



IV-246 – O MÉTODO GPR EM UM POSTO DE COMBUSTÍVEIS E SERVIÇOS, SALVADOR-BAHIA

Susana Silva Cavalcanti⁽¹⁾

Engenheira Sanitarista e Engenheira Civil pela Universidade Federal da Bahia. Mestre e Doutora em Ciências em Geofísica pela Universidade Federal da Bahia. Professora e Pesquisadora do Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia (CPGG)/Universidade Federal da Bahia (UFBA).

Moara Maria Oliveira de Matos⁽²⁾

Geofísica pela Universidade de São Paulo (USP). Atua como Geofísica na Companhia de Ferro Ligas da Bahia (FERBASA).

Verusca Santos Almeida⁽³⁾

Graduanda em Geofísica pela Universidade Federal da Bahia (UFBA).

Endereço⁽¹⁾: Rua Barão de Jeremoabo, s/n – Campus Universitário de Ondina – Instituto de Geociências – Universidade Federal da Bahia – Salvador - BA - CEP: 40170-115 - Brasil – Cel. (71) 99122-3687 - e-mail: scavalcanti@ufba.br

RESUMO

Os métodos geofísicos têm extensa aplicação em diversos tipos de estudos que investigam a subsuperfície. Trata-se de uma metodologia indireta, não invasiva, bastante apropriada para investigações ambientais. O método radar de penetração no solo (GPR) utiliza ondas eletromagnéticas de frequência alta, com isso é possível mapear e/ou localizar estruturas geológicas rasas e outros objetos enterrados. Os postos de combustíveis e serviços possuem reservatórios enterrados, os quais eventualmente podem apresentar vazamentos, causando contaminação do solo e do aquífero. O conhecimento destes possíveis pontos com potencial poluidor é muito importante, especialmente se for necessária uma intervenção. Os estudos geofísicos sobre delineamento de plumas poluidoras podem ser utilizados pelos proprietários e pelos órgãos gestores ambientais para promover a requalificação daquele ambiente e possível remediação. Nessa pesquisa, foram realizadas medidas geofísicas com o equipamento geofísico de GPR e posterior mapeamento da subsuperfície em um posto de combustíveis e serviços de Salvador, Bahia. Os resultados, apresentados nos radargramas, fornecem a localização de três tanques em subsuperfície e seu conteúdo.

PALAVRAS-CHAVE: Geofísica, Aquífero, Radar de penetração no solo, Posto de combustíveis e serviços.

INTRODUÇÃO

A aplicação do método geofísico Radar de Penetração no Solo (GPR) possibilitou caracterizar a área de disposição dos tanques subterrâneos de armazenamento de combustíveis. O levantamento dos dados foi realizado em um posto fora de operação permitindo observar a geometria dos tanques e a eventual presença de combustíveis. Estes resultados servem como um padrão referencial geofísico para monitorização de eventual mudança nas propriedades elétricas na área causada por vazamentos.

Os métodos eletromagnéticos de prospecção geofísica utilizam as propriedades e parâmetros elétricos de solos e rochas, como condutividade, resistividade e campo eletromagnético, para investigar a geologia de subsuperfície (TELFORD et al, 1990). Em estudos hidrogeológicos e ambientais, normalmente os métodos eletromagnéticos, incluindo o radar de penetração no solo, respondem com eficiência à maioria das solicitações (LIMA et al, 1995).

Os métodos geofísicos têm extensa aplicação em diversos tipos de estudos que investigam a subsuperfície. Trata-se de uma metodologia indireta, não invasiva, bastante apropriada para investigações ambientais. O método GPR utiliza ondas eletromagnéticas de frequência alta, com isso é possível mapear e/ou localizar estruturas geológicas rasas e outros objetos enterrados. O método geofísico GPR constitui-se uma ferramenta vantajosa no monitoramento de áreas potencialmente contaminadas.



Os postos de combustíveis e serviços possuem reservatórios enterrados, os quais eventualmente podem apresentar vazamentos, causando contaminação do solo e do aquífero. O conhecimento desses possíveis pontos com potencial poluidor é muito importante, especialmente se for necessária uma intervenção. Os estudos geofísicos sobre delineamento de plumas poluidoras podem ser utilizados pelos proprietários e pelos órgãos gestores ambientais para promover a requalificação daquele ambiente e possível remediação.

A investigação deste tema é apropriada, pois problemas relacionados à contaminação do solo e da água subterrânea nas vizinhanças de postos de combustíveis e serviços ainda ocorrem (PEDROSA et al, 2006). Os métodos geofísicos elétricos/eletromagnéticos, permitem concluir sobre a profundidade e a litologia dos estratos geológicos, podendo alcançar o substrato rochoso em alguns casos. Além disso, pode delimitar o lençol freático e identificar os limites dos reservatórios instalados e os padrões de ocorrência de vazamentos na área.

Os órgãos públicos poderão se apropriar desta avaliação das condições do subsolo na área de estudo, para utilizar em programas de gestão de recursos hídricos, fiscalização de atividades potencialmente poluidoras e para promover melhorias na qualidade de vida das pessoas o que resultará em impactos sociais positivos para a comunidade.

OBJETIVO

O levantamento com o GPR visa imagear as estruturas e camadas rasas da crosta terrestre. Neste estudo, o método foi utilizado para a localização de objetos como tanques e tubulações enterrados no subsolo. O objetivo principal foi verificar as condições da subsuperfície na área de estudo, identificar as tubulações enterradas, o reservatório de combustíveis e sua estanqueidade. Essas informações serão preciosas para o gerenciamento do local e tomada de providências, caso haja vazamentos.

METODOLOGIA UTILIZADA

Inicialmente foi feita uma revisão sistemática da literatura, para atualização do conhecimento e observação do estado da arte com relação ao tema proposto. Em seguida foram realizadas as aquisições geofísicas no local escolhido, área do posto de combustíveis e serviços em Salvador, Bahia. Foi utilizado um equipamento de radar de penetração no solo (GPR), modelo SIR3000, da GSSI, com antenas blindadas de 200MHz. Posteriormente, os dados geofísicos foram processados com o *software* REFLEXW (FURTADO, 2009), para que fossem realizadas as análises de resultados, interpretação e conclusão.

Não havia informações disponíveis sobre a profundidade, a quantidade, a direção e o tamanho dos tanques subterrâneos no local. Também não eram conhecidos os parâmetros elétricos dos materiais (Condutividade elétrica σ , a sua inversa resistividade elétrica ρ , μ a permeabilidade magnética relativa e a constante dielétrica ϵ , também denominada permitividade elétrica relativa). A σ é medida em mS/m, a ρ em Ωm , a μ e a ϵ são adimensionais. Os parâmetros foram estimados em tabelas apropriadas. Normas técnicas, croquis esquemáticos de tanques enterrados e desenhos em propagandas de revendedores de tanques e/ou proprietários de postos de combustíveis foram úteis para correlacionar com os resultados do levantamento geofísico. A identificação de ruídos como estruturas metálicas, carros e transmissores de rádio frequência são possíveis efeitos que interferem nas medidas de GPR.

Radar de Penetração no Solo (GPR)

O Radar de Penetração no Solo (GPR) usa pulsos eletromagnéticos de alta frequência, da ordem de 40 a 1.500MHz, transmitidos de uma antena de radar para o interior da Terra. Os pulsos transmitidos são refletidos nas várias interfaces existentes e o seu retorno é detectado pela antena receptora. As interfaces refletoras podem ser os estratos geológicos, o nível estático da água subterrânea, objetos enterrados e qualquer material que possua contraste nas propriedades dielétricas.

A constante dielétrica dos materiais (ϵ) está correlacionada a muitos parâmetros mecânicos e geológicos dos materiais (SHARMA, 1986). Os materiais argilosos, a presença de fluidos bem como outras substâncias aumentam a condutividade elétrica (σ) e conseqüentemente interferem na atenuação e na profundidade de

penetração do método. Esta última dificilmente ultrapassa os 10m, porém, em circunstância muito favoráveis, geralmente ambientes/materiais que têm maior resistividade elétrica, pode atingir 100m.

Alguns parâmetros físicos típicos dos materiais terrestres estão na Tabela 1. Os fundamentos do método geofísico GPR encontram-se na teoria eletromagnética, nas conhecidas equações de Maxwell. As equações simplificadas para a atenuação (a em dB/m) e para a velocidade (para baixas perdas) podem ser descritas a seguir (Equações 1 e 2), onde c é a velocidade da luz no vácuo (3×10^8 m/s) e v é a velocidade em m/s.

$$v = c/(\mu\epsilon)^{1/2} \quad \text{equação (1),}$$

$$a = 1,69(\sigma)/(\epsilon)^{1/2} \quad \text{equação (2).}$$

Tabela 1: Propriedades eletromagnéticas de materiais terrestres (Adaptado EPA, 2016).

MATERIAL	ϵ	CONDUTIVIDADE (mS/m)	VELOCIDADE (m/ns)	ATENUAÇÃO (dB/m)
Ar	1	0	0,3	0
Água destilada	80	0,001	0,033	0,002
Água doce	80	0,5	0,033	0,1
Água do mar	80	3000	0,01	1000
Areia seca	3-5	0,01	0,15	0,01
Areia molhada	20-30	0,1-1	0,06	0,03-0,3
Calcário	4-8	0,5-2	0,12	0,4-1
Folhelho	5-15	1-100	0,09	1-100
Silte	5-30	1-100	0,07	1-100
Argila	5-40	2-1000	0,06	1-300
Granito	4-5	0,01-1	0,13	0,01-1
Sal seco	5-6	0,01-1	0,13	0,01-1
Gelo	3-4	0,01	0,16	0,01

A forma de aquisição dos dados de GPR, nesse estudo, foi o *common offset* onde o receptor e o transmissor são mantidos a uma distância fixa e deslocados ao longo de uma linha para gerar um perfil (Annan, 1992). Caso a energia irradiada no ar pelo equipamento de GPR seja refletida em algum objeto (carro, edificações) localizado na superfície, essa reflexão vai aparecer nos registros. Isso pode ser um problema na interpretação dos resultados. As figuras 1 e 2 ilustram as reflexões das antenas em um objeto e os registros dos tempos de viagem das ondas eletromagnéticas correspondentes.

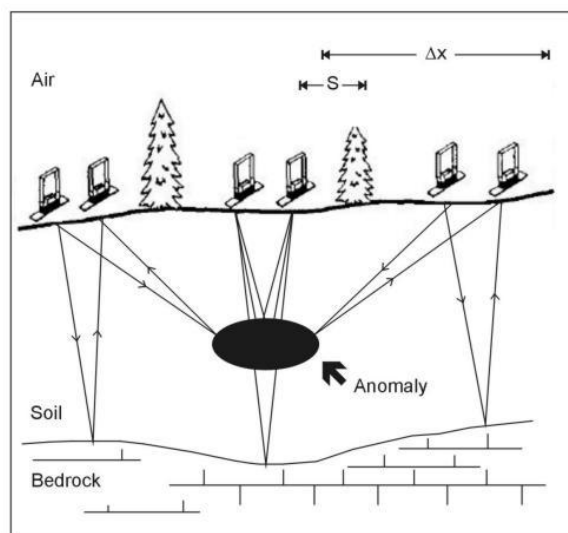


Figura 1: Esquema de aquisição com common offset (EPA, 2016).

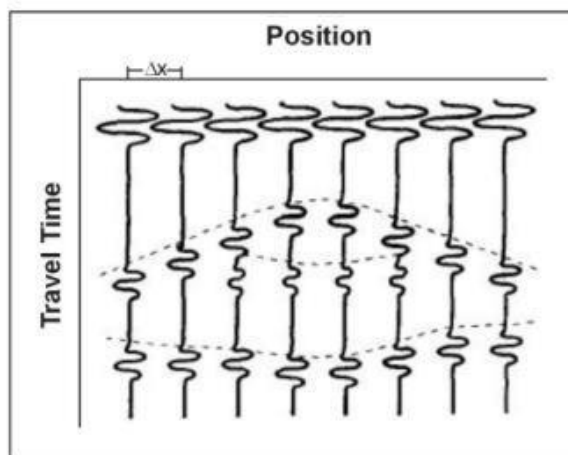


Figura 2: Formato de uma seção de reflexão de GPR, considerando o alvo ilustrado na Figura 1 (EPA, 2016).

Uma antena receptora gera um trem de ondas, pulsos eletromagnéticos, que chegam a antena receptora trazendo as informações/modificações causadas pela passagem através da subsuperfície. Faz-se necessária uma instrumentação precisa para o registro do tempo de chegada da onda de radar. Os sinais recebidos são processados e dispostos em um gráfico denominado radargrama. Os sinais de radar recebidos são amplificados, digitalizados, gravados e apresentados sob a forma de radargrama, o qual possui uma similaridade com o sismograma (métodos geofísicos sísmicos).

Área de Estudo

A área onde foram realizadas as medidas com o método geofísico Radar de Penetração no Solo (GPR) situa-se no Dique do Tororó, Município de Salvador, Estado da Bahia. A figura 3 indica esta localização. O Dique do Tororó é o único manancial natural da cidade de Salvador, no Estado da Bahia, no Brasil, tombado pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional. Comumente reduzido para Dique, possui uma lagoa de 110 mil metros cúbicos de água (Wikipedia).

A região do Dique do Tororó tem densidade populacional alta e possui, nas proximidades, quatro postos de combustíveis e serviços, além de abrigar o estádio Arena Fonte Nova. A área de estudo foi escolhida de maneira aleatória, observando apenas a proximidade do centro de pesquisa e a viabilidade para realização do levantamento geofísico. O posto de combustíveis encontrava-se desativado no momento da aquisição e isto facilitou a aquisição dos dados (Figura 4).



Figura 3: Localização da área de estudo (Wikipedia).



Figura 4: Localização do posto de combustíveis e serviços (Adaptada Google Earth).

RESULTADOS OBTIDOS

Depois de montado e instalado o equipamento de GPR, procedeu-se a aquisição dos dados (Figura 5). Foram executados 14 perfis sobre a laje de concreto onde estão os tanques subterrâneos de combustíveis. Cada perfil com cerca de 10m de comprimento, cobrindo toda a extensão da laje de cobertura dos reservatórios enterrados. A separação entre os perfis foi de 50cm visando maior detalhamento. A princípio não era conhecida a quantidade, a profundidade, a direção e o tamanho dos tanques. Utilizou-se de croquis e esquemas de distribuição de tanques submersos em postos similares para subsidiar os resultados.



Figura 5: Equipamento de GPR e equipe executora.

Os parâmetros físicos adotados foram $\epsilon = 8$, μ considerada próxima a unidade para rochas não magnéticas e σ maior do que 100S/m. Nestas condições, a velocidade de propagação do pulso eletromagnético é principalmente controlada por ϵ . Considerando a maioria dos materiais naturais, a permitividade elétrica relativa não varia mais do que um fator de 10; desta forma, é a resistividade que controla a profundidade de penetração do pulso.

Os perfis de GPR obtidos com os dados coletados no equipamento, os dados brutos, permitiram visualizar os reservatórios subterrâneos e algumas tubulações, representadas por hipérboles, na área. Inicialmente, pretendia-se inferir sobre a presença ou não de combustíveis nos tanques, no entanto, compreende-se que os



reservatórios estão vazios em decorrência do posto estar desativado. Foram visualizados três tanques subterrâneos, instalados na direção perpendicular as linhas dos perfis geofísicos.

O posto estudado estava fora de operação durante o levantamento geofísico, possibilitando a redução de ruídos nos dados brutos que foram processados no *software* REFLEXW, apenas para conversão do perfil de tempo em profundidade. No processamento foram utilizados, também, a correção estática e alguns filtros para melhorar a razão sinal/ruído. Foram construídos perfis, denominados radargramas, que servem para visualização das condições atuais dos tanques, com os radargramas já processados. Neste trabalho, foi apresentado apenas o radargrama 014 para ilustração do resultado. O radargramma 014 está representado na figura 6, antes do processamento. A velocidade estimada foi de 0,07m/ns. Finalmente, na figura 7 está o mesmo radargrama 014 já processado.

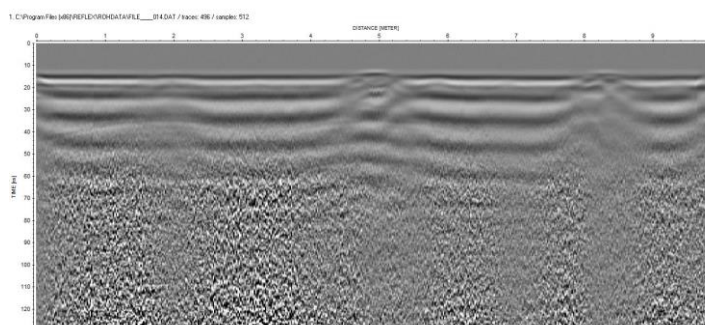


Figura 6: Perfil 014 ainda não processado.

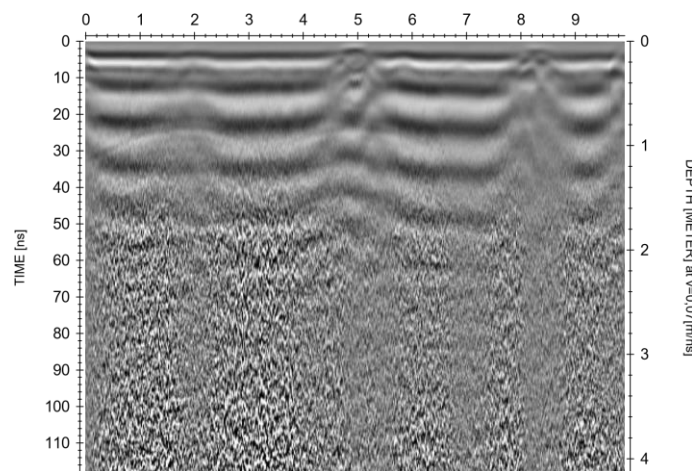


Figura 7: Perfil 014 processado.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Devido à condição de posto desativado, não foi possível observar uma assinatura geofísica relacionada ao conteúdo nos tanques. No entanto, este fato permitiu uma aquisição quase que ausente de ruídos nos dados. Isto pode ser observado pela comparação dos perfis 014 antes e após o processamento. A imagem quase que se mantém. Já é possível visualizar três grandes reflexões, localizadas a distância 2m, 5m e 8,5m, que correspondem aos poços de visita dos reservatórios.

Os dados brutos já mostram as feições do tanque subterrâneo, mas a parte superior destes tanques ficam bem registradas no perfil 014 processado. É possível notar uma hipérbole cujo topo está situado a distância horizontal de 2m e a profundidade de 1m. Estes valores concordam com os croquis consultados de outros postos e anúncios de revendedores de tanques similares.



A sequência de 14 perfis também foi utilizada para determinar a direção de instalação dos tanques subterrâneos na área de estudo. Neste caso, são três tanques e estão localizados transversalmente às linhas de aquisição geofísica. A parte inferior dos tanques não ficou visível nos radargramas. Não foi observada nenhuma reflexão que caracterize sobras de combustível nos tanques.

CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

Foram construídos perfis denominados radargramas que servem para visualização das condições atuais dos tanques subterrâneos de armazenamento de combustíveis. Com os radargramas já processados, pode-se visualizar imagens 2D representativas das condições de estanqueidade dos reservatórios. As informações obtidas por meio do método GPR serão importantes para o gerenciamento do posto de combustíveis e serviços, bem como para os gestores ambientais. A metodologia aplicada na área de estudo poderá ser reproduzida em outros locais semelhantes no município.

O emprego de métodos geofísicos em investigações de cunho ambiental se mostra apropriado e coerente uma vez que não há interferência no meio, conservando as condições iniciais dele. O GPR possibilita uma investigação do subsolo em pouco tempo, com baixo custo e pequena equipe. Os perfis construídos, radargramas, são favoráveis para a monitorização da área, para o planejamento de ações de uso do espaço ou mesmo de medidas de remediação no caso de vazamentos.

Recomenda-se a realização de outro levantamento de GPR no mesmo local com perfis na direção longitudinal a direção dos tanques, a fim de se observar ganho na profundidade de penetração do método, bem como no registro de fluidos no interior do reservatório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANNAN, A. P. Ground penetration radar workshop notes. Sensors & Software, Inc., Internal Report, 130pp, 1992.
2. EPA 2016. Disponível em: https://archive.epa.gov/esd/archive-geophysics/web/html/ground-penetrating_radar.html. Acesso em 12/06/2024.
3. FURTADO, P. Q. F. Processamento e modelagem de dados de GPR utilizando o REFLEXW 4.5. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Pará, 41pp, 2009.
4. LIMA, O. A. L.; SATO, H. K.; PORSANI, M. J. Imaging industrial contaminant plumes with resistivity techniques, *Journal of Applied Geophysics*, 34(2): 93-108, 1995.
5. PEDROSA, T. R. M. A. M., CASTRO, D. L. C., CASTELO B., R. M. G. Caracterização de plumas contaminantes de hidrocarbonetos em postos de abastecimento em Fortaleza, usando o método Radar de Penetração do Solo (GPR). *Revista de Geologia* 19: 73-86, 2006.
6. SHARMA, P. V. (1986) *Geophysical Methods in Geology*. Amsterdam: Elsevier, 1986.
7. TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. (1990) *Applied Geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.