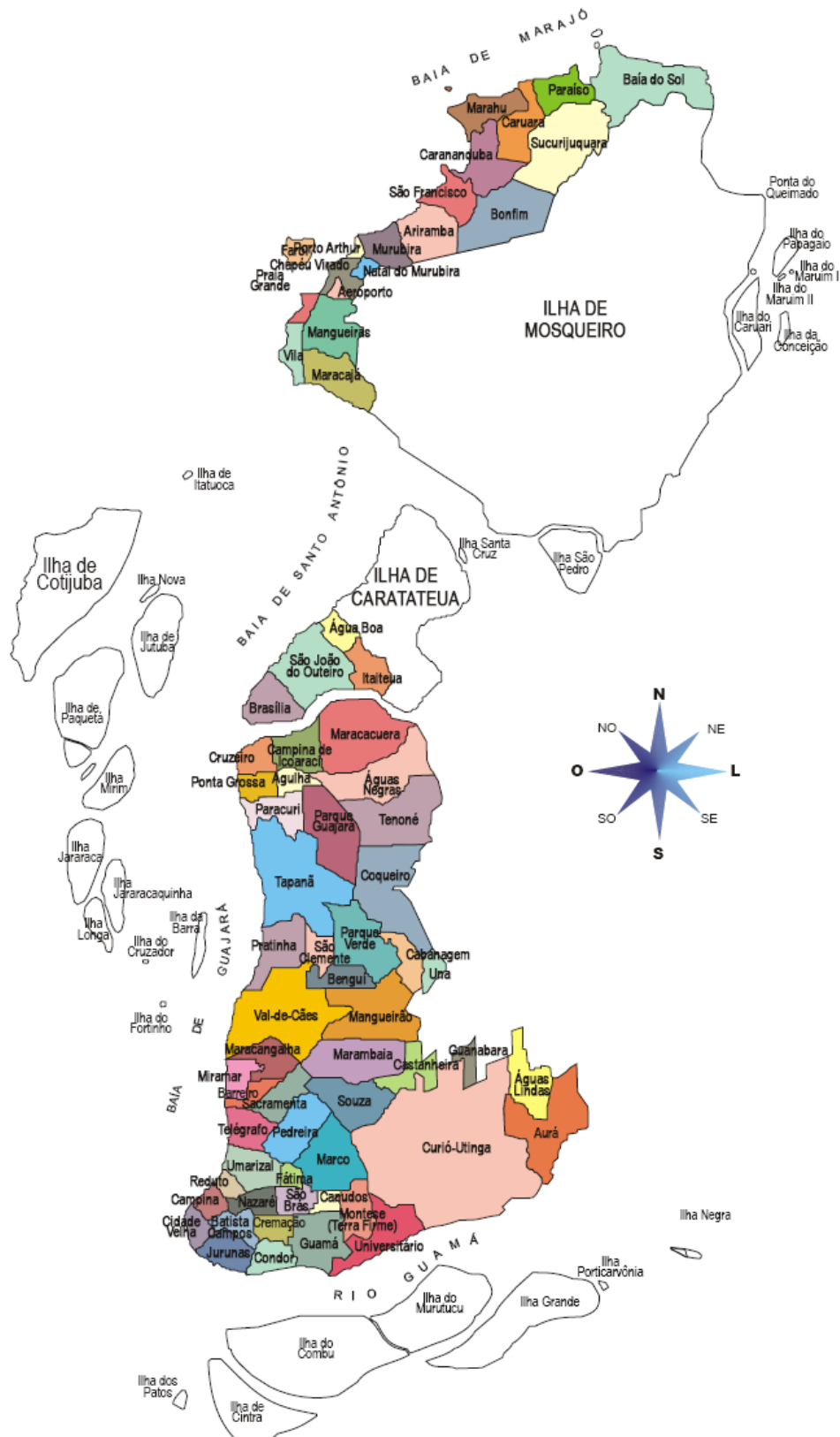
3.1 GENERALIDADES

O município de Belém possui 1.408.847 habitantes, distribuídos em uma área de 1.064,92 km² (IBGE, 2007). Em divisão territorial datada de 15/07/1999, o município é constituído de 8 distritos administrativos (figura 3.1): Belém, Bengui, Entrocamento, Guamá, Icoraci, Mosqueiro, Outeiro e Sacramenta (IBGE, 2007) e 71 bairros (figura 3.2). Sua economia gira em torno, basicamente, do comércio, serviços e turismo, embora seja também desenvolvida a atividade industrial com alguns estaleiros, metalúrgicas, pesca e beneficiamento do palmito, mas principalmente madeireira. O PIB per capita da cidade é de R\$ 9.793/ano, enquanto o nacional é de R\$14.465/ano (PARÁ, 2007) e seu índice de desenvolvimento humano municipal (IDHM) é 0,797, ocupando o 13^o lugar entre as regiões metropolitanas do Brasil (PNUD, 2003).



Fonte: Secretaria Municipal de Coordenação Geral do Planejamento e Gestão - SEGEP

Figura 3. 1 – Distritos administrativos de Belém.



Fonte: Secretaria Municipal de Coordenação Geral do Planejamento e Gestão - SEGEP

Figura 3. 2 – Bairros de Belém.

3.2 ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Belém possui 296.352 domicílios particulares permanentes, destes 218.066 são atendidos pelo serviço público de abastecimento de água potável e 78.286 domicílios estão desprovidos deste serviço. Esta situação é preocupante, pois as pessoas que não recebem água tratada, geralmente perfuram poços rasos, para captarem água do lençol freático, que geralmente não possuem nenhuma proteção. Isso representa um grave problema de saúde pública, pois há um alto risco de consumir água contaminada pelo esgoto doméstico ou fossas sanitárias. Apenas 73,60% dos domicílios de Belém são assistidos pelo serviço público de abastecimento de água, que é feito em grande parte do município pela Companhia de Saneamento do Pará (COSANPA), que atende todo o município, com exceção do distrito de Icoaraci, Outeiro e parte de Mosqueiro, cujo atendimento é feito pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Belém (SAAEB), que atende 32.118 domicílios (BELÉM, 2005; BELÉM, 2006).

A principal fonte provedora da água consumida pela população de Belém é oriunda do Rio Guamá, que abastece os lagos Água Preta (10.550.000 m³) e Bolonha (2.100.000 m³), localizados na Área de Proteção Ambiental, os quais formam o manancial do Utinga. A água bruta captada no rio Guamá é armazenada no lago Água Preta e conduzida ao lago Bolonha. A água bruta do lago Bolonha é bombeada para três Estações de Tratamento de Água (ETA): Bolonha (3.200 L/s), São Brás (1.200 L/s) e Marco (700 L/s) (FERNANDES, 2005).

A ETA Bolonha é a maior em volume de água tratada. A água produzida nesta estação é distribuída em 9 setores de abastecimento da zona central de Belém (FERNANDES, 2005) e passa atualmente por obras de expansão, onde após sua conclusão terá sua capacidade de fornecimento aumentada de 3.200 para 6.400 litros de água por segundo, melhorando o abastecimento de água nos municípios de Belém e Ananindeua (FALTARÁ, 2009).

A segunda fonte provedora de água à população de Belém são os mananciais subterrâneos, responsáveis pelo abastecimento da periferia, cuja captação é feita

através da perfuração de poços com vazões que variam entre 60 a 360 m³/h. O volume captado de água é estimado em 1.988.242 m³/mês (FERNANDES, 2005).

A Companhia de Saneamento do Pará – COSANPA

A COSANPA (Companhia de Saneamento do Pará) foi criada em 21/12/1970, pelo então governador, Alacid da Silva Nunes, através da Lei n° 4336, em substituição ao antigo Departamento de águas e Esgotos. A companhia tem como missão atender a população urbana do Estado do Pará com serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário, de forma a alcançar elevados níveis de qualidade e de universalização. Entretanto, ela atende atualmente, somente, 61 dos 143 municípios do Pará e 8 vilas (Tabela 3.1), ou seja, 2.110.475 do total de 3.363.875 de habitantes que residem em áreas urbanas (anexo A), cerca de 62,7% da população que habita as cidades do Estado do Pará.

Tabela 3. 1– Localidades atendidas pela COSANPA.

Regionais	Municípios
Metropolitana	Ananindeua, Belém, Mosqueiro e Marituba.
Baixo Amazonas	Alenquer, Altamira, Faro, Itaituba, Juruti, Monte Alegre, Óbidos, Oriximiná, Prainha, Santarém, Terra Santa e Vitória do Xingu.
Nordeste	Augusto Corrêa, Bragança, Capanema, Capitão Poço, Castanhal, Dom Eliseu, Inhangapi, Magalhães Barata, Marapanim, Nova Timboteua, Ourém, Peixe Boi, Salinópolis Santa Luzia do Pará, Santa Maria do Pará, São Caetano de Odivelas, São Francisco do Pará, Tracuateua, Vigia e Viseu.
Das Ilhas	Abaetetuba, Afuá, Anajás, Breves, Cachoeira do Arari, Igarapé Mirim, Limoeiro do Ajuru, Mocajuba, Moju, Oeiras do Pará, Ponta de Pedras, Portel, Salvaterra, Santa Cruz do Arari Soure e Tailândia.
Tocantins	Breu Branco, Conceição do Araguaia, Itupiranga, Jacundá, Marabá, Novo Repartimento, Redenção, Santa Maria das Barreiras e São Félix do Xingu.

Fonte: COSANPA (2009)

A COSANPA, há mais de dez anos não recebia a ingestão de recursos, satisfatórios, para a manutenção e ampliação de sua capacidade de atendimento a população. Ao longo destes anos veio acumulando deficiências operacionais, seja pela falta de manutenção adequada de sua rede de abastecimento de água e esgoto, seja pelo elevado incremento na demanda. Entretanto, a partir de 2007, os investimentos foram retomados, através do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), com quase 300 milhões de reais a ser investido em obras de melhorias no abastecimento de água e esgotamento sanitário nos municípios de Belém, Ananindeua, Marituba, Castanhal, Marabá e Santarém (PAC, 2007).

4 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

4.1 FISIOGRAFIA

A área de estudo, a cidade de Belém, capital do Estado do Pará, possui uma área territorial de 736 km² e está situada na coordenada geográfica a 01°27'20" de latitude sul e 48°30'15" de longitude oeste (figura 4.1), a uma altitude média de 15 m em relação ao nível do mar (RIBEIRO, 1992; FARIAS; NASCIMENTO; FERREIRA, 1992). Suas fronteiras limítrofes são: ao norte Baía do Marajó, a nordeste o município de Santo Antônio do Tauá, a leste com os municípios de Santa Bárbara do Pará, Benevides e Ananindeua, ao sul com o município do Acará, a sudoeste com o município de Barcarena e a oeste com a Bacia do Marajó (BELÉM, 2006).

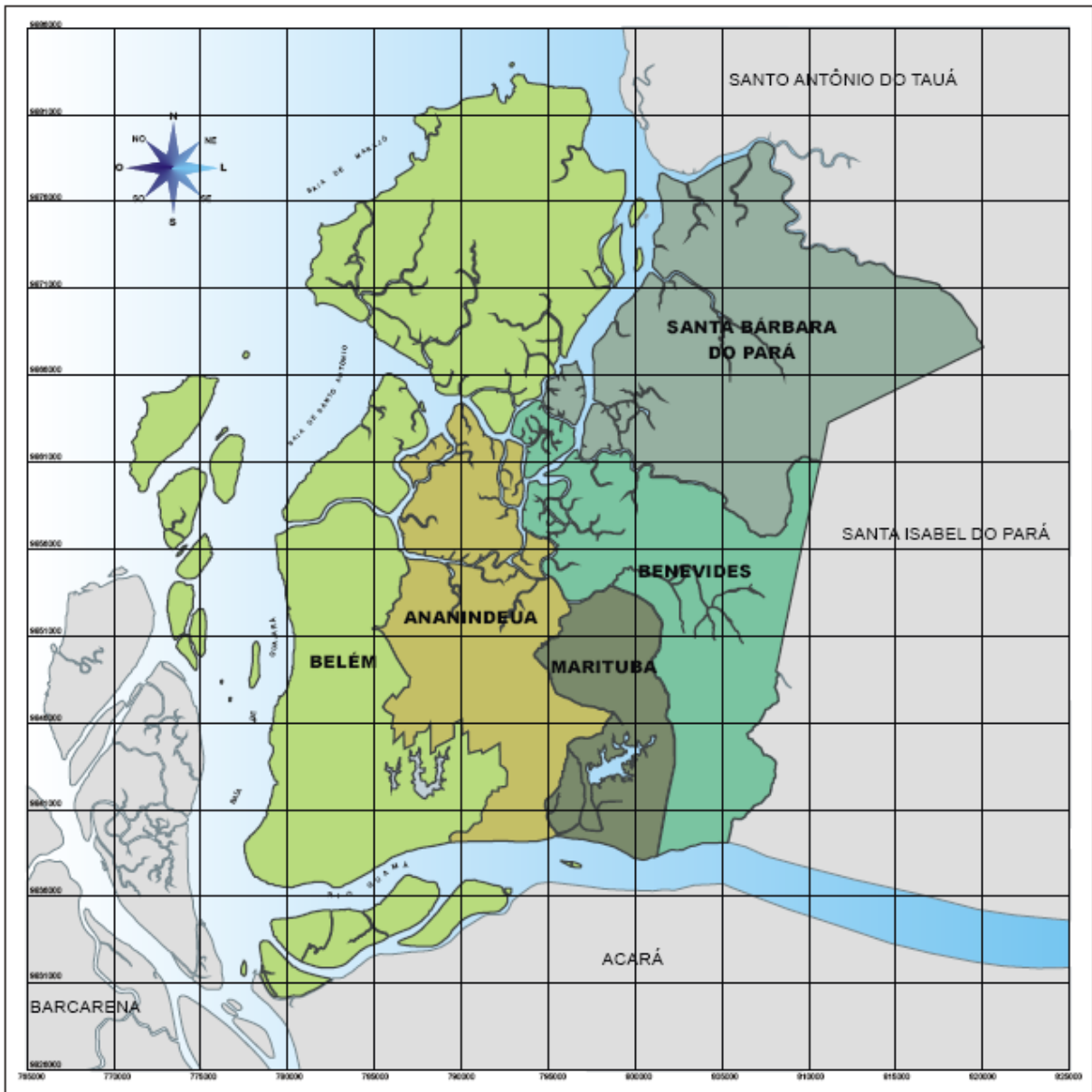


Figura 4. 1 – Localização geográfica de Belém.

4.2 GEOLOGIA

O território do Município de Belém é constituído geologicamente, em sua grande maioria, pela unidade Pós-Barreiras (Figura 4.2), que caracteriza-se por apresentar sedimentos compostos de areias de granulometria fina a média, marrom,

inconsolidadas, facilmente desagregadas, com predominância de grãos de quartzo. As areias são intercaladas em argilas escuras, com restos vegetais, distribuídos nas orlas dos rios e igarapés; por sedimentos continentais do Grupo Barreiras composto por arenitos ferruginosos, areias finas a médias, siltsas e argilosas e por sedimentos pertencentes à Formação Pirabas que é composta predominantemente, por calcários fossilíferos de coloração amarelada ou acinzentada, alternados com argilas e areias. Às vezes são calcários duros de coloração cinza, intercalados com camadas de argila calcífera em leitos sucessivos. (SAUMA FILHO, 1996; MATTA, 2002).

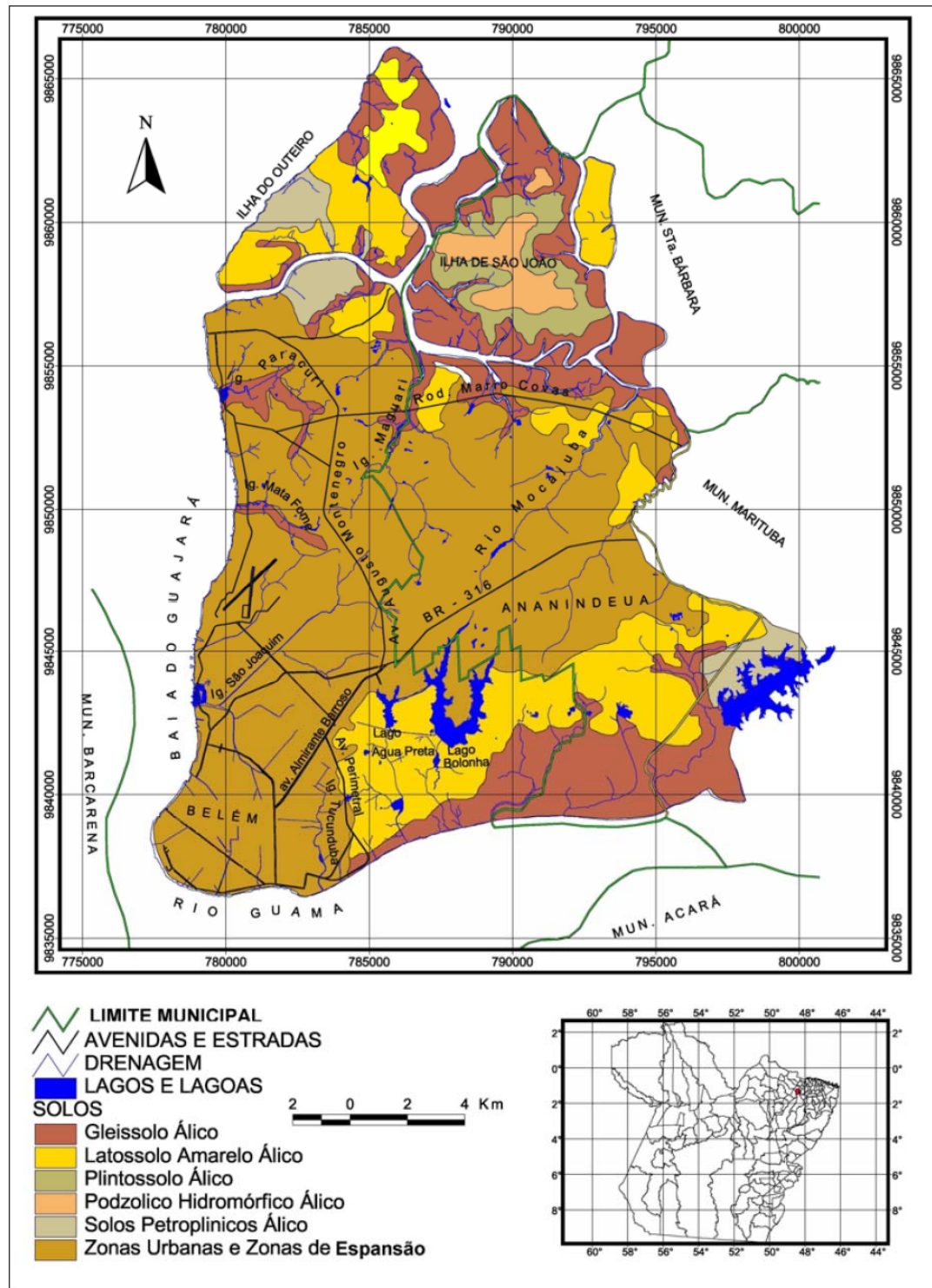


Figura 4. 2 – Mapa geológico da Região Metropolitana de Belém.

Fonte: Matta (2002)

O perfil geológico superficial do solo de Belém é formado por camadas transportadas de formação aluvionar, constituído por uma camada superficial de silte

arenoso, com espessura que pode variar de 1 a 8 m, sobreposta sobre camadas alternadas de argila e areia, com matéria orgânica e localmente laminado que apresentam espessura máxima em torno de 30 metros (BARBOSA, 2000).

5 METODOLOGIA

5.1 AQUISIÇÃO DE DADOS

Na fase de aquisição de dados executamos os perfis de GPR usando o equipamento TerraSIRch SIR (*Subsurface Interface Radar*) System-3000 fabricado pela GSSI (*Geophysical Survey Systems, Inc.*), que pertence à Faculdade de Geofísica da UFPa. O sistema é constituído por uma unidade de controle digital (figura 5.1), com o sistema operacional TerraSIRch pré-instalado, que permite a visualização e controle dos dados; duas baterias, cabos de conexões e duas antenas blindadas de 200 MHz (figura 5.2) e 400 MHz (figura 5.3). As configurações da antena, *range*, *scan* e etc são feitas a partir da unidade de controle.



Figura 5. 1 – Unidade de controle do sistema GPR da GSSI.



Figura 5. 2 – Antena de 200 MHz da GSSI.



Figura 5. 3 – Antena de 400 MHz da GSSI.

A técnica aplicada à coleta de dados nos perfis foi a de reflexão com afastamento constante no modo contínuo. Os registros foram realizados no modo tempo com a posição das medidas intercaladas pela inclusão de marcas a cada 1 m, pois para o propósito do trabalho, não houve necessidade de grandes perfis, já que as dimensões nos nossos alvos estão compreendidas entre 50 mm (5 cm) e 1000 mm (100 cm) de diâmetro.

Para obtenção de uma boa resolução vertical, que é a capacidade de distinguir as reflexões provenientes do topo e da base dos refletores (DAVIS; ANNAN, 1989). Devemos considerar as incertezas no cálculo da velocidade da onda GPR devida à variação na forma da onda durante a sua propagação, assim sendo, a resolução obtida na prática está compreendida entre $\lambda/2$ e $\lambda/3$, então, o limite de resolução teórica está compreendido entre $\lambda/2$ e $\lambda/4$ (BERES & HAENI, 1991). Assim, teoricamente, para uma onda de 200 MHz que se propaga com velocidade de 0,08 m/ns (velocidade estimada da onda GPR, para solo argiloso, através do ajuste das hipérbolas presentes nos radargramas) é possível identificar alvos com dimensões compreendidas entre 10 e 20 cm, já para uma onda de 400 Mhz, com a mesma velocidade, é possível identificar alvos com dimensões entre 5 e 10 cm (ANNAN, 2001).

Para adquirir uma boa resolução horizontal, o espaçamento entre as marcações deve ser equivalente a um quarto do comprimento da onda eletromagnética emitida e considerando a permissividade dielétrica do meio (eq. 2.30). Assim, teoricamente, para uma onda de 200 MHz que propaga-se em solo argiloso ($\epsilon_r = 15$ F/m), a separação entre os *scans* deve ser da ordem de 9,6 cm e para uma onda de 400 Mhz, no mesmo meio, a separação entre os *scans* deve ser da ordem de 4,8 cm. O uso de espaçamentos com valores superiores aos fornecidos pela equação 2.30, implica em perda de resolução para pequenos refletores localizados mais profundamente, embora nos possibilite maior praticidade e economia de tempo.

Para confrontar melhor os resultados, fez-se uso de duas antenas biestáticas blindadas de 200 MHz e 400 MHz. Optou-se por essas antenas porque elas apresentam as características necessárias à solução dos problemas, geralmente

encontrados nesse tipo de levantamento (tabela 5.1), uma vez que as tubulações estão localizadas a pouco mais de 1 metro de profundidade, em média.

Tabela 5. 1 – Características das antenas de 200 MHz e 400 MHz.

Antena	Aplicações	Profundidade máxima (m)	Range típico (ns)	Dimensão mínima do alvo (cm)
400 MHz	Geofísica rasa, meio ambiente e arqueologia.	4	20 – 100	15,25
200 MHz	Geologia e meio ambiente.	8	70 – 300	30,5

Fonte: GSSI (2004)

A aquisição dos dados GPR foi realizada em 14 perfis dentro da área do município de Belém. Os perfis foram feitos nos seguintes locais: Quatro dentro da área da COSANPA, localizado no Parque Estadual do Utinga, bairro do Curió-Utinga (figura 5.4); quatro no conjunto CDP, bairro da Maracangalha (figuras 6.8 e 6.11); dois no conjunto Costa e Silva, bairro da Castanheira (figura 6.14) e quatro no bairro da Pedreira (figura 6.17). A escolha dos locais onde foram realizados os perfis foi feita, priorizando-se a variedade de alvos presentes nesses locais e a diversidade geográfica.

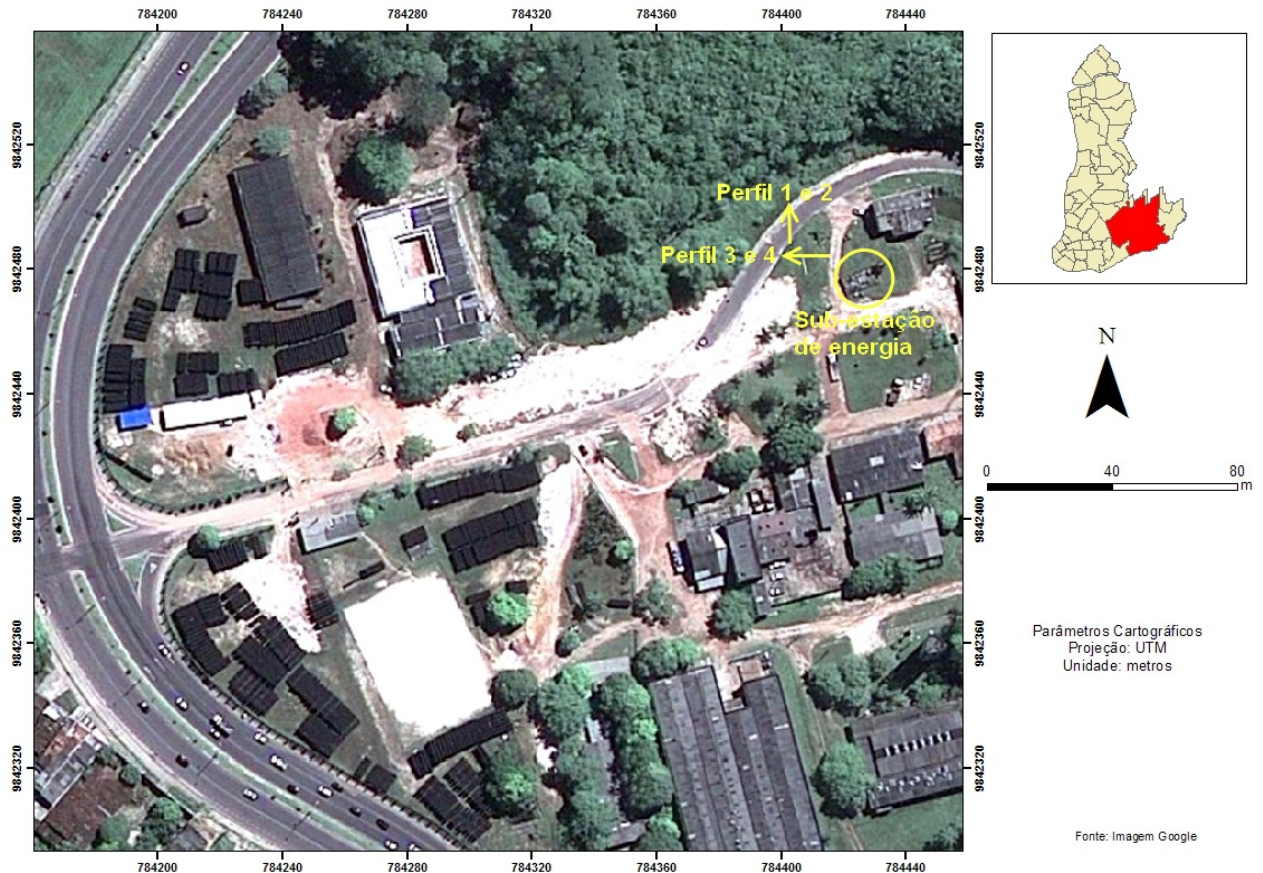


Figura 5. 4 – Área da COSANPA no Parque Estadual do Utinga.

5.2 PROCESSAMENTO DE DADOS

As etapas de processamentos adotadas nesse trabalho têm como propósito destacar os refletores contidos no solo, reduzindo a interferência provocada pela onda direta pelo ar, pela onda direta pelo solo e possíveis interferências geradas por estruturas que possam interagir com o pulso eletromagnético. Para realizar essa tarefa foi usado o software ReflexW versão 5.0.5 para Windows TM 9x/NT, pertencente à Faculdade de Geofísica da UFPA. As etapas utilizadas no processamento dos dados deste trabalho estão representadas no fluxograma a seguir (figura 5.5):



Figura 5. 5 – Fluxograma simplificado do processamento de dados GPR.

Primeira etapa: Importação dos dados

Este primeiro procedimento consiste na importação dos dados adquiridos nos levantamentos de campo e na criação de um projeto.

Segunda etapa: Edição dos dados

Este foi o segundo procedimento adotado no processamento dos dados adquiridos em campo onde foram inseridas as informações do cabeçalho, tais como frequência da antena, direção e dimensão do perfil.

Terceira etapa: Interpolação das marcas

Consiste na interpolação dos dados na direção do perfil, tendo como referência as marcas inseridas nos registros a cada metro para controle da posição das medidas.

Quarta etapa: Correção do tempo zero

Sua função é corrigir o efeito de desalinhamento em tempo, dos traços de um radargrama, provocados por saltos da antena durante a aquisição dos dados em campo, ocasionados por irregularidades presentes no terreno. A correção é realizada aplicando um deslocamento linear, para cima ou para baixo, nos traços do radargrama de modo a corrigir o desalinhamento entre traços adjacentes.

Quinta etapa: Dessaturação

Remove as componentes de baixa frequência (WOW) acopladas à amplitude da onda que originam saturações no sinal, impedindo que alguns refletores sejam perceptíveis no radargrama. Isso ocorre devido à existência do fenômeno indutivo da onda eletromagnética entre as antenas transmissora e receptora ou a saturação eletrônica do equipamento, causada pela onda direta no ar ou outras fontes externas de campo eletromagnético, tais como: casas, cercas metálicas, edifícios, árvores de grande porte, muros, torres de alta tensão, postes de iluminação, estações de rádio FM, antenas de microondas, rádios transmissores, celulares e etc (PORSANI, 2008). A aplicação do filtro DEWOW resulta em um registro “mais limpo”.

Sexta etapa: Ganho

A amplitude do sinal GPR ao se propagar no solo decai exponencialmente, por esse motivo, objetos localizados a grandes profundidades são mais difíceis de serem identificados no radargrama. Uma forma de compensar esse decaimento é a aplicação

de um ganho para que se possam intensificar as reflexões provenientes de tempo de propagação mais longos.

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

Há vários tipos de ganhos que podem ser aplicados em um processamento de dados GPR. Para esse trabalho será utilizado o ganho *Energy Decay* que consiste na aplicação de um ganho na direção do eixo do tempo para cada traço. Este ganho é baseado na curva de decaimento médio de amplitude. Primeiramente uma curva de decaimento médio é determinada de todos os traços existentes do perfil. Depois da aplicação de um filtro de mediana nesta curva, cada amostra do traço é dividida pelo valor da curva de decaimento. Frequentemente é necessário aplicar um fator de escala, parâmetro de multiplicação, menor do que um, pois, após a aplicação deste ganho, alguns valores de amplitude excederão a amplitude máxima do perfil original (SANDMEIER, 2006).

Sétima etapa: Filtragem temporal

Consiste em retirar do radargrama os ruídos ou reverberações para destacar o sinal de interesse, principalmente os que estão contidos na parte inferior. Com este filtro é possível eliminar as frequências espúrias, que se encontram em faixas de alta ou baixa frequência e que eventualmente podem mascarar estruturas no radargrama.

Os filtros temporais mais comuns são: passa banda, passa baixa e passa alta. Neste trabalho o filtro utilizado foi o passa banda que é do tipo trapezoidal, amplitude versus frequência (figura 5.6), que possui cortes entre os limites, inferior e superior das frequências de corte e os limites inferior e superior da banda passante (BRANDWOOD, 2003). Neste tipo de filtro é necessário definir quatro valores de frequências: frequência de corte inferior (f_1), frequência inferior da banda passante (f_2), frequência superior da

banda passante (f_3) e frequência de corte superior (f_1). O valor da frequência central da antena usada no levantamento deve ficar compreendido entre os valores f_2 e f_3 (NASCIMENTO, 2008 e JÚNIOR, 2009).

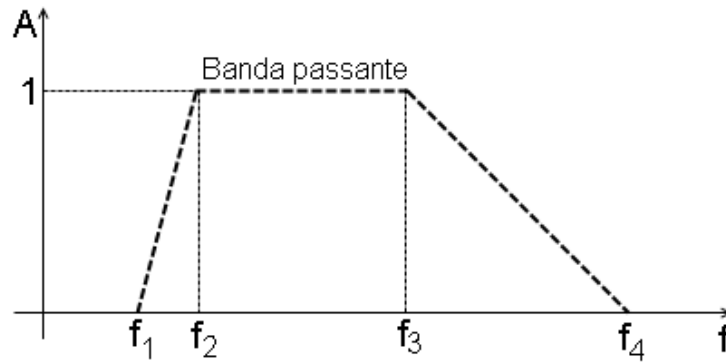


Figura 5. 6 – Representação esquemática do filtro de frequência passa banda trapezoidal.
Fonte: modificado de Bandwood (2003)

6 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

6.1 PERFIS 1 E 2

Esses perfis foram realizados dentro da área da COSANPA no Parque Estadual do Utinga, na rua principal que dá acesso ao lago Bolonha e Água Preta, ao lado de uma caixa d'água (figura 5.4). Os perfis foram feitos sobre uma camada de asfalto, tomando o sentido Sul – Norte e perpendicular a uma adutora. O solo da região pesquisada é predominantemente argilo-arenoso, com a presença de muitos restos de tubos, conexões e registros enterrados ou depositados na superfície, dos mais diferentes materiais e bitolas, haja vista que o local é usado como depósito de sobras de materiais (figura 6.1). Vale ressaltar que próximo ao local dos perfis havia uma subestação de energia elétrica, que, em alguns casos, pode interferir nos resultados finais. O objetivo foi localizar uma adutora de aço de 1000 mm de diâmetro, usada para o transporte de água bruta do lago do Utinga até a estação de tratamento de São Brás. A dimensão dos perfis foi de 6 m de comprimento com marcações feitas a cada 1 m.



Figura 6. 1 – Restos de materiais depositados na área da COSANPA no Parque Estadual do Utinga.

Perfil 1

Esse perfil foi obtido com a antena de 200 MHz. Pode-se observar, através do radargrama (figura 6.2), a presença de um forte refletor, hipérbole, localizado entre as posições 3 m e 6 m a, aproximadamente, 1 m de profundidade. Esse refletor deve representar a adutora de aço procurada.

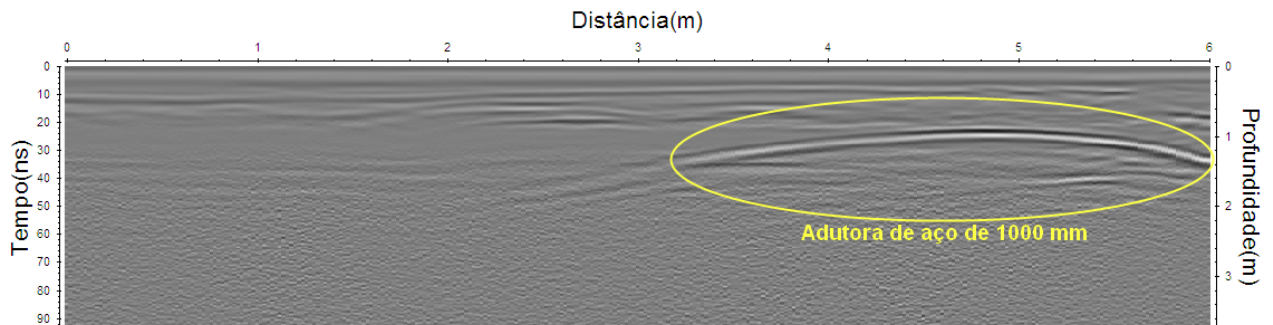


Figura 6. 2 – Radargrama do perfil 1, usando antena de 200 MHz. O forte refletor hiperbólico deve representar a adutora de aço de 1000 mm.

Perfil 2

O perfil 2, foi obtido com a utilização da antena de 400 MHz e seu radargrama é mostrado na figura 6.3, onde constata-se a presença do refletor hiperbólico, provável adutora de aço de 1000 mm, a aproximadamente 1 m de profundidade e localizada entre as posições 3 m e 6 m.

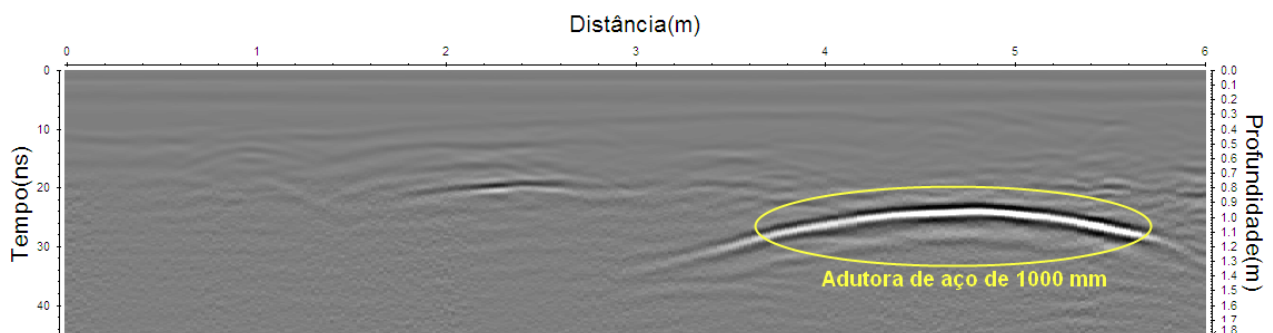


Figura 6. 3 – Radargrama do perfil 2, usando antena de 400 MHz. O forte refletor hiperbólico deve representar a adutora de aço de 1000 mm.

Conclui-se após análise dos radargramas (figuras 6.2 e 6.3), que em ambos os levantamentos os resultados mostrados foram bons. Entretanto, o levantamento feito com a antena de 400 MHz foi, sensivelmente, melhor que o levantamento feito com a antena de 200 MHz, em virtude da maior amplitude do sinal.

Em decorrência do bom resultado apresentado com a utilização da antena de 400 MHz, os processamentos dos dados limitaram-se apenas as cinco primeiras etapas. Não havendo necessidade de aplicar as demais etapas aos dados coletados.

Após as realizações dos perfis 1 e 2, foram feitas escavações em torno da adutora com a finalidade de ratificar sua localização. Fato este que pôde ser confirmado após o término das escavações e que pode ser observado na figura 6.4.



Figura 6. 4 – Escavação da adutora de aço de 1000 mm na área da COSANPA no Parque Estadual do Utinga.

6.2 PERFIS 3 E 4

Esses perfis, também, foram realizados dentro da área da COSANPA no Parque Estadual do Utinga, paralelo a rua principal que dá acesso ao lago Bolonha e Água Preta, ao lado da caixa d'água (figura 5.4). Os perfis foram feitos sobre uma camada de grama em solo argilo-arenoso, tomando o sentido Leste - Oeste e perpendicular ao

alvo. O objetivo inicial era localizar uma tubulação de ferro fundido (*FoFo*) de 75 mm de diâmetro, usada como alimentadora do transporte de água bruta para o abastecimento de carros pipas e viaturas dos bombeiros, entretanto, após a realização dos perfis foi detectada a presença da adutora de aço de 1000 mm, já descrita nos perfis 1 e 2. Então constatou-se que a mesma sofre um desvio de 90°, ficando paralela a tubulação de ferro fundido. Esses perfis foram realizados bem próximos a subestação de energia elétrica (figura 6.5), como pode ser observado na figura 5.4. A dimensão dos perfis foi de 6 m com marcações a cada 1 m.



Figura 6. 5 – Subestação de energia elétrica na área do Parque Estadual do Utinga.

Perfil 3

A figura 6.6 mostra o radargrama obtido com a antena de 200 MHz, onde pode-se observar a presença de dois refletores hiperbólicos. Entre as posições 4 e 5 m, está a provável adutora de aço, a aproximadamente 1 m de profundidade e entre as posições 6 e 7 m, está o que poderia representar a tubulação de ferro fundido, com aproximadamente 1 m de profundidade.

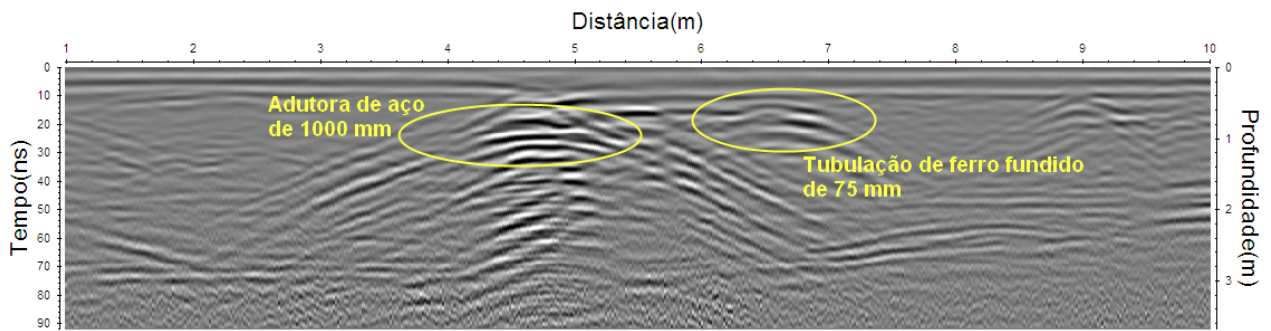


Figura 6. 6 – Radargrama do perfil 3, usando antena de 200 MHz. Os refletores hiperbólicos devem representar a adutora de aço de 1000 mm e a tubulação de ferro fundido (*FoFo*) de 75 mm, usada como alimentadora do transporte de água de 75 mm.

Perfil 4

Observando a figura 6.7 que mostra o radargrama obtido com a antena de 400 MHz, pode-se confirmar as informações obtidas com o uso da antena de 200 Mhz. Pode-se perceber a adutora de aço de 1000 mm entre as marcações 4 e 5 m e na marcação 6 m está localizada a tubulação de ferro fundido. Houve um pequeno deslocamento nas posições das tubulações, em relação ao perfil 3, em decorrência dos eventuais erros nas marcações realizadas em campo.

Após as realizações dos perfis 3 e 4, foram feitas escavações em torno da adutora com a finalidade de ratificar sua localização. Fato este que pôde ser confirmado após o término das escavações.

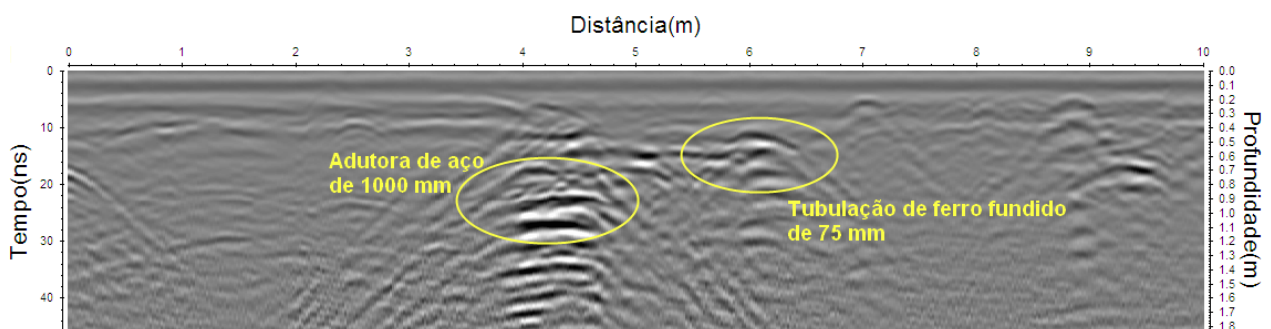


Figura 6. 7 – Radargrama do perfil 3, usando antena de 400 MHz. Os refletores hiperbólicos devem representar a adutora de aço de 1000 mm e a tubulação de ferro fundido (*FoFo*) de 75 mm, usada como alimentadora do transporte de água de 75 mm.

Pode-se concluir após análise das figuras 6.6 e 6.7 que em ambos os levantamentos os resultados mostrados são bons, entretanto, o levantamento feito com a antena de 200 MHz foi, sensivelmente, melhor que o levantamento feito com a antena de 400 MHz, haja vista que a antena de 400 MHz acentuou a presença das outras heterogeneidades presentes no solo, o que prejudicou a resolução do radargrama.

6.3 PERFIS 5 E 6

Esses perfis foram realizados na Av. Contorno, bairro da Maracangalha (figura 6.8). Os perfis foram feitos sobre uma camada de asfalto, tomando a sentido Oeste – Leste e perpendicular aos alvos. O objetivo foi localizar duas tubulações de ferro fundido (*FoFo*), uma de 150 mm e outra de 300 mm e uma tubulação de policloreto de vinila (*PVC*) – 50 mm, usadas no fornecimento de água. A dimensão dos perfis foi de 9 m de comprimento com marcações feitas a cada 1 m.

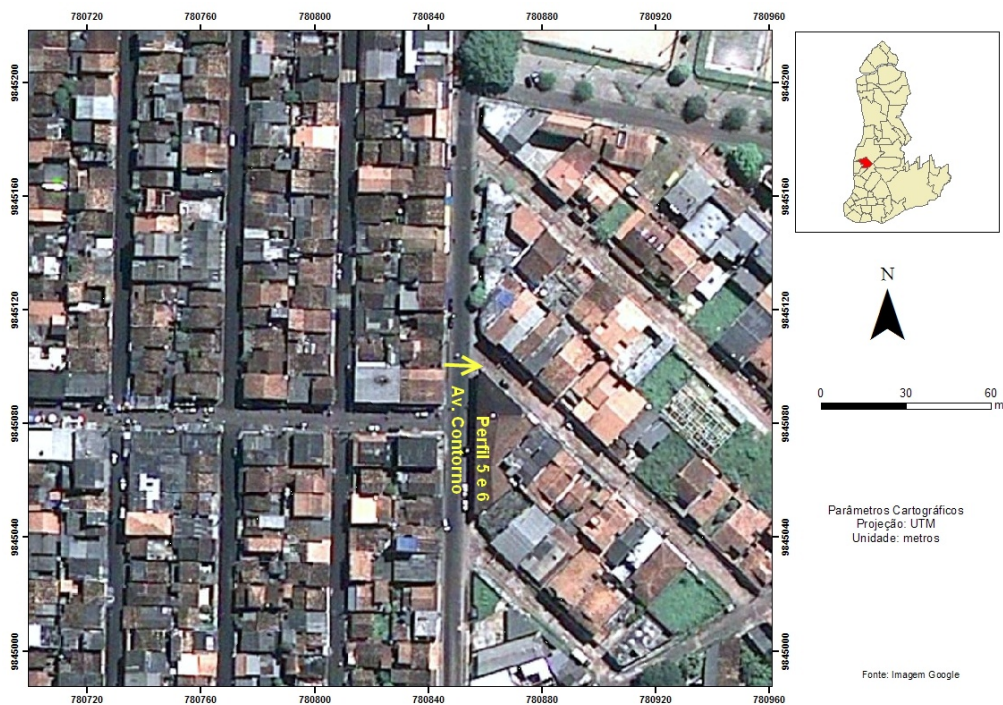


Figura 6. 8 – Mapa de localização dos perfis 5 e 6. Realizados no conjunto CDP, Av. Contorno no bairro da Maracangalha.

Perfil 5

A figura 6.9 mostra o radargrama obtido com a antena de 200 MHz. Pode-se observar a presença de dois refletores: P1, localizado na posição 1 m, com pouco mais de 1 m de profundidade e P2, situado entre as posições 6 m e 7 m e com 0,5 m de profundidade, aproximadamente.

Ao se confrontar as informações fornecidas pela COSANPA, através do cadastro técnico de rede de água (anexo B) com as informações obtidas pelo radargrama, constatou-se uma contradição, pois o cadastro mostra que as duas tubulações estariam do lado leste da rua, informação rebatida pelo radargrama (figura 6.9) que mostra a tubulação FoFo – 300 mm (P1) do lado oeste e a tubulação FoFo – 150 mm (P2) do lado leste, pois a amplitude da hipérbole em P1 é maior que em P2, o que justificaria a localização das respectivas tubulações. Após discutirem-se os resultados com os técnicos da COSANPA, chegou-se à seguinte conclusão: de fato o radargrama está fornecendo as informações corretas das tubulações, haja vista, que apenas a tubulação FoFo – 150 mm está com sua posição “amarrada” no cadastro, com a marcação 2. O que motivou essa conclusão foi que, segundo os técnicos, não é comum a existência de duas tubulações do mesmo lado da rua e, por outro lado, é muito comum a existência de informações imprecisas nesses cadastros, pois são cadastros antigos e desatualizados. Nessa sondagem não foi possível localizar a tubulação PVC – 50 mm, em decorrência do baixo contraste do PVC com o meio e ao pequeno diâmetro da tubulação.

Ao se observar a região P2, da figura 6.9, percebe-se a possível existência de mais de um refletor na região e que fica evidenciado ao se consultar o cadastro técnico de rede de água (anexo B), onde se pode perceber a extremidade de uma tubulação FoFo – 150 mm (“amarração” 1). A presença dessa tubulação (“amarração 1”) mais a tubulação FoFo – 150 mm, identificada anteriormente, estaria gerando a configuração hiperbólica observada em P2.

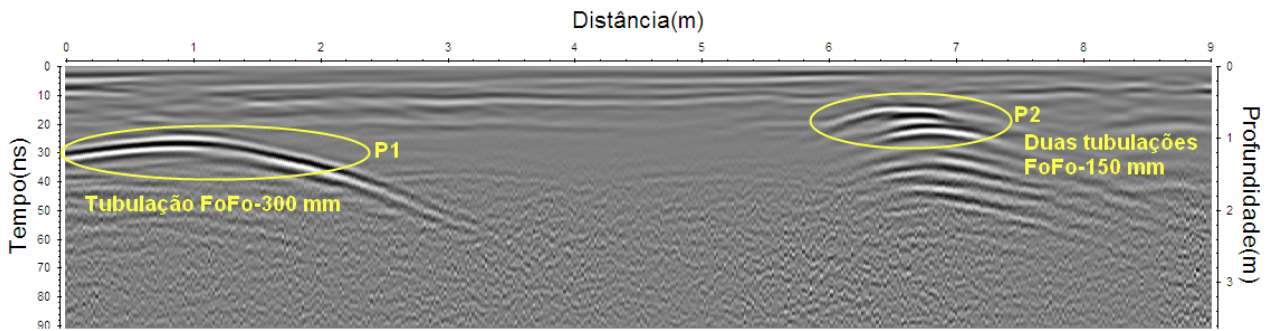


Figura 6. 9 – Radargrama do perfil 5, usando antena de 200 MHz. Os refletores hiperbólicos P1 e P2 representam, respectivamente, a tubulação FoFo – 300 mm e duas FoFo – 150 mm.

Perfil 6

O radargrama obtido com a antena de 400 MHz encontra-se na figura 6.10, onde é possível verificar a presença de dois refletores: P1 (tubulação FoFo – 300 mm) localizado na posição 1 m, com pouco mais de 1 m de profundidade e P2 (duas tubulações FoFo – 150 mm) situado entre as posições 6 m e 7 m e com 0,5 m de profundidade, aproximadamente. As informações colhidas neste perfil coincidem com as informações obtidas no perfil 5 e, mais uma vez, não foi possível a localização da tubulação PVC – 50 mm.

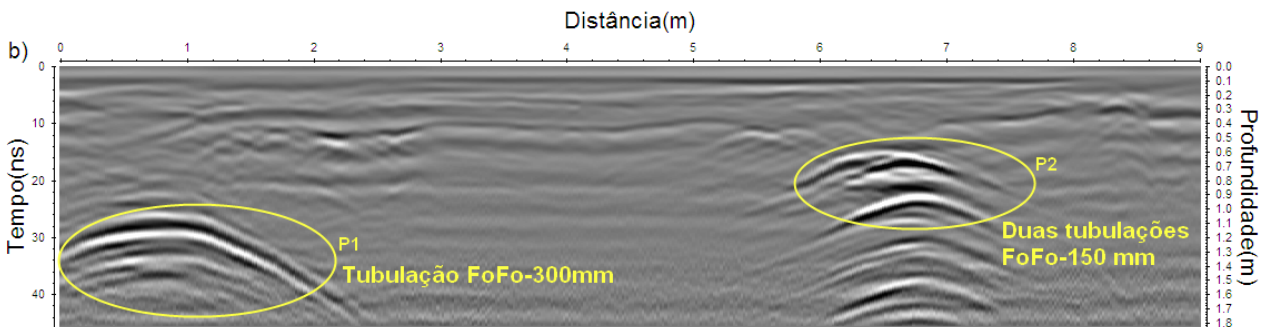


Figura 6. 10 – Radargrama do perfil 6, usando antena de 400 MHz. Os refletores hiperbólicos P1 e P2 representam, respectivamente, a tubulação FoFo – 300 mm e duas FoFo – 150 mm.

Pode-se concluir com os resultados obtidos nos radargramas das figuras 6.9 e 6.10, que a qualidade das informações é similar, devida a pequena profundidade dos refletores e ao seu bom poder reflexivo, entretanto, o mesmo não se aplica a tubulação

de PVC – 50 mm, que não pôde ser localizada devida sua pequena dimensão e ao seu baixo poder reflexivo.

6.4 PERFIS 7 E 8

Esses perfis foram realizados no conjunto CDP na Av. Norte, bairro da Maracangalha, próximo a esquina com a Av. Júlio César (figura 6.11). Os perfis foram feitos sobre uma camada de asfalto, tomando a sentido Sudeste – Noroeste e perpendicular aos alvos. O objetivo foi localizar duas tubulações de PVC – 150 mm e 250 mm de diâmetro, usadas no fornecimento de água co conjunto CDP. A dimensão dos perfis foi de 11 m de comprimento com marcações feitas a cada 1 m.

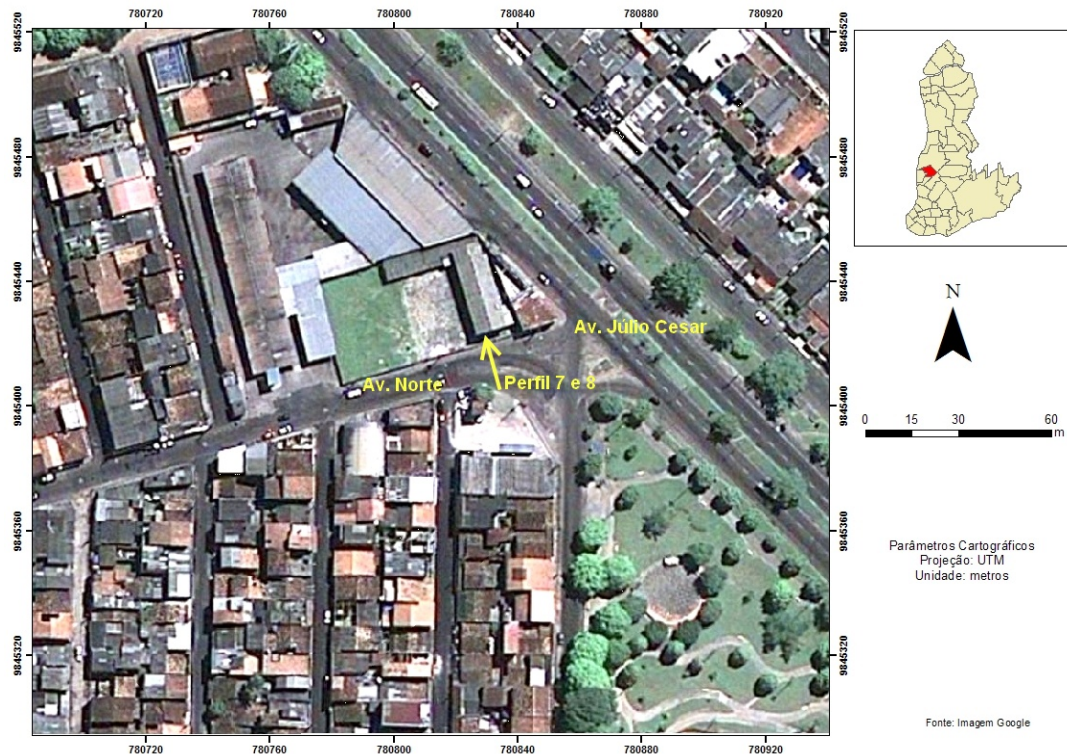


Figura 6. 11 – Mapa de localização dos perfis 7 e 8. Realizados no conjunto CDP, na Av. Norte no bairro da Maracangalha.

Perfil 7

A figura 6.12 mostra o radargrama obtido com a antena de 200 MHz. Pode-se observar a presença de três refletores: P1 localizado na posição 4 m, com aproximadamente 2 m de profundidade; P2 situado próximo a posição 7 m e quase a 1 m de profundidade e P3 que está logo após a posição 9 m e a pouco mais de 1 m de profundidade. Os alvos são, respectivamente, tubulação PVC – 150 mm, manilha de esgoto e tubulação PVC – 250 mm. As posições dos alvos P1 e P3 podem ser confirmadas através do cadastro técnico de rede de água fornecido pela COSANPA (anexo C) e o alvo P2 pôde ser confirmado visualmente no momento da coleta dos dados. Nesse perfil os alvos de PVC puderam ser identificados em função do seu maior diâmetro e do maior poder de penetração da antena.

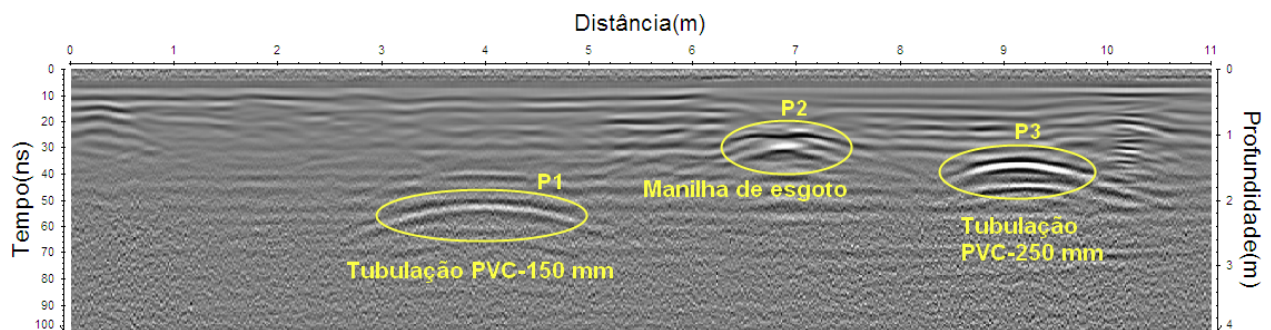


Figura 6. 12 – Radargrama do perfil 7, usando antena de 200 MHz. Os refletores hiperbólicos P1, P2 e P3 representam, respectivamente, a tubulação PVC – 150 mm, manilha de esgoto e PVC – 250 mm.

Perfil 8

Observando a figura 6.13 que mostra o radargrama obtido com a antena de 400 MHz, pode-se verificar uma nova configuração dos refletores, onde não aparece o alvo P1 (tubulação PVC – 150 mm), pois a configuração do range da antena não permitiu que a mesma alcançasse a profundidade do alvo. Como foi observado no radargrama da figura 6.12, o refletor P1 encontra-se a uma profundidade de aproximadamente 2 m, entretanto, como pode-se observar na figura 6.13, a profundidade máxima alcançada com o uso da antena de 400 MHz foi de 1,80 m, o que impossibilitou a sua localização. Então tem-se: P2 (manilha de esgoto) situado próximo a posição 7 m, quase a 1 m de

profundidade e P3 (tubulação PVC – 250 mm) que está na posição 9 m e a pouco mais de 1 m de profundidade.

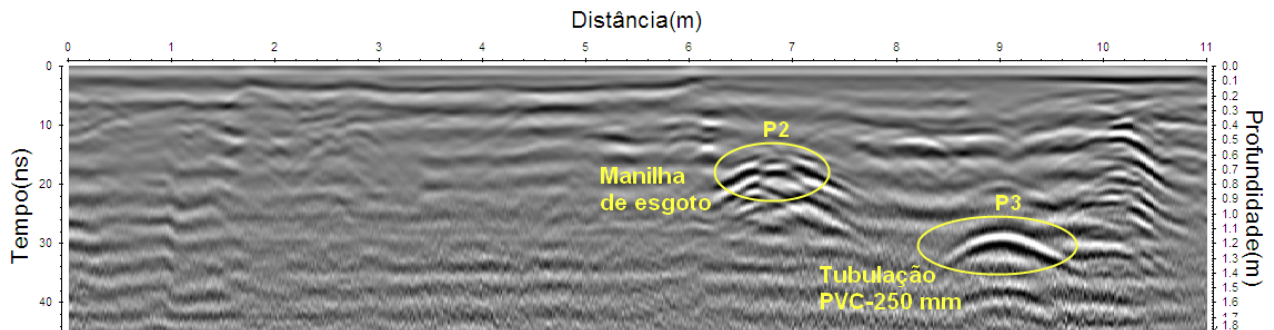


Figura 6. 13 – Radargrama do perfil 8, usando antena de 400 MHz. Os refletores hiperbólicos P2 e P3 representam, respectivamente, a manilha de esgoto e PVC – 250 mm.

Pode-se concluir após análise dos radargramas das figuras 6.12 e 6.13 que o melhor resultado foi obtido com a utilização da antena de 200 MHz, pois com a antena de 400 MHz o alvo P1 foi suprimido do radargrama, em decorrência do baixo poder de penetração da antena de 400 MHz, para o respectivo solo.

6.5 PERFIS 9 E 10

Esses perfis foram realizados na Av. Victor da Silva, bairro da Castanheira, entre o residencial Costa e Silva e o posto dos Correios (figura 6.14). As sondagens foram feitas sobre uma camada de asfalto, tomando a sentido Sudoeste – Nordeste e perpendicular ao alvo. O objetivo foi localizar uma tubulação de cimento – amianto (C.A.) de 150 mm de diâmetro, usada no fornecimento de água. A dimensão dos perfis foi de 7 m de comprimento com marcações feitas a cada 1 m.

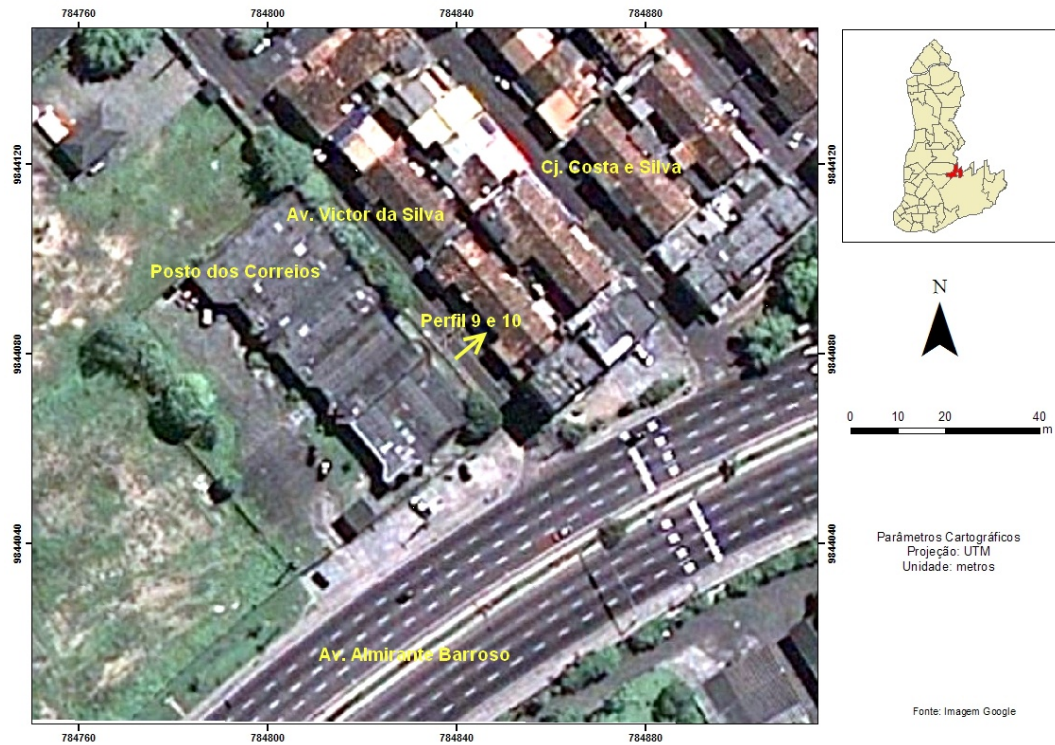


Figura 6. 14– Mapa de localização dos perfis 9 e 10. Realizados no conjunto Costa e Silva, Av. Victor da Silva no bairro da Castanheira.

Perfil 9

A figura 6.15 mostra o radargrama obtido com a antena de 200 MHz. Pode-se observar a presença de um refletor, associado à tubulação de C.A. – 150 mm, localizado entre as posições 6 m e 7 m, a pouco mais de 0,5 m de profundidade. A posição da tubulação C.A. – 150 mm, pôde ser confirmada através do cadastro técnico de redes de água, fornecido pela COSANPA (anexo D).

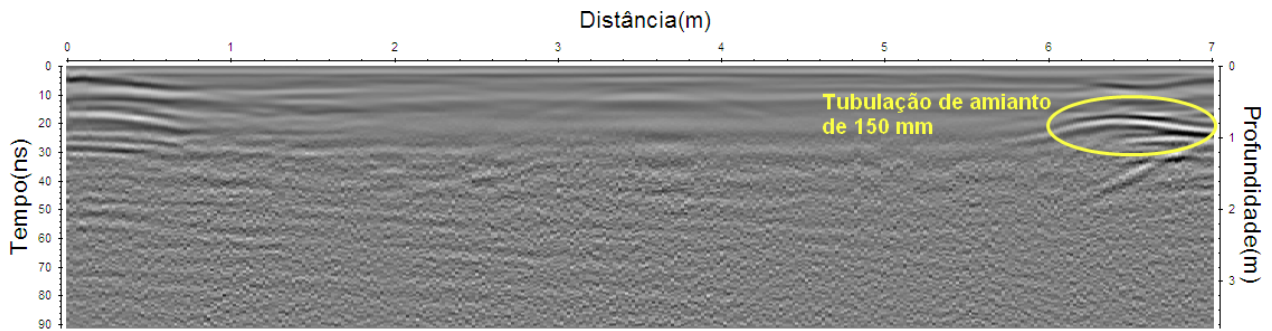


Figura 6. 15 – Radargrama do perfil 9, usando antena de 200 MHz. O refletor hiperbólico representa uma tubulação de cimento-amianto com 150 mm de diâmetro.

Perfil 10

A figura 6.16 mostra o radargrama obtido na sondagem com a antena de 400 MHz, onde o forte refletor hiperbólico deve ser a tubulação de C.A. – 150 mm, entre as posições 6 m e 7 m, a pouco mais de 0,5 m de profundidade. As informações obtidas neste perfil coincidem com as informações do perfil 9, assim como, com as informações contidas no cadastro técnico de redes de água da COSANPA (anexo D).

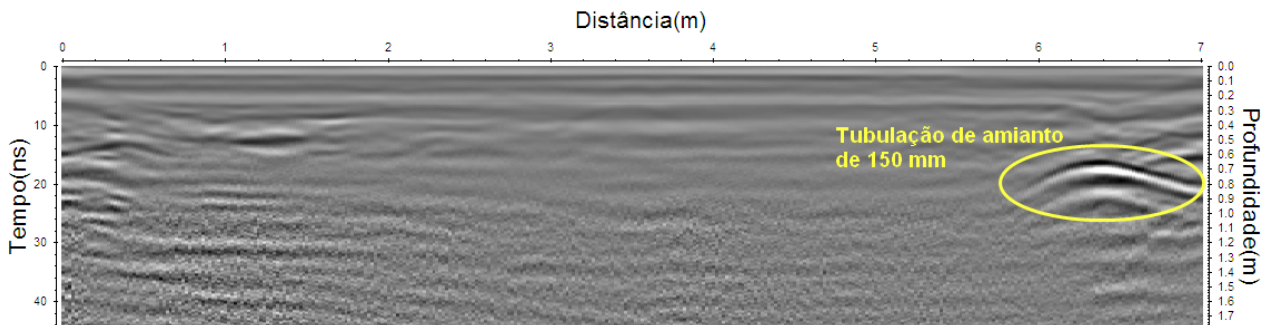


Figura 6. 16 – Radargrama do perfil 10, usando antena de 400 MHz. O refletor hiperbólico representa uma tubulação de cimento - amianto com 150 mm de diâmetro.

Pode-se concluir através da análise dos resultados fornecidos pelos radargramas das figuras 6.15 e 6.16, que as informações obtidas com as antenas são equivalentes, com uma sensível melhora nos resultados fornecidos pela antena de 400 MHz, já que o alvo procurado não é um bom refletor.

6.6 PERFIS 11 E 12

Esses perfis foram realizados na Rua Antônio Everdosa (figura 6.17), próximo a esquina da Tv. Angustura, bairro da Pedreira, em frente a residência de número 1479. Os perfis foram feitos sobre uma espessa camada de asfalto, pôde-se constatar in loco, tratar-se de uma região onde o solo é argilo-arenoso, com a presença de Grés do Pará (pedra preta) e concreções ferruginosas (piçarra). Os perfis foram tomados no sentido Noroeste – Sudeste e perpendicular aos alvos. O objetivo foi localizar uma tubulação de PVC – 75 mm e FoFo – 300 mm de diâmetro, usadas no fornecimento de água. A dimensão dos perfis foi de 10 m de comprimento com marcações feitas a cada 1 m. As sondagens foram realizadas apenas na metade da rua que compreende a um sentido de fluxo dos carros, pois é a faixa que continha as duas tubulações.

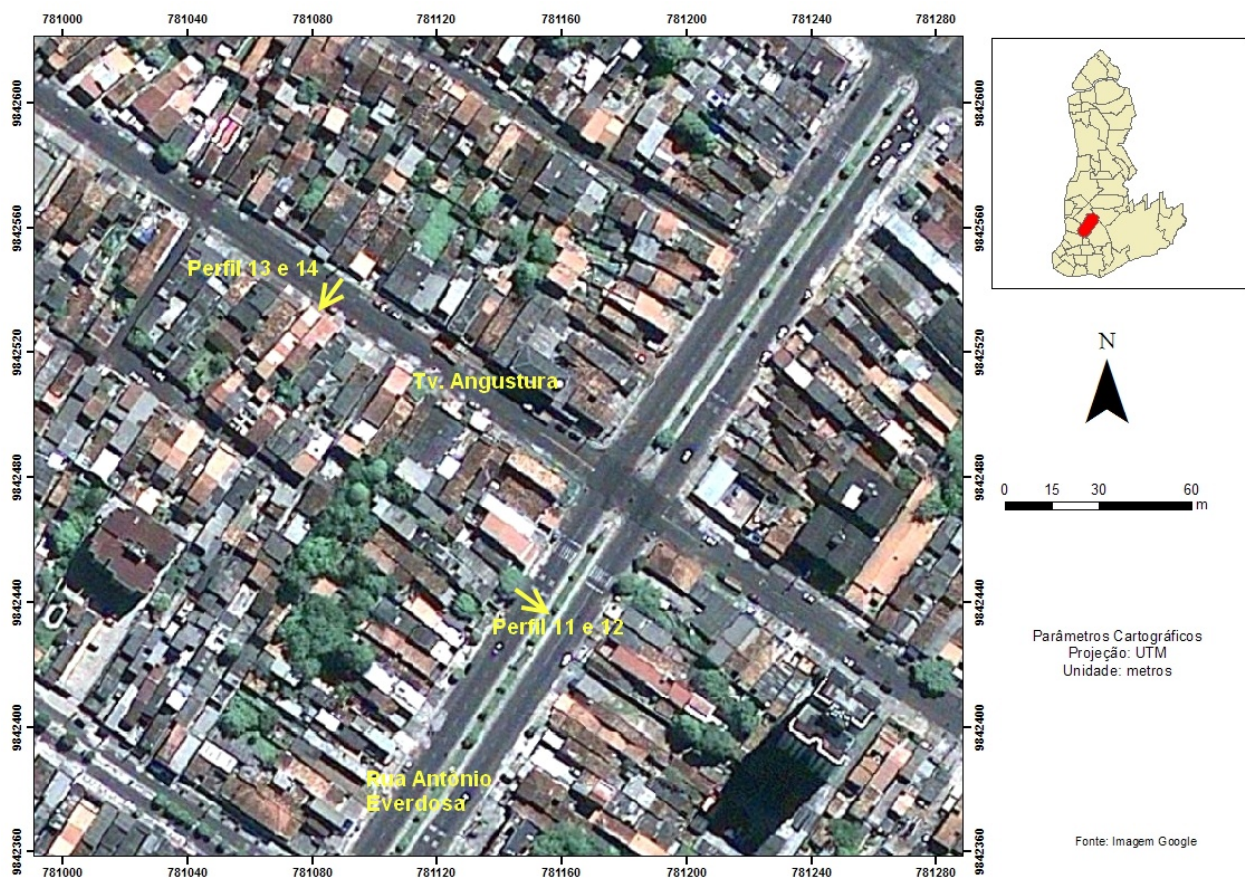


Figura 6. 17 – Mapa de localização dos perfis 11, 12, 13 e 14. Realizados na Rua Antônio Everdosa e Tv. Angustura no bairro da Pedreira.

Perfil 11

Na figura 6.18, mostra o radargrama obtido a partir da sondagem feita com a antena de 200 MHz. Pode-se observar a presença do refletor, FoFo – 300 mm, localizado entre as posições 5 m e 6 m, a uma profundidade de aproximadamente 2 m. A posição da tubulação FoFo – 300 mm, pôde ser confirmada através do cadastro técnico de redes de água fornecido pela COSANPA (anexo E). Nesse perfil não foi possível localizar a tubulação PVC – 75 mm, provavelmente devido à grande profundidade de sua localização e ao seu baixo poder reflexivo. Entre as posições 9 m e 10 m, pode-se observar a existência de um refletor, entretanto pela sua pequena profundidade, ele não se enquadra com nenhum dos alvos pesquisados, pois todos estão a profundidades superiores a 0,8 m, segundo o anexo E.

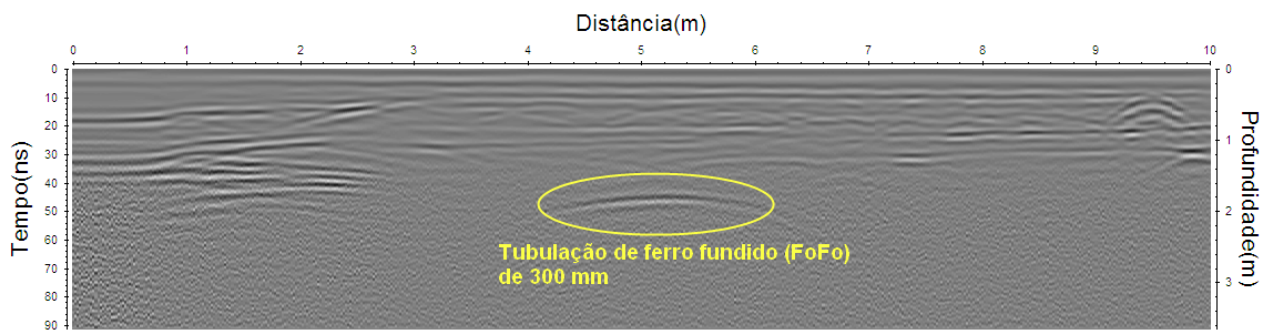


Figura 6. 18 – Radargrama do perfil 11, usando antena de 200 MHz. O refletor hiperbólico representa uma tubulação FoFo – 300 mm.

Perfil 12

A figura 6.19 mostra o radargrama obtido com a antena de 400 MHz. Pode-se verificar a ausência das tubulações, tanto a PVC – 75 mm, quanto a FoFo – 300 mm. O radargrama nos mostra que o range da antena não permitiu que a mesma alcançasse a profundidade do alvo FoFo – 300mm, pois, como foi observado na figura 6.18, a mesma encontra-se a uma profundidade de aproximadamente 2 m, entretanto, a profundidade máxima alcançada com o uso da antena de 400 MHz foi menor que 2 m, o que não permitiu sua identificação. Pode-se perceber, apenas, a presença de ruídos

provenientes das heterogeneidades presentes no solo e do refletor desconhecido presente entre as posições 9 m e 10 m.

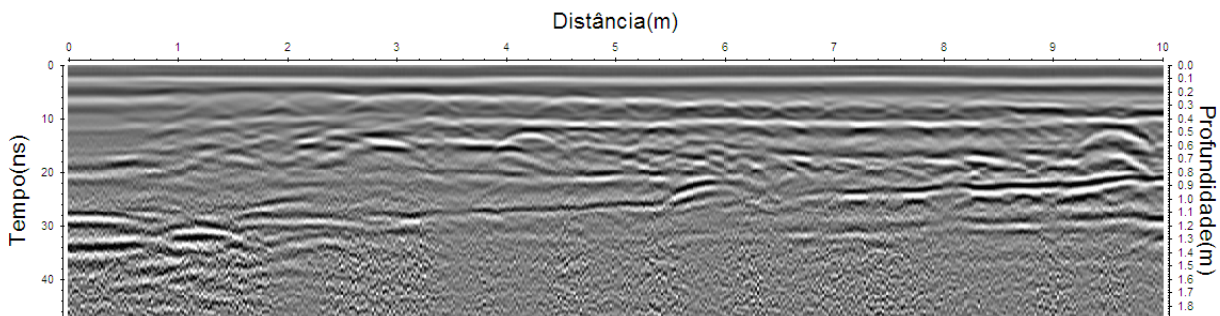


Figura 6. 19 – Radargrama do perfil 12, usando antena de 400 MHz.

Após análise dos resultados fornecidos pelos radargramas das figuras 6.18 e 6.19, concluímos que o resultado fornecido com a utilização da antena de 200 MHz é melhor que o fornecido pela antena de 400 MHz, já que os alvos procurados estão localizados a uma profundidade relativamente grande.

6.7 PERFIS 13 E 14

Esses perfis foram obtidos na Tv. Angustura (figura 6.17), entre Rua Nova e Rua Antônio Everdosa, bairro da Pedreira, em frente a residência de número 1168. Os perfis foram feitos sobre uma espessa camada de asfalto, em uma região onde pôde-se constatar in loco, tratar-se de um solo argilo-arenoso, com a presença de Grés do Pará (pedra preta) e concreções ferruginosas (piçarra). Os perfis foram realizados tomando a sentido Nordeste – Sudoeste e perpendicular aos alvos. O objetivo foi localizar as seguintes tubulações: PVC – 75 mm, FoFo – 600 mm e CA – 200 mm, usadas no fornecimento de água. A dimensão dos perfis foi de 10 m de comprimento com marcações feitas a cada 1 m.

Perfil 13

A figura 6.20 mostra o radargrama obtido com a antena de 200 MHz. Pode-se observar a presença de quatro regiões refletoras: P1 localizada entre as posições 1 m e

2 m, P2 situada entre as posições 5 m e 6 m, P3 próxima a posição 8 m e P4 na posição 9 m. Na região onde se encontra o alvo P1, pode-se perceber a formação de possíveis hipérbolas, entretanto não se pode afirmar, categoricamente, tratar-se de uma tubulação PVC – 75 mm, alvo localizado nesta região, segundo o cadastro de redes da COSANPA. Os demais alvos são, respectivamente, as seguintes tubulações: manilha de esgoto (P2), FoFo – 600 mm (P3) e CA – 200 mm (P4). As posições dos alvos P3 e P4 podem ser confirmadas através do cadastro técnico de redes de água fornecido pela COSANPA e que encontra-se em anexo e o alvo P2 pôde ser confirmado visualmente no momento da coleta dos dados.

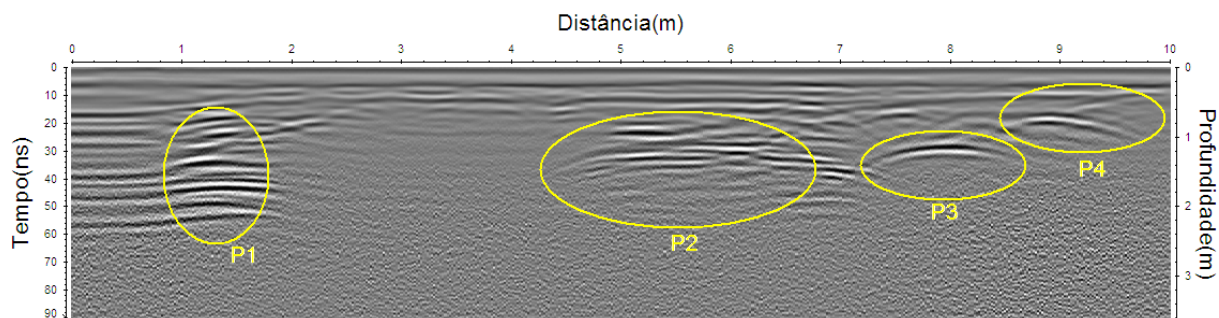


Figura 6. 20 – Radargrama do perfil 13, usando antena de 200 MHz. Os refletores hiperbólicos P1, P2, P3 e P4 representam, respectivamente, alvo indeterminado, manilha de esgoto, FoFo – 600 mm e FC – 200 mm.

Perfil 14

Na figura 6.21, tem-se o radargrama obtido com a antena de 400 MHz, onde pode-se identificar as seguintes regiões refletoras: P1 (possível alvo de PVC – 75 mm, segundo o cadastro da COSANPA) localizada entre as posições 1 m e 2 m, P2 (manilha de esgoto) situada entre as posições 5 m e 6 m, P3 (FoFo – 600 mm) próxima a posição 8 m e P4 (FC – 200 mm) na posição 9 m. As informações colhidas neste perfil coincidem com as informações do perfil 13, quando usamos a antena de 200 MHz e com o cadastro técnico de redes de água da COSANPA (anexo E), excetuando-se a tubulação de PVC – 75 mm, pois a amplitude do sinal GPR não foi suficiente para que pudéssemos chegar a uma conclusão exata da sua localização.

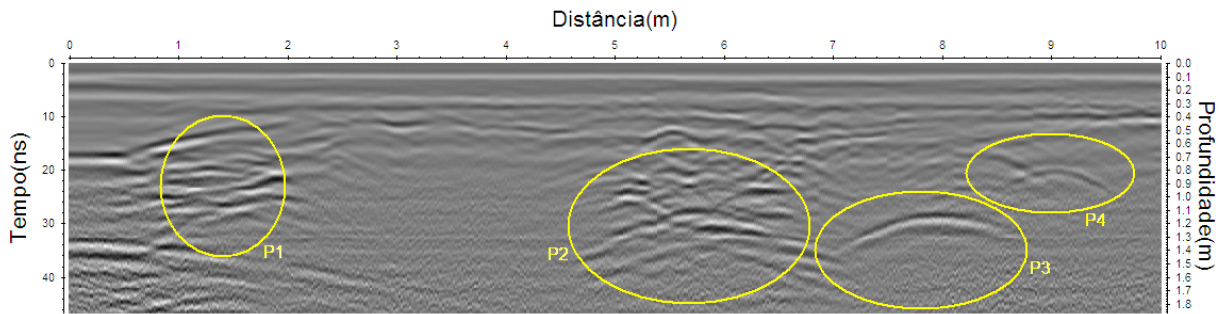


Figura 6. 21 – Radargrama do perfil 14, usando antena de 400 MHz. Os refletos hiperbólicos P1, P2, P3 e P4 representam, respectivamente, alvo indeterminado, manilha de esgoto, FoFo – 600 mm e FC – 200 mm.

Após análise dos resultados obtidos nos radargramas das figuras 6.20 e 6.21, concluímos que os resultados fornecidos com a utilização da antena de 200 MHz são melhores que os fornecidos pela antena de 400 MHz, fato que fica evidente na figura 6.20, já que os alvos procurados estão localizados a uma profundidade relativamente grande e são menos reflexivos, excetuando-se o FoFo – 600 mm, que é um bom refletor.

6.8 SÍNTESE DOS ALVOS PESQUISADOS

A tabela 6.1, mostra um resumo dos alvos pesquisados, com a respectiva antena utilizada na sondagem e a situação de localização.

Tabela 6. 1 – Alvos pesquisados.

Tubulações alvo	Antenas (MHz)	Perfil	Situação
Aço de 1000 mm	200	1	Localizada
	400	2	Localizada
Ferro fundido de 75 mm	200	3	Localizada
	400	4	Localizada
Ferro fundido de 150 mm	200	5	Localizada
	400	6	Localizada

Ferro fundido de 300 mm	200	5	Localizada
	400	6	Localizada
Ferro fundido de 300 mm	200	11	Localizada
	400	12	Não localizada
Ferro fundido de 600 mm	200	13	Localizada
	400	14	Localizada
Cimento – Amianto de 150 mm	200	9	Localizada
	400	10	Localizada
Cimento – Amianto de 200 mm	200	13	Localizada
	400	14	Localizada
PVC de 50 mm	200	5	Não localizada
	400	6	Não localizada
PVC de 75 mm	200	11	Não localizada
	400	12	Não localizada
PVC de 75 mm	200	13	Indefinida
	400	14	Indefinida
PVC de 150 mm	200	7	Localizada
	400	8	Não localizada
PVC de 250 mm	200	7	localizada
	400	8	localizada

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Dentro das perspectivas iniciais, propostas por este trabalho, o método GPR mostrou-se uma ferramenta eficaz na localização das tubulações utilizadas pela Companhia de Saneamento do Pará – COSANPA, no abastecimento de água à população da área urbana do município de Belém-PA, pois dos 13 alvos pesquisados, apenas 3 não puderam ser plenamente identificados, em decorrência do material constituinte dos alvos.

Os alvos que não foram plenamente identificados pelas duas antenas, 200 MHz e 400 MHz, foram às tubulações constituídas de PVC, especificamente as de 50 mm e 75 mm de diâmetro, haja vista o baixo poder reflexivo do PVC e as pequenas dimensões dos alvos.

O método GPR revelou-se muito eficaz na localização de alvos metálicos, pois, apenas um deles não foi identificado pela antena de 400 MHz, devido a sua maior profundidade e ao baixo poder de penetração da antena, menor que 2 m. Porém, esse alvo foi perfeitamente identificado pela antena de 200 MHz, que possui um poder maior de penetração.

Os perfis realizados com o intuito de localizar as tubulações de cimento-amianto, foram 100% cobertas de êxito, já que as tubulações feitas com esse material são armadas em estruturas feitas de metal, o que contribui para o seu poder reflexivo, pois o poder reflexivo do cimento-amianto é pequeno.

Por não ser o foco deste trabalho, as interferências provocadas pelas heterogeneidades presentes no solo não foram destacadas, exceto nos casos em que algum elemento superficial ou informação adicional, visualizadas em campo, permitiu sua descrição mais detalhada. Como foi verificado no caso das manilhas de esgoto descritas nos perfis 7, 8, 13 e 14.

No que diz respeito à utilização das antenas, pode-se concluir que a antena de 200 MHz destacou-se nos resultados obtidos, em comparação com a antena de 400 MHz, pois a mesma foi capaz de localizar todos os alvos metálicos, de cimento-amianto

e os de PVC de maior dimensão. O mesmo não ocorreu com a de 400 MHz, pois não foi capaz de localizar uma das tubulações metálicas, devido ela encontrar-se em profundidade maior que o poder de penetração da antena.

Como sugestão para estudos futuros, recomenda-se a utilização de antenas com frequências menores que as utilizadas, outros alvos com dimensões diferentes, e fundamentalmente a utilização de um hodômetro acoplado as antenas, na realização dos perfis, para proporcionar maior agilidade e confiança aos dados coletados.

REFERÊNCIAS

- ALONSO, M.; FINN, E. J. *Física: um curso universitário*. São Paulo: Edgard Blucher, 1972. 565 f.
- ANNAN, A. P. *Ground Penetration Radar Workshop notes*. Sensors & Software, 2001. 197p.
- ANNAN, A. P.; DAVIS, J. L. *Impulse radar sounding in permafrost*. Radio Sci v. 11, p. 383-394. 1976.
- ANNAN, A. P. *Transmission dispersion and GPR*. Journal of Environmental and Engineering Geophysics. v.0, n.2, 1992. p. 125-136.
- BARBOSA, A. V. C. *Aplicação de Sondagem Elétrica e GPR no Mapeamento Geotécnico no município de Belém - Pa*. 2000. 113 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2000.
- BELÉM (Município). Secretaria Municipal de Coordenação Geral do Planejamento e Gestão – SEGEP. *Anuário Estatístico do Município de Belém*. Belém, 2006. 515 p.
- Id., Segunda Conferência Municipal de Cidade de Belém. *Relatório Geral*. Belém, 2005. 33 p.
- BERES, M.; HAENI, F.T. *Application of ground penetrating radar methods in hidrogeologic studies*. *Ground Water*, v.29, 1991. p. 375-386.
- BORGES, W. R. *Caracterização Geofísica de Alvos Rasos com Aplicação no Planejamento Urbano e Meio Ambiente: Estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP*. 2007. 260 f. Tese (Doutorado em Geofísica) – Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, São Paulo, 2007.
- BRANDWOOD, D. *Fourier Transforms in Radar and Signal Processing*. 1. ed. London: Artech House. 2003. 212 p.
- CAMPBELL, K.J.; ORANGE, A. S. 1974. *A Continuous profile of sea ice and freshwater ice thickness by impulse radar*. *Polar Record* 17, 1974. p. 30-42.
- COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARÁ – COSANPA. *Localidades operadas pela COSANPA*, 2009. Disponível em: < <http://www.cosanpa.pa.gov.br/regionais.asp> >. Acesso em: 15 dez. 2009.

DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. *Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy*. Geophysical Prospecting, v. 37, 1989. p.531-551.

DANIELS, D. J. *Surface penetrating radar*. The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 1996. 300 p.

DURANTE, D.P. *Applicazione ed integrazione di metodi di prospezione geofisica. Studio idrogeofisico della Zona Insatura in condizioni idriche controllate*. 2007. 176 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Università di Bologna, Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico-Ambientali, Bologna, 2007.

FALTARÁ água em 15 bairros. *Amazônia Jornal*, Belém, 20 nov. 2009. Disponível em: <<http://www.orm.com.br/amazoniajornal/interna/default.asp?modulo=222&codigo=444111>>. Acesso em: 28 nov. 2009.

FARIAS, E. dos S.; NASCIMENTO, F.S. do; FERREIRA, M.A.A. *Mapeamento da área Belém - Outeiro*. Estágio de campo III: Relatório Final. Belém, PA: UFPa, 1992, 247 f.

FERNANDES, L. F. *A sustentabilidade do sistema de abastecimento de água em Belém*. 2005. 293 f. Tese (Doutorado em Meio Ambiente) – Universidade Federal do Pará, Núcleo de Altos Estudos Amazônicos, Belém, 2005.

GEOPHYSICAL SURVEY SYSTEMS INC - GSSI. *Terrasirch SIR System – 3000 User's Manual*. United States, 2004. 71 p. (Manual do Usuário)

GRACIA, V. P. *Radar de subsuelo – Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico – artístico*. 2001. 955 f. Tese (Doutorado em Geofísica) – Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Ingeniería de Terreno, Cartográfica y Geofísica, Barcelona, 2001.

GRIFFITHS, D. J. *Introduction to Electrodynamics*. 3. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1999. 576 p.

HARRISSON, C. *Reconstruction of subglacial relief from radio echo sounding records*, Geophysics, v. 35, 1970. p. 1109-1115.

HUISMAN, J.A.; Hubbard, S. S.; Redman, J. D. e Annan, A. P. *Measuring Soil Water Content with Ground Penetrating Radar: A Review*. *Vadose Zone Journal*. 2, 2003. p.476-491.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. 2005. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pibmunicipios/2005/tab01.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2009.

Id., 2007. Disponível em: <<http://www.ibge.com.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em: 25 nov. 2009.

JÚNIOR, J. A. R. *Estudo de pluma de contaminação por combustível com o método gpr e desenvolvimento de simulador geofísico para fins educativos*. 2009. 172 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém, 2009.

KELLER, G.V. Rock and mineral properties. *Investigations in Geophysics, n3. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*. Society of Exploration Geophysicists, Ed. Misac N. Nabighian, v.1, p.13-51, 1987.

LIMA, A. V. M. *Migração Reversa no Tempo Pós e Pré-Empilhamento Aplicada a Dados Sísmicos e de GPR*. 2007. 151 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, Salvador, 2007.

MATTA, M.A.S. *Fundamentos hidrogeológicos para a gestão integrada dos recursos hídricos da região de Belém/Ananindeua – Pará, Brasil*. 2002. 292 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 2002.

MOREY, R.M. Continuous subsurface profiling by impulse radar. In: *Subsurface Exploration for Underground Excavation and Heavy Construction*. American Society of Civil Engineers, p. 213-232, 1974.

NASCIMENTO, W. G. *Investigação geofísica ambiental e forense com os métodos radar e LIN nos cemitérios do Bengui e do Tapanã (Belém – Pa)*. 2008. 153 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém, 2008.

NETO, P. X. *Processamento e Interpretação de Dados 2D e 3D de GPR: Aplicações no Imageamento de Feições Kársticas e Estruturas de dissolução no Campo de Petróleo de Fazenda Belém – CE*. 2006. 192 f. Tese (Doutorado em Geofísica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Natal, 2006.

NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física Básica 3 – Eletromagnetismo*. 1. ed. Rio de Janeiro: Edgard Blucher, 1997. 323 p.

OLHOEFT, G. R. Electrical properties of rocks, in *Physical Properties of Rocks and Minerals*, in Touloukian, Y. S., Judd, W. R., and Roy, R. F., eds.: New York, McGraw-Hill, p. 257-330, 1981.

PAC garante recursos para obras de saneamento básico no estado. *Companhia de saneamento do Pará – COSANPA*, Belém, 10 ago. 2007. Disponível em: <http://www.cosanpa.pa.gov.br/noticias_detalhes.asp?Codigo=118>. Acesso em: 28 dez. 2009.

PARÁ (Estado). Instituto do Desenvolvimento Econômico-Social do Pará–IDESP. *Resumo do PIB dos Municípios Paraenses*. Pará, 2007. 11p.

PORSANI, J.L. *Ground Penetrating Radar (GPR): Proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado-SP*. 1999. 145 f. Tese (Doutorado em Geofísica) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 1999.

Id., 1999. *Método GPR: Aplicações em geologia, geotecnia, meio ambiente e arqueologia*. Belém, PA, 2008. Apostila.

POWERS, M. H. *Modeling frequency dependent GPR*. *The leading Edge*, v.16, n. 11, p. 1657-1662, 1997.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO–PNUD. *Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil*. 2003. Disponível em: <http://www.pnud.org.br/atlas/ranking/RM_Ranking.doc>. Acesso em: 25 nov. 2009.

REITZ, J.R.; MILFORD, F.J.; CHRISTY, R.W. *Fundamentos de Teoria Eletromagnética*. 3. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1982. 516 p.

REYNOLDS, J.M. *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons Ltd., Baffins Lane, Chichester. West Sussex P019 1UD, England, 1997. p. 681-749.

RIBEIRO, H.M.C. *Avaliação atual da qualidade das águas superficiais dos lagos Bolonha e Água Preta situados na área fisiográfica do Utinga (Belém-Pa)*. 1992. 205 f. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Petrologia) – Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém. 1992.

RIJO, L. *Electrical Geophysics. 1-D Earth Direct Modeling*. Belém, 2004. 263 p. Disponível em: <www.rijo.pro.br>. Acesso em: 03 jul. 2009.

RODRIGUES, S. I. *Caracterização GPR de Tambores Metálicos e Plásticos: Estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP*. 2004. 102 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, São Paulo, 2004.

SANDMEIER, K.J. *REFLEXW Version 5.0, Windows 9x/2000/NT. Program for the processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction and transmission data.* Germany, 2006. 478 p. (Manual do Software)

SAUMA FILHO, M. *As águas subterrâneas de Belém e adjacentes: Influência da formação Pirabas e parâmetros físico-químicos para medidas de qualidade.* 1996. 128 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 1996.

STRATTON, J. A. *Electromagnetic Theory.* New York: McGraw-Hill, 1941, 615 p.

TOPP, G. C. et al. *Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines.* Water Resour.s Res, Canada, v.16, 1980. p. 574-582

VAN DAM, R. L. *Causes of ground-penetrating radar reflections in sediment.* 2001. 110 f. Thesis (Doctoral in Earth Sciences) – Vrije Universiteit, Faculty of Earth Sciences Amsterdam, 2001.

WARD, S. H.; HOHMANN, G. W. *Eletromagnetic theory for geophysical applications. Investigations in Geophysics,* n.3. Eletromagnetic Methods in Applied Geophysics. Society of Exploration Geophysicists, Ed. Misac N. Nabighian, v.1, 1987. p. 131-311.

ANEXOS

**ANEXO A: POPULAÇÃO DE CADA MUNICÍPIO DO PARÁ
ATENDIDA PELO ABASTECIMENTO DE ÁGUA DA COSANPA.**

Município	População	População urbana	População atendida	Nível de atendimento
Abaetetuba	120.075	73.210	52.645	72%
Afuá	32.270	7.417	6.021	81%
Alenquer	32.270	7.417	6.021	81%
Altamira	76.728	61.713	23.006	37%
Anajás	19.848	4.997	2.624	53%
Ananindeua	422.334	421.324	153.965	37%
Augusto Corrêa	34.446	13.936	4.971	36%
Belém	1.324.883	1.318.005	1.029.876	78%
Bragança	98.565	59.459	42.978	72%
Breu Branco	41.386	20.347	7.962	39%
Breves	82.923	41.675	32.077	77%
Cachoeira do Arari	15.121	5.587	10.588	190%*
Capanema	55.731	46.661	18.339	39%
Capitão Poço	54.745	23.233	13.875	60%
Castanhal	138.974	126.643	69.033	55%
Conceição do Araguaia	42.626	28.855	31.372	109%*

Dom Eliseu	41.376	24.913	7.580	30%
Faro	12.590	6.169	5.790	94%
Igarapé Miri	34.478	23.494	13.640	58%
Inhangapi	7.870	2.086	2.125	102%*
Itaituba	93.334	63.552	9.188	14%
Itupiranga	65.144	19.356	4.064	21%
Jacundá	41.263	35.128	18.992	54%
Juruti	34.232	11.828	10.244	87%
Limoeiro do Ajuru	20.394	3.930	3.124	80%
Magalhães Barata	4.618	2.235	2.738	122%*
Marabá	177.699	142.114	70.288	49%
Marapanim	24.087	9.191	9.130	99%
Marituba	92.134	80.319	18.302	23%
Mocajuba	21.498	15.239	14.296	94%
Moju	57.217	19.050	10.400	55%
Monte Alegre	68.072	23.219	16.187	70%
Mosqueiro	27.896	27.645	10.614	38%
Nova Timboteua	10.405	4.547	3.546	78%
Novo Repartimento	49.319	18.309	3.779	21%
Óbidos	43.612	23.533	23.577	100%
Oeiras do Pará	24.138	8.283	5.148	62%
Oriximiná	51.834	31.296	23.084	74%
Ourém	14.660	6.635	5.511	83%
Peixe Boi	8.146	4.095	2.622	64%
Ponta de Pedras	19.373	8.955	8.745	98%
Portel	40.141	18.280	10.830	59%

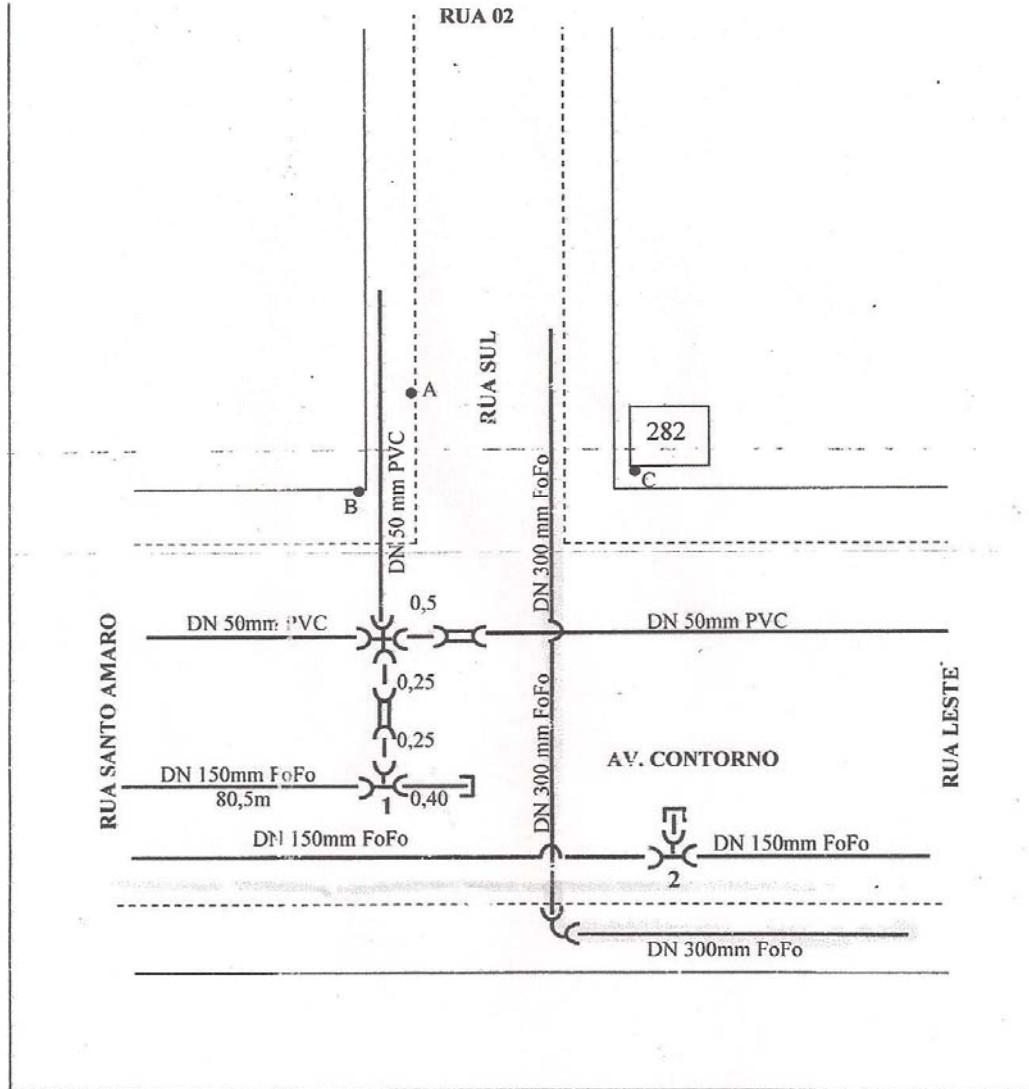
Prainha	30.768	8.057	7.702	96%
Redenção	66.013	62.216	2.832	5%
Salinópolis	36.234	32.950	38.078	116%**
Salvaterra	15.921	9.110	5.719	63%
Santa Cruz do Arari	5.461	2.333	5.758	247%*
Santa Luzia do Pará	20.081	8.738	3.582	41%
Santa Maria das Barreiras	11.369	1.512	1.785	118%*
Santa Maria do Pará	21.311	11.968	12.155	102%*
Santarém	273.091	193.785	165.724	86%
São Caetano de Odivelas	15.770	6.624	6.931	105%*
São Félix do Xingu	31.774	11.500	4.002	35%
São Francisco do Pará	16.813	5.792	6.251	108%*
Soure	20.351	17.644	15.731	89%
Tailândia	43.586	31.897	5.222	16%
Terra Santa	15.430	11.594	12.974	112%
Tracuateua	25.704	5.286	4.656	88%
Vigia	42.416	29.568	25.783	87%
Viseu	47.714	15.389	6.497	42%
Vitória do Xingu	11.425	4.032	1.636,00	41%

* Índice de atendimento superior a 100 %, oriundo da população rural.

** Índice de atendimento superior a 100 %, oriundo da população flutuante.

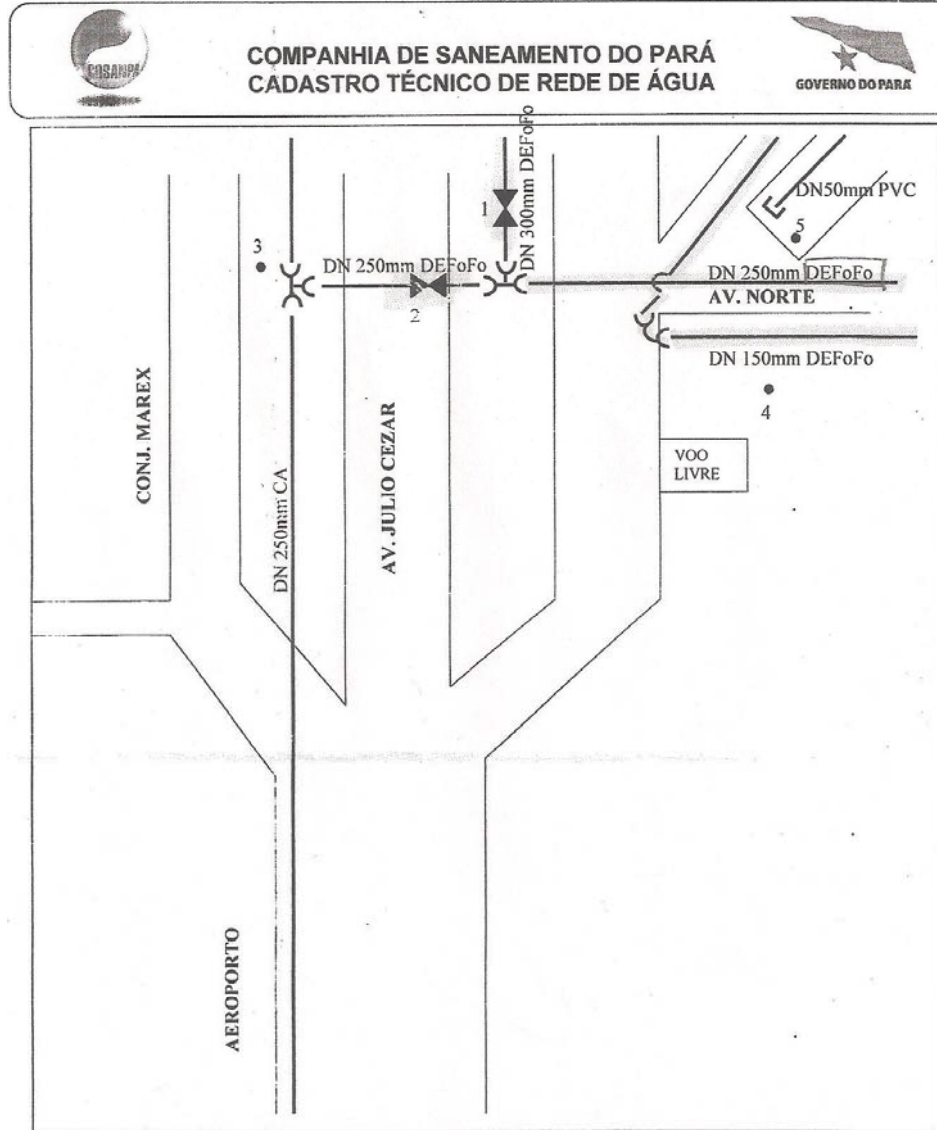
ANEXO B: CADASTRO TÉCNICO DE REDE DE ÁGUA DA AV. CONTORNO

CONTORNO



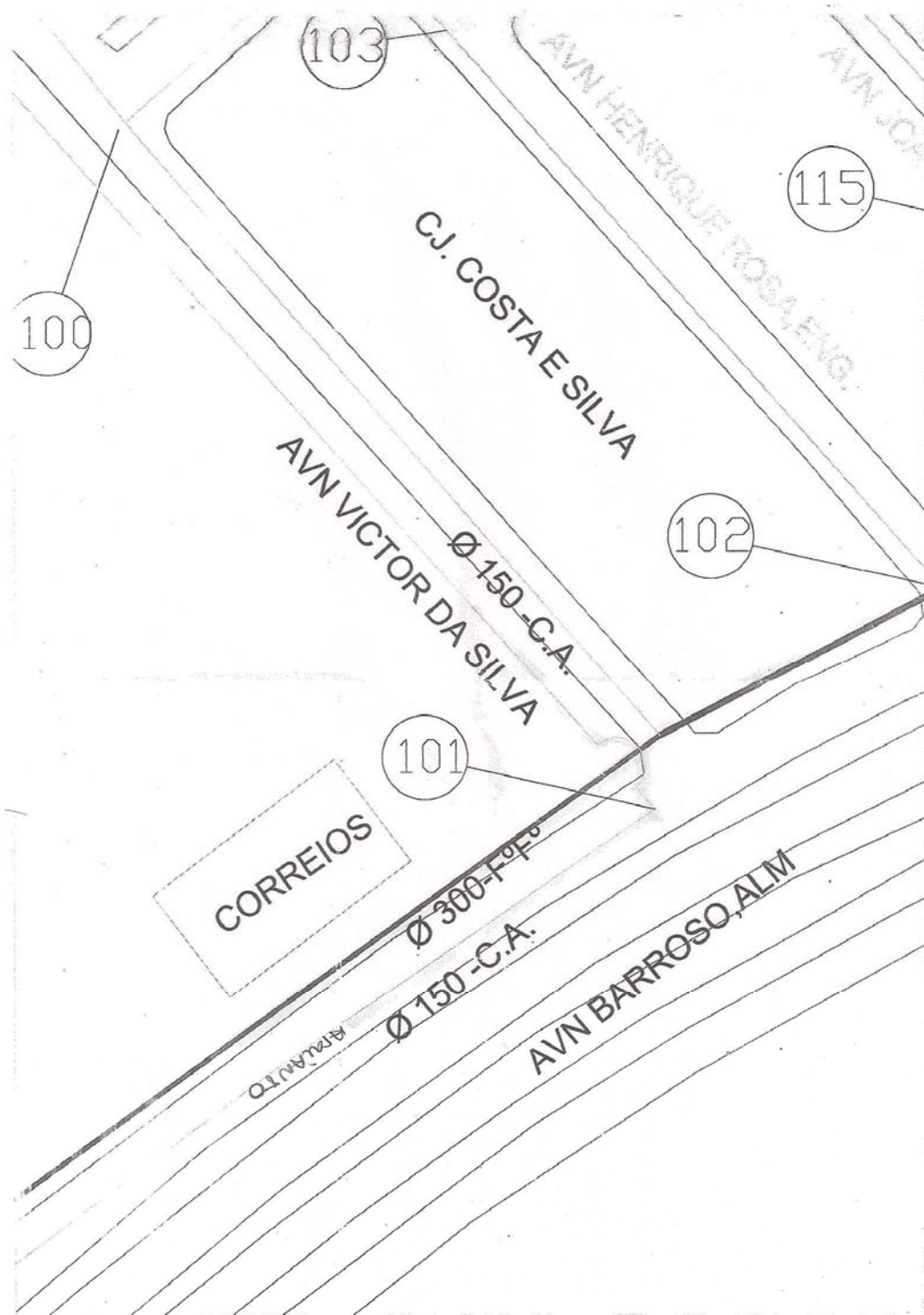
Nº	DISTANCIAS	PROF	OUTROS DADOS	
1	1A=2,20m 1B=5,10m	0,70		
2	2B=11,00 2C=10,00			
ATUALIZADO				
COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARÁ		DANIEL MESCOITO	DATA	03.12.2005
LOCALIDADE: BELÉM-ZONA CENTRAL		GILMAR SANTOS		
SETOR	10º SETOR (CDP)		DETALHE	378

ANEXO C: CADASTRO TÉCNICO DE REDE DE ÁGUA DA AV. NORTE

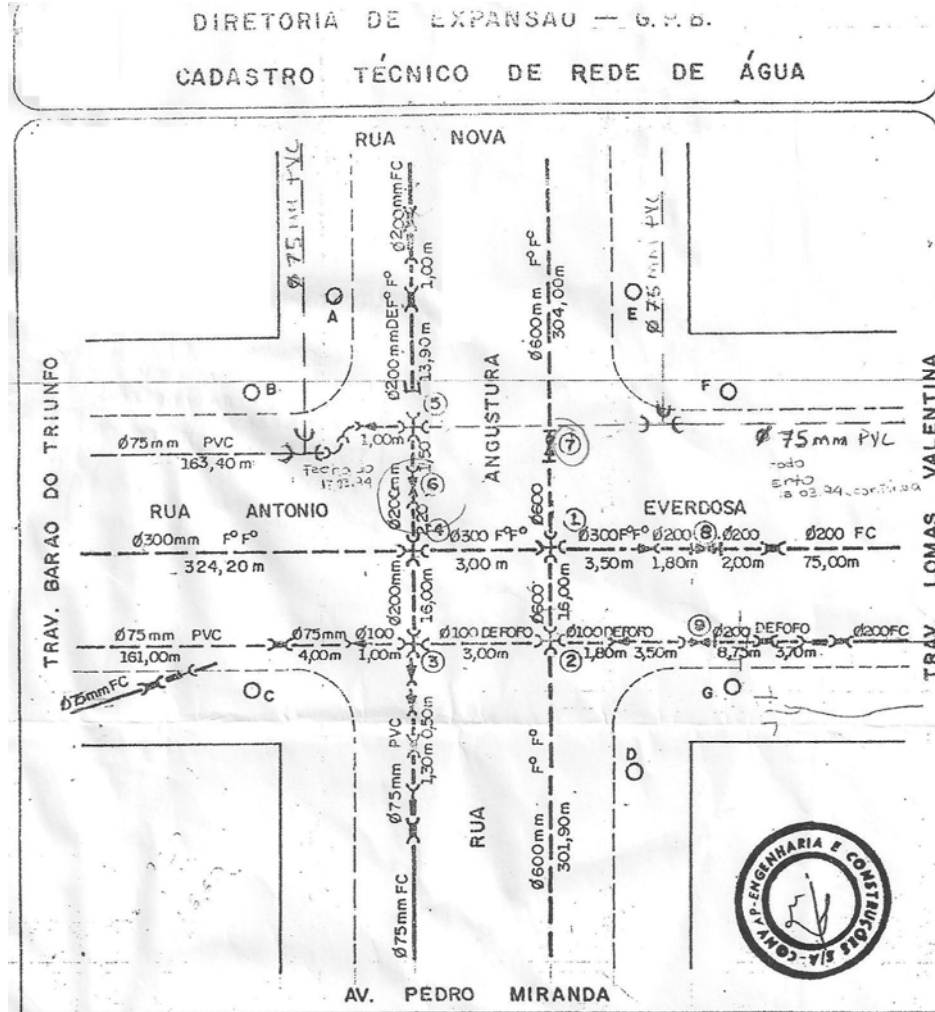


Nº	DISTANCIAS	PROF	OUTROS DADOS		
			01	T PVC JE BBB DN 50	01
	1 A 3 = 27,80m				
	1 A 4 = 15,90m				
	1 A 5 = 31,20m				
	2 A 3 = 23,80m				
	2 A 4 = 20,00m				
	2 A 5 = 36,90m				
COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARÁ			MARCA	TIPO	DIAMETRO
LOCALIDADE: BELÉM-ZONA CENTRAL					
SETOR	10º SETOR (CDP)		DETALHE		356

ANEXO D: CADASTRO TÉCNICO DE REDE DE ÁGUA DA AV. VICTOR DA SILVA



ANEXO E: CADASTRO TÉCNICO DE REDE DE ÁGUA DA AV. ANTONIO EVERDOSA E AV. ANGUSTURA



Nº	DISTANCIAS	PROF.	OUTROS DADOS				
			REGISTRO	R_6	R_7	R_8	R_9
1	1A=12,95m 1B=14,70m	1,40m	REGISTRO	R_6	R_7	R_8	R_9
2	2C=15,00m 2E=17,00m	0,80m	DIÂMETRO	200mm	600mm	350mm	200mm
3	3C=12,70m 3D=12,90m	1,40m	TIPO	RGC	RGC	RGC	RGC
4	4E=11,40m 4F=11,30m	1,30m	MARCA	BARBARA	BARBARA	BARBARA	BARBARA
5	5A= 7,90m 5B=10,20m	0,80m	PROFUNDIDADE		1,80m		
6	6E= 15,00m 6F= 19,30m 6A=8,40		HIDRANTE				
7	7E= 9,60m 7F= 15,00m 7A=6,80		MARCA	TIPO	DIÂMETRO		
8	8E=11,20m 8F= 7,75m		OPR: _____ REDE EXECUTADA _____ REDE EXISTENTE				
9	9G= 9,50m 9D= 17,10m		COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARÁ DEPENDENCIA ZONA CENTRAL				

COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARÁ
LOCALIDADE: SELÉM-ZONA CENTRAL
SETOR: 92 PRESSÃO DA REDE:



QUADRICULA: 09021 DETALHE: 042
DATA: 22/03/88 FOLHA:
ATUALIZADO EM: