

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA EM RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EXPLORAÇÃO PETROLÍFERA E MINERAL

RENAN NICOLAU RIBEIRO DA ROCHA

**USO DE GPR NA INSPEÇÃO DE SOLO POTENCIALMENTE CONTAMINADO
POR HIDROCARBONETOS EM UM POSTO DE COMBUSTÍVEL, GURINHÉM-PB**

Campina Grande, PB

2019

RENAN NICOLAU RIBEIRO DA ROCHA

**USO DE GPR NA INSPEÇÃO DE SOLO POTENCIALMENTE CONTAMINADO
POR HIDROCARBONETOS EM UM POSTO DE COMBUSTÍVEL, GURINHÉM-PB**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral, Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia, da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Exploração Petrolífera e Mineral.

Orientadores:

Prof^ª. Dr^ª. Elissandra N. de Moura Lima

Prof. Dr. Anderson de Medeiros Souza

Campina Grande, PB

2019

R672u Rocha, Renan Nicolau Ribeiro da.
Uso de GPR na inspeção de solo potencialmente contaminado por hidrocarbonetos em um posto de combustível, Gurinhém-PB / Renan Nicolau Ribeiro da Rocha. – Campina Grande, 2019.
54 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Exploração Petrolífera e Mineral) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2019.

"Orientação: Profa. Dra. Elissandra Nascimento de Moura Lima, Prof. Dr. Anderson de Medeiros Souza".

Referências.

1. Geofísica. 2. GPR (Ground Penetrating Radar). 3. Gestão Ambiental. 4. Postos Revendedores de Combustíveis. 5. Solo Potencialmente Contaminado – Remediação. I. Lima, Elissandra Nascimento de Moura. II. Souza, Anderson de Medeiros. III. Título.

CDU 550.3(043)

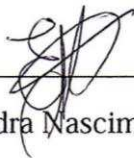
RENAN NICOLAU RIBEIRO DA ROCHA

**USO DE GPR NA INSPEÇÃO DE SOLO POTENCIALMENTE CONTAMINADO
POR HIDROCARBONETOS EM UM POSTO DE COMBUSTÍVEL GURINHÓ - PB**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral, Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia, da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Exploração Petrolífera e Mineral.

Aprovada em: 09 / 08 / 2019.


Comissão Examinadora



Professora Drª. Elissandra Nascimento de Moura Lima
UFCG



Professor Dr. George do Nascimento Ribeiro
UFCG



Dr. Alexandre Endres Marcon
CAERN

Dedico esta, assim como outras conquistas, à minha esposa, Carla Natália Lisboa Bezerra, aos meus pais, Rosenilda Ribeiro da Rocha e João Evangelista Feríssimo da Rocha, à minha irmã, Morgana Ribeiro da Rocha e às minhas sobrinhas Maria Clara Ribeiro Cândido e Mariah Lisboa Bezerra Costa, que são verdadeiros presentes de Deus em minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus primeiramente, por ser o guia e fonte de sustento, coragem e sabedoria durante o decorrer dessa longa jornada.

À minha família, em especial à minha esposa, Carla Natália Lisboa Bezerra, pelo apoio incondicional, carinho, amor e companheirismo, fundamentais para superar as dificuldades dessa caminhada.

À Orientadora e Geóloga, Dr.ª Elissandra Nascimento de Moura Lima, pelo apoio e atenção, desde as etapas de seleção do programa e pelos ensinamentos e discussões ao longo dos mais de dois anos de trabalho nesse mestrado.

Ao orientador e também Geólogo, Dr. Anderson de Medeiros Souza, pelo aporte técnico que ajudou a direcionar este trabalho, com sugestões e mediações desde as etapas de pré-projeto.

Ao proprietário do posto Auto Pista, e em especial ao gerente Delosmar, pela atenção e disponibilidade durante todo o período deste trabalho.

À Universidade Federal de Campina Grande, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral (PPGEPM) desta Universidade, bem como a todos os professores que o compõem, pelo empenho, disponibilidade e pelos conhecimentos transmitidos.

À Liana Bastos Bezerra, Secretária do PPGEPM, pelo apoio, atenção e prestatividade.

À Universidade Federal do Rio Grande do Norte, em especial ao Laboratório de Análises Estratigráficas do Departamento de Geologia, na pessoa do professor Dr. Francisco Pinheiro Lima Filho, pelo apoio técnico e logístico durante as atividades de campo desenvolvidas no município de Gurinhém-PB.

Ao professor João Andrade dos Reis Júnior, da Universidade Federal Rural da Amazônia, pela grande contribuição para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, em especial aos gestores do Campus Picuí, dentre eles o amigo Fábio do Egito Pedrosa, que deram todo o apoio necessário para a minha qualificação, como servidor.

Ao professor Dr. George do Nascimento Ribeiro (UAEB/CDSA/UFCG), pelos conselhos e direcionamentos na minha vida acadêmica em geral, seu apoio sempre foi e é fundamental.

Por fim, minha gratidão ao ensino público, gratuito e de qualidade e a todos que fazem de sua rotina um instrumento para fortalecê-lo ainda mais.

“A melhor maneira que o homem dispõe para se aperfeiçoar é aproximar-se de Deus.”

Pitágoras

RESUMO

Os postos revendedores de combustíveis têm sido uma das principais fontes de contaminação do solo e do manancial subterrâneo. Este trabalho tem por objetivos: demonstrar as vantagens da ferramenta geofísica GPR (Ground Penetrating Radar) no monitoramento de solo potencialmente contaminado por vazamentos de tanques de armazenamento em um posto revendedor de combustíveis e, avaliar a eficiência do método “Remoção de Solo” na eliminação de pluma de contaminação ocasionada por vazamentos de tanques de armazenamento de hidrocarbonetos, anteriormente aplicado pelo posto de combustíveis. Para o estudo de caso, foi selecionado um posto de combustíveis em Gurinhém-PB. Foram levantados 9 (nove) perfis de sondagem geofísica, com frequências de 200 e 400 MHz, totalizando aproximadamente 400 m de levantamento, perpendiculares aos tanques subterrâneos de armazenamento de gasolina e na área de menor cota do terreno, teoricamente favorável a migração dos contaminantes. O GPR demonstrou-se um método não invasivo e com profundidade de penetração satisfatória. O método “Remoção de Solo” que foi aplicado para remediar a contaminação anteriormente detectada na área do entorno dos tanques de armazenamento se mostrou eficiente, pois reduziu consideravelmente a contaminação e o vazamento dos tanques foi resolvido com a troca destes. Uma das linhas de aquisição L0 apresentou uma anomalia de alta resistividade, podendo estar correlacionada a eventual contaminação por hidrocarbonetos. Como a distância da área supostamente contaminada para as instalações de bombas e tanques de armazenamento é relativamente grande (aproximadamente 30 m) para correlacionar a contaminação a um vazamento recente, é possível que esta esteja relacionada a resíduos da contaminação anterior do solo, antes das ações de remediação.

Palavras-chave: GPR, Postos revendedores de combustíveis, Gestão ambiental, Remediação.

ABSTRACT

Fuel retailers have been one of the main sources of contamination of soil and groundwater. The objective of this work is to demonstrate the advantages of the Ground Penetrating Radar (GPR) geophysical tool in monitoring potentially contaminated soil from storage tanks at a gas station and to evaluate the efficiency of the “Soil Removal” method in the disposal of contamination plume caused by leaks from hydrocarbon storage tanks, previously applied by the fuel station. For the case study, a fuel station was selected in Gurinhém-PB. Nine (9) geophysical survey profiles were surveyed, with frequencies of 200 and 400 MHz, totaling approximately 400 m of survey, perpendicular to the underground storage tanks of gasoline and in the area of looser ground, theoretically favorable to the migration of contaminants. The GPR proved to be a noninvasive method with satisfactory penetration depth. The “Soil Removal” method that was applied to remediate the contamination previously detected in the area around the storage tanks proved to be efficient, since it considerably reduced the contamination and the leakage of the tanks was solved by changing them. One of the L0 acquisition lines presented a high resistivity anomaly, which could be correlated to eventual hydrocarbon contamination. Since the distance from the allegedly contaminated area to the pump and storage tank facilities is relatively large (approximately 30 m) to correlate contamination with a recent spill, it may be related to remnants of previous soil contamination prior to actions of remediation.

■■■■■■■■ GPR ■ Fuel retailers ■ Environmental Management ■ Remediation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Localização e vias de acesso à área estudada.....	6
Figura 2 – Províncias estruturais brasileiras, segundo Bizzi et al. (2003).....	7
Figura 3 – Mapa geológico do município de Gurinhém – PB. Modificado de Cunha (2014). ...	8
Figura 4 – Mapa de isolinhas da profundidade (em metros) dos poços cadastrados no município de Gurinhém – PB.	10
Figura 5 – Distribuição dos hidrocarbonetos no ambiente subterrâneo. Modificado de Cruz (2015).....	14
Figura 6 – Técnicas de remediação declaradas no cadastro de áreas contaminadas da CETESB. Modificado de Moraes et al. (2014).	16
Figura 7 – Diagrama de arranjo das antenas do GPR. Modificado de Cruz (2015).	21
Figura 8 – Esquematização da aquisição de dados com perfis de reflexão com afastamento constante. Modificado de Reis Júnior (2014).	22
Figura 9 – Esquematização da aquisição de dados com sondagem de velocidade tipo (A) CMP e (B) GARR. Modificado de Reis Júnior (2014).	22
Figura 10 – Modos distintos de transiluminação: (A) Common Offset (B) Direta. (C) GPR e (D) Variável. Modificado de Reis Júnior (2014).	29
Figura 11 – Representação esquemática da aquisição de um perfil de reflexão GPR com afastamento contínuo e os radargramas obtidos a partir da resposta de quatro posições amostradas. Modificado de Souza (2013).	30
Figura 12 – Posto Auto Pista, no município de Gurinhém.	34
Figura 13 – Processo de escavação para substituição dos tanques. (Imagens cedidas pela administração do posto).	34
Figura 14 – Aquisição de dados GPR com antena monoestática.	35
Figura 15 – Detalhe da unidade de controle.	36
Figura 16 – Esquema de disposição espacial das linhas GPR adquiridas.	36
Figura 17 – Linha 01 de aquisição resultante das antenas (A) 200 MHz e (B) 400 MHz.	39

Figura 1 – Linha 02 de aquisição resultante das antenas (A) 200 MHz e (B) 400 MHz.....	40
Figura 19 – Linha 03 de aquisição resultante das antenas (A) 200 MHz e (B) 400 MHz.....	41
Figura 20 – Linha 03 de aquisição resultante das antenas (A) 200 MHz e (B) 400 MHz.	42
Figura 21 – Linha 04 de aquisição resultante das antenas (A) 200 MHz e (B) 400 MHz.....	43
Figura 22 – Linha 05 de aquisição resultante das antenas (A) 200 MHz e (B) 400 MHz.....	44
Figura 23 – Linha 06 de aquisição resultante das antenas (A) 200 MHz e (B) 400 MHz.....	45
Figura 24 – Linha 07 de aquisição resultante das antenas (A) 200 MHz e (B) 400 MHz.....	46
Figura 25 – Linha 08 de aquisição resultante das antenas (A) 200 MHz e (B) 400 MHz, com destaque para a zona de atenuação.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Concentração Máxima Permitida (em ppb) dos BTE em água para consumo humano em diferentes países e seus respectivos documentos orientadores.	12
Tabela 2 – Principais tecnologias de remediação.	17
Tabela 3 – Principais métodos geofísicos utilizados em problemas ambientais.	20
Tabela 4 – Valores do coeficiente de reflexão para algumas interfaces típicas.	24
Tabela 5 – Constante dielétrica e condutividade elétrica, observadas nos materiais comuns para as frequências utilizadas no GPR.	25
Tabela 6 – Aplicabilidade do GPR conforme frequência central da antena e sua profundidade de penetração aproximada.	27
Tabela 7 – Frequência central das antenas versus a resolução vertical.	27
Tabela 8 – Procedimentos adotados no processamento dos radargramas.	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADQG	Australian Drinking Water Guidelines
ANA	Agência Nacional de Águas
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BTEQ	Hidrocarbonetos aromáticos (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos)
CMP	Common MidPoint
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPAQ	Conselho de Proteção Ambiental - Paraíba
CPRQ	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CTRN	Centro de Tecnologia em Recursos Naturais
DNAPL's	Dense Nonaqueous Phase Liquids
DOD ETTC	Department of Defense Environmental Technology Transfer Committee
EC	European Communities
EQ	Eletromagnéticas
FEAQ	Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais
FEPAQ	Fundação Estadual de Proteção Ambiental do Rio Grande do Sul
GCDQ	Guidelines for Canadian Drinking Water Quality
GPR	Ground Penetrating Radar
GSSI	Geophysical Surveys Systems, Incorporation
HPA'Q	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
IAP	Instituto Ambiental do Paraná
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFPB	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
IQA	Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina
INEA	Instituto Estadual do Ambiente do Rio de Janeiro
Q	quilmetro
L	Litro
LAE	Laboratório de Análises Estratigráficas
LNAPL's	Light Nonaqueous Phase Liquids
Q	Metro

□H□	Mega□ertz
□S	Ministério da Sa□de
□	Nanosegundos
NAPL's	Nona□ueous Phase Li□uids
PB	Paraíba
PIB	Produto Interno Bruto
□□□	Partes por bilhão
PPGEP□	Programa de Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral
S	Sul
SIAGAS	Sistema de Informações de □guas Subterr□neas
SUDE□A	Superintendência de Administração do Meio Ambiente - Paraíba
SUDENE	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
USEPA	United States Environmental Protection Agency□
□	Oeste
□ARR	□ide-Angle Reflection-Refracton

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	Apresentação.....	1
1.2.	Justificativa	1
1.3.	Objetivos.....	4
1.4.	Localização	5
2.	CONTEÚTUALIZAÇÃO DA ÁREA.....	6
2.1	Aspectos socioeconómicos	6
2.2	Contexto Geológico	7
2.3	Hidrologia	9
2.4	Hidrogeologia	9
2.5	Clima.....	10
3.	IMPACTO AMBIENTAL DOS POSTOS REENDEDORES DE COMBUSTÍVEL	10
3.1	Impactos Gerais	11
3.2	Fases da contaminação.....	13
4.	TÉCNICAS DE REMEDIAÇÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS.....	15
5.	GROUND PENETRATING RADAR.....	19
5.1.	O que é o Ground Penetrating Radar.....	20
5.1.1	Conductividade elétrica.....	22
5.1.2	Permissividade dielétrica	22
5.1.3	Permeabilidade magnética.....	23
5.1.4	Impedância elétrica.....	24
5.1.5	Frequência do pulso.....	26
5.2.	Aquisição de dados	27
5.3.	Processamento de dados	29
5.4.	Interpretação de dados	30
5.5.	Exemplos de GPR na identificação de plumas de contaminação	31
6.	METODOLOGIA.....	32
7.	POSTO AUTO PISTA	33
8.	AQUISIÇÃO DE DADOS	35
9.	PROCESSAMENTO DOS DADOS GPR	37
10.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	38
11.	CONCLUSÕES	49
12.	REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

O presente trabalho intitulado de “**Uso do GPR em áreas industriais para identificação de vazamentos em sistemas de distribuição de gás natural - PB**” corresponde a documentação escrita da dissertação de mestrado do Engenheiro de Minas Renan Nicolau Ribeiro da Rocha, aluno do Programa de Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral (PPGEPM) do Centro de Tecnologia em Recursos Naturais (CTRN) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). A defesa deste corresponde ao último pré-requisito exigido pelo PPGEPM para obtenção do título de Mestre em Exploração Petrolífera e Mineral.

A pesquisa foi desenvolvida sob orientação dos professores Dra. Elissandra Nascimento de Moura Lima e Dr. Anderson de Medeiros Souza, com o apoio do Laboratório de Análises Estratigráficas (LAE) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB e do Posto Auto Pista, localizado no município de Gurinhém – PB.

1.2 Justificativa

Segundo Brilhante e Caldas (2004), a manutenção da qualidade ambiental consiste em um tema essencial de política governamental, além de ser uma grande preocupação dos cidadãos, seja nos países industrializados ou não. Essa consciência leva a população a ter uma visão mais crítica da degradação ambiental como uma ameaça à saúde e ao bem-estar social, todavia o rápido crescimento e a crescente urbanização das cidades ignoram alguns quesitos essenciais para o controle ambiental, ocasionando problemas como ocupações de áreas de risco, disposição incorreta de resíduos sólidos, vazamentos de contaminantes no solo, entre outros (ALARENGA, 2007).

Os problemas referentes aos contaminantes ambientais estão, em parte, associados à Revolução Industrial ocorrida desde o final do século XIX, onde passaram a se agravar com maior intensidade, espelhando o processo de industrialização e atendendo ao estímulo permanente ao consumo do sistema capitalista, ameaçando e causando prejuízos à saúde do homem e dos ecossistemas. Neste cenário, a indústria do petróleo sempre ocupou um lugar de destaque, sendo fonte para produção de querosene, época utilizada para iluminação, até os

dias atuais, depois de diversos avanços tecnológicos, sendo o principal fornecedor da energia utilizada nos transportes em todo o mundo, além da ampla gama de aplicações de seus derivados, como asfalto, plástico, tintas, óleos lubrificantes, dentre outros.

A indústria do petróleo oferece inúmeras vantagens no âmbito socioeconômico, apresentando em contrapartida, diversos riscos ambientais em qualquer que seja a etapa de sua produção e distribuição, tornando-se alvo de grandes preocupações. Neste ciclo, diversas atividades se destacam, dentre elas, os postos revendedores de combustíveis, distribuídos nos mais diversos pontos do território brasileiro.

Segundo a Agência Nacional de Águas – ANA (2005), os postos de combustíveis são uma das principais fontes potenciais de contaminação do solo e do manancial subterrâneo, através do vazamento dos tanques subterrâneos de armazenamento. Esses vazamentos estão associados a problemas de instalação e, principalmente, à corrosão de tanques, normalmente construídos em aço, com vida útil média de 20 anos. Falta prioridade, por parte das empresas, às atividades ambientais e de manutenção preventiva, tidas ainda como custo adicional (NASCIMENTO, 2012).

O Brasil, alcançou o quantitativo de 40.12 revendedores varejistas de combustíveis líquidos em 2015, segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP (2016), passando a 41.69, em 2016 (ANP, 2017) e chegando a 41.94 unidades ao fim de 2017 (ANP, 2018), justificando assim o seu reconhecimento como potencial poluidor subterrâneo, visto que, cada vez mais tanques de armazenamento são instalados no subsolo brasileiro.

Tendo em vista o expressivo número de instalações de tanques de combustíveis e as consequências por ela trazidas, oferecendo riscos tanto para a segurança e proteção física da população, como para o meio ambiente, desde 1981 a atividade foi submetida à legislação ambiental pela criação da Lei Federal nº6.938, regulamentada pelo Decreto nº99.274/90. Mais tarde, em meados de 1997, o Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, sujeitou a atividade ao licenciamento ambiental através da Resolução nº237 e por fim, a mais importante norma regulamentadora da atividade, a Resolução CONAMA nº273, de novembro de 2000, que estabelece diretrizes para o licenciamento ambiental de postos de combustíveis e serviços e dispõe sobre a prevenção e controle da poluição da água superficial e subterrânea, do solo e do ar, passando a exigir, por exemplo, a utilização de tanques de armazenamento duplamente protegidos, em prevenção à corrosão. A partir desta Resolução, muitos órgãos governamentais e ambientais, no âmbito federal, estadual e municipal, concentraram suas atenções ao caso.

No cenário nacional, órgãos como a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), a Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) em Minas Gerais, o Instituto Estadual do Ambiente (INEA) no Rio de Janeiro, o Instituto Ambiental do Paraná (IAP), o Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina (IMA) e a Fundação Estadual de Proteção Ambiental (FEPAM) no Rio Grande do Sul têm se destacado no sentido do estabelecimento dos padrões necessários para que o gerenciamento de áreas contaminadas se desenvolva de forma adequada, visando minimizar o risco à saúde humana e ao meio ambiente associado à utilização destas áreas (MORAES et al., 2014). No estado da Paraíba, a SUDEMA – Superintendência de Administração do Meio Ambiente, é o órgão ambiental responsável pelo licenciamento e fiscalização deste tipo de empreendimento, através do COPAM – Conselho de Proteção Ambiental, criado nos termos da Lei 4.335 de dezembro de 1991, e que desde então atua na prevenção e no controle da poluição e degradação do meio ambiente, visando a proteção, conservação, recuperação e melhoria dos recursos ambientais, analisando todas as licenças concedidas por aquela.

No que se refere às contaminações oriundas de postos de combustíveis, Mindrisz (2006) afirma que elas se manifestam como contaminações superficiais, devido a constantes e sucessivos derrames junto às bombas e bocais de enchimento dos reservatórios de armazenamento, ocorrendo também, na subsuperfície através do vazamento de tanques e tubulações subterrneas.

Estas contaminações têm como principais constituintes os hidrocarbonetos monoaromáticos, também conhecidos por compostos BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e os orto, meta e para xilenos), para Mindrisz (2006), consideradas substâncias perigosas aos seres humanos por serem depressivos do sistema nervoso central e por causarem leucemia em exposições crônicas.

Desta forma, em observância à gravidade do problema e o grande impacto desse tipo de contaminação para as áreas afetadas, torna-se necessária a tomada de medidas visando a remediação ou descontaminação dos locais atingidos. No entanto, a especificidade destes locais (geologia, hidrogeologia, características físicas e químicas dos contaminantes, etc.), assim como a escolha do sistema de remediação a ser utilizado (custos de energia, preço de mão-de-obra, aspectos políticos, tempo e recursos disponíveis), tornam-se fatores balizadores deste processo, não cabendo ao presente estudo, avaliar a melhor técnica de remediação aplicada ao caso em questão.

Outro agravante é a complexidade da detecção deste tipo de contaminação. Devido a sua localização na subsuperfície, não obrigatoriamente aflorada e observada em superfície de forma direta, os métodos diretos convencionais de investigação, como poços de monitoramento e furos de sondagem acabam restringindo as informações e impossibilitando um melhor entendimento da geometria e extensão das plumas contaminantes (SOUSA, 2009), caso existam. Em concordância com isto, Santos e Griep (2000) colocam a geofísica como uma área em franca ascensão, aplicando métodos indiretos e não invasivos para a investigação de fenômenos físico-químicos na subsuperfície, através de imagens contínuas que facilitam a interpretação e a delimitação destas plumas.

Em seus estudos, Daniels et al. (1995) e Saucier et al. (1990), apontam a permissividade e a condutividade elétrica dos hidrocarbonetos, explicadas adiante, como as propriedades físicas primárias detectáveis da superfície, pois a presença destes, modificam as propriedades elétricas do subsolo, causando contrastes com o background, devido aos baixos valores de permissividade e condutividade dos hidrocarbonetos em relação às rochas da subsuperfície e água subterrânea.

De acordo com Reis Júnior (2009), a aplicação do método GPR a casos desta natureza de forma satisfatória, torna-se possível devido à relação custo/benefício, relativamente baixa, e à existência desses contrastes com o background, comprovados por diversos estudos voltados à detecção de plumas contaminantes de hidrocarbonetos.

Para a presente pesquisa foi utilizado o método Ground Penetrating Radar (GPR) para investigação da eficácia do método de remediação utilizado no Posto Auto Pista, conforme relatos e registros fotográficos cedidos pela administração do mesmo, buscando localizar possíveis zonas de baixa condutividade e permissividade elétrica.

1.1 OBJETIVO

O presente trabalho tem por objetivo principal demonstrar a eficácia da ferramenta geofísica GPR (Ground Penetrating Radar), também conhecida por Georadar, no monitoramento de solo potencialmente contaminado por vazamentos de tanques de armazenamento em um posto revendedor de combustíveis.

1.3.1 Objetivos específicos

- Imageamento 2D por GPR da subsuperfície do terreno de um posto revendedor de combustíveis, no município de Gurinhém, Paraíba.
- Explanar sobre os benefícios do uso do GPR na investigação de possíveis plumas de contaminação por hidrocarbonetos na área em estudo.
- Avaliar a eficiência do método “Remoção de Solo” na eliminação de pluma de contaminação ocasionada por vazamentos de tanques de armazenamento, anteriormente aplicado pelo posto de combustíveis.

1.1 LOCALIZAÇÃO

A área em estudo corresponde ao terreno do Posto de combustíveis Auto Pista, localizado na Rodovia Governador Antônio Mariz, BR 230 – km 09, distando cerca de 9,1 km da sede municipal de Gurinhém, via rodovia PB-063. O município está situado na Mesorregião do Agreste Paraibano e na Microrregião de Itabaiana, apresentando altitude aproximada de 104 m e distando cerca de 61,9 km da capital João Pessoa, cujo acesso é feito através das rodovias BR-230 e PB-063, conforme a Figura 1.

O município está localizado entre as coordenadas geográficas de Latitude 7°7'22"S e Longitude 35°25'21"W, abrangendo uma área de aproximadamente 309 km², equivalente a 0,54% da superfície estadual (CPRM, 2005), inseridos na folha Sapé (SB.25-C-II), na escala 1:100.000, editada pela SUDENE.

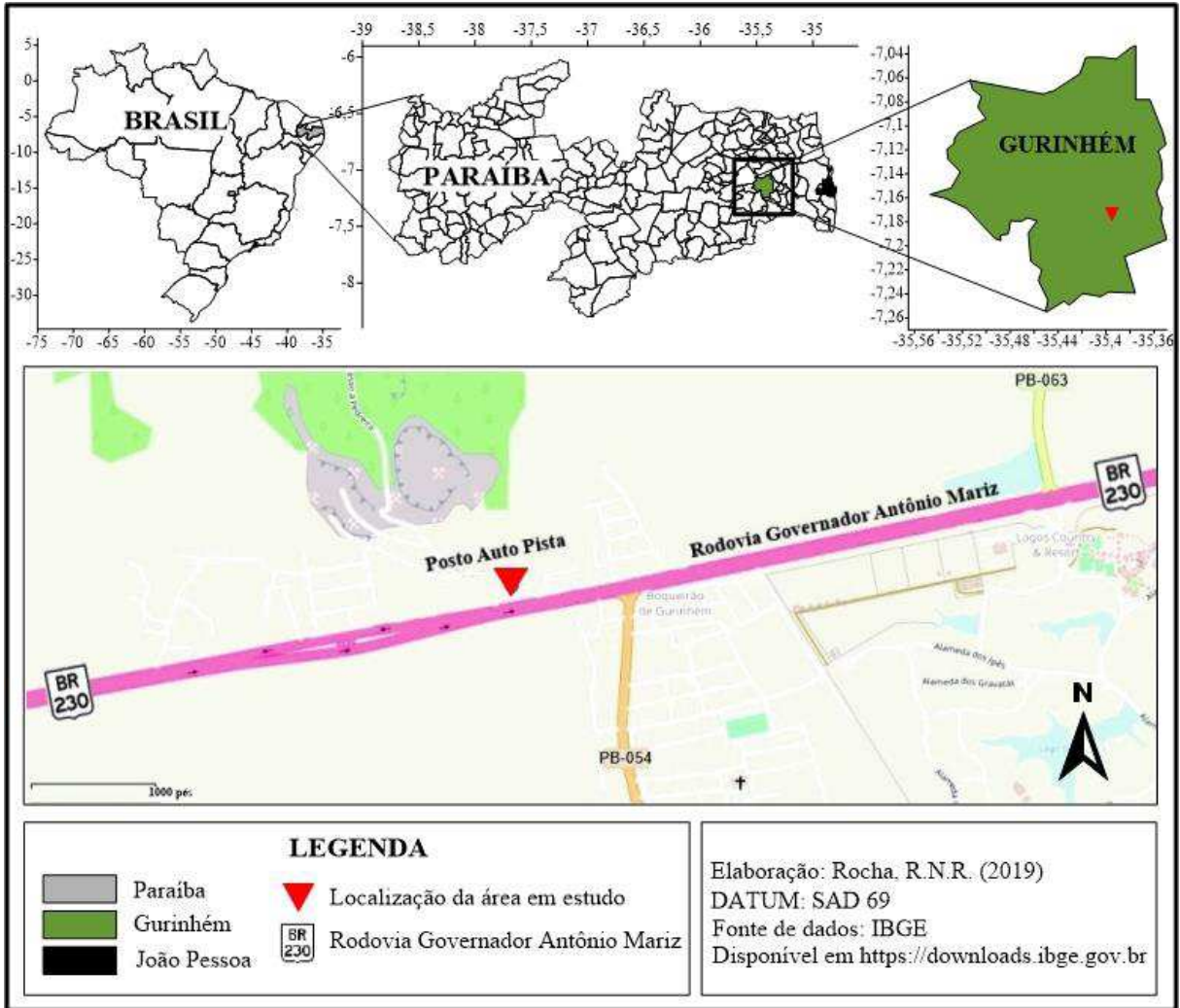


Figura 1 – Localização e vias de acesso à área estudada.

2. CONTEXTO GERAL DA ÁREA

2.1. A LOCALIDADE

Fundado em 1954, o município tem sua população estimada (2014) em cerca de 14.131 pessoas, católicas em sua grande maioria, com uma respectiva densidade demográfica de 45,73 hab/km² e Índice de Desenvolvimento Humano Municipal de 0,556, conforme dados do último Censo IBGE. O PIB per capita é de R\$9.326,71 (IBGE, 2016).

2.2 C O N T E U D O G E N E R A L

Conforme a CPRM (2005), o município de Gurinhém – PB encontra-se inserido, geologicamente, na Província Borborema (Figura 2), sendo estratigraficamente constituído pelos litotipos dos Complexos Cabaceiras (A4cb), Sertania (PP2se) e Serra do Tabitac (PM3s), além dos sedimentos do Grupo Barreiras (ENb), conforme observado na Figura 3.

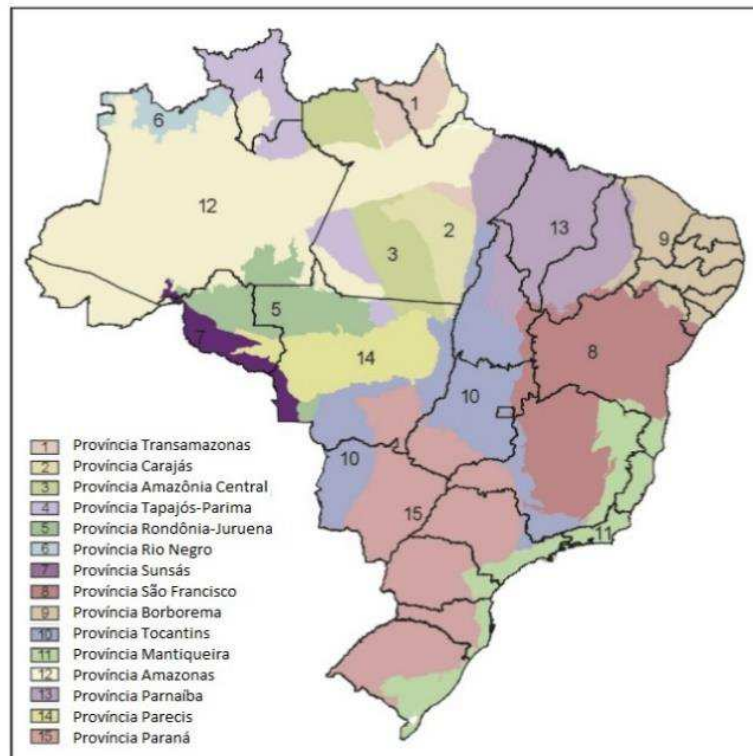
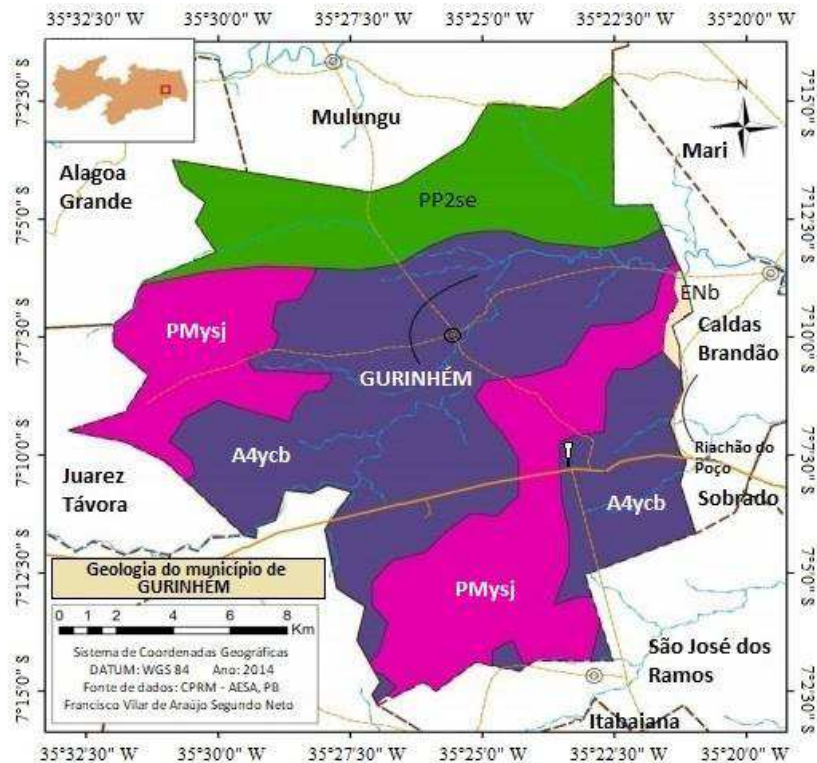


Figura 2 – Províncias estruturais brasileiras, segundo Bizzi et al. (2003).

A região denominada de Província Borborema por Almeida et al. (1977) designa a porção nordeste da Plataforma Sul-Americana, abrangendo uma vasta região com mais de 450.000 km² (OSA et al. 2011), além de possuir como características marcantes o expressivo magmatismo neoproterozoico e o notável sistema de zonas de cisalhamento, constituindo o último episódio de deformação ductil regional afetando a região (DIAS, 2006). Dentro do contexto litológico da província, existe uma subdivisão proposta por trabalhos da década de 1990 (DIAS, 2006), atribuindo características às diferentes unidades. Dentro desta percepção, CPRM (2002) destaca as quatro unidades litoestratigráficas que abrangem o município de Gurinhém – PB, no qual encontra-se a área do presente trabalho:

O Complexo Cabaceiras é uma unidade formada por ortognaisses granodiorítico-graníticos variavelmente migmatizados, que intercalam muitas rochas metamórficas.

O Complexo Sertânia é uma unidade metassedimentar, com alguma contribuição metavulcânica máfica, característica do Terreno Alto Moxotó. A litologia é formada por biotita gnaisse com granada e/ou sillimanita, biotita gnaisse, calcário cristalino, rocha calcissilicática, quartzo e raro anfíbrito.



UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS

Cenozóico

ENb Grupo Barreiras: arenito e conglomerado, intercalações de siltito e argilito

Paleo a Mesoproterozóico

PMysj Complexo Serra do Jabitacá: ortognaisse e migmatito de protólito tonalítico-granodiorítico

Paleoproterozóico

PP2se Complexo Sertânia: quartzito, metavulcânica máfica

Arqueano

A4ycb Complexo Cabaceiras: ortognaisse tonalítico-granodiorítico: intercalações de metamáfica

CONVENÇÕES GEOLÓGICAS

- Contato
- Lineamentos estruturais

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

- Sede municipal
- Rodovia estadual e estradas
- Rodovia federal
- Drenagens
- Limite municipal
- Localização da área estudada

Figura 3 – Mapa geológico do município de Gurinhém – PB. Modificado de Cunha (2014).

O Complexo Serra do Tabitacó é constituído por metagranitoides que constituem grandes batólitos, com ocorrência na Paraíba desde a região a norte de Monteiro até São João do Cariri. A composição varia entre monzonítica-sienogranítica e granítica, podendo ocorrer áreas de composição tonalítica-grano-diorítica, com enclaves de gnaisses granatíferos, além de anfíbolitos e leptinitos, por vezes migmatizados, com mesossoma anfibolítico predominante.

As rochas da Grupo Barreiras, que ocorrem desde o Rio de Janeiro até o estado do Pará, onde são representadas por sucessões contínuas de depósitos sedimentares siliciclásticos, estão presentes em uma pequena porção do município, (SOUSA, 2009). Cunha (2014), cita a presença de estratificações quase que totalmente horizontais, constituídas por sedimentos de diversas naturezas, desde areias até argilas de coloração das mais variadas, incluindo por vezes, leitos de seixos rolados.

2.1.1. Hidrografia

O município de Gurinhém encontra-se inserido nos domínios da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba. Seus principais afluentes são os rios Gurinhém, Gurinhenzinho e Salgado, além dos riachos Lagoa Nova, Morcego, Cipoal, Três Passagens, Carrapicho, Camucó, Salgado e Riachão. Os principais corpos de acumulação são os Açudes do Morais, Agostinho, Salgado, Corgonho, Aragão, Boqueirão, Doce, da Felha, Pinheiro e Primavera, além das Lagoas dos Bezerros e das Pipocas. Todos os cursos d'água têm regime de escoamento intermitente e o padrão de drenagem é o dendrítico (CPRM, 2005).

2.1.2. Hidrogeologia

Inserido no domínio Cristalino, o município é constituído por aquíferos fissurais, e poços com profundidade média de 40,7 m, de acordo com o banco de dados da CPRM (SIAGAS), conforme ilustrado na Figura 4. A ocorrência de água subterrânea nestes litotipos estão condicionadas a uma porosidade secundária representada por fraturas e fendas, resultando em reservatórios aleatórios, descontínuos, de pequena extensão e vazão, além da água tipicamente salinizada, devido às composições rochosas (BOMFIM, 2010).

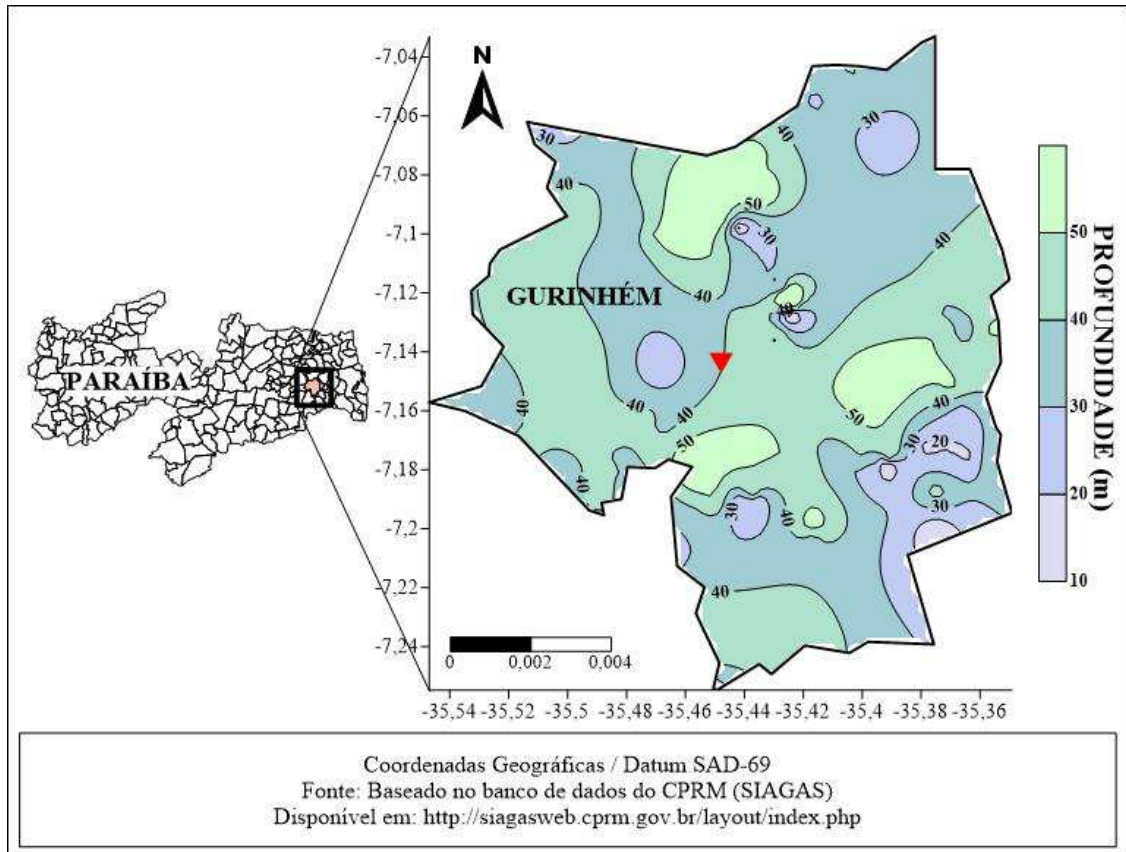


Figura 4 – Mapa de isolinhas da profundidade (em metros) dos poços cadastrados no município de Gurinhém – PB.

2.5 CONCLUSÃO

Segundo a classificação de Köppen e Geiger, a área encontra-se no domínio do clima A, clima tropical com estação seca de inverno, recebendo influências do litoral, mas também da região mais semiárida por se tratar de uma área de transição, apresentando uma precipitação média anual de 431,0 mm (CPRM, 2005), com um período chuvoso entre os meses de novembro e abril, com uma pluviosidade média de 96 mm (CPRM, 2005-2006). A temperatura média anual é de 25 °C, com a umidade relativa do ar em torno de 60% (CUNHA, 2014).

2.6 IMPACTO AMBIENTAL DOS POSTOS REVENDEDOR ES DE COMBUSTÍVEL

Entende-se por impacto ambiental, a alteração no meio ou em algum de seus componentes por determinada ação ou atividade, existindo a necessidade de quantificá-la, devido a eventuais variações que podem modificar positiva ou negativamente o cenário em questão.

O conhecimento destes impactos permite a avaliação das consequências oriundas de algumas atividades, no caso, os impactos resultantes dos Postos Revendedores de Combustíveis, oferecendo a possibilidade de prevenção e/ou mitigação de determinado problema ambiental através da execução de projetos ou ações de remediação diversas

Conforme Sousa (2009), devido aos riscos ambientais e outros fatores agravantes, a atividade vem sendo constantemente regulamentada através de leis, portarias e normas, estando sujeita à fiscalização a nível federal, estadual e municipal.

11 IMPACTOS AMBIENTAIS

O crescimento descontrolado do mercado brasileiro de Postos Revendedores de Combustíveis e o seu reconhecido potencial poluidor podem resultar numa perda ambiental bastante representativa. O maior risco que estes empreendimentos oferece ao meio ambiente e à população como um todo é a contaminação da subsuperfície e do ar, além de apresentar riscos de incêndio e explosões, principalmente pelo fato de estarem localizados em áreas densamente povoadas (NASCIMENTO, 2012; SOUSA, 2009).

A gasolina, assim como outros combustíveis, é constituída por hidrocarbonetos, que por sua vez, são compostos orgânicos de hidrogênio e carbono, podendo ainda conter oxigênio, nitrogênio e enxofre. Estes hidrocarbonetos, quando presentes em subsuperfície como contaminantes, são denominados de Líquidos de Fase Não Aquosa, Nonaqueous Phase Liquids (NAPL) e são divididos nas categorias leves e densos. Os Light Nonaqueous Phase Liquids (LNAPLs) são mais leves que a água e os Dense Nonaqueous Phase Liquids (DNAPLs), mais densos que a água. A maioria dos combustíveis flutua na água subterrânea caracterizando-se como LNAPLs, a exemplo da gasolina, do diesel e do querosene. (MARRUES, 2007).

Dentro deste cenário, Nascimento (2012) cita a poluição da subsuperfície como um dos maiores problemas e o atribui aos hidrocarbonetos monoaromáticos, conhecidos como BTEX. A gasolina em si é pouco solúvel em água, porém, em contato com a água subterrânea, dissolve-se parcialmente. Os compostos BTEX, dentro de mais de uma centena de constituintes, são os mais solúveis em água e, portanto, são os contaminantes a primeiro atingirem o lençol freático (CORSEUIL, 1992, apud CORSEUIL e MARINS, 1997, p. 51) devido a sua alta mobilidade. Podem estar associados ainda aos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) constituintes do óleo diesel, caracterizando maior toxicidade e contaminação, e podendo inviabilizar a exploração dos aquíferos por eles contaminados. No geral, esta mobilidade se deve ao fato dos

componentes da gasolina possuem baixos pesos moleculares, tratando-se de compostos de hidrocarbonetos que possuem entre 4 e 10 átomos de carbono por molécula (ALARENGA, 2007).

Os compostos BTEX são contaminantes considerados substâncias perigosas por serem depressoras do sistema nervoso central, apresentando toxicidade crônica, mesmo em pequenas concentrações (da ordem de ppb – parte por bilhão). Dentre os BTEX, o benzeno é considerado o mais tóxico, tendo sua ação cancerígena reconhecida desde 1994 pela Portaria nº 3 da Secretaria de Saúde e Segurança no Trabalho. Seu padrão de potabilidade é de 5 ppb ou µg/l, segundo as normas do Ministério da Saúde (MS), porém, a sua concentração dissolvida em água em contato com gasolina pode chegar a 30.000 ppb (CORSEUIL e MARINS, 1997; OLIVEIRA e LOUREIRO, 1999). Segundo Tiburtius et al. (2004) a inalação de tolueno ou xilenos pode induzir distúrbios no modo de falar, na visão, audição, no controle dos músculos e outros, além de sugerirem a associação entre benzeno e xilenos e o surgimento de tumores cerebrais. A tabela a seguir mostra a concentração máxima permitida dos BTEX em água para consumo humano em diferentes países.

Tabela 1 – Concentração Máxima Permitida (em ppb) dos BTEX em água para consumo humano em diferentes países e seus respectivos documentos orientadores.

Substância	USEPA ¹	Resolução CONAMA nº357/2005	Resolução CONAMA nº396/2006	Portaria MS nº2914/2011	Directive 91/676/EC ²	ADWG ³	GCDG ⁴
	EUA	Branco	Branco	Branco	Cinco Euros	Azul	Cinco
Benzeno	5	5	5	5	1	1	5
Tolueno	1.000	2	170	170	-	100	-
Etilbenzeno	700	90	200	200	-	300	-
Xilenos	10.000	300	300	300	-	600	-

¹ United States Environmental Protection Agency

² European Communities

³ Australian Drinking Water Guidelines

⁴ Guidelines for Canadian Drinking Water Quality

Ferreira, Carvalho et al. (2014).

Esse tipo de contaminação ocorre devido a eventuais lançamentos de combustíveis no solo, ocasionados por transbordamentos ou derramamentos nas operações de descarga e

principalmente, a vazamentos nos sistemas de armazenamento subterrâneo, em decorrência de defeitos de fabricação, da corrosão dos tanques e tubulações fabricadas em aço, ou até mesmo pela instalação defeituosa destes, além da vida útil destas instalações.

Um ponto muito importante no tocante ao estudo dos contaminantes de derivados de petróleo no meio ambiente está relacionado à utilização do etanol como combustível e, principalmente no Brasil, como parte da mistura da gasolina comercial, chegando à proporção de 24% em volume. Estando no solo, o etanol pode colaborar no processo de solubilização dos compostos BTEX, aumentando a mobilidade com o que os mesmos se dispersam pelo solo e pelas águas. Além disto, o etanol em altas concentrações no solo pode até mesmo prejudicar a biodegradação dos compostos BTEX, devido à sua ação inibidora do crescimento bacteriano. Sendo assim, o etanol traz um agravante a mais para o entendimento dos processos de contaminação de solos e águas subterrâneas no Brasil, sendo necessária a adaptação de práticas de avaliação e remediação utilizadas no exterior para considerar a influência exercida por essa substância (OLIVEIRA e LOUREIRO, 1999).

2 FENÔMENOS DE DISPERSÃO

Segundo Oliveira e Loureiro (1999), uma vez derramado no solo, os combustíveis possuem diversos comportamentos de dispersão, que dependem de diversos fatores, dentre os quais podemos citar: a quantidade de líquido despejada, as características físico-químicas dos materiais do solo, as características físico-químicas do contaminante, a profundidade do lençol freático e a presença de estruturas subterrâneas de origem antropogênica.

Azambuja et al. (1999) propõem a designação de cinco fases distintas de contaminação que tipicamente se manifestam em vazamentos de tanques de combustível e as descrevem da seguinte forma:

- **Fase de dispersão** constitui uma área de dispersão entre a fonte e o nível freático e caracteriza-se por uma fina película de hidrocarbonetos envolvendo grumos de solo ou descontinuidades existentes na rocha, em consequência da descida vertical dos hidrocarbonetos sendo mais importante para os produtos mais viscosos como o diesel.
- **Fase de película** constitui em um véu não miscível sobre o topo do lençol freático livre e que pode ser mais espesso em casos onde o sistema freático é pouco dinâmico (várzeas).

- **Fase Dissolvida** – caracterizada pela solubilização dos hidrocarbonetos na água subterrânea a depender de seus constituintes. No caso da gasolina brasileira, a solubilidade é aumentada em função da adição do etanol. Esta fase é mais importante para fluidos menos viscosos como a gasolina.
- **Fase Adsorvida** – constitui uma fase gasosa dos componentes voláteis dos combustíveis e que ocupa vazios do solo ou rocha, sendo mais importante para os hidrocarbonetos de menor ponto de vaporização, como aqueles que compõem a gasolina.
- **Fase Residual** – aparece mais tipicamente em áreas urbanas onde a pavimentação do solo é intensa e pouco permeável, caracterizando-se pela acumulação de produtos condensados sob os pavimentos.

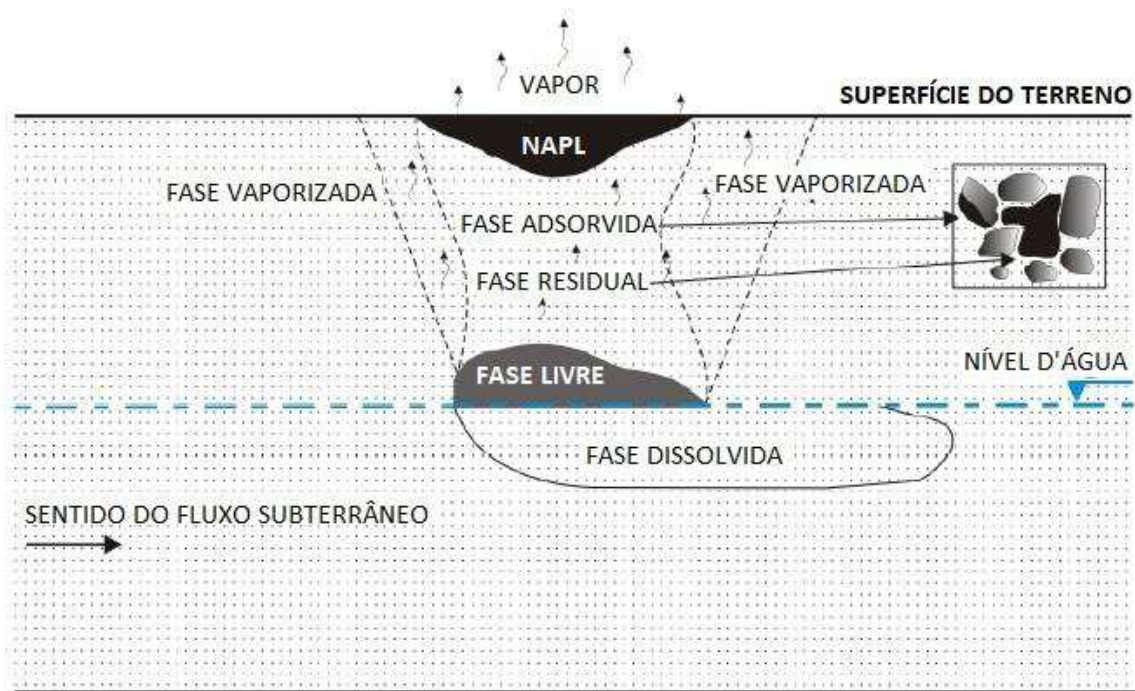


Figura 5 – Distribuição dos hidrocarbonetos no ambiente subterrâneo. Modificado de Cruz (2015).

Na maioria dos casos de contaminação desse tipo, a preocupação do diagnóstico consiste em delimitar as fases adsorvida e livre, conforme mostrado na Figura 5, pois estas são as mais importantes no que concerne ao risco ambiental, além serem as fases mais susceptíveis à remediação mais efetivas (AQUAMBUCA et al., 1999).

□□ TÉCNICAS DE REMEDIAÇÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS

Conforme a Resolução Conama nº 420 de dezembro de 2009, áreas contaminadas são locais com a presença de substâncias químicas, decorrentes de atividades antrópicas, numa concentração que restrinja a utilização desse recurso ambiental e que venham causar risco à saúde humana, assim como aos bens a proteger.

A remediação, por sua vez, é um conjunto de ações para a recuperação ambiental e consequente proteção do ambiente e da saúde humana, através de uma intervenção direta, visando conter, isolar, remover ou reduzir as concentrações dos contaminantes presentes (LIMA et al., 2017).

Para Santos et al. (200□), a urgência de remediar estas áreas é proporcional à pressão que as empresas receberão para agir sobre seus passivos e não há consenso quando se trata do fator econômico, principalmente no que tange às tecnologias de remediação, devido aos altos valores empregados, além da grande variedade de técnicas existentes, exigindo cautela na escolha, minimizando o risco de erro de forma a atender o caso em questão. Para isto, é necessária uma etapa prévia de investigação, com o intuito de fornecer subsídios para a concepção e detalhamento de um projeto de remediação, que seja tecnicamente adequado, legalmente cabível e economicamente viável, para cada situação.

Esta grande variedade de técnicas espelha a particularidade de cada demanda ambiental, o aumento das exigências dos órgãos ambientais, o surgimento de legislações específicas para o tema de áreas contaminadas, além do aumento da conscientização da sociedade relativa a esse tema, indicando a necessidade de inovação tecnológica e buscas de diferentes alternativas para reabilitação das áreas contaminadas.

Santos et al. (200□, *apud* Eugris, 200□), categoriza as tecnologias de remediação em três diferentes tipos:

- **T**écnicas de **processos** nos quais os contaminantes são transformados em função da ação de microrganismos, resultando em substâncias como dióxido de carbono, água ou biomassa. Geralmente são de baixo custo e não há necessidade de tratamento residual, todavia, requer tempo e é difícil verificar sua eficácia.
- **T**écnicas de **utilizam-se** das propriedades físicas e/ou químicas e/ou elétricas do contaminante e/ou do meio contaminado para destruir (conversão química), separar ou conter a contaminação. Nos processos químicos, a estrutura e o comportamento químico das

substâncias são alterados por meio de reações químicas a fim de produzir compostos menos tóxicos. Possuem boa relação custo-benefício e são rápidos, comparados aos processos biológicos.

➤ **Processos térmicos** que usam o calor para aumentar a volatilidade, queimar, decompor, destruir ou dissolver os contaminantes. Embora sejam uma alternativa rápida, são, em geral, os mais caros.

A Tabela 2 apresenta resumidamente um levantamento de algumas das principais tecnologias de remediação preparado pelo U.S. Department of Defense Environmental Technology Transfer Committee (DOD ETTC), adaptado de Moraes et al. (2014), além de informações contidas em Lima et al. (2017) e Santos et al. (2009).

No estado de São Paulo, as técnicas mais utilizadas para remediação de áreas contaminadas são: Bombeamento e tratamento, Extração Multifásica, Recuperação de fase livre, Atenuação natural monitorada e Remoção de solo. A Figura 6 apresenta um gráfico com todas as principais técnicas aplicadas para remediação de áreas contaminadas, declaradas até o fim de 2012 no cadastro da CETESB.

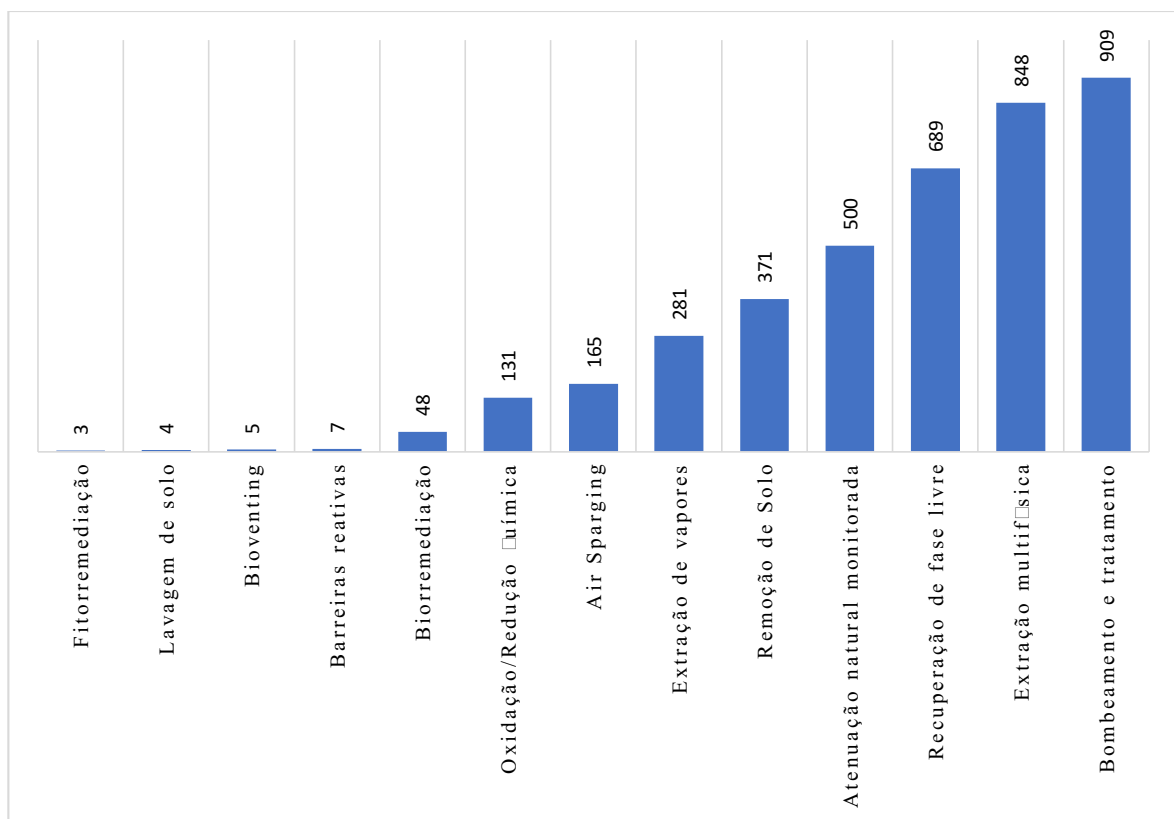


Figura 6 – Técnicas de remediação declaradas no cadastro de áreas contaminadas da CETESB.

Modificado de Moraes et al. (2014).

Tabela 2 – Principais tecnologias de remediação.

TRATAMENTOS BIOLÓGICOS	
B [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] []	Estimulação da atividade dos microrganismos que ocorrem naturalmente na área contaminada para reforçar a degradação biológica dos contaminantes orgânicos
B [] [] [] [] [] [] [] []	Fornecimento de oxigênio para solos contaminados não saturados pelo movimento forçado de ar (extração ou injeção) para aumentar a concentração de oxigênio e estimular a biodegradação
E [] A [] S [] [] [] [] [] [] [] []	O ar é injetado sob pressão, abaixo do nível d'água, para aumentar a concentração de oxigênio na água subterrânea e para aumentar a taxa de degradação biológica de contaminantes orgânicos por microrganismos que ocorrem naturalmente
F [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] []	A fitorremediação utiliza vegetação, enzimas derivadas da vegetação e outros processos complexos para isolar, destruir, transportar e remover contaminantes orgânicos de solos contaminados
TRATAMENTOS FÍSICO-QUÍMICOS	
L [] I []	Injeção ou infiltração de uma solução (surfactantes, co-solventes, ácidos, bases, solventes ou água limpa) contendo um aditivo em uma zona saturada contaminada, seguida da aplicação de um gradiente hidráulico para extração da água subterrânea e do efluente (solução com os contaminantes), para tratamento fora do terreno e/ou reinjeção
E []	Ocorre por meio da instalação de um sistema de ventilação a vácuo em poços de extração distribuídos na área de interesse, visando criar uma zona de influência do sistema em toda a extensão da pluma contaminante e criando um gradiente de pressão dirigido para estes pontos, possibilitando a extração das fases livre, vapor e dissolvida, além de estimular o processo de biodegradação natural da zona não saturada.
E []	Atua promovendo a circulação do ar através do subsolo e a remoção dos compostos volatilizados por esse processo. O processo inclui um sistema de tratamento dos efluentes gasosos. Esta tecnologia é também conhecida como SIE (Soil Vapor Extraction) e Air Sparging, sendo ambos considerados técnicas inovadoras
O [] R []	Converte, através de reações químicas de oxirredução, contaminantes perigosos em não perigosos ou compostos menos tóxicos que são mais estáveis, menos móveis, e/ou inertes. Os agentes oxidantes mais utilizados são o ozônio, peróxido de hidrogênio, hipocloritos, cloro, dióxido de cloro, permanganato de potássio, dentre outros

L [] [] [] [] [] [] []
(Ex situ) Contaminantes adsorvidos nas partículas finas do solo são separadas do solo por um sistema de base aquosa a partir do tamanho das partículas. A ação da água de lavagem pode ser aumentada com o uso de um agente de lixiviação básica, surfactante, ajuste de pH ou quelante para ajudar a remover os materiais orgânicos e metais pesados

A [] **S** [] [] [] [] [] [] Compostos orgânicos voláteis são retirados da água subterrânea pelo aumento da área de superfície da água contaminada exposta ao ar. Métodos de aeração incluem torres e aeração difusa, por exemplo

B [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] []
[] [] [] [] [] [] []
Consistem na passagem da água subterrânea contaminada através de uma barreira permeável instalada em subsuperfície transversalmente ao sentido de escoamento, interceptando a pluma de contaminação. Três tipos de barreiras são utilizados: de adsorção, na qual os contaminantes ficam adsorvidos e são removidos; de precipitação, os contaminantes dissolvidos na água são precipitados e removidos; reativa, que promove a quebra dos compostos tóxicos em produtos inertes.

PROCESSO TÉRMICO

E [] [] [] [] [] [] [] [] [] []
[] [] [] [] [] [] [] []
[] [] [] [] [] [] [] []
Injeção de ar/vapor quente ou aquecimento por radio frequências são usados para aumentar a mobilidade de compostos voláteis e facilitar sua extração, incluindo um sistema para manipulação destes gases

I [] [] [] [] [] [] [] [] São usadas altas temperaturas, entre 70 - 1.200 °C para promover a combustão (na presença de oxigênio) de constituintes orgânicos em resíduos perigosos persistentes ao meio

OUTROS

B [] [] [] [] [] [] [] []
[] [] [] [] [] [] []
Por meio de poços de extração, as águas subterrneas contaminadas são removidas e tratadas por diversas tecnologias. Uma vez remediadas são reintroduzidas no aquífero ou descartadas em corpos hídricos superficiais

A [] [] [] [] [] [] [] []
[] [] [] [] [] [] []
Conhecida também como remediação intrínseca ou passiva, usa processos físico-químicos e biológicos naturais que ocorrem na área contaminada com o objetivo de reduzir as concentrações dos contaminantes, toxicidade, massa e/ou volume até níveis adequados; proteção da saúde humana e ao meio ambiente

R [] [] [] [] [] [] [] [] Consiste na substituição de solo contaminado por solo limpo, que é escavado e destinado para tratamento adequado. Como forma de destinação adequada podemos citar a disposição final em aterro industrial, incineração entre outras

F [] [] [] [] Modificado de Moraes et al. (2014), Lima et al. (2017) e Santos et al. (2006).

5 □ GROUND PENETRATING RADAR

Os mais diversos métodos geofísicos estão sendo empregados na detecção, monitoramento e recuperação de áreas degradadas, principalmente no que diz respeito à avaliação da presença de contaminantes no meio ambiente. Dentre aqueles, os de maior destaque são os métodos da eletrorresistividade, o eletromagnético indutivo, a magnetometria e o Ground Penetrating Radar (ALBUINO, 1999 □ CRUZ, 2015), caracterizando-se como métodos não destrutivos que permitem a avaliação das condições geológicas locais e uma detecção direta da contaminação subterrânea através do contraste das propriedades físicas dos materiais encontrados em subsuperfície, como condutividade elétrica, permissividade elétrica, susceptibilidade magnética, radioatividade, densidade e velocidade de propagação de ondas mecânicas e eletromagnéticas.

Smith (2001) aponta o GPR como um método capaz de oferecer melhorias significativas nas metodologias aplicadas no campo da hidrologia de contaminantes. A Tabela 3 lista as principais técnicas geofísicas aplicadas em questões ambientais. Vale ressaltar que, nenhum método é considerado absoluto, sendo comum o emprego concomitante deles em um mesmo estudo, naturalmente, cada um com suas vantagens e desvantagens, dependendo das características da área em questão.

O GPR possui a menor razão custo/benefício dentre os métodos supracitados, produzindo imagens da subsuperfície com alta resolução e maior facilidade na aquisição de dados, podendo ser utilizado nas mais diversas áreas, onde outros métodos teriam sua aplicabilidade limitada pela interferência de ruídos, principalmente em áreas urbanas.

No que se refere a problemas de contaminação da subsuperfície, Smith (2001), cita três objetivos distintos, pelos quais o GPR pode ser aplicado. O primeiro, qualitativo, seria a utilização do método para detecção direta na determinação e localização atual do contaminante. Os demais, consistem no desenvolvimento de modelos quantitativos para compreensão do transporte de contaminantes a longo prazo. O segundo objetivo seria o desenvolvimento de um modelo hidrogeológico através de dados geológico-estrutural em larga escala da subsuperfície. O último seria a atribuição de valores destas propriedades hidrogeológicas (saturação, porosidade, permeabilidade) para modelar com precisão o comportamento dos contaminantes.

Tabela 3 – Principais métodos geofísicos utilizados em problemas ambientais.

TODO GEOFÍSICO	APLICAÇÕES AMBIENTAIS
Ground Penetrating Radar	Identificação de dutos, tambores enterrados, localização de plumas de contaminações causadas por vazamentos de hidrocarbonetos e outros produtos químicos.
Eletromagnético	Localização de objetos condutivos e localização de plumas de contaminação.
Eletrorresistividade	Mapeamento hidrológico e localização de plumas de contaminação.
Polarização Induzida	Localização de pluma de contaminação.
Potencial Espontâneo	Modelo hidrológico, fluxo da água, infiltração em represas, etc.
Magnético	Localização de objetos magnéticos (tambores metálicos)
Radioatividade	Localização de objetos radioativos.
Gravimetria	Mapeamento da topografia do topo rochoso sob a qual foram depositados resíduos.

Fonte: Modificado de Reis Júnior (2009).

5.1 O Método de Georadar (GPR)

O GPR (Radar de Penetração do Solo), ou simplesmente Georadar, é um método geofísico que emprega uma técnica semelhante à sísmica de reflexão, com a particularidade que consiste na emissão e reflexão de ondas eletromagnéticas de alta frequência, entre 1 MHz e 1 GHz (NIGAM, 2001) para investigação da subsuperfície, visando localizar áreas contaminadas, estruturas sedimentológicas, objetos enterrados, mapeamento do lençol freático, dentre outras aplicações.

Estas ondas eletromagnéticas são geradas através de um curto pulso de alta frequência e repetidamente emitidas à subsuperfície por uma antena transmissora, componente do GPR localizado próximo à superfície do terreno, que serão propagadas no subsolo até o momento do contato com algum horizonte que apresente contraste nas propriedades elétricas do meio. A partir desta interação, parte das ondas são refratadas ou refletidas para superfície, onde serão

captadas pela antena receptora do equipamento, a outra parte é transmitida e continua se propagando no subsolo. O intervalo de tempo entre a transmissão e a recepção da onda, é chamado de tempo de trânsito, expresso em nanossegundos ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$).

Na Figura 7 pode ser observado o princípio de funcionamento do GPR. A energia que é refletida é registrada em função do tempo de percurso da onda (tempo duplo), que é amplificada, digitalizada e gravada no disco rígido do computador, necessitando ainda de um posterior processamento destes dados para uma interpretação mais precisa. O resultado de um perfil GPR é uma imagem das variações em subsuperfície das propriedades elétricas, dadas em função do tempo de percurso do pulso eletromagnético (SOUZA, 2005).

Cruz (2015) cita que a propagação dessas ondas eletromagnéticas depende da frequência do sinal que é transmitido e das propriedades elétricas dos materiais, as quais são principalmente dependentes do conteúdo de água presente no meio, de forma que, quanto maior o conteúdo de água maior será a atenuação do sinal da onda.

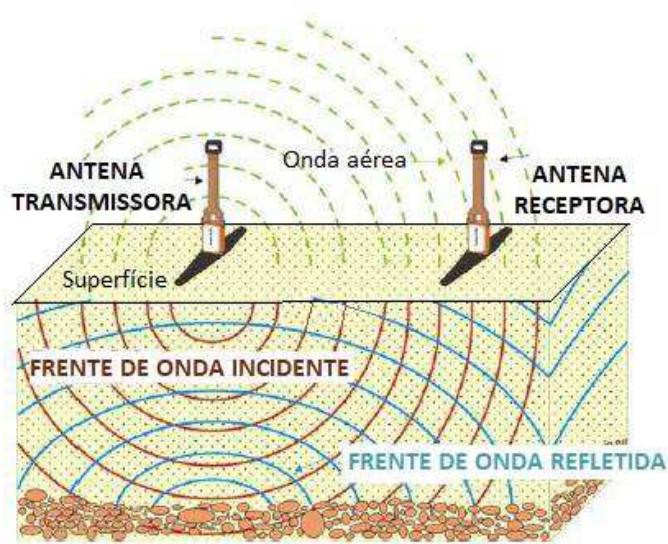


Figura 7 – Diagrama de arranjo das antenas do GPR. Modificado de Cruz (2015).

Almeida et al. (2007) também cita a presença de combustíveis na subsuperfície como modificadora das propriedades elétricas do meio, segundo ele, a resistividade é elevada no momento da contaminação, por se tratar de compostos orgânicos e diminui gradativamente com o tempo, conforme a ação das bactérias responsáveis pela biodegradação dos combustíveis com a formação de ácidos que tornam o ambiente menos resistivo.

Além da propagação das ondas EM, ocorrem também outros fenômenos ondulatórios como a transmissão, a refração e a reflexão, todos regidos por diversos fatores, dentre os quais

Cruz (2015) destaca as propriedades elétricas do solo (condutividade elétrica, σ , permeabilidade magnética, μ e permissividade dielétrica, ϵ), a impedância elétrica, a frequência do pulso, o conteúdo de água, e a geometria das estruturas em subsuperfície.

Ainda, de acordo com o autor referido anteriormente, o melhor entendimento desses fenômenos durante a propagação e interação das ondas EM com as estruturas em subsuperfície, é fundamental para a correta aplicação do método e posterior interpretação dos dados obtidos. Para isto, faz-se necessário o entendimento da teoria do Eletromagnetismo Clássico, o qual descreve a geração e propagação de ondas e campos EM.

Porém, essas teorias não consideram as características físicas do meio, essenciais para os métodos geofísicos eletromagnéticos, tornando-se necessária associá-las às relações constitutivas do meio, que traduzem a interação entre os campos eletromagnéticos de uma determinada fonte com um determinado meio, através das propriedades físicas descritas a seguir.

5.1.1 Condutividade Elétrica

A primeira relação constitutiva, também conhecida como Lei de Ohm, relaciona os vetores da densidade de corrente de condução (\vec{J}) ao do campo elétrico (\vec{E}), através de um fator de proporcionalidade, denominado condutividade elétrica (σ):

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (1.1)$$

σ expresso em Siemens/metro (S/m) e expressa a facilidade de um corpo em conduzir corrente elétrica. Cruz (2015) e Souza (2005) citam vários fatores que contribuem para a variação da condutividade, dentre eles: o teor de umidade, a porosidade, a concentração de sais dissolvidos, a proporção de argilas e a presença de minerais condutivos. O aumento da condutividade está intrinsecamente ligado à atenuação do sinal eletromagnético.

5.1.2 Permissividade Dielétrica

A segunda relação constitutiva relaciona os vetores do deslocamento elétrico (\vec{D}) ao do campo elétrico (\vec{E}), através do fator de proporcionalidade, denominado, permissividade dielétrica (ϵ):

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (1.2)$$

Cruz (2015) ressalta a importância tanto da condutividade elétrica, quanto da permissividade dielétrica, visto que, possuem influência direta na atenuação e propagação das

ondas de radar, respectivamente. ϵ expresso em Farada/metro (F/m) e expressa a habilidade de um material de se polarizar e sustentar a energia armazenada em resposta a um campo elétrico aplicado e, desta forma, cancelar parcialmente o campo dentro do material.

Usualmente, utiliza-se a permissividade dielétrica relativa (ϵ_r) ou constante dielétrica dos materiais (k), definida como:

$$k = \epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (1.3)$$

Onde:

ϵ = permissividade dielétrica do material

ϵ_0 = permissividade dielétrica do vácuo ($\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ F/m)

Segundo Marques (2007), o valor da constante dielétrica das rochas é função de seus constituintes, sendo consideravelmente afetada pela saturação de água, podendo aumentar cerca de dez vezes o valor da constante em relação à mesma rocha seca, chegando a valores ainda maiores, no caso de salinidade dessa água. Para Souza (2005), isto ocorre porque os íons dissolvidos na água proporcionam um mecanismo de condução elétrica, que dissipa o campo eletromagnético aplicado, extraindo e transferindo, de forma irreversível, a energia do campo EM para o meio, provocando a atenuação e a baixa penetração da onda no meio. A Tabela 5 lista alguns materiais comuns, com os respectivos valores da constante dielétrica e da condutividade elétrica, que podem facilitar o entendimento destas propriedades.

5.1.1. Permeabilidade magnética

A terceira relação constitutiva relaciona os vetores da indução magnética (B) e o do campo magnético (H), através do fator de proporcionalidade, denominado, permeabilidade magnética (μ):

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (1.4)$$

μ expresso em Henry/metro (H/m) e demonstra, segundo Souza (2013), o campo magnético no interior de um material. Estudos apontam que em muitas situações geológicas, as propriedades elétricas são fatores mais relevantes às respostas do GPR, que a permeabilidade magnética, todavia, atentam para os casos de valores elevados desta propriedade, de forma que, seus efeitos não devem ser totalmente ignorados no levantamento.

5.1.1 Impedância

Expressa a oposição que determinada interface faz à propagação do sinal. Quando a onda do radar se propaga em um meio, se depara com variações nas propriedades elétricas, próprias para cada camada existente, podendo causar uma forte impedância elétrica na interface que separa estas camadas, determinando a quantidade do sinal que deverá ser refletido (CRUZ, 2015).

Esta propriedade é normalmente expressa pelo coeficiente de reflexão:

$$r_{GPR} = \frac{\sqrt{k_1} - \sqrt{k_2}}{\sqrt{k_1} + \sqrt{k_2}} \quad (1.5)$$

Onde k_1 e k_2 são as constantes dielétricas acima e abaixo da superfície refletora, respectivamente. A Tabela 4 a seguir, mostra valores do coeficiente de reflexão típicos de algumas interfaces para frequência do radar.

Tabela 4 – Valores do coeficiente de reflexão para algumas interfaces típicas.

DE		PARA		COEFICIENTE DE REFLEXÃO (%)
Ar	1	Solo seco	5	3
Solo seco	5	Água	1	60
Solo seco	5	Solo saturado	25	3
Solo seco	5	Rocha		12
Solo	3,5	Metal	∞	100

Fonte: Modificado de Cruz (2015).

Tabela 5 – Constante dielétrica e condutividade elétrica, observadas nos materiais comuns para as frequências utilizadas no GPR.

ATERIAIS SECOS	ϵ	σ (mS/m)	ATERIAIS SATURADOS	ϵ	σ (mS/m)
Ar	1	0	Água destilada	1	0,01
Areia seca e cascalho	2 - 6	0,01	Água fresca	1	0,5
Argila seca	5	2	Água do mar	1	3000
Folhelho e siltito seco	5	1	Areia saturada	20 - 30	0,1 – 1
Calcário seco	4	0,5	Silte saturado	10	1 – 10
Solo arenoso seco	2,6	0,14	Argila saturada	40	1000
Solo argiloso seco	2,4	0,27	Solo arenoso saturado	25	6,9
Sal seco	5 - 6	0,01 - 1	Solo argiloso saturado	15	50
Granito seco	5	0,01	Arenito saturado	20 - 30	40
Basalto seco	6	1	Siltito saturado	30	100
Diabásio seco	7	10	Folhelho saturado	7	100
Ferro	1	10^9	Calcário saturado	1	2
Aço	1	∞	Granito saturado	7	1
PVC	1	0	Basalto saturado	1	10
Asfalto	3 - 5	0	Diabásio saturado	1	100
Concreto seco	5,5	0	Concreto saturado	12,5	0
LNAPL	2	0	Diclorometano	1,3	1,1
DNAPL	2 - 3	0	Benzeno	2,24	0,11
Hexano	1,1	0,5	Metanol	33,7	0,3

Ferraz Cruz (2015) e Souza (2005).

5.1.5 Freqüência

Esta propriedade é de fundamental importância no levantamento GPR, pois possui influência direta, tanto na profundidade de penetração da onda eletromagnética em subsuperfície, quanto na resolução dos dados obtidos. O aumento da frequência da onda transmitida resulta numa melhor resolução dos dados obtidos, porém, com uma menor profundidade de penetração. Por outro lado, diminuindo-se a frequência, aumenta-se a profundidade de penetração, porém, com uma menor resolução dos dados obtidos.

Daniels (1995) cita que a profundidade de penetração pode variar de 4 m no gelo, 1 a 1,5 m na Lua, centenas de metros em rochas de sal, dezenas de metros no granito, areias e cascalhos, até poucos metros em solos com alto teor de argila.

Observa-se na Tabela 6 algumas áreas de aplicação do GPR, de acordo com a frequência central da antena e a correspondente estimativa de profundidade de penetração. Na Tabela 7 são apresentadas algumas estimativas de valores de resolução vertical para as frequências centrais correspondentes, obtidos em Annan (1992).

Além da frequência, a profundidade de penetração também é controlada por quatro tipos de perdas por atenuação: condução elétrica, polarização, espalhamento geométrico e perdas por dispersão. Maiores detalhes sobre estes tipos de perdas podem ser encontrados em Souza (2005).

Diante do exposto, é perceptível que os melhores resultados com GPR são obtidos em terrenos com materiais resistivos, de forma que, os materiais condutivos, com alto teor de argila e/ou água, tendem a atenuar de forma significativa o sinal emitido, provocando a baixa penetração e interferindo na reflexão do mesmo.

Tabela 6 – Aplicabilidade do GPR conforme frequência central da antena e sua profundidade de penetração aproximada.

APLICAÇÃO	FREQUENCIA CENTRAL	PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO
Inspeções em concreto	2.600 MHz	0 – 0,4 m
Inspeções em concreto	2.000 MHz	0 – 0,4 m
Inspeções em concreto	1.600 MHz	0 – 0,5 m
Inspeções em concreto, Identificação de vazios	900 MHz	0 – 1,0 m
Engenharia, meio Ambiente, Identificação de vazios	400 MHz	0 – 4,0 m
Geologia, Engenharia, Meio Ambiente, Arqueologia	270 MHz	0 – 6,0 m
Geologia, Engenharia, Meio Ambiente, Arqueologia	200 MHz	0 – 9,0 m
Geologia, Meio Ambiente, Mineração, Arqueologia	100 MHz	0 – 15,0 m
Geologia	16 – 10 MHz	0 – 50,0 m

Tabela 7 – Frequência central das antenas versus a resolução vertical.

FREQUENCIA CENTRAL (MHz)	RESOLUÇÃO VERTICAL (m)
200	0,25
100	0,50
50	1,00
25	2,00

Fuente: Modificado de Souza (2005).

5.2.1. Aquisição de dados

Segundo Reis Júnior (2014), os dados de GPR podem ser obtidos por meio de três técnicas, que são: perfis de reflexão com afastamento constante, sondagens de velocidade (*Common MidPoint – CMP e Wide-Angle Reflection-Refraction – WARR*) e tomografia ou transiluminação.

Os perfis de reflexão com afastamento constante podem ser realizados com antenas monoestáticas ou então por um par de antenas biestáticas afastadas por uma distância fixa (common-offset), que é transportado passo a passo nos perfis, conforme observado na Figura 8, resultando numa imagem que confronta a distância percorrida com o tempo duplo da onda refletida.

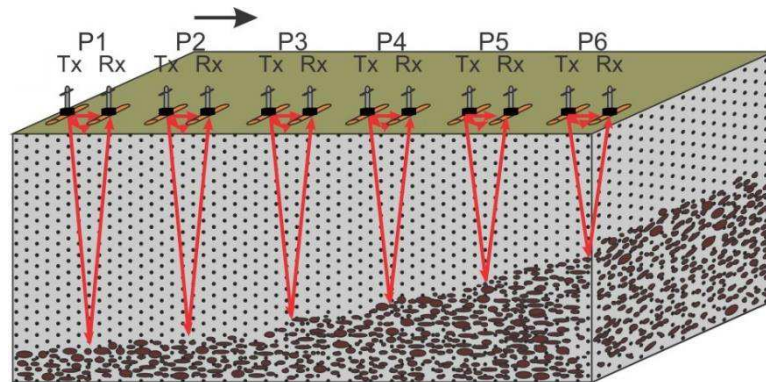


Figura 8 – Esquematização da aquisição de dados com perfis de reflexão com afastamento constante. Modificado de Reis Júnior (2014).

Na técnica de sondagem de velocidade, com o arranjo CMP, as antenas transmissora e receptora são movidas em sentidos opostos, partindo-se de um ponto central fixo, esquematizado a seguir, na Figura 9A. Com o arranjo NARR, Figura 9B, uma das antenas é mantida fixa enquanto a outra é sucessivamente afastada da primeira. Esses dois arranjos servem para estimar a velocidade da onda EM no meio e através da conversão do tempo duplo em profundidade, verificar a origem das reflexões.

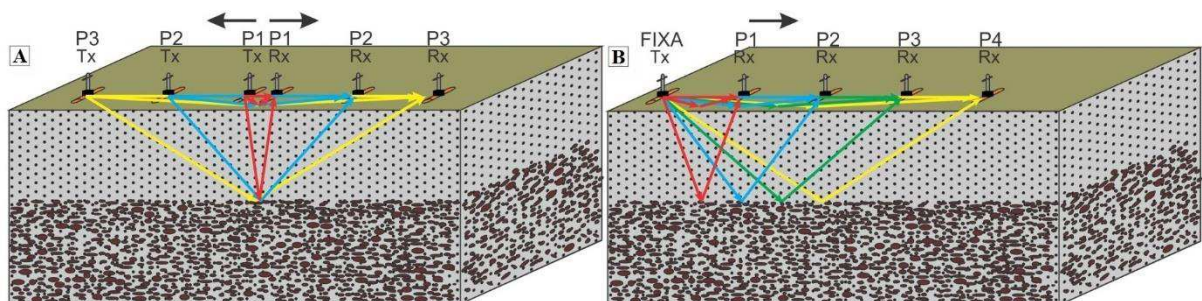


Figura 9 – Esquematização da aquisição de dados com sondagem de velocidade tipo (A) CMP e (B) NARR. Modificado de Reis Júnior (2014).

A última técnica utilizada é a transiluminação, realizada de quatro maneiras distintas, de acordo com o objetivo do levantamento e conforme mostrado na Figura 10: Common Offset,

Direta, Vertical Radar Profiling (VRP) e Variável. No modo Common Offset, as antenas estão dispostas no mesmo poço e o registro é semelhante à aquisição de reflexão com afastamento constante (Figura 10A). No modo Direto, as antenas estão dispostas em poços diferentes e as seções geradas usando-se tempo direto e não mais tempo duplo (Figura 10B). No VRP, a antena transmissora é disposta na superfície, enquanto a receptora é deslocada no interior do poço (Figura 10C). Por fim, no modo Variável as antenas estão alocadas em poços distintos e, para cada medida, a posição da antena transmissora é mantida constante, enquanto a receptora é deslocada no poço (Figura 10D), repetindo-se todo o procedimento até que a antena transmissora tenha percorrido todo o poço, permitindo calcular a velocidade média da onda EM, uma vez que se conhece a distância entre as antenas (REIS JUNIOR, 2014).

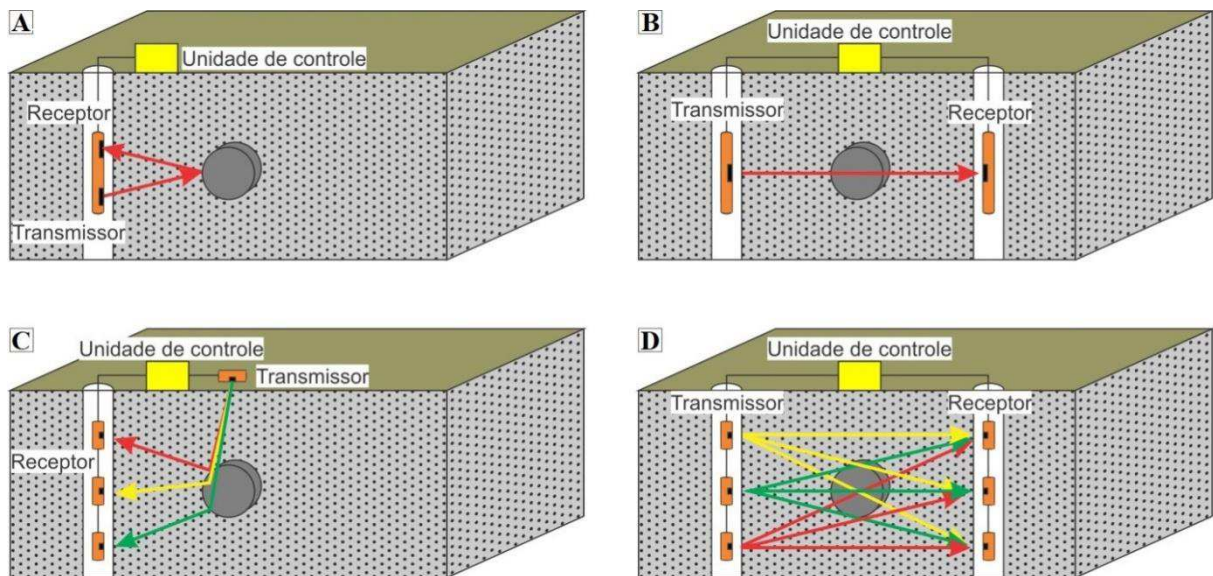


Figura 10 – Modos distintos de transiluminação: (A) Common Offset (B) Direta. (C) VRP e (D) Variável. Modificado de Reis Junior (2014).

5.1.1.1. Pós-aquisição

A etapa que sucede a aquisição de dados no campo e trata-se da aplicação de um conjunto de técnicas, recursos e ferramentas aos dados digitalizados, com o intuito de remover os sinais indesejados (também chamados de ruídos) captados durante o levantamento, de forma que, as feições de interesse sejam realçadas nos radargramas, facilitando a interpretação visual dos dados da subsuperfície investigada.

O produto final do levantamento GPR é chamado de Radargrama, segundo Souza (2013), podendo ser visualmente representados de duas formas: Wiggle Trace (conjunto de traços não interpolados) e Linescan, conforme mostrado na Figura 11. Ainda, segundo o autor

anteriormente citado, o Linescan é o tipo mais utilizado na área de geociências, tratando-se de uma interpolação de um conjunto de traços associados a uma determinada paleta de cores. Em um Radargrama, a distância percorrida pelo sistema GPR ao longo do levantamento é representada pelo eixo horizontal, enquanto o eixo vertical, representa o tempo duplo de propagação da onda eletromagnética, dada em nanosegundos.

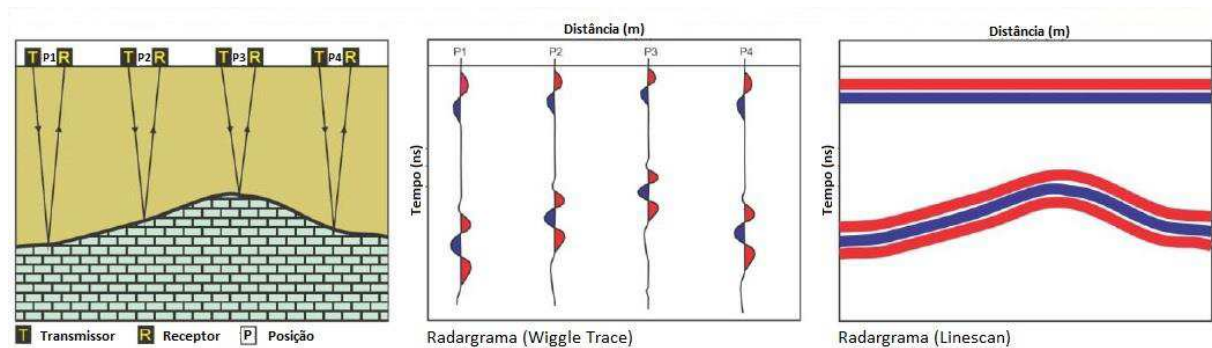


Figura 11 – Representação esquemática da aquisição de um perfil de reflexão GPR com afastamento contínuo e os radargramas obtidos a partir da resposta de quatro posições amostradas. Modificado de Souza (2013).

5.1.1.1

A análise dos radargramas é feita de forma qualitativa, buscando-se localizar em cada linha GPR, contrastes com o background da subsuperfície, devido às características resistivas de plumas contaminantes de combustíveis. Todavia, esta resistividade pode ser afetada pelo processo de biodegradação, causada pela ação das bactérias presentes no local, causando um aumento na condutividade do meio. Desta forma, Reis Júnior (2009) ressalta que, as respostas elétricas e eletromagnéticas dos contaminantes orgânicos dependem da idade da contaminação.

Para cada linha GPR adquirida são apresentados dois radargramas previamente processados: o superior é o radargrama obtido com a antena de frequência 200 MHz, com a utilização da nomenclatura “A” e o inferior é o radargrama obtido com a antena de frequência 400 MHz, com a utilização da nomenclatura “B”.

O eixo vertical dos radargramas representam a profundidade de penetração do sinal, expresso em metros, enquanto o eixo horizontal representa a distância percorrida pelo equipamento, também expressa em metros.

5.5 Efeitos do GPR em estudos de contaminação em subsuperfície

Diversos trabalhos têm sido desenvolvidos nas últimas décadas utilizando os métodos geofísicos, em especial o Ground Penetrating Radar, para estudos de contaminação em subsuperfície e, principalmente, na detecção e mapeamento de plumas de contaminação por derivados de hidrocarbonetos.

Daniels et al. (1995), utilizaram o GPR como ferramenta na detecção de contaminantes próximos a superfície, mostrando a capacidade da ferramenta em fornecer um meio de mapear os hidrocarbonetos na zona vadosa.

Moreira e Dourado (2007) realizaram uma análise temporal com o GPR, apresentando um estudo comparativo entre perfis adquiridos nos anos de 1994 e 2003, numa área contaminada por compostos LNAPL sob atenuação natural, indicando um aumento da condutividade elétrica do meio, observada a partir da atenuação acentuada do perfil GPR nas secções mais recentes, associando-a a uma suposta liberação de íons ocasionada pela dissolução de minerais pelo ataque de ácidos orgânicos resultantes do processo de biodegradação.

Almeida et al. (2007) fizeram uma investigação técnica e científica quanto a aplicação da metodologia geofísica GPR em áreas suspeitas de contaminação do solo e de aquíferos por derivados de hidrocarbonetos oriundos de vazamentos em tanques de postos de serviços em Abaetetuba – PA. A interpretação geofísica relaciona as zonas de baixa reflexão, localizadas nas áreas dos postos, a uma suspeita produção de contaminação.

Marques (2007) apresentou os resultados de quatro métodos geofísicos, dentre eles o GPR, com o objetivo de detectar a pluma de contaminação em um posto de combustível com histórico de vazamento. Neste caso, os dados do Georadar não possibilitaram nenhuma correlação com o substrato contaminado, provavelmente devido à pouca profundidade de penetração.

Santos e Griep (2004) aplicaram o método GPR na detecção de possíveis plumas de contaminação, causadas por vazamentos de tanques de armazenamento de combustíveis, localizadas nos postos de abastecimento da cidade de Rio Grande – RS. O método mostrou-se eficiente e os resultados obtidos revelaram suspeitas de contaminação, evidenciadas pelas zonas de atenuação do sinal existentes nos perfis e por uma linha de alta reflexão.

Sousa (2009) aplicou a metodologia geofísica, com a utilização do Georadar, para obtenção de um imageamento de subsuperfície da pluma de contaminação ocasionada por um posto de revenda de combustíveis, desativado, localizado na Praia de Búzios, litoral sul do

estado do Rio Grande do Norte. Os resultados permitiram a identificação de duas prováveis fases de contaminação, as quais foram denominadas de fase absorvida e fase dissolvida, baseadas na classificação proposta por Azambuã et al. (2000).

Cruz (2015) tentou estabelecer critérios técnico-científicos para aplicação do método GPR em áreas sujeitas a contaminação da subsuperfície por substâncias orgânicas, em particular, hidrocarbonetos, produzida por vazamentos na área de estudo. As discussões foram baseadas em seções geofísicas resultantes de trabalhos por ela pesquisados, visando entender as zonas de baixa reflexão, normalmente associadas às plumas de contaminação por hidrocarbonetos.

2 METODOLOGIA

Foram pesquisados diferentes trabalhos publicados, como teses, dissertações, monografias e artigos, que abordaram a aplicabilidade do Ground Penetrating Radar a estudos ambientais, principalmente em postos de combustíveis, facilitando o entendimento da temática, assim como, auxiliando na interpretação dos resultados obtidos.

A seleção do posto de combustíveis como área de estudo foi feita com base no histórico de contaminação informado pela administração do posto e de acordo com a disponibilidade e autorização da mesma. Assim o Posto Auto Pista, localizado no município de Gurinhém-PB, foi selecionado para realização do levantamento GPR, tendo conhecimento que aquele empreendimento havia passado por atividades de remediação.

Com o objetivo de averiguar se a prática de remediação anteriormente aplicada pelo posto foi bem sucedida, foi feita a aquisição de aproximadamente 400 m de linhas GPR, perpendiculares aos tanques subterrâneos de armazenamento de gasolina e na área de menor cota do terreno, teoricamente favorável a migração de tais contaminantes. Caso houvesse contaminações residuais, estas seriam detectadas pelo levantamento GPR.

Para a aquisição dos dados, foi utilizado o equipamento SIR-3000 da GSSI (Geophysical Surveys Systems, Incorporation), fornecido pelo LAE – Laboratório de Análises Estratigráficas, do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, equipado com antenas monoestáticas de 200 e 400 MHz, que tiveram seus resultados confrontados para auxiliar a interpretação dos mesmos. Adicionalmente, foi realizado o levantamento planialtimétrico da área, com o auxílio da Estação Total – Topcon, modelo CTS 3007 e o GPS

Geodésico – Topcon, modelo *iper Lite Plus*, também fornecidos pelo LAE, para atribuição correta de localização e cotas dos diferentes pontos da superfície no processamento dos dados.

Para o processamento de dados foi utilizado o software *Reflex*, versão *5.0*, utilizado tanto no processamento e interpretação de dados sísmicos, quanto em dados GPR.

□□ **POSTO AUTO PISTA**

O empreendimento situado às margens da Rodovia Governador Antônio Mariz, BR 230 – km 09, foi inaugurado na década de 00, equipado com os típicos tanques subterrâneos de armazenamento de ferro, substituídos em outubro de 2016 por tanques duplamente *baquetados*, de acordo com as novas diretrizes que norteiam a atividade. Atualmente o posto possui três tanques subterrâneos, sendo dois, com dimensões 1,910 x 5,400 m e capacidade de 15.000 L cada, destinados ao armazenamento de gasolina e o terceiro, tripartido, com dimensões 2,549 x 6,000 m e capacidade de 30.000 L, destinado ao armazenamento de etanol e diesel (S10 e S500). O piso da pista de abastecimento e o piso sobre os tanques de armazenamento são de concreto armado em bom estado de conservação, diferentemente do pátio de estacionamento, que não possui nenhum tipo de cobertura (Figura 12).

Durante este processo de escavação e substituição dos tanques (Figura 13), segundo o gerente do posto foi observado no solo adjacente aos tanques, uma coloração escura e o forte cheiro de combustível no local, externando a preocupação e a necessidade de medidas remediadoras para amenizar ou eliminar os danos causados.

Em atendimento à necessidade, foi empregado o método de “Remoção de Solo” no local da contaminação, escavando-se todo o solo contaminado, destinando-o para aterro de uma área da pedreira localizada por trás do empreendimento e substituindo-o por solo limpo. Não houve tratamento posterior dos resíduos.

O posto não apresenta nenhum indício atual de contaminação em superfície, o que aponta para um resultado positivo da última substituição dos tanques e remoção de solo. No entanto não há poços de monitoramento, o que é recomendável. Nenhum estudo voltado ao meio ambiente foi desenvolvido recentemente no local, como análise química de solo e/ou água subterrânea.



Figura 12 – Posto Auto Pista, no município de Gurinhém.



Figura 13 – Processo de escavação para substituição dos tanques. (Imagens cedidas pela administração do posto).

□□ A AQUISIÇÃO DE DADOS

A aquisição de dados com o GPR foi realizada utilizando a técnica de perfis de reflexão com afastamento constante, no modo distância contínuo, de forma que o equipamento foi arrastado sem interrupções do início ao final de cada linha preestabelecida. Foram utilizadas antenas monoestáticas, ou seja, a mesma antena é responsável pela emissão e recepção do sinal, com frequências de 200 e 400 MHz, equipadas com odômetro e conectadas a uma unidade de controle (Figura 14).

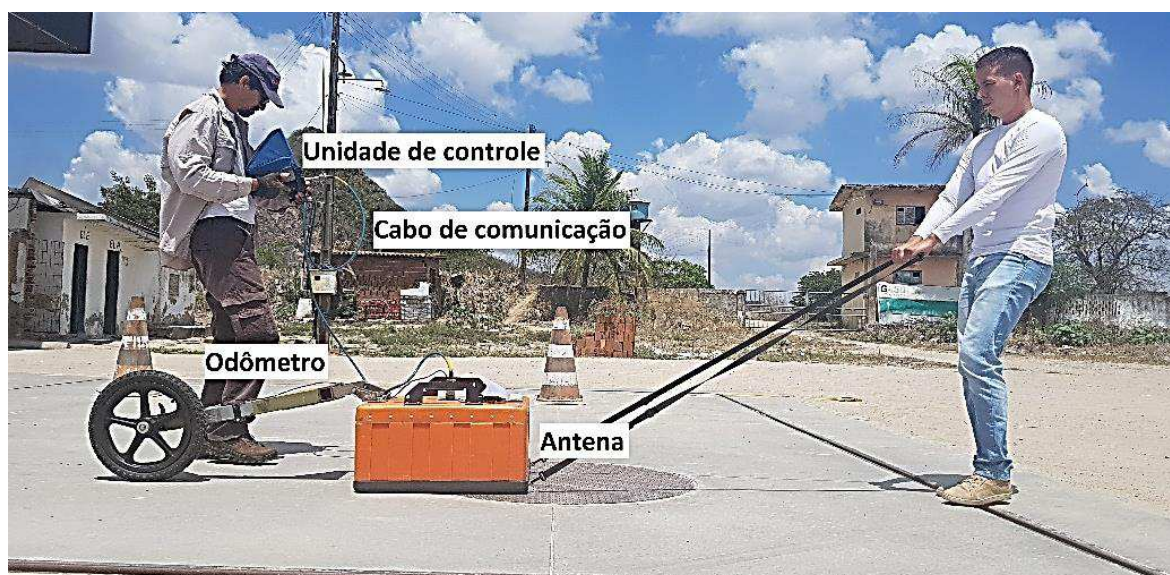


Figura 14 – Aquisição de dados GPR com antena monoestática.

Também foi preestabelecido o valor de 50 scans por metro, o que significa que, a cada 2 (dois) centímetros, foi registrado um scan (Figura 15). A abertura da janela temporal, que limita o tempo que esta janela permanece aberta para que o sinal seja transmitido e refletido, retornando a antena receptora, foi de 350 ns para a antena 200 MHz e 250 ns para a antena 400 MHz. O número de amostragem, que significa quantos pontos devem ser amostrados por traços, foi 1024, valor adequado e comumente utilizado em levantamentos deste tipo e para a constante dielétrica (ϵ), foi atribuído valor 5,00.



Figura 15 – Detalhe da unidade de controle.

Definidos todos estes parâmetros, foram alocadas nove linhas de aquisição para cada frequência utilizada (200 e 400 MHz), perpendiculares aos tanques subterrâneos de armazenamento de gasolina (Figura 16), obedecendo a sobreposição destas para facilitar a comparação e interpretação dos dados, totalizando cerca de aproximadamente 400 m de levantamento.

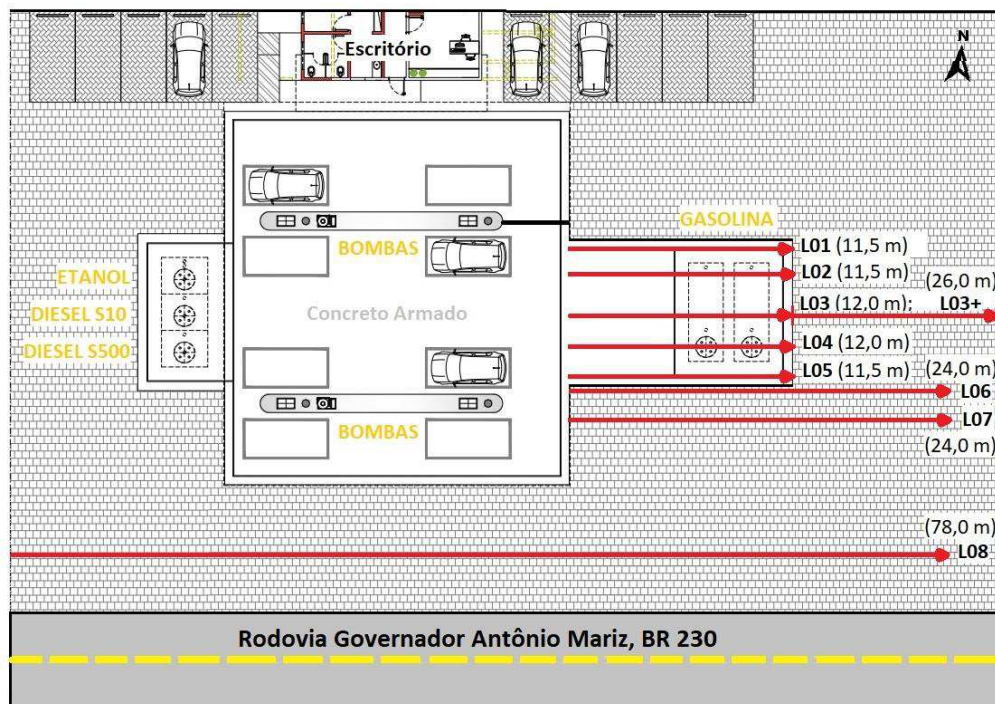


Figura 16 – Esquema de disposição espacial das linhas GPR adquiridas.

PROCESSAMENTO DOS DADOS GPR

O processamento dos dados adquiridos foi realizado com o objetivo de amenizar a interferência dos ruídos e realçar os contrastes das propriedades elétricas da subsuperfície, principalmente no que diz respeito à atenuação do sinal GPR por parte da possível existência de hidrocarbonetos. Os dados são apresentados em forma de radargramas, resultantes do processamento dos dados GPR no software Reflex, versão 5.0, com escala vertical representando a profundidade de investigação expressa em metros (m), convertida a partir da velocidade média das ondas considerada, de 0,125 m/ns, e a escala horizontal representando o deslocamento espacial do equipamento, também expressa em metros (s). A Tabela 7 lista os principais procedimentos adotados durante o processamento dos dados adquiridos para o presente estudo, de forma resumida e sequenciada.

Tabela 7 – Procedimentos adotados no processamento dos radargramas.

PROCEDIMENTO	DESCRIÇÃO
Correção do tempo zero	Remove os registros nulos (ondas diretas) efetuados no período de tempo que a antena receptora fez leituras, mas os primeiros sinais enviados pela antena transmissora ainda não haviam retornado.
Debobinagem	Remove o ruído de baixa frequência gerado pela indução eletromagnética entre as antenas.
Remoção de ganho na aquisição	Remove o ganho aplicado durante a aquisição.
Ganho de decaimento de energia	Corrige os efeitos de perda de sinal relacionados à propagação das ondas e realça os refletores de interesse para maior nitidez das mudanças de propriedades da subsuperfície.
Fast Fourier Transform (FFT)	Convertem os dados do domínio de distância para o domínio de número de onda.
Filtro de passagem de banda	Remove os ruídos de alta e baixa frequência que estão fora da banda de sinal da frequência central da antena utilizada.
Correção topográfica	Atribui a cada traço seu respectivo valor de cota, permitindo a representação das variações de altitude (z) presentes na superfície.
Conversão tempo-profundidade	Convertem-se as informações de “ns” para metros.

1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos com o GPR neste estudo foram analisados procurando-se identificar áreas de atenuação do sinal GPR, atribuídas a possíveis plumas residuais de contaminação, após o processo de remediação ao qual a área foi submetida. Desta forma, cada linha de aquisição foi analisada individualmente, integrando as imagens obtidas a partir das antenas (A) 200 MHz e (B) 400 MHz, conforme observado nas figuras abaixo e em Reis Júnior (2009) e Sousa (2009) que também utilizaram estas frequências em seus estudos.

Durante o levantamento, confirmando sua característica não invasiva, o GPR não ofereceu qualquer tipo de perturbação ao terreno analisado, assim como ao funcionamento do empreendimento, mostrando-se também altamente flexível quanto ao manuseio e a utilização de antenas com diferentes frequências, admitindo a comparação de resultados e facilitando a interpretação dos mesmos. Além disto, a utilização de antenas blindadas, como em Sousa (2009), reduziu consideravelmente a interferência de eventos indesejáveis durante o levantamento.

As antenas obtiveram profundidades de investigação satisfatórias, a de 200 MHz atingiu 19 m em média, enquanto a antena de 400 MHz alcançou 14 m de profundidade. Os radargramas foram editados de forma a abordar apenas uma profundidade média de 6 m, facilitando a disposição e comparação das imagens, visto que, profundidades maiores não apresentaram feições de interesse ao presente estudo.

A antena de 200 MHz, por possuir uma menor resolução, apresenta eventuais radargramas com áreas atenuadas, podendo ser interpretada erroneamente como potencialmente contaminada. Porém, quando comparadas ao radargrama de 400 MHz, de melhor resolução, têm-se uma imagem mais nítida da área, facilitando a análise.

Em observação aos radargramas resultantes das Linhas de aquisição 01 e 02 (L01 e L02), ilustradas nas Figuras 17 e 18, não há indicações de feições que possam ser correlacionadas a contaminações. Destacam-se boas reflexões nas distâncias 3, 5 e 11 m, possivelmente associadas às estruturas metálicas presente no piso cimentado.

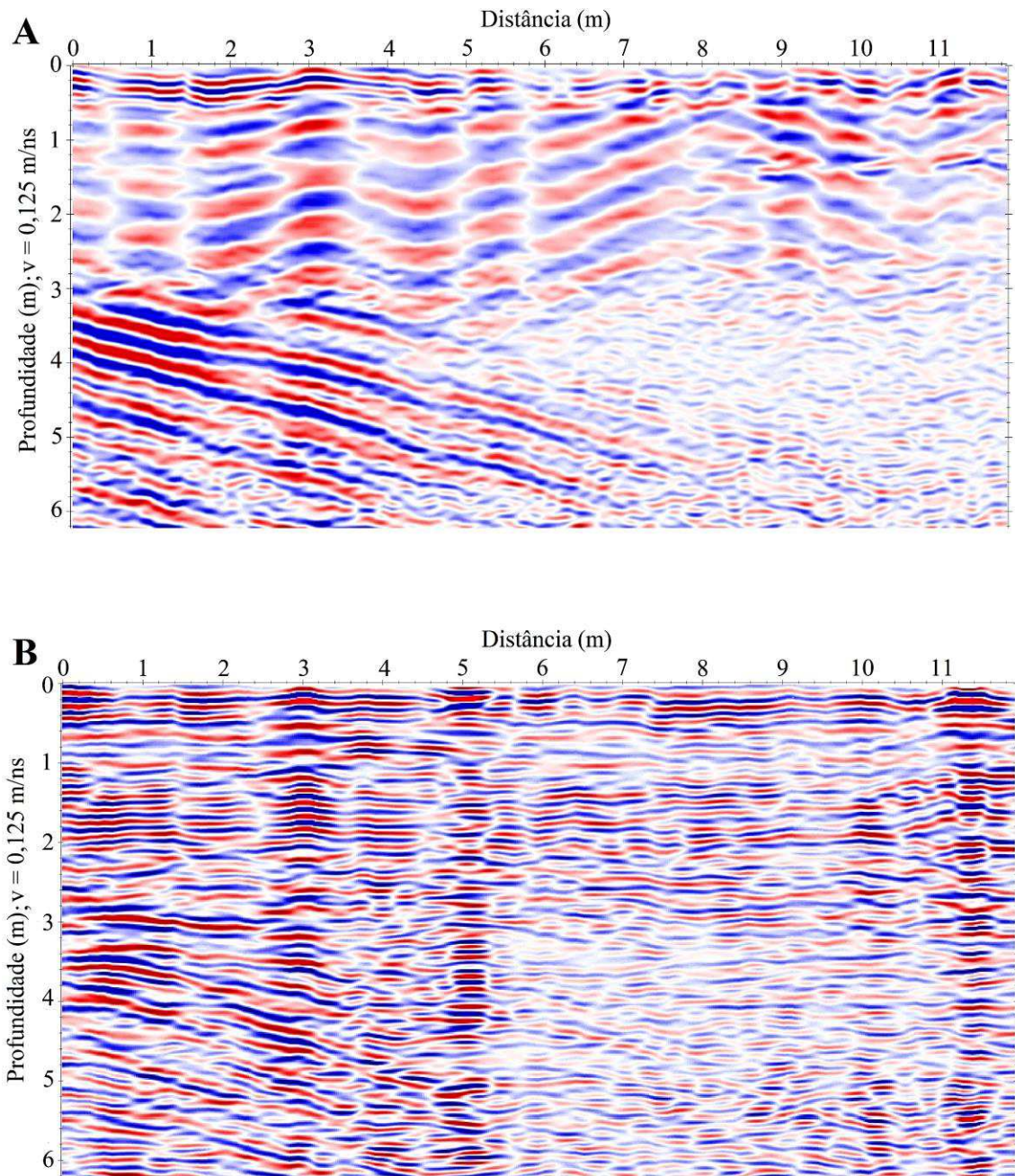


Figura 17 – Linha 01 de aquisição resultante das antenas (A) 200 MHz e (B) 400 MHz.

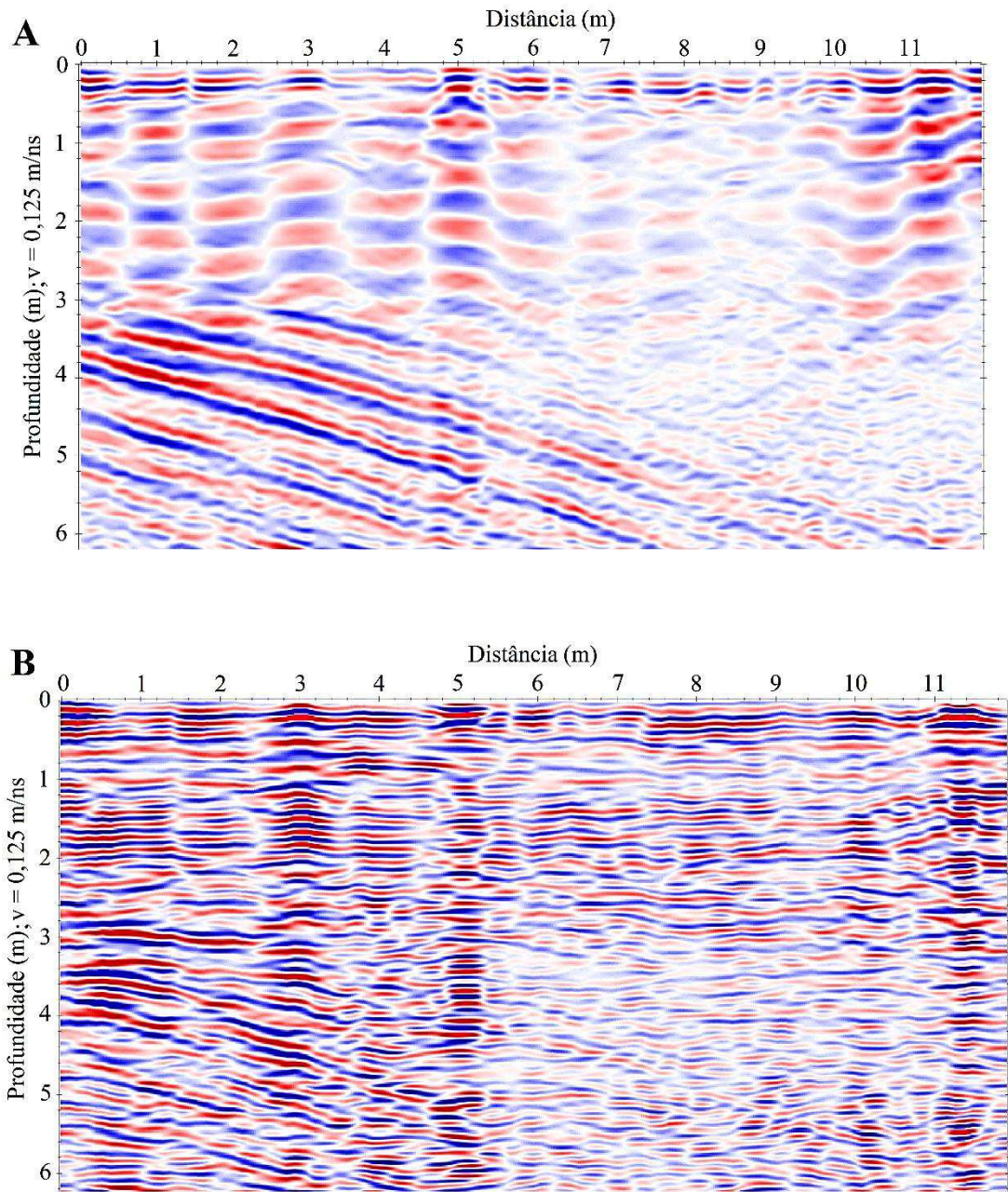


Figura 1 – Linha 02 de aquisição resultante das antenas (A) 200 MHz e (B) 400 MHz.

Nos radargramas obtidos através das Linhas de aquisição 03 e 03' (L03 e L03') representados nas Figuras 19 e 20, onde a Linha 03' é uma extensão da Linha 03, também não existe indicações de feições que possam ser atribuídas a eventuais contaminações, apenas pequenas áreas de atenuação, pouco sugestivas.

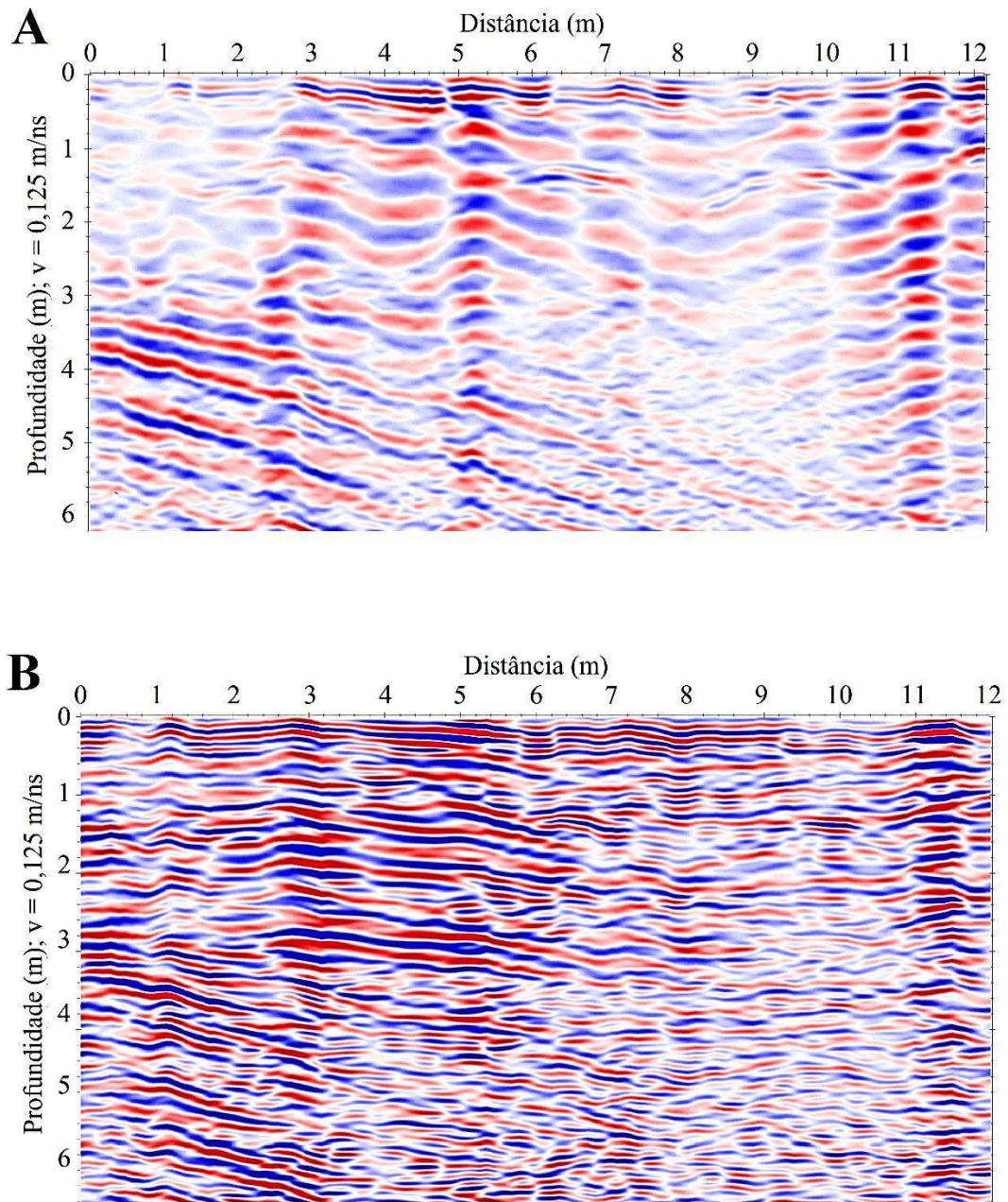


Figura 19 – Linha 03 de aquisição resultante das antenas (A) 200 MHz e (B) 400 MHz.

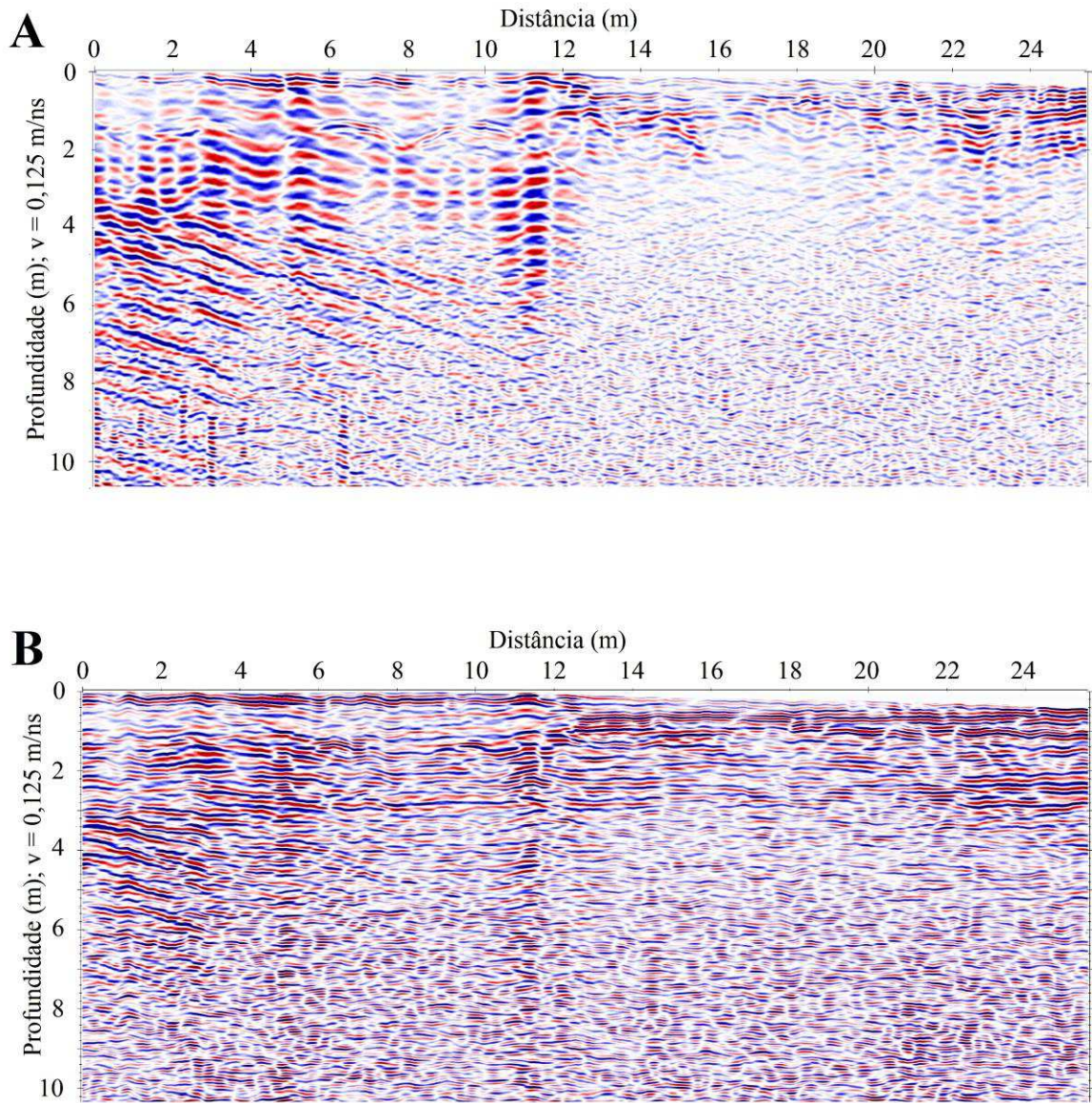


Figura 20 – Linha 03 de aquisição resultante das antenas (A) 200 MHz e (B) 400 MHz.

A Linha de aquisição 04 (L04), ilustrada na Figura 21, apresenta dois refletores verticais nas distâncias entre 6-7 e outra a 10 m, desde a profundidade 0 (superfície), atribuídos às tampas metálicas e aos tanques subterrâneos propriamente ditos.

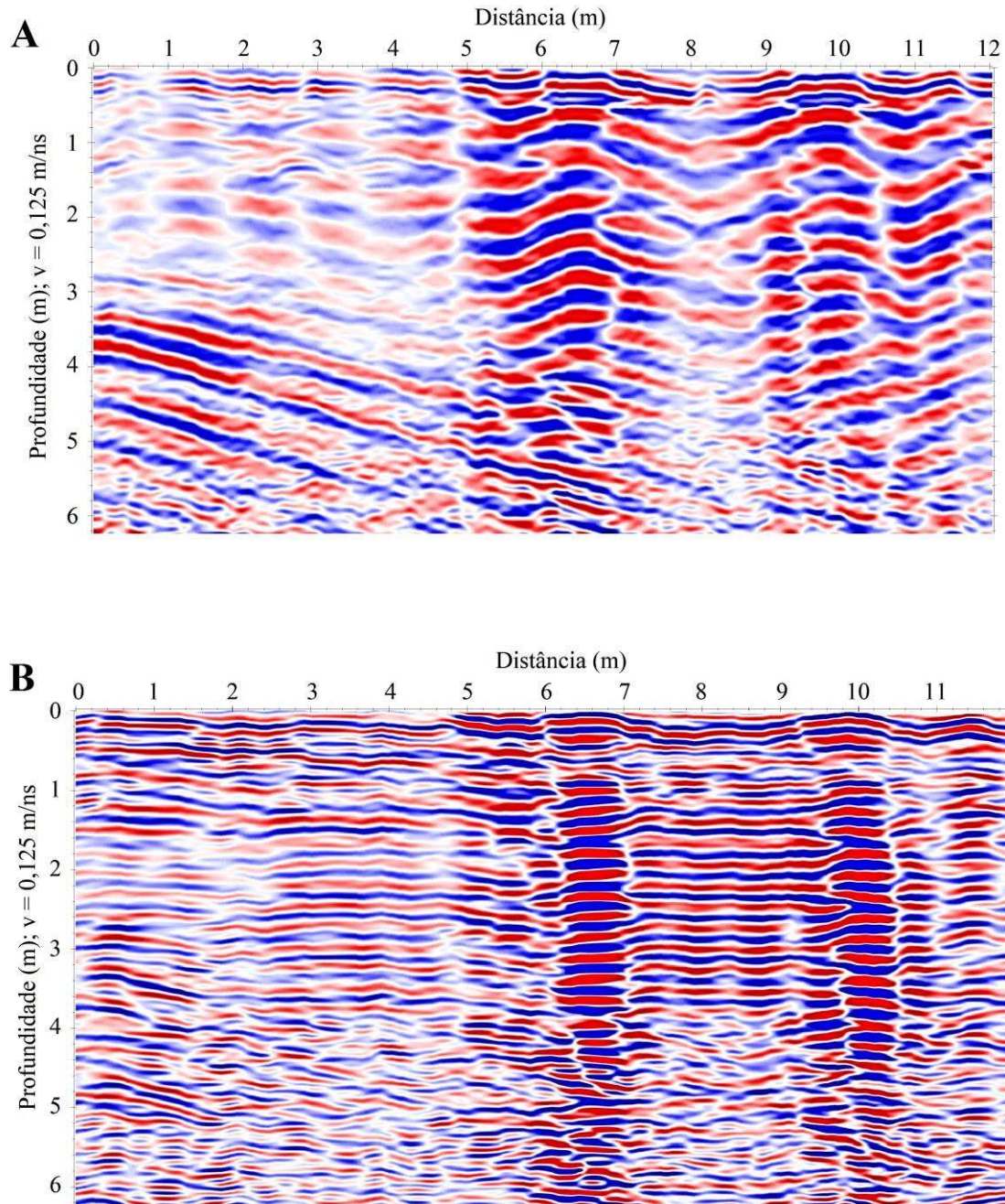


Figura 21 – Linha 04 de aquisição resultante das antenas (A) 200 MHz e (B) 400 MHz.

A Linha de aquisição 05 (L05), situada fora da área de instalação dos tanques e representada na Figura 22, possui refletores nítidos e não sugere nenhuma feição característica de contaminação por hidrocarbonetos, apresentando porém, na profundidade de aproximadamente 4 m, uma interface que pode ser atribuída ao contato do aterro do terreno com o embasamento.

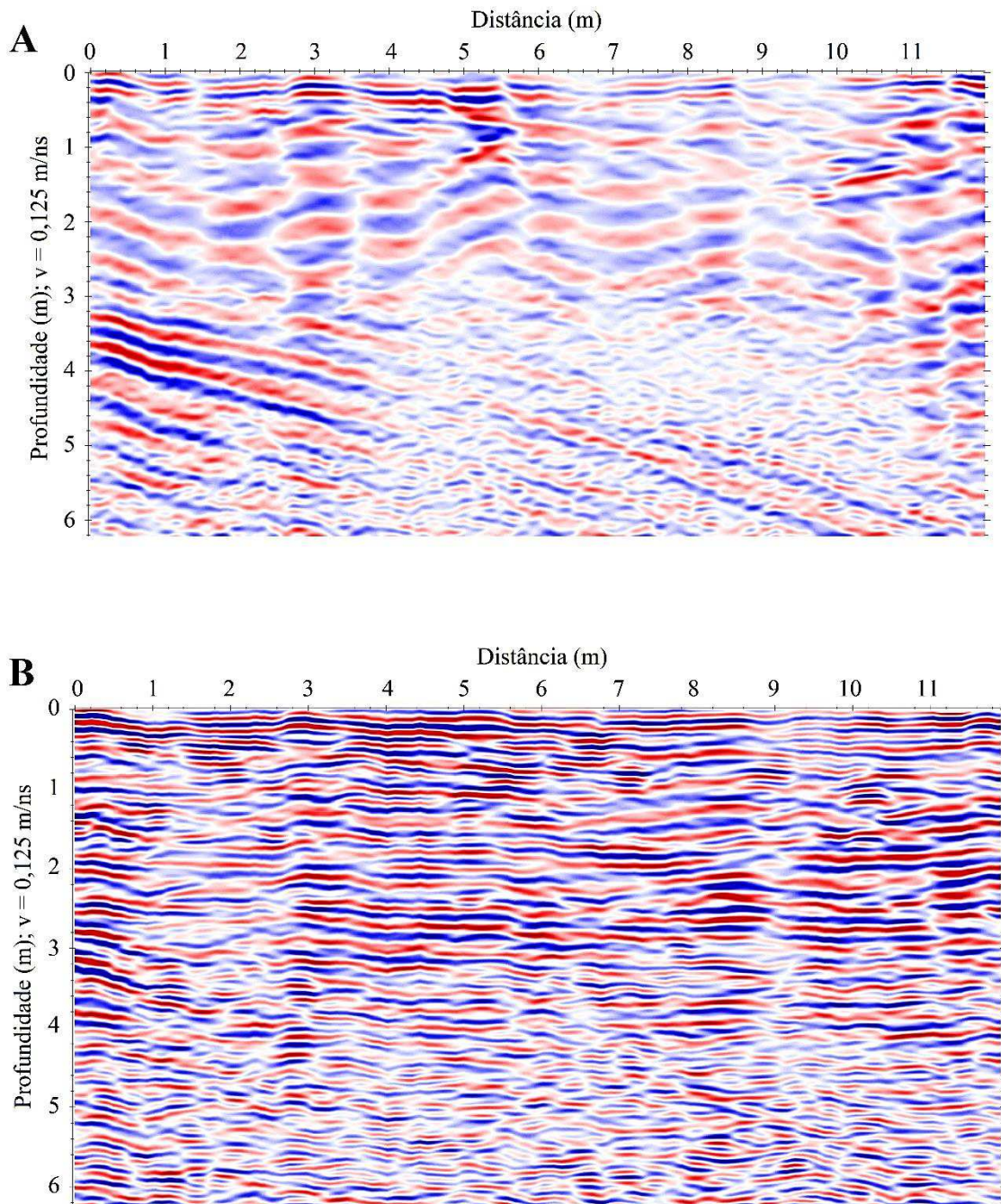


Figura 22 – Linha 05 de aquisição resultante das antenas (A) 200 MHz e (B) 400 MHz.

Os radargramas resultantes das Linhas de aquisição 06 e 07 (L06 e L07), representados nas Figuras 23 e 24 também correspondem a locais fora da área de instalação dos tanques de armazenamento, porém no sentido do escoamento, conforme a topografia do local. Também não há indicações de feições que possam ser correlacionadas a contaminações, notando-se apenas dois refletores distintos, possivelmente associados à interface terreno/embasamento.

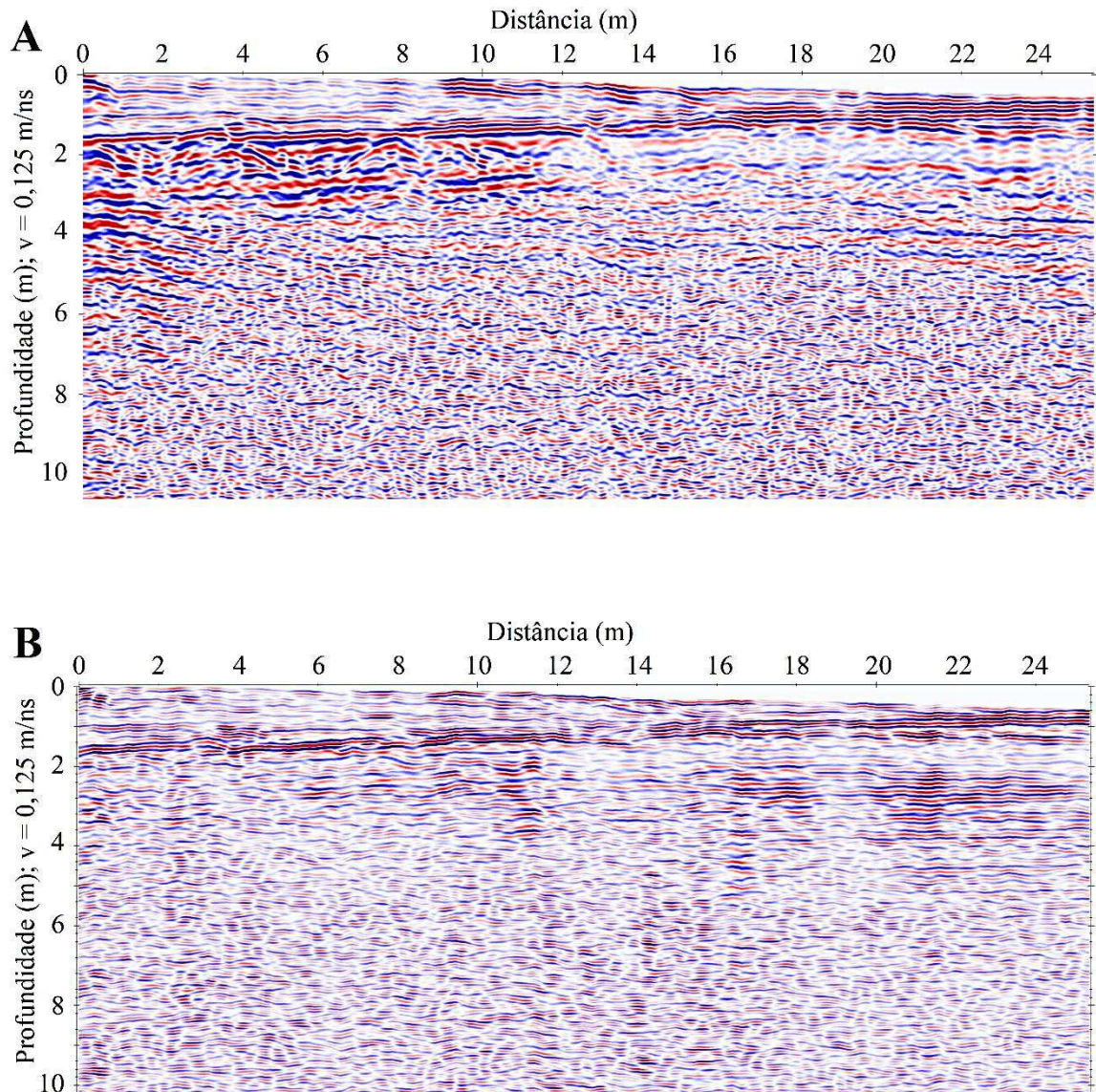


Figura 23 – Linha 06 de aquisição resultante das antenas (A) 200 MHz e (B) 400 MHz.

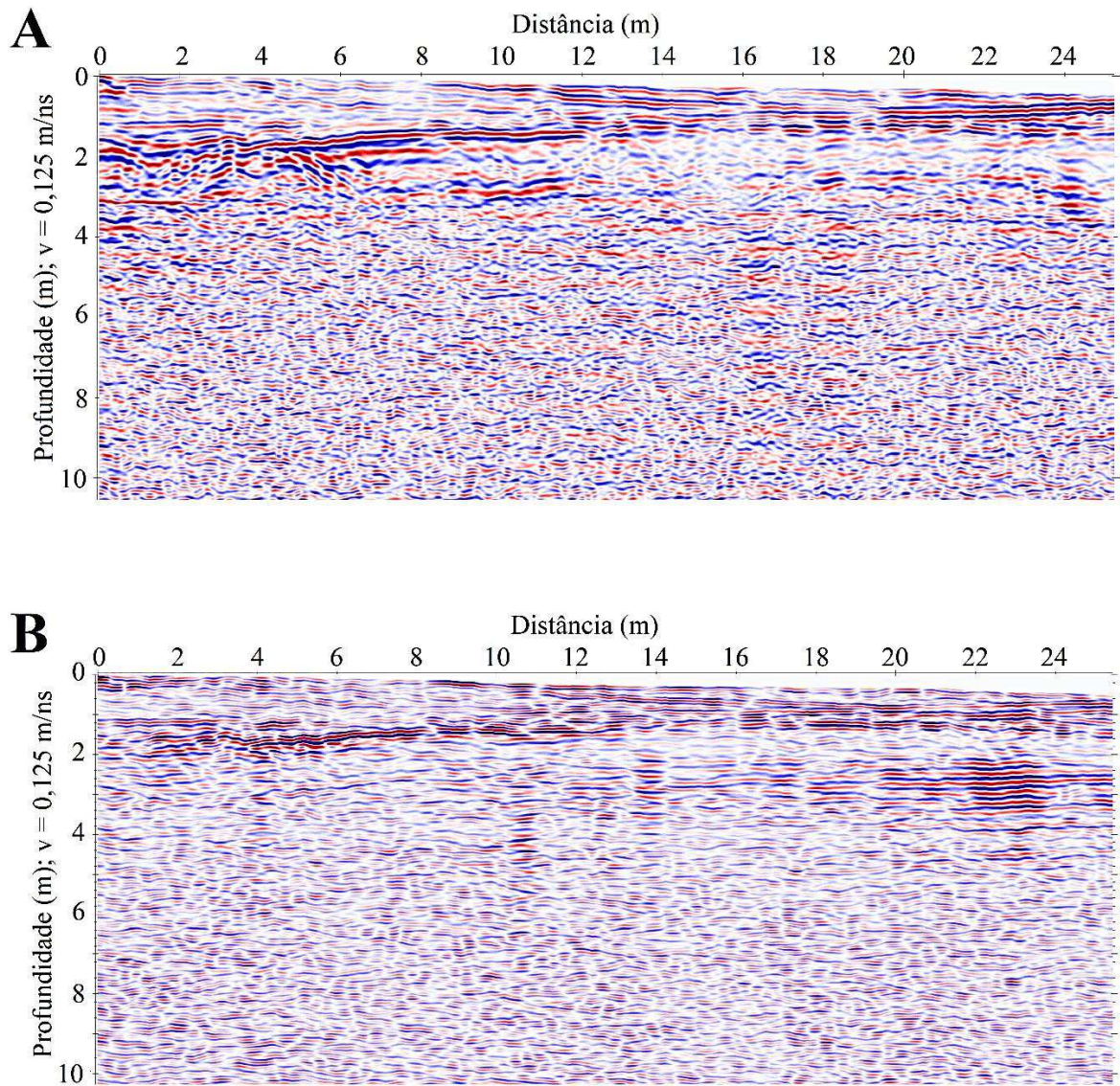


Figura 24 – Linha 07 de aquisição resultante das antenas (A) 200 MHz e (B) 400 MHz.

Por fim, a Linha de aquisição 01 (L01), representada na Figura 25, a mais extensa e distante dos tanques de armazenamento, foi a única a apresentar uma zona de atenuação de sinal considerável (baixa reflexão), a 2 m de profundidade, entre as distâncias 6 e 16 m, conforme destacado na Figura 25, podendo ser correlacionada à possível contaminação do local por hidrocarbonetos, devido a sua alta resistividade, assim como abordado em Almeida et. al (2007), Santos e Griep (2001), Reis Júnior (2009) e Cruz (2015). Por tratar-se de um local distante dos tanques de armazenamento, porém de cotas topográficas mais baixas com relação a estes, estaria num sentido de escoamento de um suposto vazamento, possivelmente associado à tendência de fluxo em sentido ao desnível topográfico, a exemplo de Moreira e Dourado (2006).

Com a distância da área de resistividade anômala para as instalações de bombas e tanques de armazenamento, não podemos correlacionar a contaminação a um vazamento atual, sendo possível que, se existente, esta seja associada a resíduos de uma contaminação anterior às ações de remediação praticadas no local. Para que possamos apontar a contaminação, torna-se necessária a realização de análises complementares ao GPR, a exemplo da utilização do método geofísico de Eletroresistividade ou análises químicas quantitativas como a de Hidrocarbonetos Totais de Petróleo, popularmente conhecida como TP1.

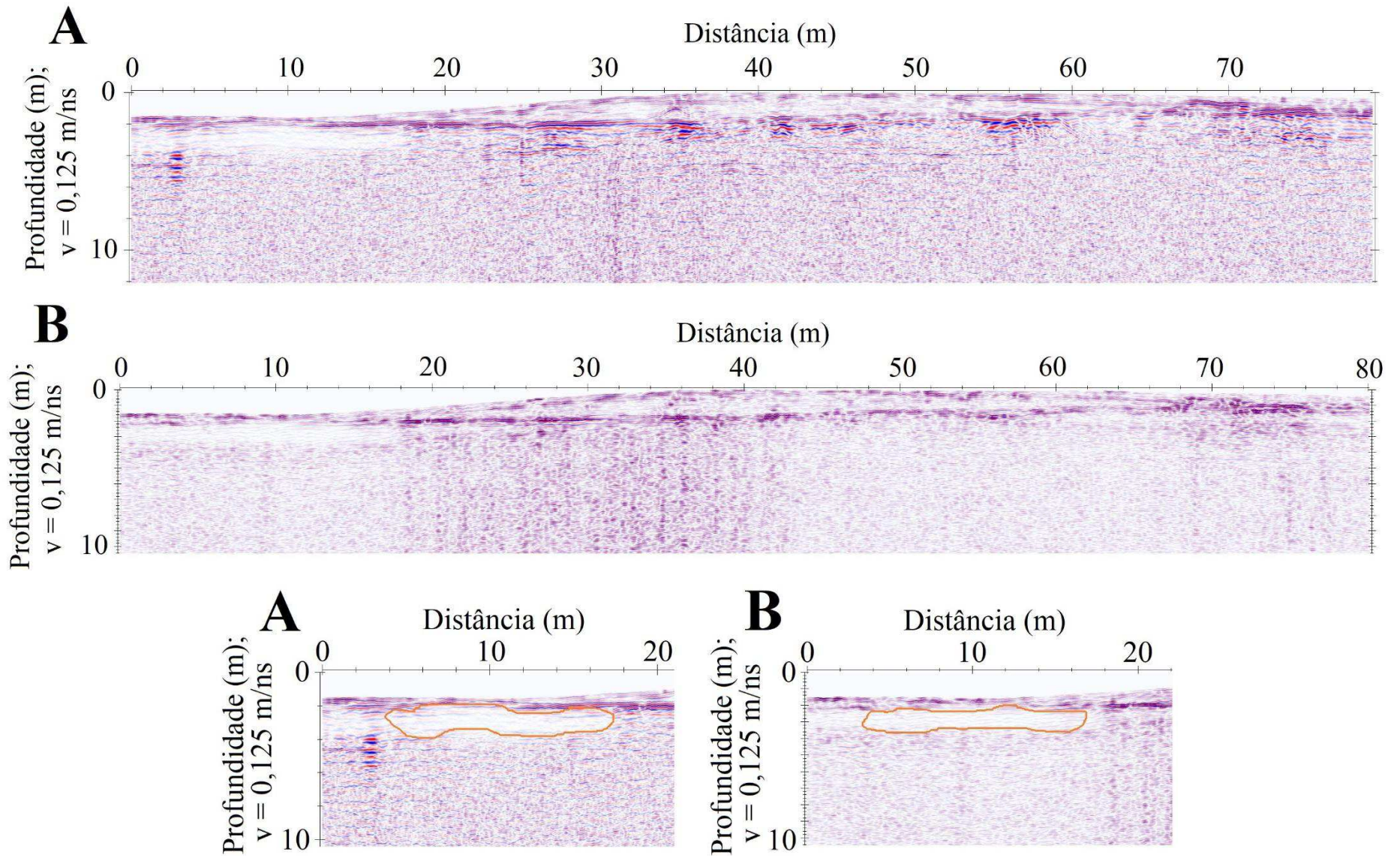


Figura 25 – Linha 0 de aquisição resultante das antenas (A) 200 MHz e (B) 400 MHz, com destaque para a zona de atenuação.

11 CONCLUSÕES

O presente estudo de caso demonstrou a eficiência da ferramenta geofísica GPR no monitoramento de solo potencialmente contaminável por vazamento de tanques de armazenamento de combustíveis (hidrocarbonetos).

O Ground Penetrating Radar mostrou-se um método não invasivo e de alta flexibilidade quanto o manuseio e a utilização de antenas com diferentes frequências, admitindo a comparação de resultados e facilitando a interpretação dos mesmos. Além disto, a utilização de antenas blindadas permitiu reduzir consideravelmente a interferência de eventos indesejáveis durante o levantamento, oferecendo uma profundidade de imageamento e resolução satisfatória para o presente estudo.

A julgar pelos resultados obtidos nas linhas de aquisição L01, L02, L03, L04, L05, L06 e L07, a área em estudo não apresentou nenhuma feição correlacionável a uma recente contaminação por hidrocarbonetos.

O resultado obtido na linha de aquisição L07 mostrou uma atenuação considerável no sinal, com aproximadamente 10 m de extensão, apresentando-se como uma anomalia de alta resistividade, podendo estar correlacionada a eventual contaminação por hidrocarbonetos, sendo necessária a realização de análises complementares do solo, para confirmação de que a indicação do GPR de fato trata-se de uma contaminação, se já recente ou anterior às atividades de remediação aplicadas na área.

O método de remediação “Remoção de Solo” que foi aplicado para sanar a contaminação anteriormente detectada na região dos tanques de armazenamento se mostrou eficiente. Trata-se de um método simples e foi satisfatório, neste caso, porque o problema de vazamento dos tanques foi resolvido com a troca destes.

Assim a utilização do GPR pode ser considerado exitoso, uma vez que possibilitou o imageamento da subsuperfície do terreno em questão e a consequente visualização e interpretação dos contrastes nas propriedades do meio, mesmo diante da escassez de informações do local, visto que, o posto não possui nenhum mecanismo para controle ambiental no empreendimento.

12 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F.F.M et al. Províncias estruturais brasileiras. In: SBG/Núcleo Nordeste, Simpósio de Geologia do Nordeste, 1977, Campina Grande. **Atas**, 363-391.

ALMEIDA, F.M. SOUSA, D.M. LUIZ, G. C. G. **Atas do Congresso Brasileiro de Petróleo e Gás**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS, 4., 2007, Campinas.

ALARENGA, M.C. **Curso de Engenharia Ambiental**. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2007. 49 f.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Plano Nacional de Recursos Hídricos**. Brasília: CDOC, 2005. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/planejamento/planos/pnrh/PlanoQualidadeAguasSubterraneas.pdf> Acesso em: 02 fev. 2019.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Anuário Estatístico ANP 2016**. Rio de Janeiro: ANP, 2016. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/anp/images/publicacoes/AnuarioEstatisticoANP2016.pdf> Acesso em: 03 fev. 2019.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Plano Nacional de Recursos Hídricos 2017**. Rio de Janeiro: ANP, 2017. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/anp/images/publicacoes/livros/revistas/PanoramaAbastecimento2017.pdf> Acesso em: 03 fev. 2019.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Anuário Estatístico ANP 2019**. Rio de Janeiro: ANP, 2019. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/images/publicacoes/anuario-estatistico/2019/anuario2019.pdf> Acesso em: 23 mar. 2019.

AQUINO, F. Métodos geofísicos aplicados à investigação de contaminação subterrânea: estudo de casos. **Revista Brasileira de Geofísica**, 1999. Disponível em: https://abms.com.br/livros/bibliotecavirtual/reg_eo99/1999-aquino.pdf. Acesso em: 06 fev. 2017.

AMBURUA, E. COSTA, A.F.U. NANNI, A.S. O emprego da prospecção geofísica na avaliação de plumas de contaminação por hidrocarbonetos. In: **II Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 1999, Porto Alegre – RS. **Anais do VII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Rio de Janeiro: ABES, 2000.

BIANCHI, L.A. et al. **Geologia Ambiental e Geotécnica em Bacias Sedimentares**. SIG – Brasília: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2003. 692 p.

BOMFIM, L.F.C. **Geologia Ambiental e Geotécnica em Bacias Sedimentares**. SIG – Brasília: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2003. 692 p. **II Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e II Encontro Nacional de Perfuradores de Poços**, São Luís, ago./set. 2010.

BRILHANTE, O.M. CALDAS, L.A. (Coord.). **Geologia Ambiental e Geotécnica em Bacias Sedimentares**. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora FIOCRUZ, 2004.

CARVALHO, D.A. et al. Análise de BTE em água: comparação entre duas colunas cromatográficas. **Revista Brasileira de Águas Subterrâneas**, Taubaté, v. 9, n. 1, p. 149-160, jan./mar. 2014.

CORSEUIL, J. MARINS, M.D.M. Contaminação de águas subterrâneas por derramamentos de gasolina: o problema é grave. **Revista Brasileira de Geofísica**, n. 2, p. 50-54, 1997.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Geologia Ambiental e Geotécnica em Bacias Sedimentares**. Brasília: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2002. Disponível em: rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/5034/GeologiaParaiba.pdf. Acesso em: 04 dez. 2017.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **P** **D** **G** **P** Recife: CPRM/PRODEEM, 2005. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/~spui/bitstream/doc/160751/Rel%20Gurinh%C3%A9m.pdf> Acesso em: 01 mar. 2011

CRUZ, C.G. **I** **G** **GPR** 2015, 10 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, 2015.

CUNHA, G.S. **A** **U** **G** 2014. 52 f. Monografia (Graduação em Geografia) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014.

DANIELS, J. ROBERTS, R. ENDL, M. Ground Penetrating Radar for the detection of liquid contaminants. **A** **G**, v. 33, p. 195-207, 1995.

DIAS, L.G. da S. **C** **S** **C** **RN**2006. 203 f. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

NIGAM, R. Ground Penetrating Radar for Environmental Applications. **A** **R** **E** **P** **S**, v. 29, p. 229-255, maio 2001.

LIMA, S.D. et al. Gerenciamento de áreas contaminadas por postos de combustíveis em Cuiabá, Mato Grosso, Brasil. **A** **Á** - **A** **I** **A** **S**, Taubaté, v. 12, n. 2, p. 299-315, mar./abr. 2017.

MARQUES, S.G. **E** **E** **2007**. 9 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociência – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MINDRIS, A. C. **Avaliação da contaminação de aquíferos por combustíveis orgânicos em Belo Horizonte: Avaliação preliminar.** São Paulo: IPT - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. 155 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MORAES, S.L. TEIXEIRA, C.E. MAQUIMIANO, A.M. S. **Mapas de prioridade – Plano de ação preventiva na detecção de plumas em postos de combustíveis.** São Paulo: IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo: BNDES, 2014.

MOREIRA, C.A. DOURADO, C. Monitoramento da atenuação natural de pluma de contaminação pelo método de Radar de Penetração no Solo (GPR). **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 25, n. 4, p. 39-39, 2007.

NASCIMENTO, O. Mapas de prioridade – Plano de ação preventiva na detecção de plumas em postos de combustíveis. In: III Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, 2012, Maringá. **Atas**, Maringá 2012.

OLIVEIRA, L.I. LOUREIRO, C.O. Contaminação de aquíferos por combustíveis orgânicos em Belo Horizonte: Avaliação preliminar. **Atas do Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**, São Paulo: 199. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/2227>. Acesso em: 01 abr. 2014.

OSATO, L.S. et al. Contribuição de uma seção gravimétrica transversal ao estudo da estruturação litosférica na porção setentrional da Província Borborema, NE do Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v. 29, n. 2, p. 309-329, 2011.

REIS JUNIOR, A. **Efeitos da atenuação natural de plumas de combustíveis orgânicos em aquíferos.** GPR e a detecção de plumas de combustíveis orgânicos em aquíferos. 2009. 172 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2009.

REIS JUNIOR, A. **Literatura de revisão sobre GPR e a detecção de plumas de combustíveis orgânicos em aquíferos.** D. 2014. 10 f. Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

SANTOS, E. UNGARI, C.N. SANTOS, M.B. **P** *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, v. 2, p. 203-212, 199.

f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 200.

SAUC, A. ATEANA, E.A. NAS, M.S. **E** *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, v. 2, p. 203-212, 199.

SANTOS, A.R. GRIEP, G. **D** *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, v. 2, p. 203-212, 199.

R **P** **S** **GPR** 200. 57 f. Monografia (Graduação em Oceanologia) – Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 200.

SOUSA, A. C. P. de. **U** **GPR** *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, v. 2, p. 203-212, 199.

P **B**/RN2009. 69 f. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

SOUA, M.M. **U** **G** **GPR** *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, v. 2, p. 203-212, 199.

2005. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

SOUA, A.M. **P** *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, v. 2, p. 203-212, 199.

2013. 153 f. Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

TIBURTIUS, E.R.L. PERALTA-AMORA, P. LEAL, E.S. **C** *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, v. 2, p. 203-212, 199.

BT *Química Nova*, São Paulo, v. 27, n. 3, p. 441-446, junho de 2004.