



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOFÍSICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

DANUSA MAYARA DE SOUZA

**USO DO RADAR PARA AVALIAÇÃO GEOFÍSICA DA
CONTAMINAÇÃO DOS POSTOS DE COMBUSTÍVEIS BRÁZ DE
AGUIAR (BELÉM/PA) E SÃO PAULO (ABAETETUBA/PA)**

**BELÉM
2008**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação(CIP)
Biblioteca Geól. Rdº Montenegro G. de Montalvão

- S729u Souza, Danusa Mayara de
Uso do radar para avaliação geofísica da contaminação dos postos de combustíveis Braz de Aguiar (Belém-Pa) e São Paulo (Abaetetuba-Pa). / Danusa Mayara de Souza. – 2008
56 f. : il.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geofísica) – Faculdade de Geofísica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, Segundo Semestre de 2007.
Orientador, José Gouvêa Luiz
1. Radar-GPR. 2. Contaminação. 3. Hidrocarbonetos 4. Postos de serviços. I. Universidade Federal do Pará II. Luiz, José Gouvêa, Orient. III. Título.

CDD 20º ed.:621.3848



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOFÍSICA**

DANUSA MAYARA DE SOUZA

**USO DO RADAR PARA AVALIAÇÃO GEOFÍSICA DA
CONTAMINAÇÃO DOS POSTOS DE COMBUSTÍVEIS BRÁZ DE
AGUIAR (BELÉM/PA) E SÃO PAULO (ABAETETUBA/PA)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Geofísica da Universidade Federal do Pará – UFPA, em cumprimento às exigências para a obtenção de grau Bacharel em Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. José Gouvêa Luiz

**BELÉM
2008**

DANUSA MAYARA DE SOUZA

**USO DO RADAR PARA AVALIAÇÃO GEOFÍSICA DA
CONTAMINAÇÃO DOS POSTOS DE COMBUSTÍVEIS BRÁZ DE
AGUIAR (BELÉM/PA) E SÃO PAULO (ABAETETUBA/PA)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Geofísica da Universidade Federal do Pará – UFPA, em cumprimento às exigências para a obtenção de grau Bacharel em Geofísica.

Data de aprovação: ___/___/___

Conceito: _____

Banca examinadora:

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

Prof^a Lúcia Maria da Costa e Silva – Membro
Doutora em Geofísica
Universidade Federal do Pará

Prof. José Geraldo das Virgens Alves – Membro
Mestre em Geofísica
Universidade Federal do Pará

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

À minha amada e heróica família.

AGRADECIMENTOS

Ao meu amado Jesus Cristo pelo suporte e força na subida de mais um degrau e por ter me consolado e conversado comigo nos momentos em que eu olhei para cima, mas não vi o céu.

À minha mamãe Socorro, pela dedicação e por ser o meu espelho, aos meus irmãos Eduardo e Tiago, pelo amor e paciência, e à meu pai Domingos, pelas inúmeras vezes que me mandou fazer Geoprocessamento e pelo seu jeito *Shrek* de ser.

Aos meus queridos amigos Lili, Daniel e Anderson, por sempre estarem de bom humor e caminharem lado a lado nas adversidades.

Ao meu afável orientador José Gouvêa Luiz, pelos grandiosos ensinamentos.

À Profª e amiga Lúcia Maria da Costa e Silva, pelas valiosas lições de Geofísica e vida.

Ao Prof. José Geraldo das Virgens Alves, pelas inesquecíveis oportunidades de monitoria e pela credibilidade.

Ao Prof. Marcos Welby Correa Silva, por ter aceitado substituir o meu orientador na ocasião da minha defesa, assumindo o posto de presidente da banca examinadora do trabalho.

À Welitom Borges (Geopesquisa), pelo imensurável auxílio no processamento dos dados com o REFLEXW.

Aos meus inigualáveis professores e educadores da Faculdade de Geofísica, pela competência e seriedade na arte de ensinar.

Aos colegas de curso de graduação e pós-graduação em Geofísica, em especial ao Alex e Fabíola, pelas prestimosas ajudas em trabalhos de campo.

Aos técnicos, Paulo Magalhães, Afonso e Alberto Leandro, pelas sábias e práticas instruções.

À Tiago Cândido Neto e família pela amizade desde 1990 e pela oportunidade de estágio na Eletronorte.

“O coração do sábio adquire o conhecimento, e o ouvido dos sábios busca a ciência.”

Provérbios 18:15

RESUMO

Os combustíveis derivados do petróleo têm uma elevada resistividade elétrica. Por esse motivo, ao serem derramados no solo elevam a resistividade do ambiente. Com o passar do tempo, a ação de bactérias nos compostos orgânicos dos combustíveis produzem a sua biodegradação com a formação de ácidos que dissolvem íons do material do subsolo, fazendo com que a resistividade elétrica diminua bastante, transformando o ambiente em um bom condutor de eletricidade. Em resumo, o derramamento de combustíveis derivados de hidrocarbonetos produz plumas de contaminação que têm sido associadas, em levantamentos geofísicos, tanto a valores elevados de resistividade elétrica, como a baixíssimos valores de resistividade. Neste trabalho pretendeu-se detectar a assinatura (resistiva ou condutiva) de anomalias associadas à contaminação por combustíveis derivados de hidrocarbonetos no Posto São Paulo, localizado em Abaetetuba-PA e Posto Bráz de Aguiar, que se encontra desativado, localizado na cidade de Belém-PA. As medidas geofísicas foram realizadas com o Método Radar de Penetração no Solo (GPR). O estudo foi desenvolvido através de perfis distribuídos de modo a cobrir o perímetro externo dos postos, bem como as suas áreas internas. Durante as medidas foi usada uma antena monoestática de 400 MHz. Os dados obtidos com o GPR foram processados com o *software* REFLEXW com a finalidade de melhorar os registros, para suas posteriores interpretações. Uma assinatura de baixa resistividade foi detectada em ambos os postos.

Palavras-chave: GPR. Contaminação. Hidrocarbonetos. Postos de Serviço.

ABSTRACT

The fuels derived from petroleum have a high electric resistivity. For this reason, when they are spilled into the ground they raise the resistivity of the environment. After some time however, the action of bacterias over the organic compounds of fuels produce their biodegradation with the formation of acid that dissolve ions of the material of the ground, lowering the electric resistivity and transforming the environment into a good conductor of electricity. In summary, spilling of fuels derived from hydrocarbons produces plumes of contamination that have been associated, in geophysical surveys, as much as resistivity highs, as very low values of resistivity. In this work was intended to detect the signature in terms of resistivity of anomalies associated to contamination by fuels derived from hydrocarbons at the São Paulo Gas Station, an active gas station located in Abaetetuba-Pará and at the Braz de Aguiar Gas Station, a deactivated station, located in Belém-Pará. The geophysical measurement were carried through with the Ground Penetrating Radar Method (GPR). The study was developed along profiles covering the external perimeter of the gas stations, as well as their internal areas. The measurement were performed using a monostatic 400 MHz antenna. The data were processed with the REFLEXW software to improve the quality of the registers in order to make ease the interpretation. A signature of low resistivity was found in both gas stations.

Key-words: GPR. Contamination. Hydrocarbons. Gas Stations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Ilustração de trem de pulsos (adaptado de MAHAFZA, 2000)	15
Figura 2	Esquema de funcionamento de um GPR (adaptado de DAVIS; ANNAN, 1989)	16
Figura 3	Exemplificação de um levantamento GPR e ilustração de um radargrama (adaptado de DAVIS; ANNAN, 1989)	17
Figura 4	Ilustração de vazamento de combustíveis em um posto (adaptado de GIIMANN, 2003).	21
Figura 5	Gráficos dos resultados da pesquisa bibliográfica	26
Figura 6	Equipamento GSSI SIR-3000 e antena de 400 MHz	29
Figura 7	Seqüência de processamento	30
Figura 8	Janela de bandapassante	32
Figura 9	Localização do Posto São Paulo (em vermelho) – Abaetetuba/PA (adquirida e adaptada de GOOGLE MAPS)	33
Figura 10	Disposição dos perfis no Posto São Paulo	34
Figura 11	Localização do Posto Bráz de Aguiar (em vermelho) – Belém/PA (adquirida e adaptada de GOOGLE MAPS)	35
Figura 12	Disposição dos perfis no Posto Bráz de Aguiar.	36
Figura 13	Perfil 1 do Posto São Paulo. (A) Dado Bruto. (B) Processado. (C) Migrado. (D) Interpretado.	38
Figura 14	Perfil 2 do Posto São Paulo. (A) Dado Bruto. (B) Processado. (C) Migrado. (D) Interpretado.	40
Figura 15	Perfil 3 do Posto São Paulo. (A) Dado Bruto. (B) Processado. (C) Migrado. (D) Interpretado.	42
Figura 16	Perfil 4 do Posto São Paulo. (A) Dado Bruto. (B) Processado. (C) Migrado. (D) Interpretado.	44
Figura 17	Perfil 5 do Posto São Paulo. (A) Dado Bruto. (B) Processado. (C) Migrado. (D) Interpretado.	45
Figura 18	Perfil 1 do Posto Bráz de Aguiar. (A) Dado Bruto. (B) Processado. (C) Migrado. (D) Interpretado.	47
Figura 19	Perfil 2 do Posto Bráz de Aguiar. (A) Dado Bruto. (B) Processado. (C) Migrado. (D) Interpretado.	48
Figura 20	Perfil 3 do Posto Bráz de Aguiar. (A) Dado Bruto. (B) Processado. (C) Migrado. (D) Interpretado.	50
Figura 21	Perfil 4 do Posto Bráz de Aguiar. (A) Dado Bruto. (B) Processado. (C) Migrado. (D) Interpretado.	51
Figura 22	Perfil teste 1 do Posto Bráz de Aguiar. (A) Dado Bruto. (B) Processado. (C) Migrado. (D) Interpretado.	52
Figura 23	Perfil teste 2 do Posto Bráz de Aguiar. (A) Dado Bruto. (B) Processado. (C) Migrado. (D) Interpretado.	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	METODOLOGIA	13
2.1	MÉTODO GPR	13
2.1.1	Histórico	13
2.1.2	Fundamentos Teóricos	15
2.2	CARACTERÍSTICAS DOS HIDROCARBONETOS E INTERAÇÃO COM O MEIO GEOLÓGICO	21
2.3	REVISÃO ESTRUTURADA DA LITERATURA	23
2.3.1	Fonte dos Dados Bibliográficos	24
2.3.2	Caracterização e Seleção dos Artigos	24
2.3.3	Casos Históricos Selecionados	26
2.4	LEVANTAMENTO DE CAMPO	28
2.4.1	Equipamento	28
2.4.2	Processamento GPR	29
2.4.3	Apresentação das Áreas de Estudo	32
2.4.3.1	Posto São Paulo (em atividade)	33
2.4.3.2	Posto Bráz de Aguiar (desativado)	35
3	RESULTADOS	37
3.1	POSTO SÃO PAULO (EM ATIVIDADE)	37
3.2	POSTO BRÁZ DE AGUIAR (DESATIVADO)	46
4	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	53
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

1 INTRODUÇÃO

Da água existente no planeta Terra, 97,5% são salgadas. Somente 2,5% estão disponíveis como água doce. Deste último, 0,3% forma os rios, sendo sua utilização e tratamento muitas vezes oneroso; 29,9% correspondem à água subterrânea, em parte a salvo da ação prejudicial humana, o que não ocorre com os rios; 68,9% não podem ser utilizados, pois se encontram congelados (geleiras); 0,9% é oriundo de outros reservatórios (FRANCISCO, 2004).

O aproveitamento criterioso da água subterrânea, como fator essencial para o desenvolvimento, enfrenta pelo menos três desafios, refere-se ao aprimoramento. O primeiro desafio, no campo hidrogeológico da exploração, avaliação e exploração da água subterrânea. O segundo, à proteção e da conservação, já que a contaminação da água subterrânea pelo homem começou há cerca de 30 anos nos países mais desenvolvidos e já ocorre em muitos locais do Brasil. O terceiro desafio, conseqüentemente, está associado à necessidade de conhecimentos para bem planejar e administrar tantos os diversos usos quanto a proteção da água subterrânea (FEITOSA; MANOEL FILHO, 1997).

A Geofísica pode possibilitar prevenção, remediação e monitoramento de impactos ambientais (como lixões, cemitérios, postos de combustíveis, curtumes, rochas e materiais radioativos), que normalmente contaminam o solo, subsolo e recursos hídricos.

Crescentes casos de contaminação de água subterrânea por vazamentos de hidrocarbonetos estão muitas vezes associados ao fim da vida útil dos tanques subterrâneos armazenadores de combustíveis que é de aproximadamente 20 anos, podendo ser reduzida para 10 anos se o tanque encontrar-se desprotegido (sem jaquetamento). Apesar dos aquíferos serem muito menos vulneráveis à contaminação do que as águas superficiais, uma vez produzida a contaminação, a recuperação, dependendo do tipo de contaminante, pode levar muitos anos e até mesmo tornar-se economicamente inviável (ALMEIDA, 2007; FEITOSA; MANOEL FILHO *op. cit.*).

Na aplicação da Geofísica, o uso do GPR (*Ground Penetrating Radar*) em estudos ambientais pode ser considerado vantajoso, pois permite a execução de perfis contínuos e com alta resolução, apresenta facilidade de aquisição de dados, realização de medidas com diversas frequências e versatilidade do equipamento em campo, possibilitando sua aplicação inclusive em áreas urbanas. Quando comparada com outras técnicas de investigação, este método possui uma baixa relação de custos/benefício aliada à rapidez de execução.

Neste trabalho foi avaliado o emprego do Método Eletromagnético (EM) GPR em áreas sujeitas à contaminações por derivados de hidrocarbonetos (combustíveis em postos de serviços). Foram investigados dois postos de serviços: Posto São Paulo, em Abaetetuba e Posto Bráz de Aguiar, me Belém. O primeiro ainda em operação e, o segundo, já desativado e tendo sido parcialmente remediado.

2 METODOLOGIA

2.1 Método GPR

2.1.1 Histórico

O Radar (*RA*dio *D*etection *A*nd *R*anging) de Penetração no Solo, também é conhecido como radar de prospecção geotécnica (em Portugal), *earth sounding radar*, *georadar*, *ground probing radar*, *radar terrestre penetrant*, *subsurface radar*, *surface penetrating radar*, tendo como principal e mais conhecida nomenclatura *ground penetrating radar* – GPR ou, simplesmente, radar.

O radar consiste de uma metodologia introduzida por Christian Hülsmeier (aos 22 anos de idade) baseada no uso de sinais eletromagnéticos para localização de objetos enterrados em subsuperfície patenteada na Alemanha em 1904 (Patente nº 165546) e nos EUA em 1906 (Patente nº 810150). Somente em 1910 ocorreu a primeira publicação sobre a utilização dessa metodologia por Gotthelf Leimbach e Heinrich Löwy ao descrever uma pesquisa (Patente Alemã nº 237944) empregando sinais eletromagnéticos para detectar artefatos enterrados (BAUER 2005a; 2005b).

A primeira patente do uso do radar de pulsos para investigar estruturas soterradas foi obtida por Hülsenbeck em 1926 (Patente alemã nº 489434). Já Stern, no mesmo ano (1926), em um projeto criado e desenvolvido na Áustria, fez o primeiro equipamento de GPR aplicado com sucesso no mapeamento de geleiras (OLHOEFT, 1996).

Entre 1950 e 1960, as forças armadas dos EUA começaram a desenvolver sistemas de GPR para localizar túneis escavados e usados pelos Vietcongs. Durante a década de 1960, o sistema desenvolvido por Stern foi adaptado por cientistas americanos e usado na investigação das propriedades elétricas da

subsuperfície lunar durante o Projeto Apolo 17 (BORGES, 2007; SIMMONS* *et al.* 1972 *apud* OLHOEFT *op. cit.*).

Em meados de 1970, Rex Morey e Art Drake fundaram a *Geophysical Survey Systems Incorporated* (GSSI) e disponibilizaram de forma comercial o GPR, que antes era desenvolvido pelos próprios usuários. A partir daí, outras empresas vão surgindo, como a *A-Cube Inc. Geological Survey* (DAVIS; ANNAN, 1989).

Ao longo da década de 1980, com o aumento da potência e sofisticação da digitalização do instrumento de GPR, o método se apresentou como uma ferramenta muito útil em estudos de engenharia civil, geologia, arqueologia, criminalística e aplicações em estudos ambientais, tais como contaminações por lixões e hidrocarbonetos tiveram maior divulgação de 1990 a 2000 (DANIELS, 2004).

Atualmente, o radar passa por um *boom* em Geofísica, mesmo sendo uma metodologia bastante antiga. Esse *boom* deve-se principalmente à evolução dos recursos de processamento (*softwares* e metodologias) oriundos da Sísmica. O GPR também conta com a vantagem de ser uma técnica não destrutiva e não invasiva, além de fornecer seções amigáveis à geologia e possuir um vasto leque de aplicações que podem variar de acordo com a frequência da antena utilizada.

Em suma, as principais aplicações do GPR são estudos de *permafrost* (gelo), mapeamento de feições geológicas, geotecnia (edificações civis, asfalto, tubulações, pistas de aterrissagem, pisos e calçadas), meio ambiente (lixões, aterros sanitários, curtumes, postos de serviços, refinarias, fábricas e cemitérios), geofísica legal (criminalística, forense, inspeções e identificações de bombas enterradas), arqueologia (utensílios e edificações de povos antigos) e paleontologia.

* SIMMONS, G.; STRANGWAY, D. W.; BANNISTER, L.; BAKER, R.; CUBLEY, D.; LA TORRACA, G.; WATTS, R. The surface electrical properties experiment. **Lunar Geophysics**, p. 258-271. 1972.

2.1.2 Fundamentos Teóricos

O Radar de Penetração no Solo é um método geofísico baseado na propagação de ondas EM de alta frequência. A partir de uma antena transmissora, são emitidas ondas de energia EM na faixa de 10 MHz a 1 GHz. Quando a onda eletromagnética atinge a interface entre materiais geológicos que apresentam propriedades EM distintas, parte da sua energia é refletida em direção à superfície, sendo captada pela mesma antena ou por uma segunda antena receptora (DAVIS; ANNAN *op. cit.*).

Um sistema de GPR, basicamente, consiste de um gerador de sinal (caixa de controle), duas antenas, sendo uma de transmissão (Tx) e outra recepção (Rx), e um *datalogger*, que tem capacidade de gravação digital. Em alguns sistemas, uma única antena funciona tanto como receptor e transmissor (modo **monoestático**); quando se usam duas antenas separadas, sendo uma o transmissor e outra o receptor, também podendo ser uma antena transmissora e uma receptora dentro de uma mesma unidade, o modo denomina-se **biestático** (BORGES *op. cit.*).

Em geral, o radar emprega um trem de pulsos (Figura 1). O período interior do pulso (**PIP**) é T , o comprimento do pulso é τ e a diferença entre as posições do τ na transmissão e recepção dos pulsos é Δt . A antena de transmissão gera um trem de ondas na banda das radiofrequências que se propagam afastando-se num feixe cônico a uma velocidade no ar 300.000 km/s (0,3 m/ns) (MAHAFZA, 2000).

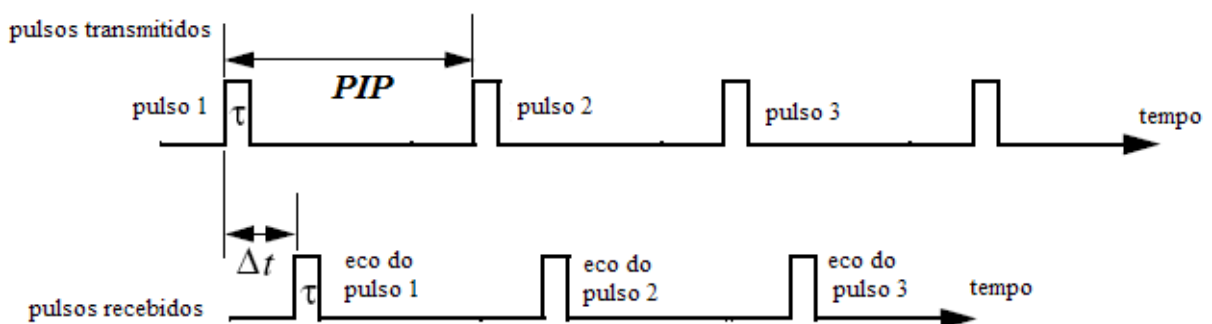


Figura 1 – Ilustração de trem de pulsos (adaptado de MAHAFZA, 2000).

A propagação do sinal de radar em subsuperfície depende da frequência do sinal emitido e das propriedades elétricas do meio. No caso dos materiais geológicos, as propriedades elétricas são controladas principalmente pela mineralogia dos constituintes, presença de argilas, conteúdo de minerais metálicos e pelo conteúdo de água. Havendo contraste em pelo menos de uma das propriedades físicas (condutividade elétrica σ , constante dielétrica K e permeabilidade magnética μ) dos materiais em subsuperfície, parte do sinal é refletida, sendo recebida pela antena receptora que dirige o sinal recebido do subsolo ao receptor. O receptor amplifica os retornos e prepara-os para o processamento do sinal. A extração da informação do alvo é executada pelo bloco do processador do sinal. O posicionamento do alvo é computada medindo o tempo de trânsito da onda, que é o tempo que um pulso leva para percorrer o trajeto entre a antena transmissora, o alvo investigado e a antena receptora (Figura 2).

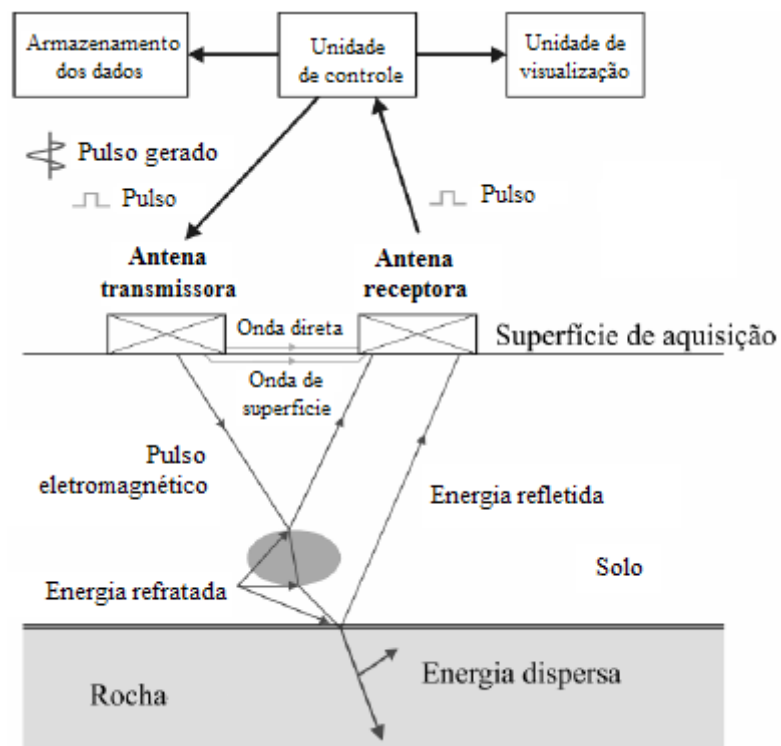


Figura 2 – Esquema de funcionamento de um GPR (adaptado de DAVIS; ANNAN, 1989).

A seção resultante, o radargrama, é formada por cada traço (*scan*) representativo dos tempos de chegada dos pulsos refletidos, bem como o pulso transmitido pelo ar mais a onda direta que se propaga pelo solo. As reflexões primárias se apresentam em tempos posteriores (ou maiores) no *scan*. Conforme é deslocada a antena sobre o terreno, são registrados diferentes *scans* em diferentes pontos. O conjunto de *scans* posicionados lado a lado (Figura 3), na seqüência de suas aquisições, forma o radargrama, que é uma exibição análoga à seção sísmica (sismograma) (DAVIS; ANNAN *op.cit.*).

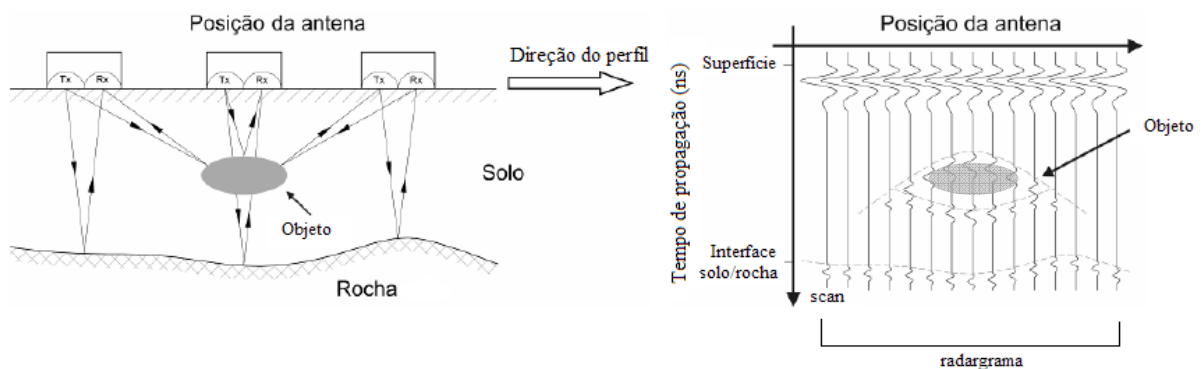


Figura 3 – Exemplificação de um levantamento GPR e ilustração de um radargrama (adaptado de DAVIS; ANNAN, 1989).

A partir do radargrama se pode obter a profundidade das interfaces de reflexão facilitando assim a interpretação do perfil e fornecendo uma aproximada localização dos alvos. Para isso é necessário conhecer, essencialmente, dois parâmetros: o tempo de trânsito entre o início da propagação e a chegada da onda refletida e a velocidade de propagação da onda.

O tempo de trânsito é armazenado no *datalogger* durante a aquisição dos dados. Já a velocidade de propagação é basicamente controlada pela constante dielétrica dos materiais em subsuperfície, que é a razão entre a permissividade elétrica do material e a do vácuo ($8,854 \times 10^{-12}$ F/m). Em um meio não magnético, a velocidade de propagação pode ser estimada através da expressão

$$V = \frac{c}{\sqrt{K}}, \quad (1)$$

sendo c a velocidade da propagação da onda EM no vácuo (velocidade da luz 3×10^8 m/s).

A profundidade de penetração da onda, por sua vez, é controlada pela sua frequência e pela resistividade elétrica do meio onde ela se propaga. A frequência é diretamente proporcional à resolução e inversamente proporcional à penetração da onda no meio. Para uma determinada velocidade V , à medida que a frequência f aumenta, o comprimento de onda diminui, ou seja, pode-se escrever:

$$V = \lambda f . \quad (2)$$

A equação da onda para o campo elétrico \vec{E} é dada por

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu \frac{\partial(\sigma \vec{E})}{\partial t} + \mu \frac{\partial^2(\epsilon \vec{E})}{\partial t^2} , \quad (3)$$

sendo ∇^2 o operador Laplaciano, μ a permeabilidade magnética, σ a condutividade elétrica (inverso da resistividade), ϵ a permissividade elétrica e t o tempo.

A solução geral para a equação da onda é representada por

$$E = E_0 e^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \beta z)} , \quad (4)$$

em que E_0 é a amplitude máxima da onda, z a profundidade e α e β são parâmetros que contêm as propriedades EM do meio (resistividade elétrica, permissividade elétrica e permeabilidade magnética). A primeira exponencial controla a atenuação da onda, enquanto a segunda, a sua propagação.

Durante a propagação da onda eletromagnética, sua energia é refletida e refratada quando encontra variações nas propriedades eletromagnéticas do meio.

Essas propriedades são normalmente acopladas em um parâmetro denominado de impedância intrínseca, definido por

$$Z = \frac{\sqrt{i\omega\mu}}{\sqrt{\sigma + i\omega\varepsilon}}. \quad (5)$$

O contraste entre as propriedades eletromagnéticas ou o contraste entre as impedâncias intrínsecas dos meios controla a quantidade de energia refletida. Essa quantidade pode ser avaliada através do coeficiente de reflexão definido por

$$CR = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (6)$$

em que os índices 1 e 2 referem-se aos meios 1 e 2 separados por uma interface.

A impedância intrínseca Z é aproximada por $\sqrt{\mu/\varepsilon}$, quando a condutividade (σ) for pequena (menor que 10^{-3}). Nesse caso, o coeficiente de reflexão pode ser estimado por

$$CR = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}}. \quad (7)$$

Teoricamente, a resolução pode ser estimada tomando-se 1/4 do comprimento de onda. Desse modo, para uma onda de 100 MHz e 0,08 m/ns de velocidade, é possível reconhecer corpos de dimensões superiores a 0,2 m; enquanto que para uma onda de 400 Mhz e mesma velocidade, é possível identificarem-se corpos de dimensões superiores a 0,05 m (5 cm) (AL-QUADI; LAHOUAR, 2005; CLARK *et al.* 2001; DAVIS; ANNAN *op. cit.*).

Valores de condutividade elétrica e velocidade da onda EM em alguns materiais são listados na Tabela 1.

Material	σ (mS/m)	v (m/ns)	Material	σ (mS/m)	v (m/ns)
Água fresca	0	0,30	DNAPL	10^{-7}	0,19
Água do mar	0,5	0,033	Ferro	10^9	0,3
Areia seca	3×10^3	0,01	Gasolina	10^{-7}	0,22
Areia saturada	0,01	0,15	Metanol	34	0,052
Argila seca	0,1-1	0,06	PVC	0	0,1 – 0,17
Argila saturada	0,1 - 1	0,06	Siltito saturado	100	0,05
Asfalto	0	0,1 – 0,12	Solo arenoso seco	0,14	0,18
Benzeno	10^{-7}	0,2	Solo arenoso saturado	6,9	0,06
Concreto saturado	0	0,08	Solo argiloso seco	0,27	0,19
Concreto seco	0	0,13	Solo argiloso saturado	1 – 10	0,09

Tabela 1 – Tabela de condutividades e velocidade (adaptada de DAVIS; ANNAN, 1989).

2.2 Características dos Hidrocarbonetos e Interação com o Meio Geológico

Hidrocarbonetos são compostos químicos orgânicos formados, essencialmente, por hidrogênio (H) e carbono (C), podendo ter em suas cadeias átomos de oxigênio (O), nitrogênio (N) e enxofre (S).

Os principais derivados de hidrocarbonetos utilizados como combustíveis são: a gasolina (C_8H_{18}), o óleo diesel ($C_{12}H_{26}$), o querosene ($C_{16}H_{34}$) e o querosene de aviação (C_9H_{20}). O álcool, etanol, (C_2H_5OH) mesmo possuindo em sua fórmula molecular átomos de hidrogênio (H) e carbono (C), por estar ligado à um grupamento hidroxila (OH), pertence ao grupo dos Alcoóis, que é um subgrupo dos hidrocarbonetos.



Figura 4 – Ilustração de vazamento de combustíveis em um posto (adaptado de GIIMANN, 2003).

A contaminação de águas subterrâneas por combustíveis derivados da destilação do petróleo tem sido objeto de crescente pesquisa no Brasil. Os compostos hidrocarbonetos monoaromáticos benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos (denominados BTEX), presentes nesses combustíveis, são extremamente tóxicos à saúde humana e podem inviabilizar a exploração de aquíferos por eles contaminados (CASSIDY, 2004).

Os compostos hidrocarbonetos são classificados como “compostos de fase líquida não aquosa” (*nonaqueous phase liquids*, NAPLs), devido as suas propriedades físicas e químicas, são imiscíveis em água. Eles são divididos em duas classes: “compostos de fase líquida leve não aquosa” (*light nonaqueous phase liquid*, LNAPL), representados, principalmente, pelos BTEX e “compostos de fase líquida densa não aquosa” (*dense nonaqueous phase liquid*, DNAPL) caso dos óleos lubrificantes (MOREIRA; DOURADO, 2005; BREWSTER; ANNAN, 1994).

Os maiores problemas de contaminação são atribuídos aos hidrocarbonetos monoaromáticos (LNAPL), que são os constituintes mais solúveis e mais móveis da fração da gasolina. Os valores máximos permitidos para os diferentes hidrocarbonetos monoaromáticos, de acordo com o estabelecido pela Portaria nº 518/GM de 25/03/2004, são: 5 µg/l para o benzeno, 170 µg/l para o tolueno, 200 µg/l para o etilbenzeno e 300 µg/l para o xileno.

Os compostos BTEX são poderosos depressores do sistema nervoso central, apresentando toxicidade crônica, mesmo em pequenas concentrações (da ordem de µg/l). O benzeno é reconhecidamente o mais tóxico de todos os BTEX. Trata-se de uma substância comprovadamente carcinogênica, se ingerida, mesmo em baixas concentrações, durante períodos não muito longos de tempo. Uma exposição aguda (altas concentrações em curtos períodos) por inalação ou ingestão pode causar até mesmo a morte de uma pessoa. O padrão de potabilidade do benzeno estabelecido pelo Ministério da Saúde é de 5 µg/l, mas sua concentração na água em contato com gasolina pode chegar a 312 µg/l (SILVA *et al.* 2002).

Como a gasolina produzida no país contém de 22% a 26% de álcool, as interações entre o etanol e os compostos BTEX podem causar um comportamento da pluma de contaminação daquele observado em outros países onde a gasolina não contém etanol. A presença de etanol pode facilitar a dissolução dos BTEX em

água, aumentos da mobilidade dos BTEX dissolvidos na água subterrânea e reduzir a biodegradação natural dos BTEX. As plumas no Brasil podem, portanto, ser maiores, se deslocar mais rapidamente, bem como por áreas maiores e persistirem mais ao tempo do que nos países em que o álcool não é misturado à gasolina. (CORSEUIL; ALVAREZ, 1996; FERNANDES; CORSEUIL, 1997).

Os combustíveis derivados do petróleo têm uma elevada resistividade elétrica. Por esse motivo, ao serem derramados no solo elevam a resistividade do ambiente. Com o passar do tempo, a ação de bactérias produzem a biodegradação dos compostos orgânicos dos combustíveis. Esse processo forma ácidos que dissolvem íons do material do subsolo, fazendo com que a resistividade elétrica diminua bastante, o que transforma o ambiente em um bom condutor de eletricidade.

Em resumo, o derramamento de combustíveis derivados de hidrocarbonetos produz plumas de contaminação que têm sido associadas, em levantamentos geofísicos, tanto a valores elevados de resistividade elétrica, como a baixíssimos valores de resistividade. Exemplo de pluma resistiva é descrita por Benson *et al.* (1997), enquanto exemplo de pluma condutiva pode ser encontrado em Sauck *et al.* (1998).

2.3 Revisão Estruturada da Literatura

Nesta seção se apresentam os resultados de uma revisão estruturada da literatura disponível em bancos de dados eletrônicos a fim de se levantar dados sobre a aplicação do GPR em ambientes contaminados por hidrocarbonetos.

A revisão foi dividida em quatro etapas. A primeira envolveu o estabelecimento da fonte de pesquisa da literatura. A segunda, a seleção e a captura dos artigos com base em critérios de inclusão e exclusão. A terceira, a caracterização desses artigos. Finalmente a quarta etapa consistiu na descrição dos artigos capturados.

2.3.1 Fontes dos Dados Bibliográficos

A literatura pesquisada consistiu de artigos publicados sobre GPR, em fontes científicas. A pesquisa foi realizada nos bancos de dados eletrônicos Blackwell (www.blackwell-synergy.com), Informa World (www.informaworld.com), Pubmed (www.pubmed.gov), Science Direct (www.sciencedirect.com), Scielo (www.scielo.org) e Scitation (scitation.aip.org), usando-se as palavras-chave em língua inglesa “*earth sounding radar*”, *georadar*, “*ground penetrating radar*”, “*ground probing radar*”, “*surface penetrating radar*” e “*subsurface radar*”, uma vez que, normalmente, os trabalhos científicos possuem um resumo do trabalho neste idioma, o que amplia a população a ser amostrada.

As palavras-chave foram escolhidas de acordo com as várias nomenclaturas que o GPR recebe, evitando assim a perda de material bibliográfico. Os bancos de dados foram selecionados de acordo com o número de revistas científicas presentes em seus catálogos.

No total foram identificadas 1.909 referências nos bancos de dados eletrônicos, destas, 996 estavam catalogadas no Scitation, 497, no Science Direct, 300, no Blackwell, 86, no Pubmed, 21, no Informa World e 9, no Scielo em Dezembro de 2007.

2.3.2 Caracterização e Seleção dos Artigos

Os artigos encontrados foram caracterizados segundo:

- (a) o idioma, sendo considerados artigos em qualquer idioma desde que este apresentasse um resumo do trabalho em língua inglesa;
- (b) tipo de estudo, levantamento real, sítio controlado (área de testes);
- (c) modelagem (analógica e numérica);
- (d) data de publicação, sem restrição de período;
- (e) tipo de publicação, que compreendeu artigo indexado, dissertações e teses.

Os artigos selecionados foram apenas os que atendiam aos critérios de inclusão e exclusão a seguir detalhados.

✚ Critérios de inclusão:

- ✓ Estudos geofísicos, geológicos e de engenharia com o GPR;
- ✓ Estudos de contaminações do solo e/ou água subterrânea por hidrocarbonetos (associados e derivados do petróleo e álcool combustível);
- ✓ Estudos de derrames de hidrocarbonetos, independente da origem dos vazamentos.

✚ Critérios de exclusão:

- ✓ Artigos de revisão, por não serem fontes primárias de estudos;
- ✓ Estudos de modelagem (analógica e numérica), por não reportarem casos reais;
- ✓ Estudos em sítios controlados, por serem somente simulações de condições reais;
- ✓ Aplicações do GPR em áreas impactadas por contaminações por hidrocarbonetos em que o objetivo principal não fosse de caráter ambiental;
- ✓ Estudos de contaminações por hidrocarbonetos decorrentes de derrames ocorridos fora do continente (*off shore*, e.g. acidentes com navios petroleiros).

Os trabalhos foram avaliados segundo as variáveis estabelecidas, o que possibilitou a seleção do material bibliográfico. Do total de referências identificadas, 17 artigos foram capturados, sendo que 9 artigos estavam catalogados no Science Direct, 5 no Blackwell, 2 no Scitation e 1 no Scielo. Não foram encontrados artigos que atendessem aos critérios de inclusão nos bancos de dados Pubmed e Informa World.

Os artigos capturados provêm de 6 países, sendo: 7 artigos (41,1%) dos Estados Unidos, 3 artigos (17,6%) do Brasil, 3 artigos (17,6%) do Canadá, 2 artigos (11,7%) da Itália, 1 artigo (5,8%) da Inglaterra e 1 artigo (5,8%) da Nova Zelândia.

Dentre estes, 16 (94,1%) artigos estão publicados em inglês e 1 (5,8%) em português. Há 6 (35,2%) artigos sobre levantamentos reais, 5 (29,4%) sobre sítios controlados, 5 (29,4%) sobre modelagens (sendo 3 ou 17,6% analógicas e 2 ou 11,7% numéricas) e 1 (5,8%) sobre estudo em sítio controlado com modelagem numérica.

As datas das publicações variam de 1994 a 2007, sendo 1 publicado em 1994, 1 em 1995, 1 em 1997, 1 em 1998, 4 em 2000, 1 em 2002, 2 em 2003, 2 em 2004, 1 em 2006 e 3 em 2007. Todos são artigos indexados (Figura 11).

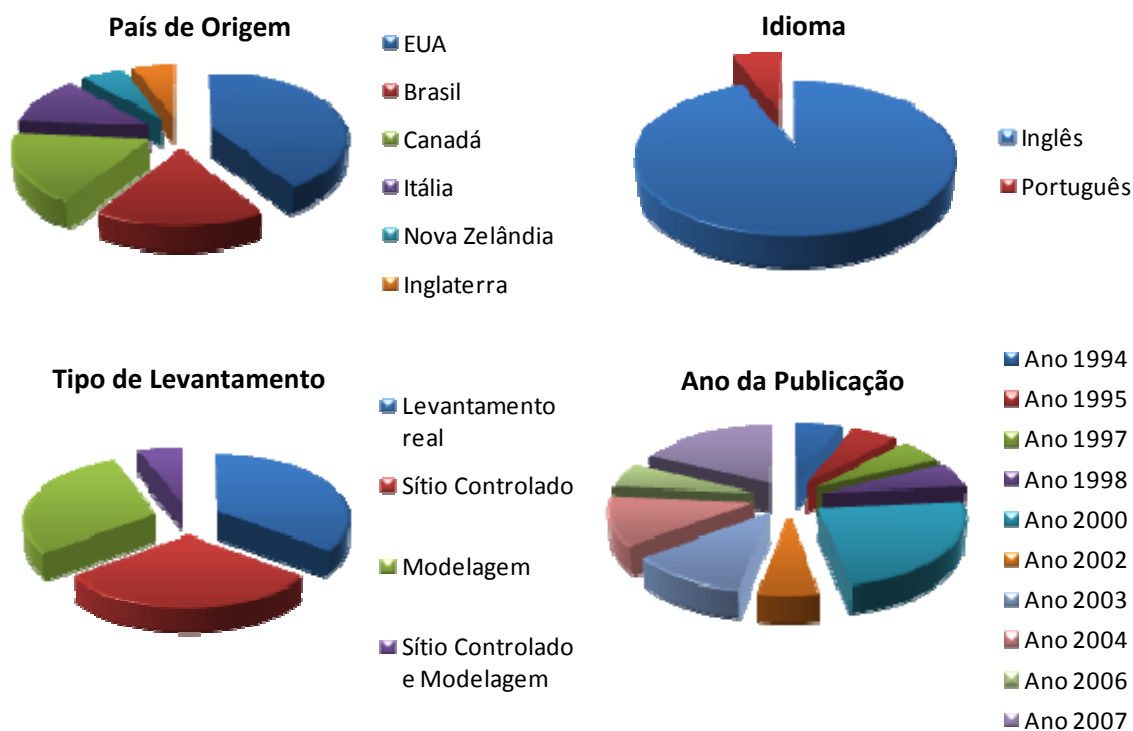


Figura 5 – Gráficos dos resultados da pesquisa bibliográfica.

2.3.3 Casos Históricos Selecionados

Dos 17 artigos capturados, 11 foram descartados pelos critérios de exclusão, sendo 6 artigos de modelagem de situações ideais, 4 artigos sobre sítios controlados por serem somente simulações de condições reais e 1 estudo em sítio controlado com modelagem.

Entre os 6 artigos selecionados 2 (33,3%) são do Brasil, 2 (33,3%) dos Estados Unidos, 1 (16,6%) da Itália e 1 (16,6%) da Nova Zelândia. Os artigos selecionados descrevem levantamentos GPR em ambientes contaminados por combustíveis de aviação, diesel, gasolina, óleo bruto e óleo lubrificante.

Atekwana *et al.* (2000) realizaram um estudo em uma refinaria de óleo bruto em Carson City, Michigan (EUA). As contaminações foram oriundas de infiltrações dos tanques e tubulações de hidrocarbonetos e puderam ser observadas em um lago próximo à área. A análise dos dados mostra regiões de baixa resistividade aparente caracterizada por zonas de sombreamento nas extremidades da área estudada. Uma região central de alta resistividade aparente e um refletor forte subparalelo foram encontrados logo abaixo do nível freático. Segundo os autores, o LNAPL está associado às plumas que formam um sistema dinâmico e têm um caráter evolutivo em tempo e posição dentro das mesmas.

Bermejo *et al.* (1997) realizaram um estudo na Base da Força Aérea de Wurtsmith em Oscoda, Michigan (EUA). A Base possui mais de oitenta locais contaminados conhecidos, incluindo cinco plumas bem estabilizadas que foram originadas por derramamentos durante manuseio e vazamento de tanques com combustíveis de aviação. Os perfis de GPR revelam um refletor particularmente forte que representa o nível freático e abaixo dele, uma pluma caracterizada por uma zona de atenuação notável (zona de sombra) que é consistente com modelos geoeletricos de plumas de LNAPL. Através do levantamento GPR conseguiu-se descobrir uma nova pluma de contaminação e mapear a extensão lateral da mesma.

Borges *et al.* (2006) apresentam seções GPR de uma área de disposição de resíduos de sulfonação de óleos lubrificantes (DNAPL) usados em Ribeirão Preto, São Paulo (Brasil). Os resíduos foram dispostos em 4 cavas sem receber nenhum tipo de impermeabilização e recobertas por solo após a recepção de resíduos por vários anos (de meados de 1960 até 1995). O GPR mostrou eficiência no mapeamento da geometria das cavas, identificando os limites e a base das cavas preenchidas com resíduos provenientes dos óleos lubrificantes, uma vez que refletores mostraram um aumento na amplitude provocado pelo aumento da resistividade elétrica do resíduo, que diminuiu abaixo dos mesmos.

Castro e Branco (2003) monitoraram a evolução de zonas contaminadas por gasolina em um posto de combustíveis em Fortaleza, Ceará (Brasil). A área de estudo consiste de sedimentos inconsolidados (seixo, areia, silte e argila). O posto possui um histórico de contaminação da água subterrânea por gasolina ocorrida em 1998. O levantamento foi realizado durante a fase de remediação que iniciou em 2000, quando se encontrou uma pluma de gasolina durante a escavação de um

túnel de metrô nas proximidades do posto. Os radargramas mostram a presença de LNAPL na zona vadosa através de fortes atenuações do sinal próximo à superfície.

Orlando (2002) realizou um estudo na Província de Pavia, Lombardia (Itália). Após um vazamento em um oleoduto, que ocasionou contaminação por gasolina e diesel, foram realizadas medidas com o GPR no local. Os dados mostraram que com o GPR foi possível monitorar a movimentação dos hidrocarbonetos desde o derrame no solo até a contaminação do nível freático. A presença do LNAPL sobre o nível freático é caracterizada por reflexões fortes e contínuas.

Pettersson e Nobes (2003) fizeram um estudo na Base Scott, estação de pesquisa permanente, situada na Ilha de Ross, região do Mar de Ross (Antártida), sobre *permafrost* (solo formado por sedimentos inconsolidados, rochas e gelo que permanece sempre congelado). Na base, o armazenamento de tanques de combustíveis acabou produzindo contaminação. Os resultados do levantamento com GPR não foram satisfatórios, uma vez que não se obteve informações acerca da localização das áreas contaminadas, devido à ausência de contraste nas propriedades elétricas. Entretanto o GPR forneceu a estrutura da subsuperfície e ajudará a confecção de modelos de fluxo, que darão um retrato mais preciso do transporte e posicionamento dos contaminantes.

Analisando o material bibliográfico selecionado observou-se que apenas 1 (16,66%) estudo (Castro & Branco *op. cit.*) trata de contaminações provenientes de postos de serviços em meio urbano.

2.4 Levantamento de campo

2.4.1 Equipamento

Para a realização dos levantamentos se utilizou o equipamento *TerraSIRch SIR (Subsurface Interface Radar) System-3000* da GSSI (*Geophysical Survey Systems, Inc.*) e uma antena monoestática blindada de 400 MHz (Modelo 5103).



Figura 6 – Equipamento GSSI SIR-3000 e antena de 400 MHz.

A profundidade de penetração e a resolução do levantamento GPR dependem de vários fatores, todavia, com uma antena de 400 MHz alcança-se uma profundidade de aproximadamente 4 m, assumindo-se a constante dielétrica igual a 5 (GSSI, 2003). O alcance (*range*) depende dos ajustes feitos no equipamento antes do levantamento, mas normalmente é de 50 ns, 512 amostras por *scan*, 64 *scans* por segundo, uma taxa de transmissão de 100 KHz e uma resolução de 16 bits (dado no formato *.dzt).

As medidas nas áreas dos postos foram realizadas ao longo de perfis no modo tempo. O controle da distância e posicionamento das medidas foi feito a partir da inserção de marcas no registro a intervalos de 5 m.

2.4.2 Processamento GPR

Os dados obtidos com o GPR foram processados com o *software* Sandmeier REFLEXW versão 4.2, pertencente à Faculdade de Geofísica/Instituto de Geociências da UFPA, com a finalidade de melhorar a visualização dos registros.

No presente estudo realizou-se a seqüência de processamento ilustrada no fluxograma apresentado na Figura 5 tanto com os dados de Abaetetuba quanto com os dados de Belém.

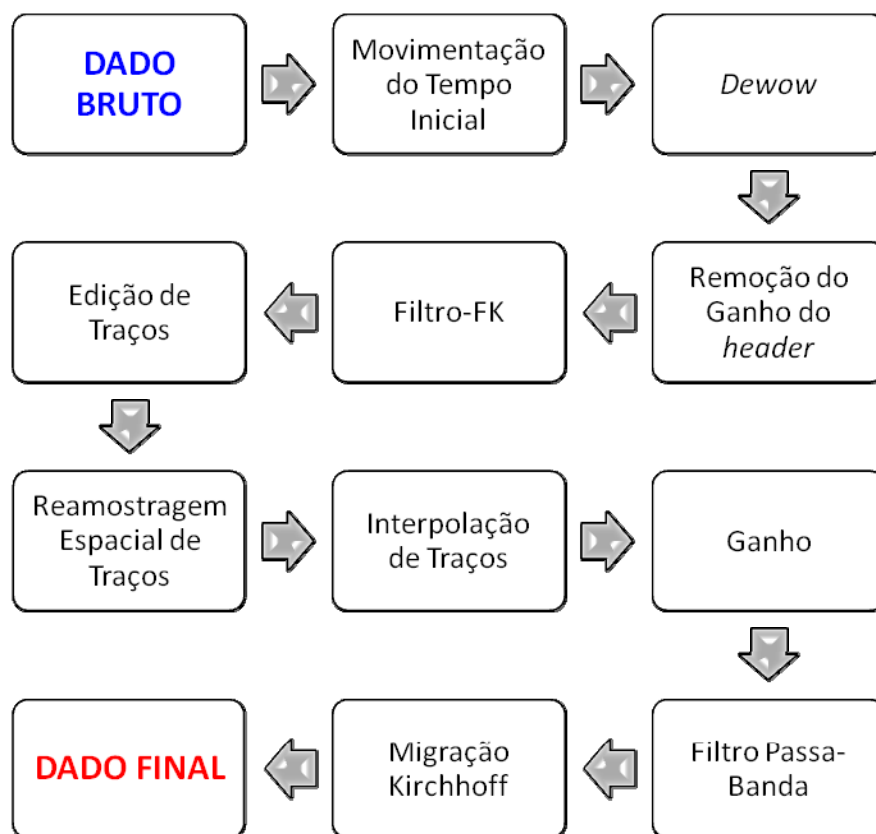


Figura 7 – Seqüência de processamento.

A etapa de pré-processamento incluiu a escolha da cor de exibição do perfil, *Rainbow 2*, que foi a que melhor se adequou ao objetivo do trabalho, que é a visualização de possíveis contaminantes e atenuações. A utilização da movimentação do tempo inicial também está incluída nessa etapa.

A **Movimentação do Tempo Inicial** foi realizada a fim de retirar dos dados os efeitos das ondas diretas do ar e do solo, i.e., realizar a correção do tempo zero. Para isso se utilizou a opção *move to negative times*. Os traços dos dados não são modificados no tempo, eles simplesmente são deslocados para cima (SANDMEIER, 1998; YELF, 2004).

Através do **Dewow** (*subtract-mean*), um valor médio (*running average*) é calculado para cada traço de acordo com a janela de tempo escolhida. Este filtro pode ser usado para eliminar uma boa parte de baixas freqüências associadas à saturação do sistema de registro devido às grandes amplitudes das ondas diretas no ar e no solo. Para este propósito, o intervalo da janela deve ser ajustado para

aproximadamente o tamanho do pulso principal (*wavelet*) através da onda direta que pode ser visualizada em *wiggle window*. Foi ajustado em 6 ns o valor da janela de tempo, em conformidade com o tamanho da *wavelet* (MESSINGER, 2004; STRANNEBY, 2000).

A **Remoção do Ganho do *header*** foi realizada, devido à necessidade de visualização dos dados em sua forma original sem o ganho que o aparelho automaticamente registra nos *headers* dos dados.

Eventos que mergulham (inclinação das camadas) em um plano (t,x) , sendo t o tempo e x a direção do perfil, podem ser separados em um plano (f,k) , em que f é a frequência e k é igual ao inverso de metro (1/m). A opção *generate fk-spectrum* realiza a Transformada de Fourier dos dados obtidos no domínio do tempo-espaco para o domínio de frequência-número de onda, fornecendo o espectro-fk correspondente. Por meio do **Filtro-FK** é possível suprimir tanto ruídos com um mergulho constante (caso das reverberações) como também enfatizar sinais com os mergulhos procurados (YILMAZ, 1987).

Um ponto negativo do Filtro-FK é que, apesar dele realçar certos objetos, ele também aumenta o ruído, fazendo com que alguns refletores de alta frequência se cruzem. Todavia, isso pode ser retirado com o processo de migração.

A correção do tempo em que as antenas estão paradas e ligadas (varredura em um mesmo ponto) foi feita na etapa **Edição de Traços**, que opera com os parâmetros fornecidos pelo usuário. Tais parâmetros são os números dos traços de início e término do perfil desconsiderando-se as zonas de investigação no mesmo ponto.

Após a Edição dos Traços é necessário colocar os dados nos seus tamanhos reais e fazer a **Reamostragem Espacial de Traços**, para que os mesmos fiquem com seus tamanhos e distribuições de informações em parâmetros reais. A **Interpolação de Traços** normaliza a escala horizontal do perfil coletado no modo tempo.

O **Ganho** utilizado foi o “decaimento de energia”. Este maximiza os contrastes, fornecendo uma imagem mais nítida das mudanças de propriedades da subsuperfície, porém ele também maximiza o ruído de baixa frequência.

Para retirada do ruído de baixa frequência dos dados utilizou-se um **Filtro Passa-Banda**. Como a antena utilizada foi de 400 MHz (frequência central), a concentração maior de energia no espectro se encontra entre a metade e o dobro desse valor, uma vez que a terra comporta-se como um filtro dispersando as frequências. O filtro foi desenhado usando as frequências 90, 140, 500 e 700 MHz e tem a forma trapezoidal conforme ilustrado na Figura 6. Os valores das frequências do filtro foram obtidos após vários testes com diversas frequências (BRANDWOOD, 2003).

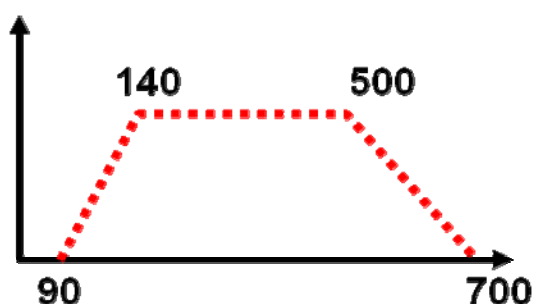


Figura 8 – Janela de bandapassante.

A **Migração Kirchhoff** foi utilizada para colapsar difrações e retirar possíveis eventos cruzados localizando os objetos em suas posições reais. Para realizar essa migração é necessário conhecer a velocidade das ondas, que pode ser estimada por meio das superposições de hipérboles. Neste procedimento é recomendado utilizar a hipérbole de menor abertura, para evitar ruído no processo de migração (CLAERBOUT; BLACK, 2005; YILMAZ *op. cit.*).

A partir da superposição de hipérboles, estimou-se a velocidade de 0,166 m/ns, para uma abertura de hipérbole igual a 20 (menor das aberturas das hipérboles).

2.4.3 Apresentação das Áreas de Estudo

O estudo foi realizado no posto São Paulo, localizado em Abaetetuba/PA e em um posto desativado, localizado na cidade de Belém/PA.

2.4.3.1 Posto São Paulo (em atividade)

O posto São Paulo está localizado na Av. D. Pedro II esquina com Av. São Paulo no bairro da Aviação, em Abaetetuba/PA (Figura 7). O posto foi implantado no ano de 1998, com tanques subterrâneos de ferro e bandeira branca.

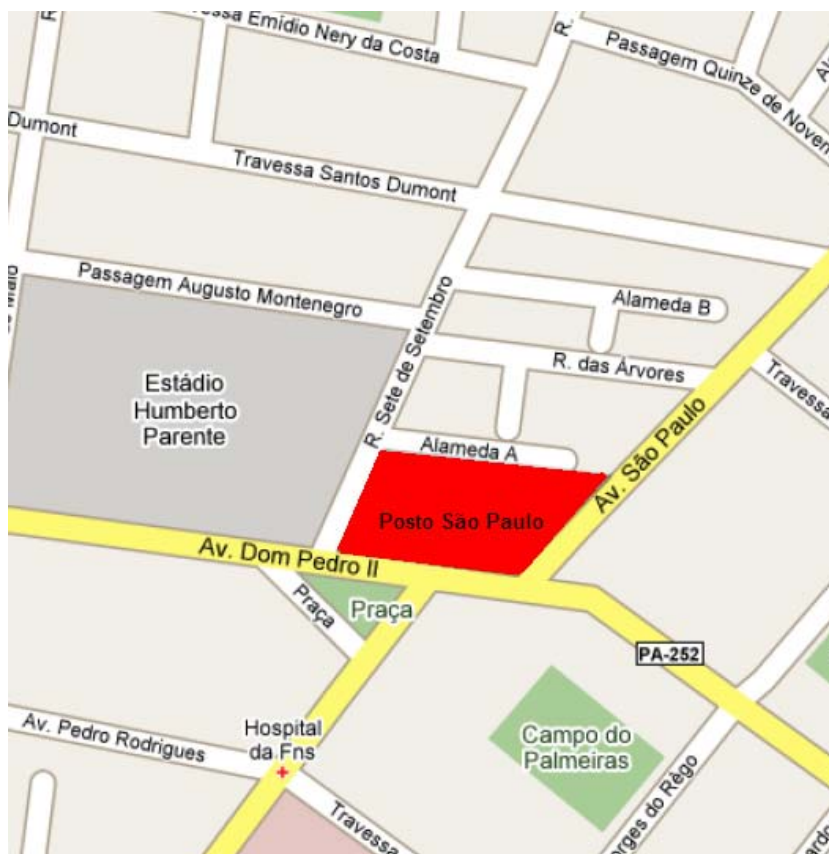


Figura 9 – Localização do Posto São Paulo (em vermelho) – Abaetetuba/PA (adquirida e adaptada de GOOGLE MAPS).

O posto comercializava gasolina comum (3 bombas), óleo diesel (2 bombas) e álcool etílico hidratado comum (1 bomba). Ele dispõe de 2 tanques subterrâneos de 15 m³ (diesel e álcool) e 1 tanque de 30 m³ (gasolina).

Os tanques de ferro implantados nunca foram trocados, o que pode estar causando problemas graves ao meio ambiente, embora o posto seja relativamente novo.

O levantamento GPR no Posto São Paulo (realizado em 25/08/06) consistiu de 5 perfis de caminhamento no modo temporal usando a técnica *common offset*, com marcações a cada 5 m, distribuídos de modo a cobrir o perímetro externo do posto, bem como sua área interna.

Perfil	Extensão
1	30 m
2	50 m
3	40 m
4	15 m
5	15 m

Tabela 2 – Dados do Posto São Paulo.

A Figura 8 ilustra a disposição dos perfis no perímetro do Posto São Paulo. A cor azul representa gasolina aditivada, a verde, gasolina comum e a laranja, o óleo diesel.

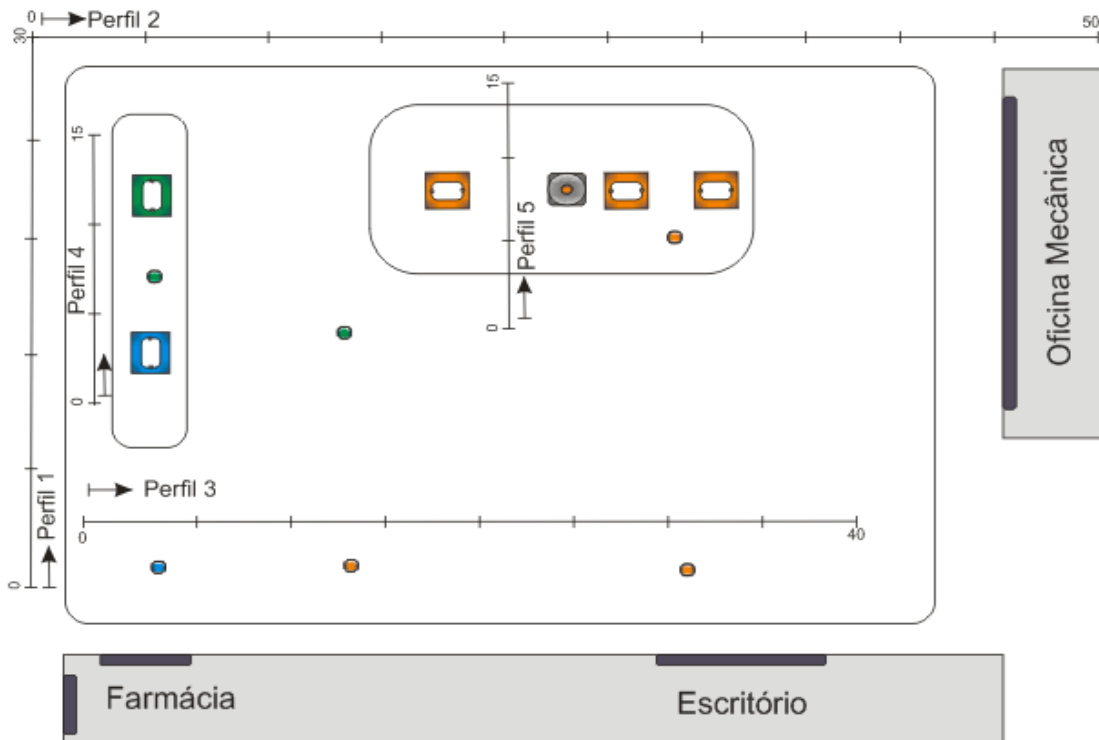


Figura 10 – Disposição dos perfis no Posto São Paulo.

2.4.3.2 Posto Bráz de Aguiar (desativado)

O Posto Bráz de Aguiar está localizado na Av. Bráz de Aguiar entre a TV. Dr. Moraes e a TV. Benjamin Constant no bairro de Nazaré em Belém/PA, mas se encontra desativado.

Eram comercializados neste posto gasolina comum (1 bomba), gasolina aditivada (2 bombas) e álcool etílico hidratado comum (2 bombas).

Tinha 2 tanques de 15 m³ (gasolina comum e álcool) e 1 tanque de 30 m³ (gasolina aditivada). O posto funcionava com bandeira Texaco (CHEVRON).

O posto funcionou por mais de 20 anos comercializando gasolina comum, gasolina aditivada e álcool etílico hidratado comum. Foi desativado em 2004 e passou por um processo de remediação. Esse processo consistiu de bombeamento para retirada de gás e líquidos subterrâneos.

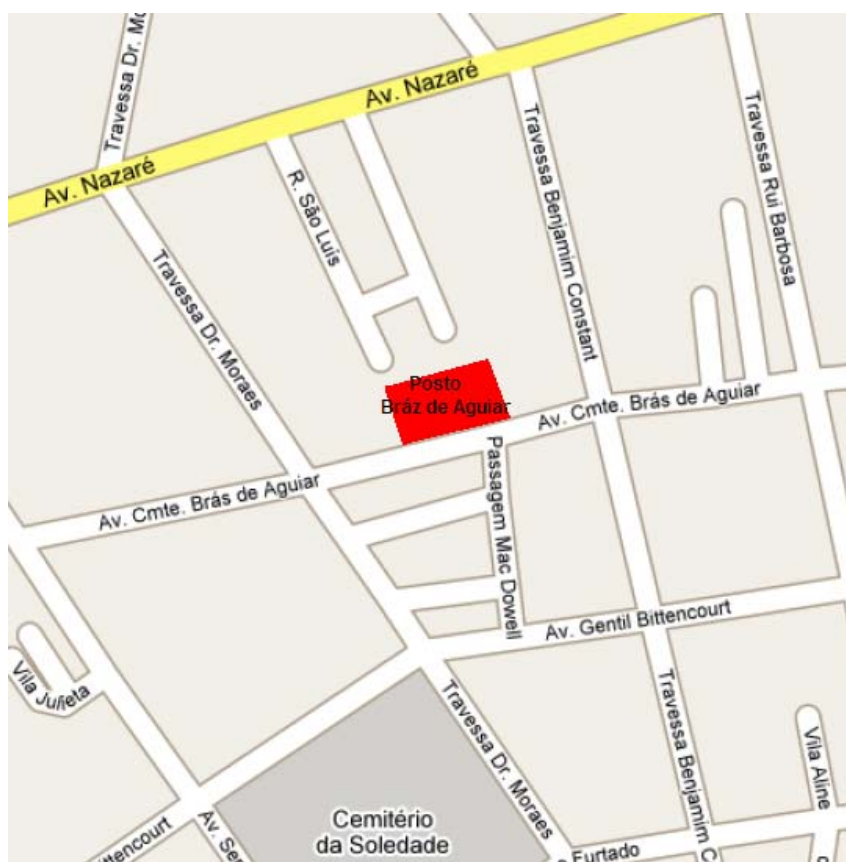


Figura 11 – Localização do Posto Bráz de Aguiar (em vermelho) – Belém/PA (adquirida e adaptada de *GOOGLE MAPS*).

O levantamento de GPR realizado no posto Bráz de Aguiar (21/09/07) consistiu de 6 perfis de caminhamento no modo temporal usando a técnica *common offset* com marcações a cada 1 m (Perfil teste 1 e 2), 2 m (Perfil 1, 3 e 4) e 5 m (Perfil 2) na área interna do posto. O comprimento dos perfis é mostrado na Tabela 3 e a posição dos perfis é ilustrada na Figura 10.

Perfil	Extensão
1	18 m
2	38 m
3	10 m
4	16 m
Teste 1	3 m
Teste 2	6 m

Tabela 3 – Dados do Posto Bráz de Aguiar.

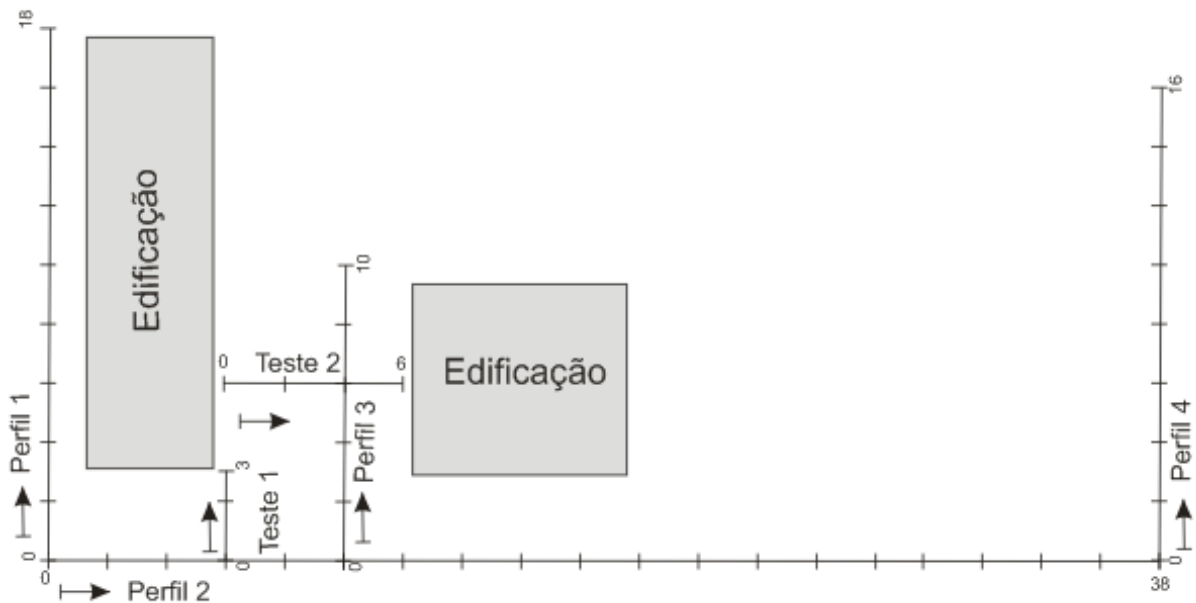


Figura 12 – Disposição dos perfis no Posto Bráz de Aguiar.

3 RESULTADOS

3.1 Posto São Paulo (em atividade)

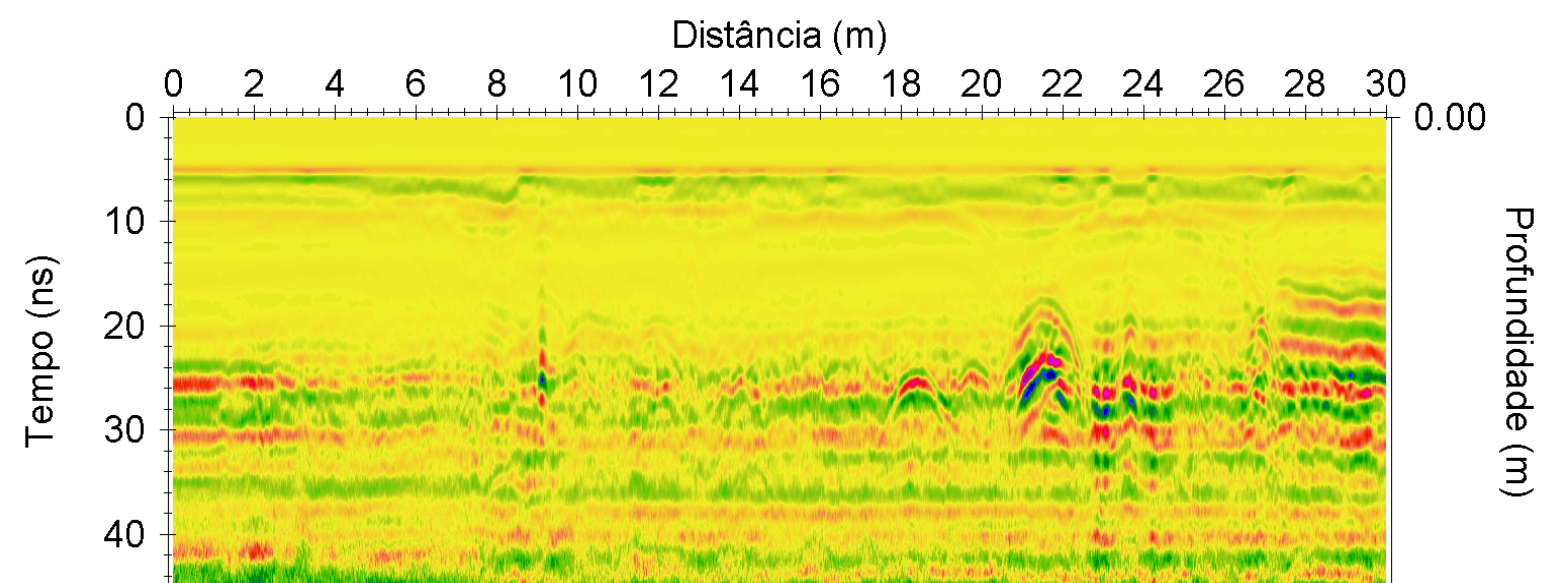
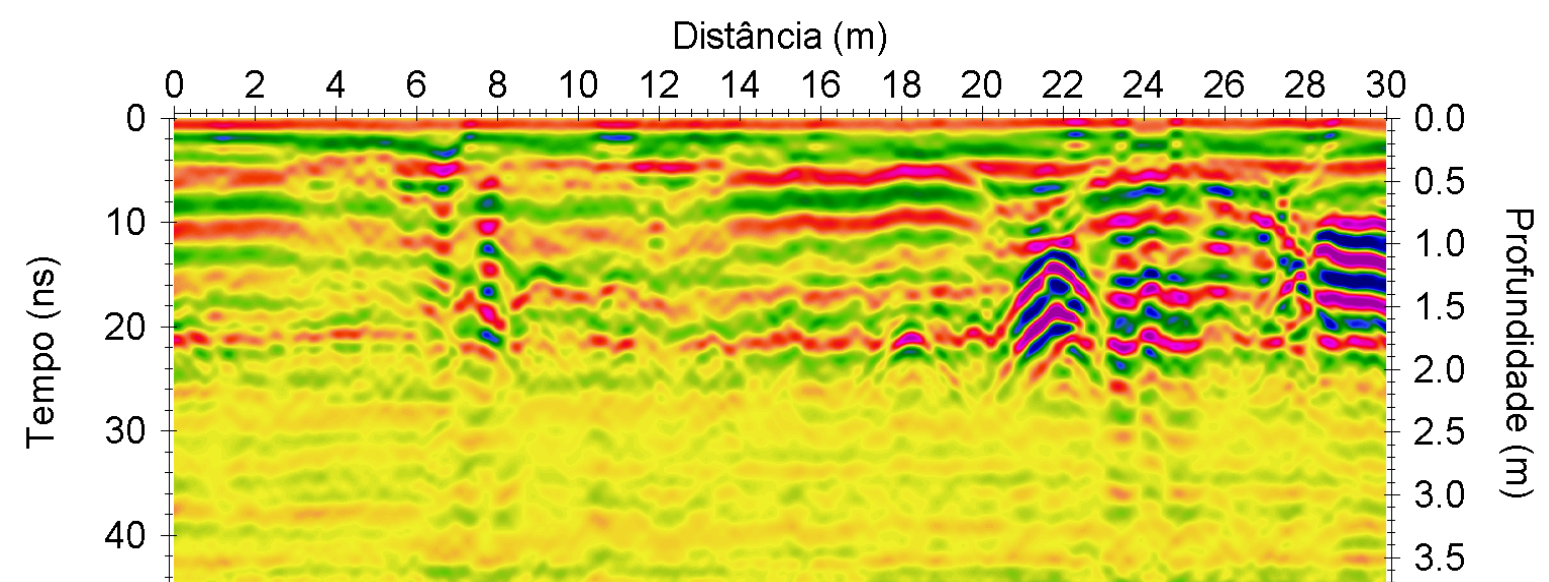
O perfil 1 (Figura 13) mostra uma difração entre as posições 21 m e 23 m que, possivelmente (pelo tamanho da hipérbole), corresponde a uma tubulação subsuperficial. Na posição 14 m ocorre uma maior atenuação do sinal a partir de 2 m de profundidade, que pode ser devida a uma maior quantidade de argila presente nos sedimentos.

O perfil 2 (Figura 14) possui zonas de forte reflexão do sinal entre as posições 5 m e 9 m, que podem ter sido causadas pela presença de tanque subterrâneo. Outras reflexões fortes também são observadas, aproximadamente, na posição 47 m. No perfil 2 não ocorrem zonas de forte atenuação, a partir de 2 m de profundidade, não sugerindo, portanto, a presença de contaminação.

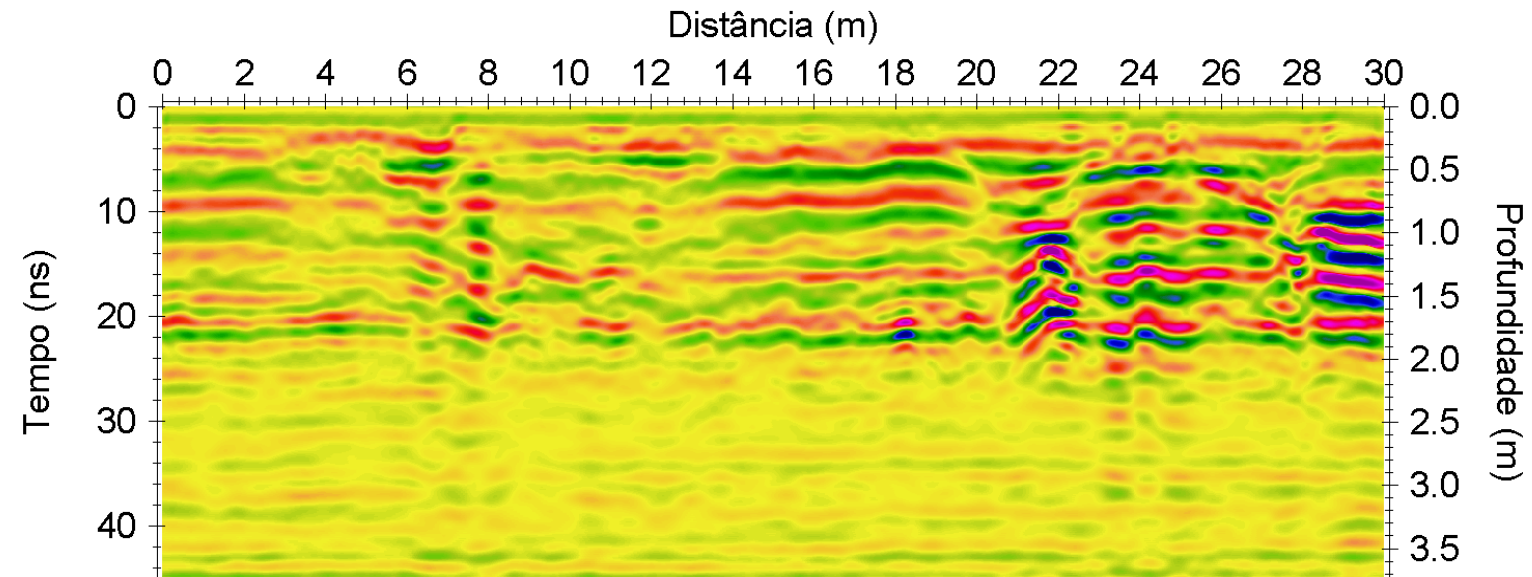
O perfil 3 (Figura 15) mostra fortes reflexões de 0 a 14 m, que podem ter sido geradas por tanques de combustível. Reflexões entre 18 m e 21 m e entre 23 m e 25 m podem estar associadas a tubulações. Zonas de atenuação do sinal são observadas próximas e abaixo do primeiro refletor (entre 3 m e 4 m e entre 14 m e 18 m) e podem ser devidas a vazamentos.

O perfil 4 (Figura 16) apresenta algumas reflexões devido à presença de tubulação nas posições entre 1 m a 4 m e 5 m a 9 m.

O perfil 5 (Figura 17) assim como o perfil 4 (Figura 16) apresenta reflexões devido à provável presença de tubulações subterrâneas. Entretanto, no perfil 5, observa-se uma zona de atenuação entre 2 m e 12 m, a partir de 2 m de profundidade. Essa zona pode estar relacionada à contaminação ou argilosidade do terreno.

A**B**

C



D

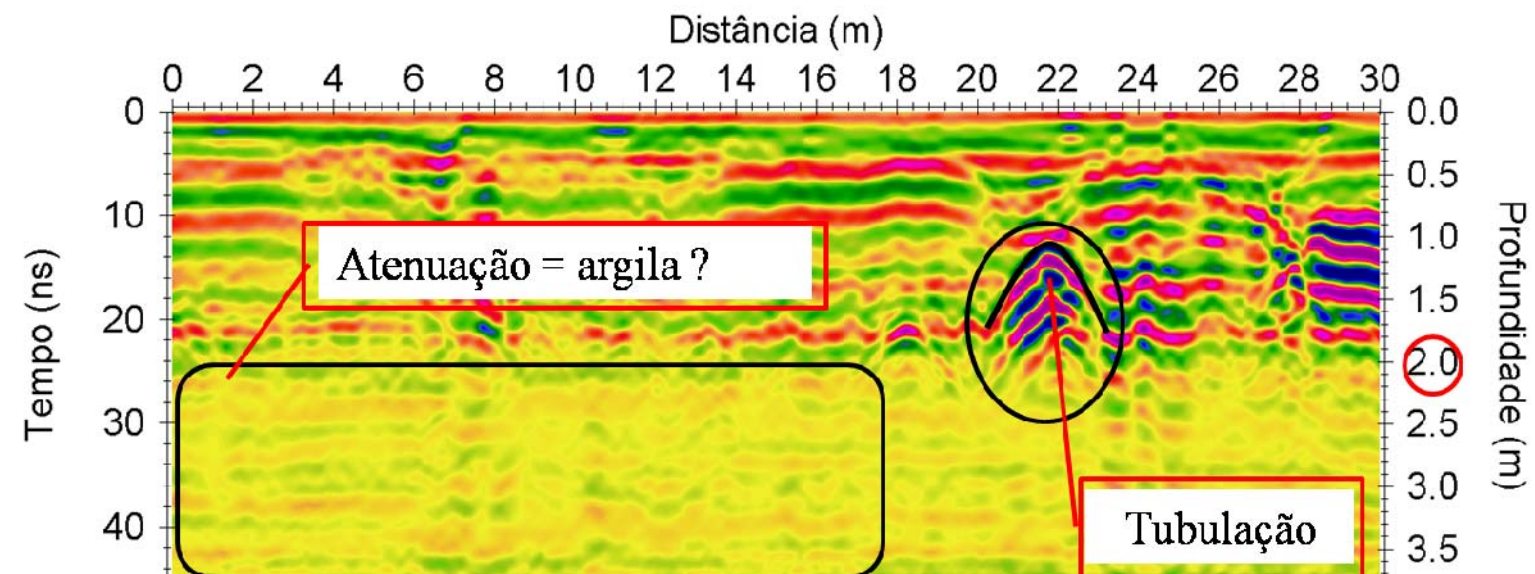
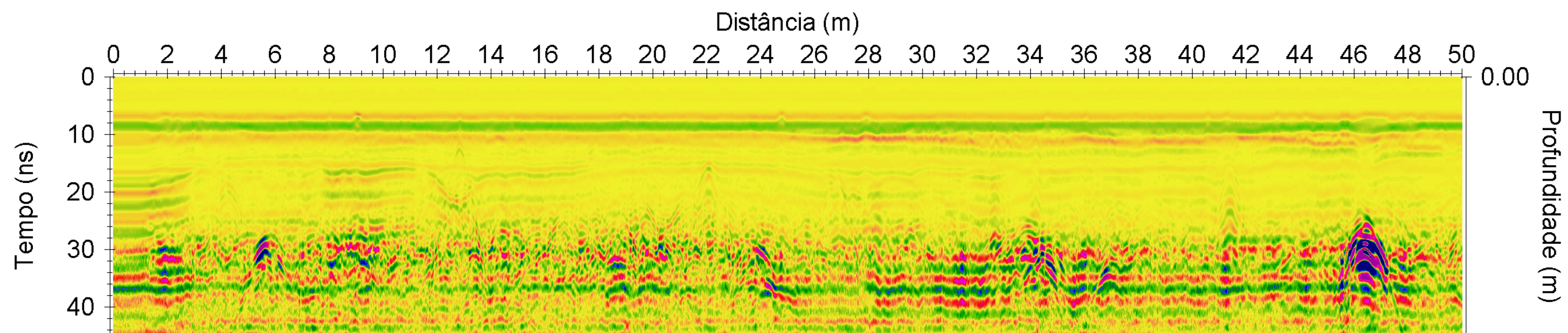
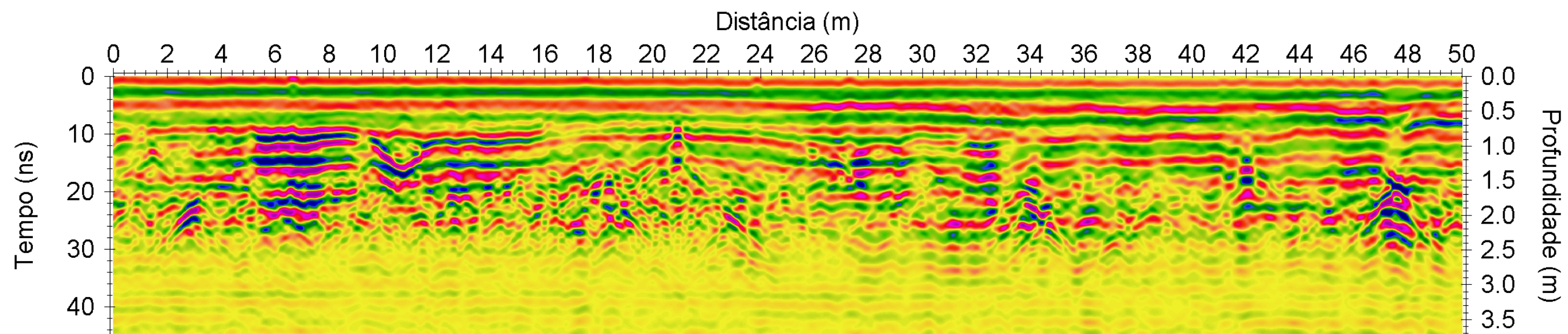


Figura 13 – Perfil 1 do Posto São Paulo. (A) Dado Bruto. (B) Processado. (C) Migrado. (D) Interpretado.

A**B**

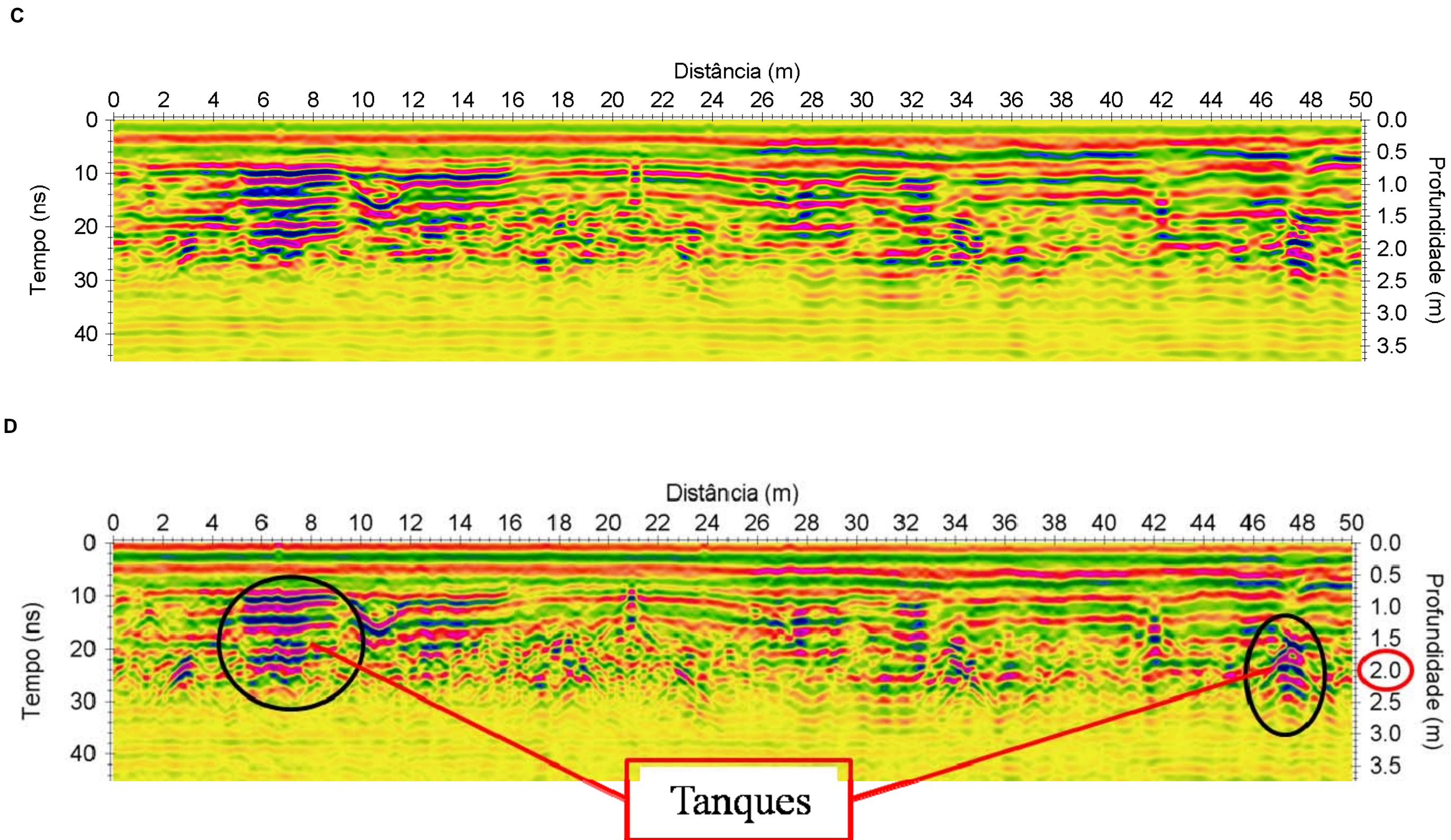
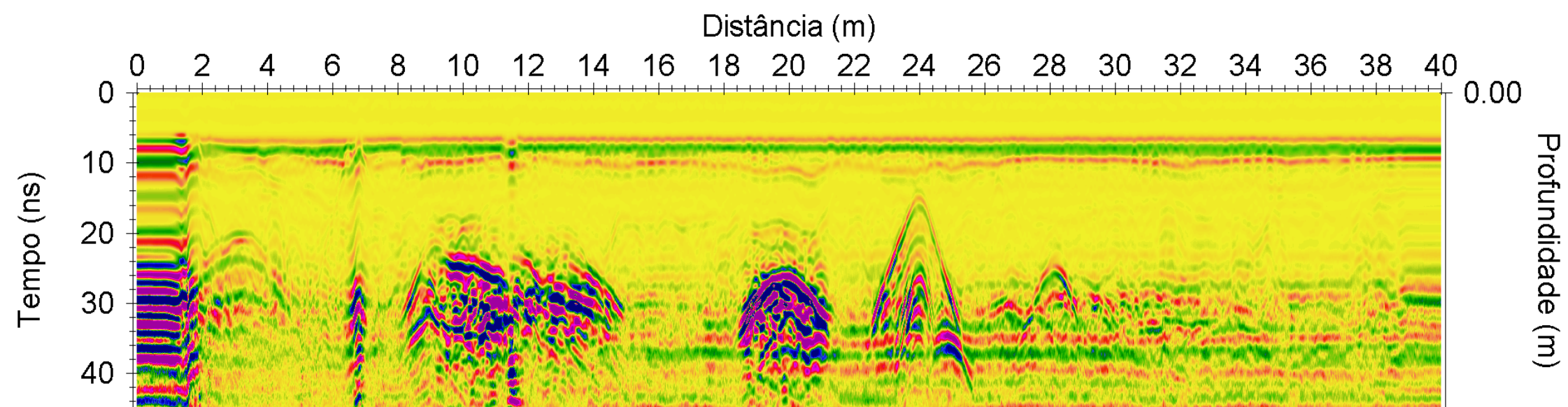
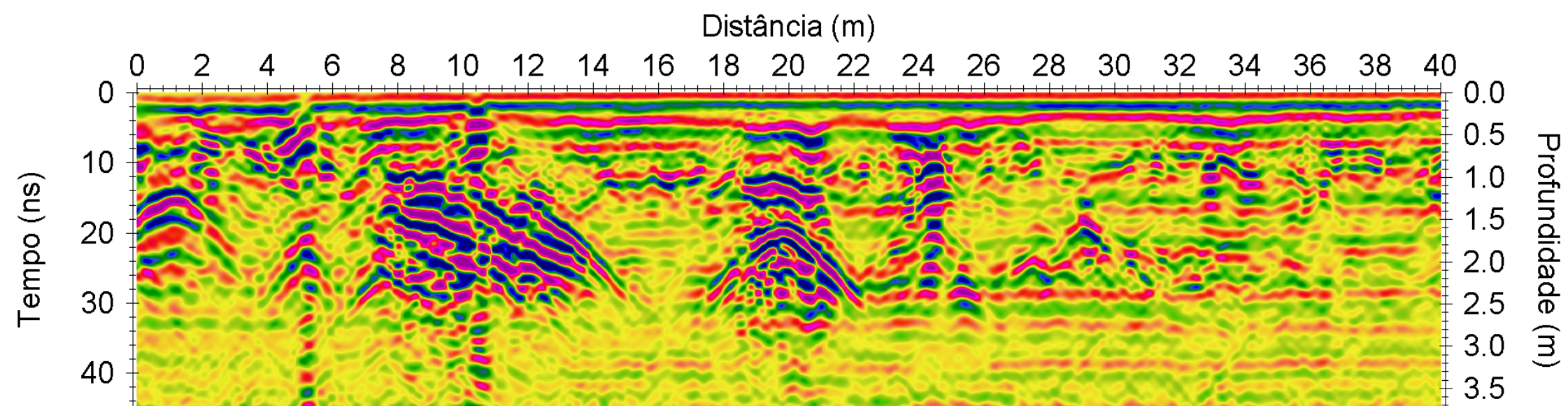


Figura 14 – Perfil 2 do Posto São Paulo. (A) Dado Bruto. (B) Processado. (C) Migrado. (D) Interpretado.

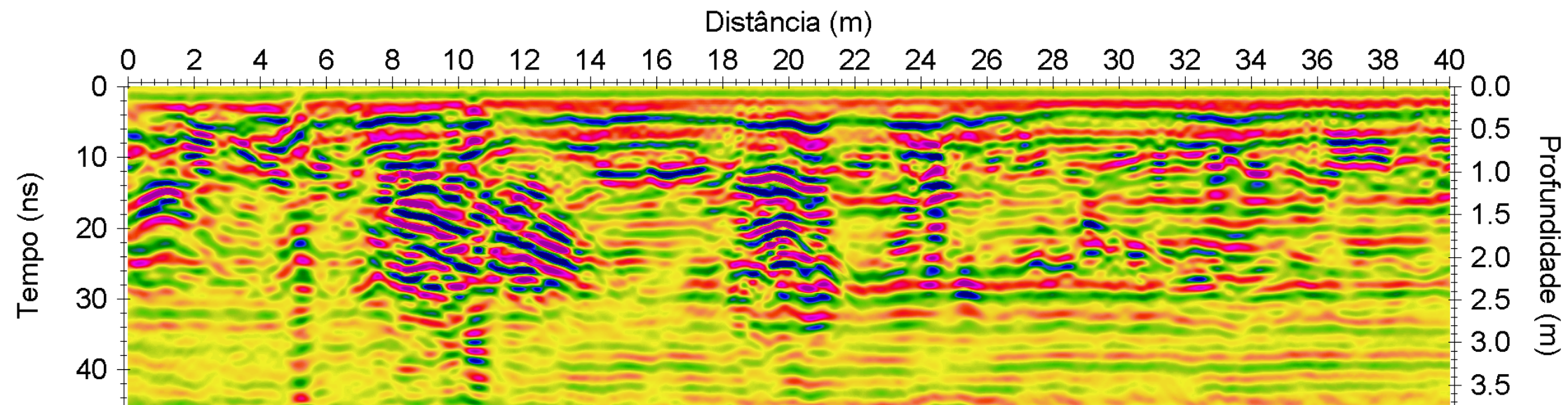
A



B



C



D

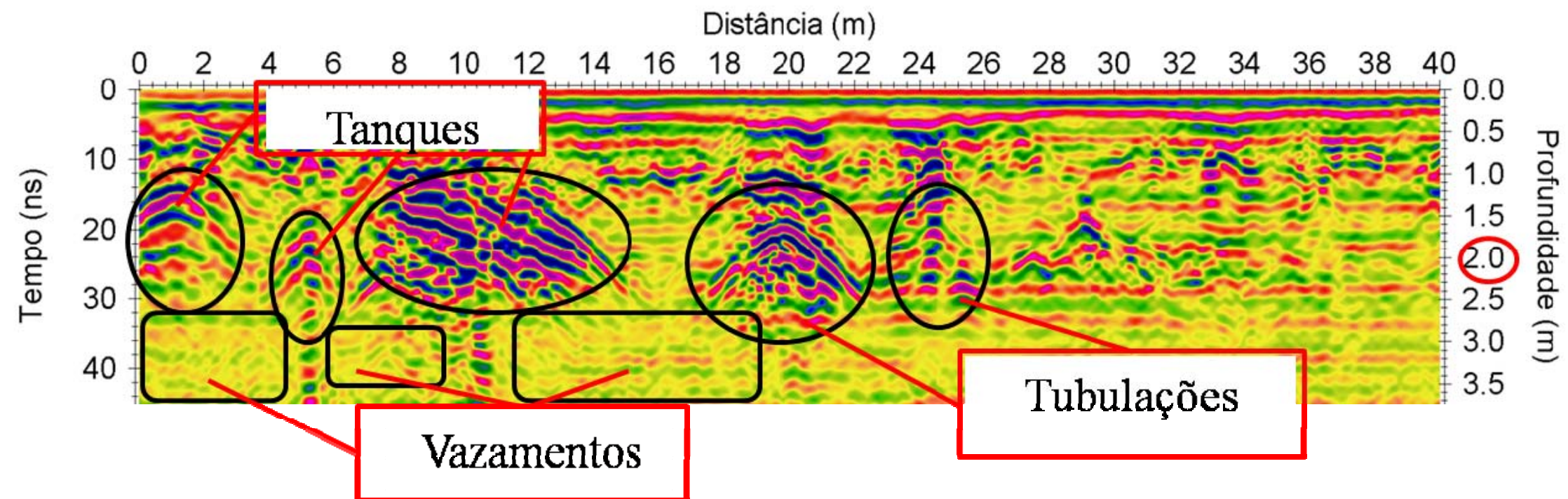


Figura 15 – Perfil 3 do Posto São Paulo. (A) Dado Bruto. (B) Processado. (C) Migrado. (D) Interpretado.

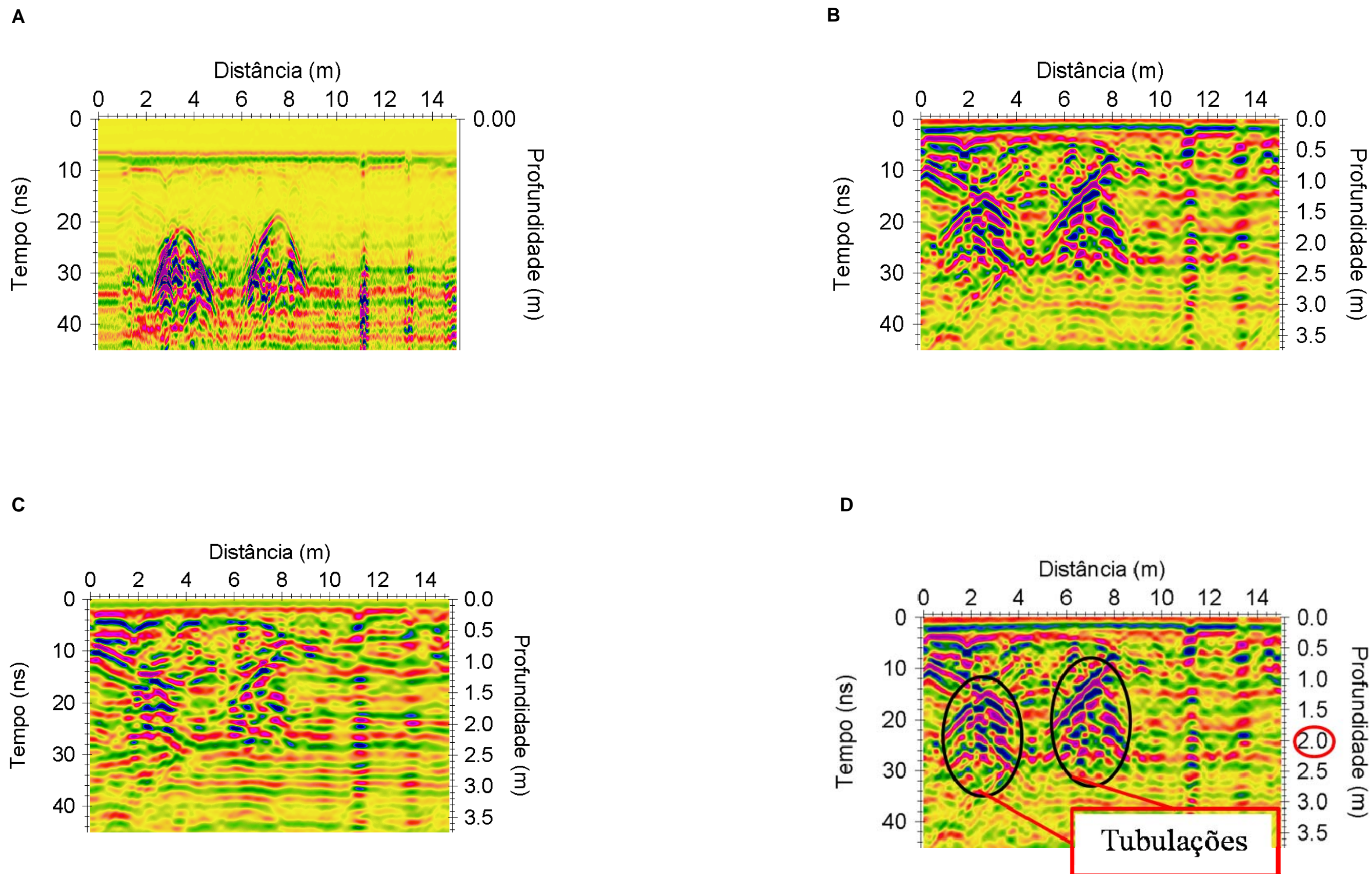


Figura 16 – Perfil 4 do Posto São Paulo. (A) Dado Bruto. (B) Processado. (C) Migrado. (D) Interpretado.

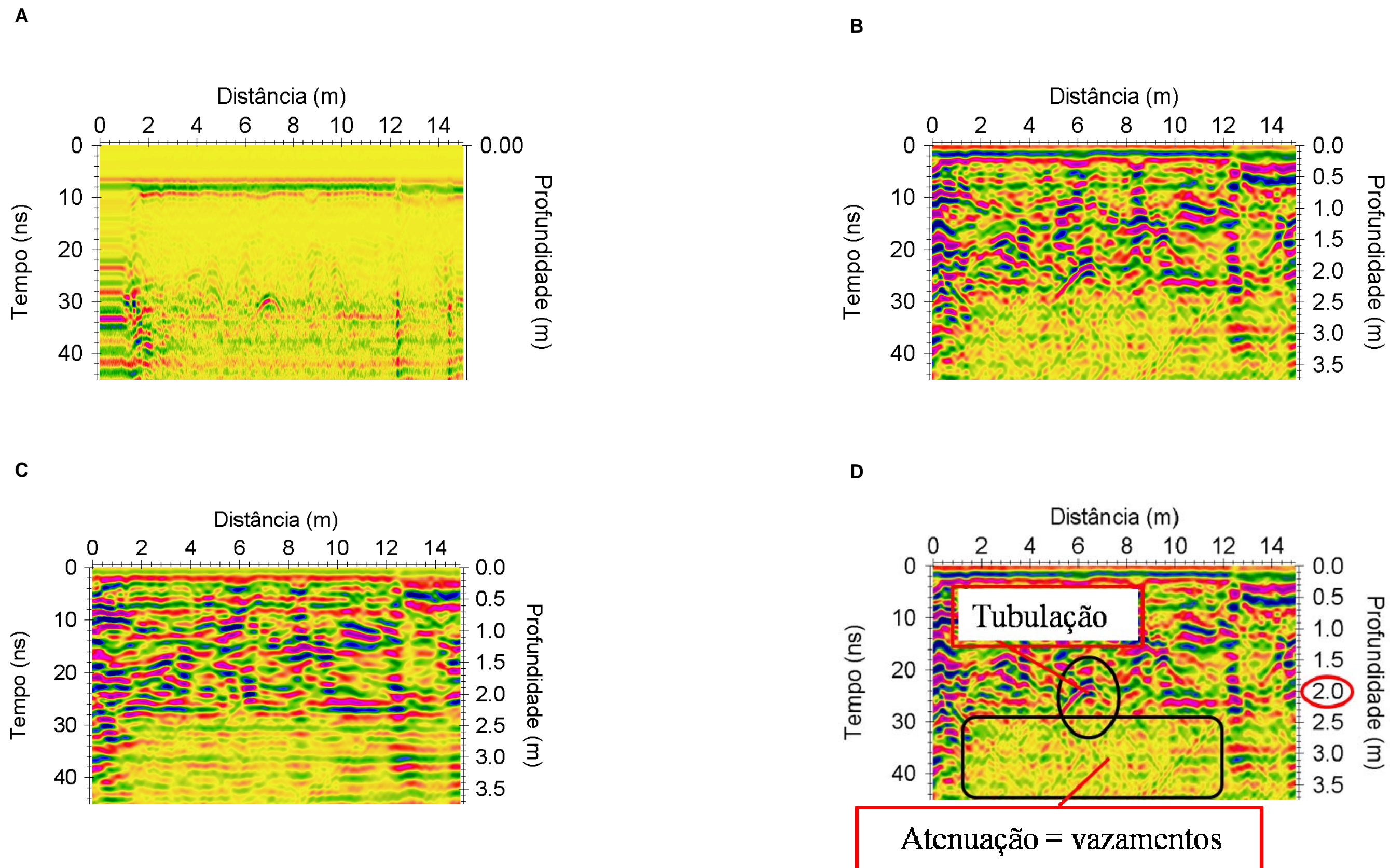


Figura 17 – Perfil 5 do Posto São Paulo. (A) Dado Bruto. (B) Processado. (C) Migrado. (D) Interpretado.

3.2 Posto Bráz de Aguiar (desativado)

Os perfis 1, 2 e 3 foram realizados muito próximos à localização dos tanques subterrâneos e tubulações de combustível do posto. O perfil 4 foi corrido em local mais afastado da posição dos tanques e tubulações, nos fundos do posto.

Tubulação no início do perfil 1 (Figura 18) evidencia diversas zonas de atenuação do sinal que podem ser devidas à contaminação. Essas zonas ocorrem a partir da profundidade de 2 m em todo o perfil e entre as posições 6 m a 10 m e 12 m a 14 m a partir da profundidade de 1 m.

O perfil 2 (Figura 19) apresenta um conjunto de feições subverticais que podem ter sido ocasionadas pela mesma tubulação do início do perfil 1 (Figura 18), uma vez que os perfis têm seu início no mesmo ponto com direções, porém diferentes. Uma zona com refletores horizontais paralelos é vista entre 13 m a 22 m e, provavelmente, foi provocada por um tanque de combustível disposto paralelamente ao perfil. No perfil observaram-se zonas de atenuação do sinal a partir de 1 m de profundidade entre 8 m e 13 m e entre 20 m e 29 m. Essas zonas podem ser devidas à contaminação.

O perfil 3 (Figura 20) evidencia fortes reflexões na posição 2 m que podem ter sido provocadas por tubulações. Nesse perfil ocorrem fortes atenuações no sinal entre 4 m e 10 m a profundidade superior a 2 m. Essas atenuações podem ser devidas à contaminação, bem como à argilosidade do terreno, já que ocorrem em profundidades superiores às profundidades com atenuações encontradas nos outros perfis.

O perfil 4 (Figura 21) foi realizado nos fundos do posto, longe da área em que se encontravam os tanques. Neste perfil as zonas de atenuação do sinal ocorrem em profundidades maiores que 2 m e devem ter sido ocasionadas pela maior porção de argila no local.

Os perfis teste 1 (Figura 22) e teste 2 (Figura 23) foram realizados bem em cima de uma conhecida tubulação a fim de verificar seu nível de influência (resposta) no perfil. Pode-se imagiá-las com clareza e boa resolução.

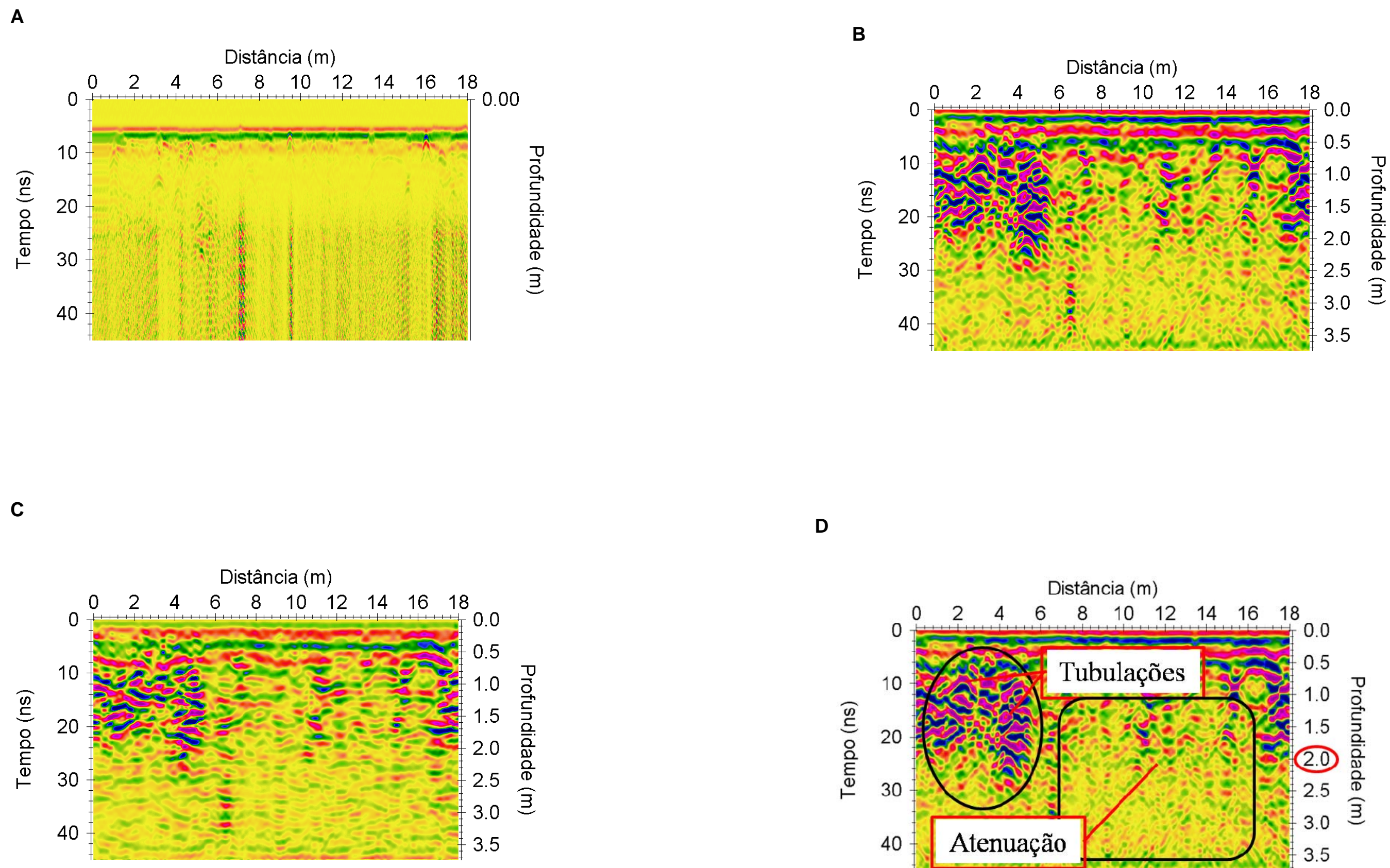
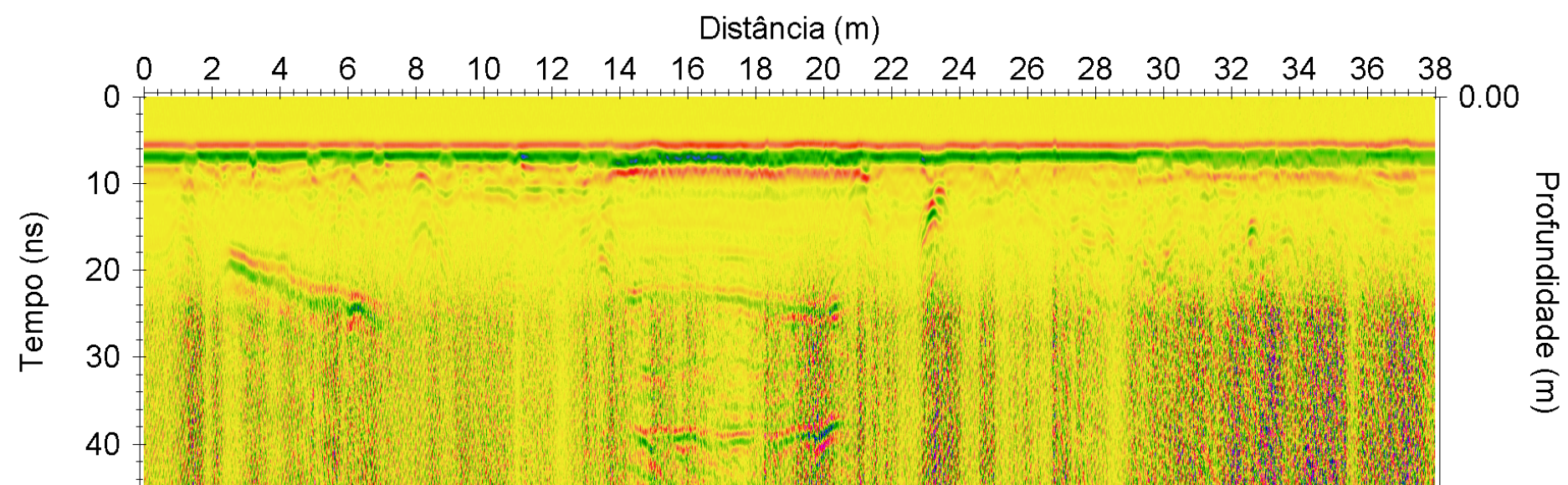
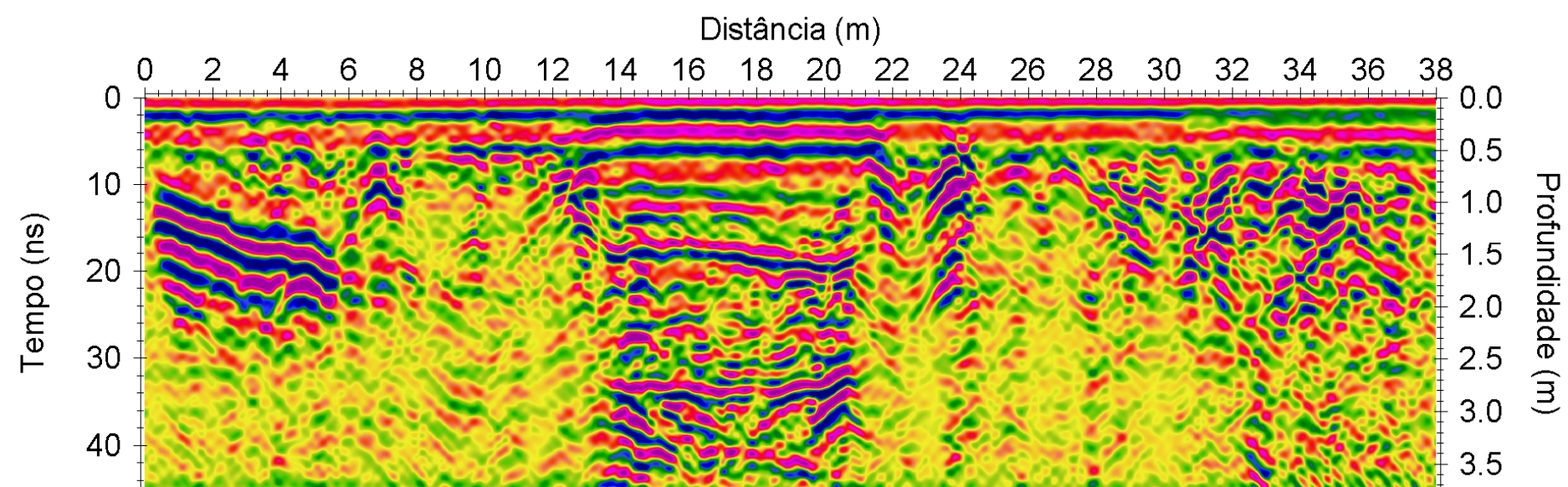


Figura 18 – Perfil 1 do Posto Bráz de Aguiar. (A) Dado Bruto. (B) Processado. (C) Migrado. (D) Interpretado.

A**B**

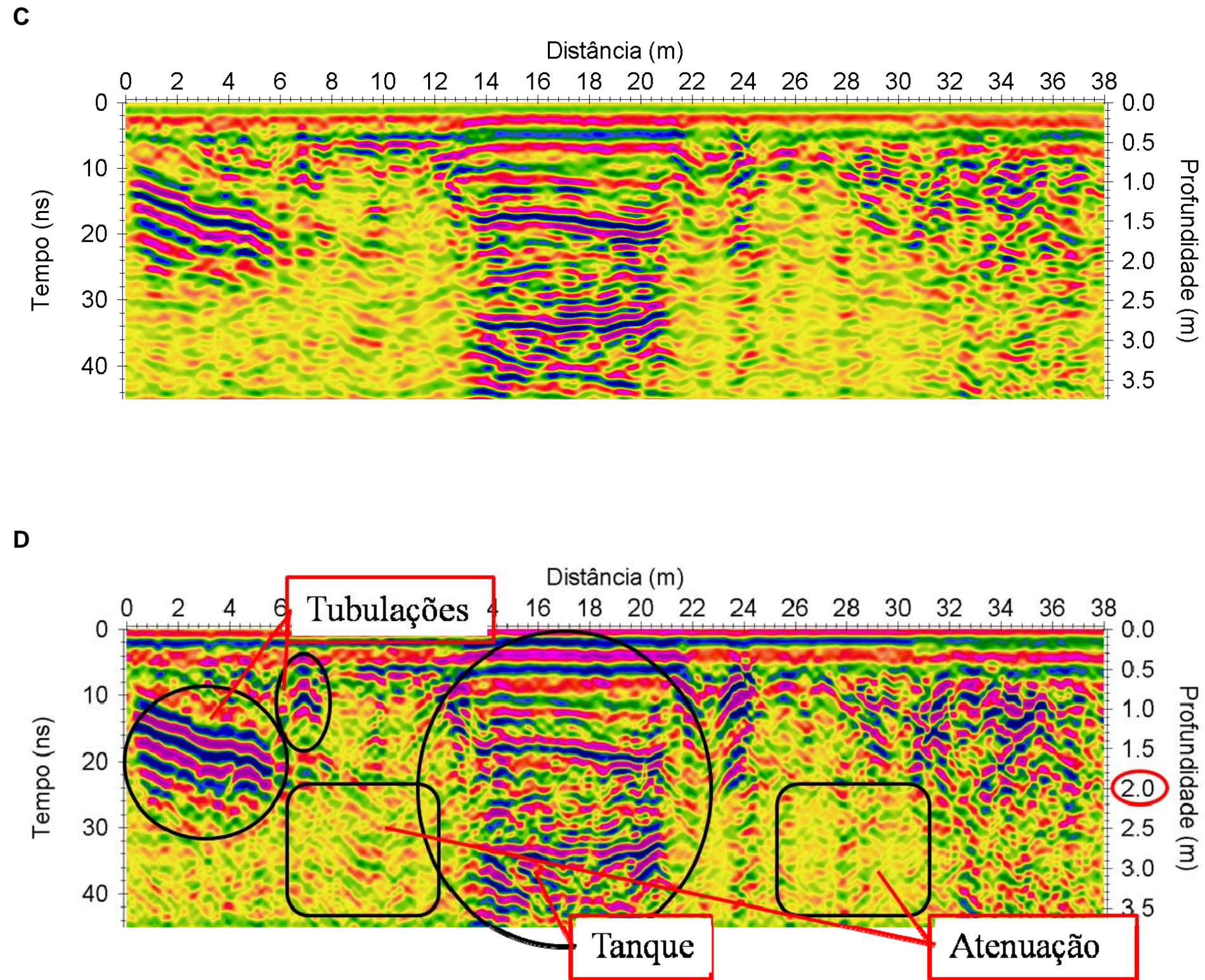


Figura 19 – Perfil 2 do Posto Bráz de Aguiar. (A) Dado Bruto. (B) Processado. (C) Migrado. (D) Interpretado.

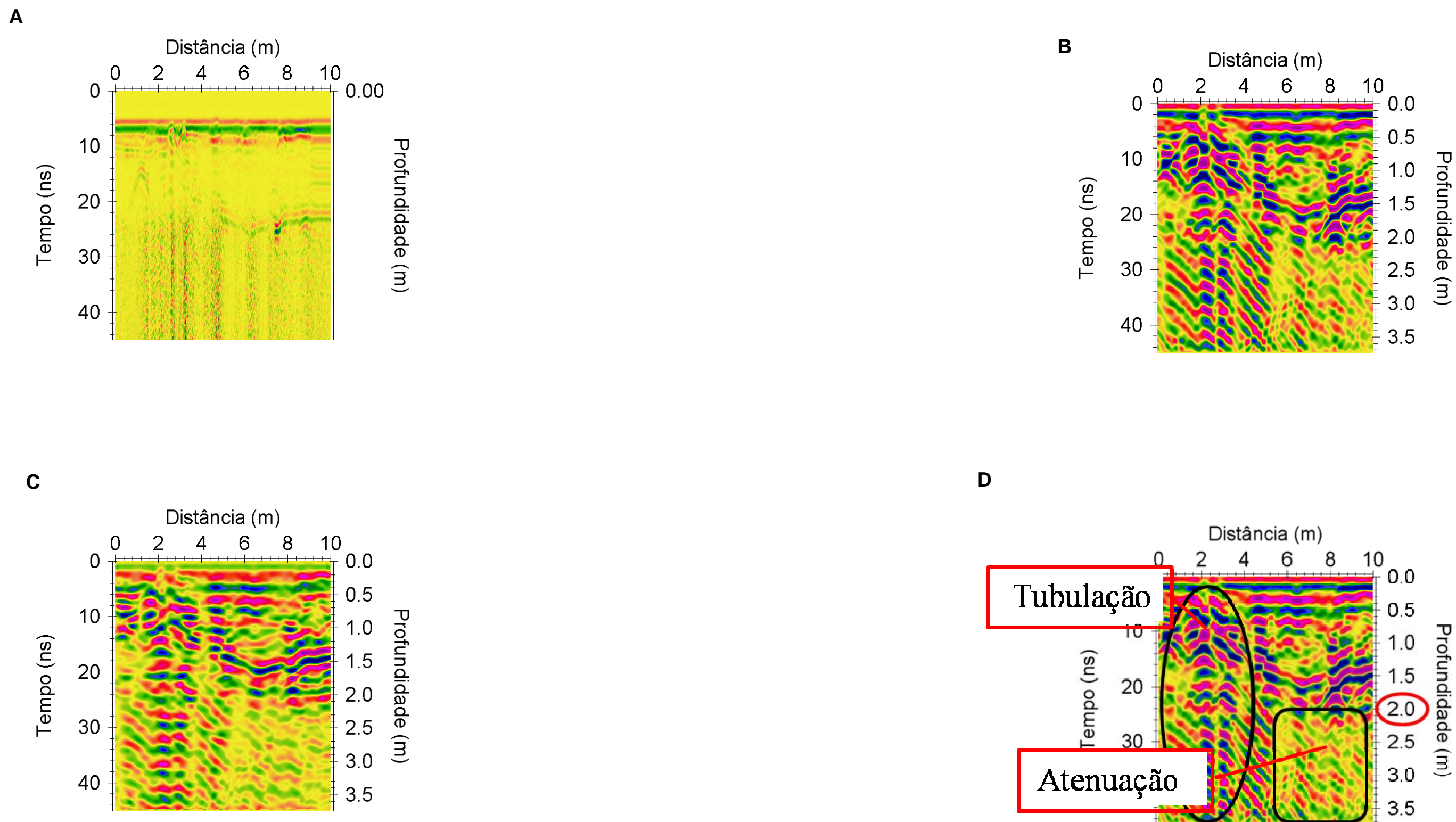


Figura 20 – Perfil 3 do Posto Bráz de Aguiar. (A) Dado Bruto. (B) Processado. (C) Migrado. (D) Interpretado.

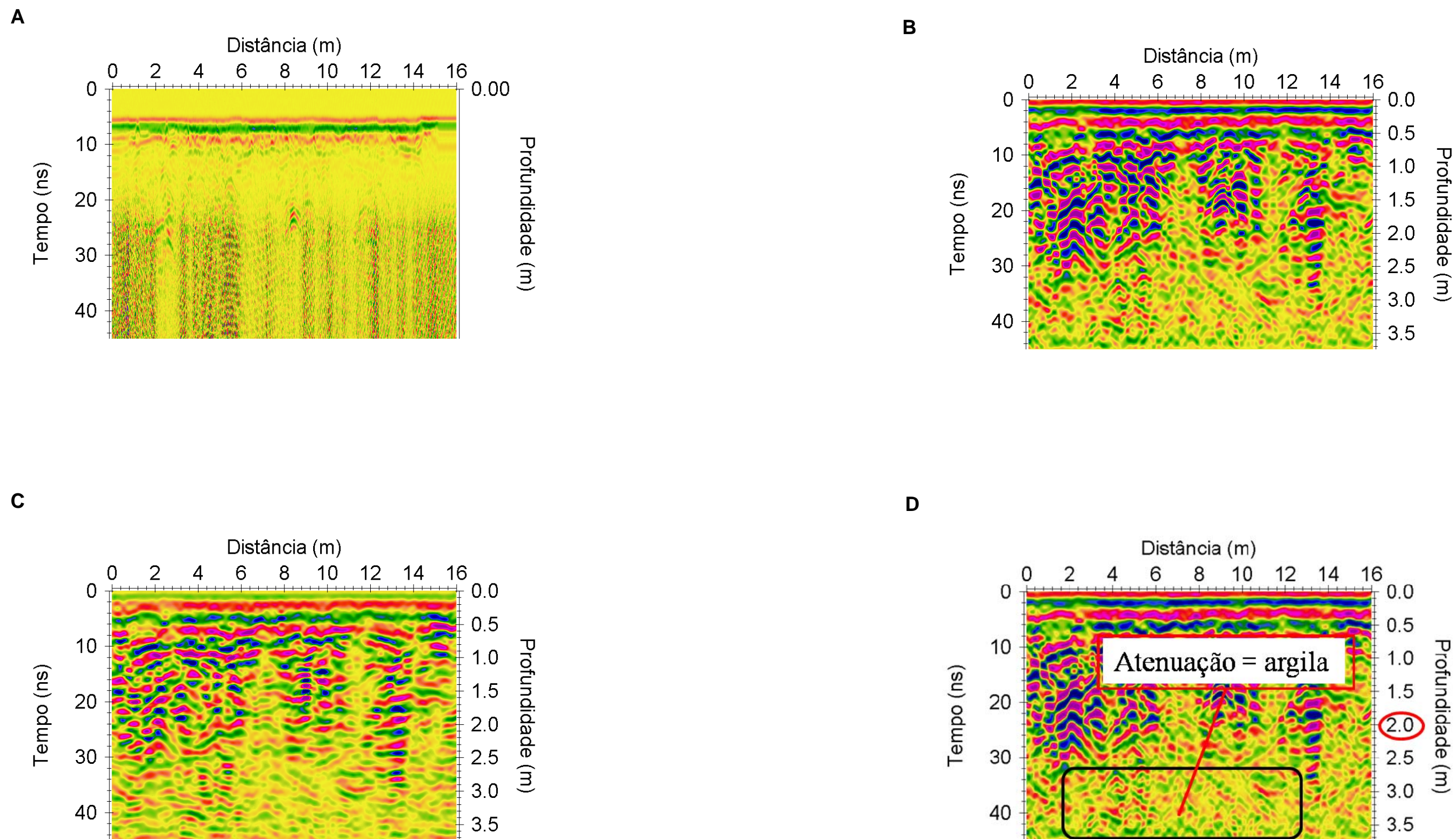


Figura 21 – Perfil 4 do Posto Bráz de Aguiar. (A) Dado Bruto. (B) Processado. (C) Migrado. (D) Interpretado.

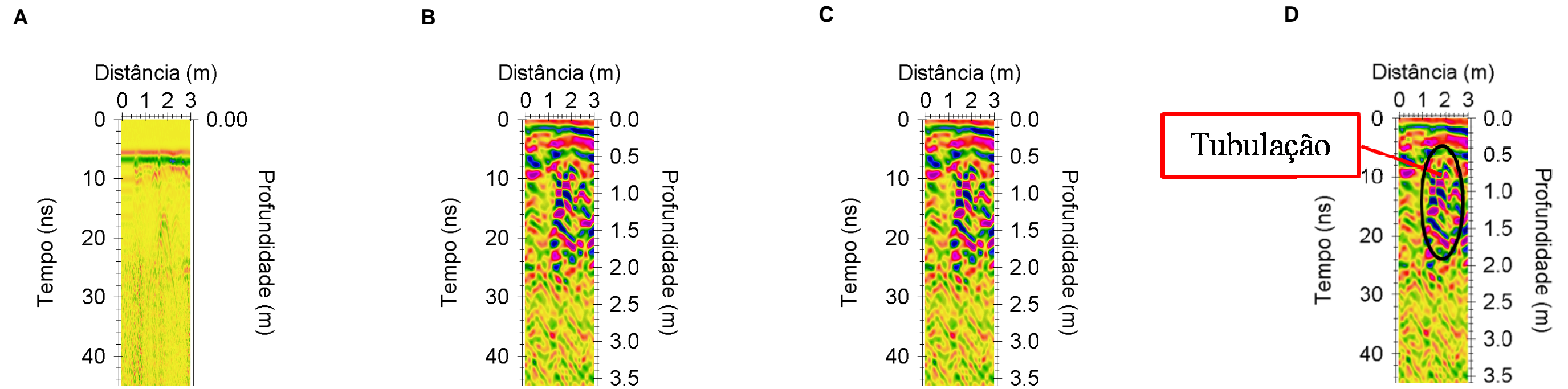


Figura 22 – Perfil teste 1 do Posto Bráz de Aguiar. (A) Dado Bruto. (B) Processado. (C) Migrado. (D) Interpretado.

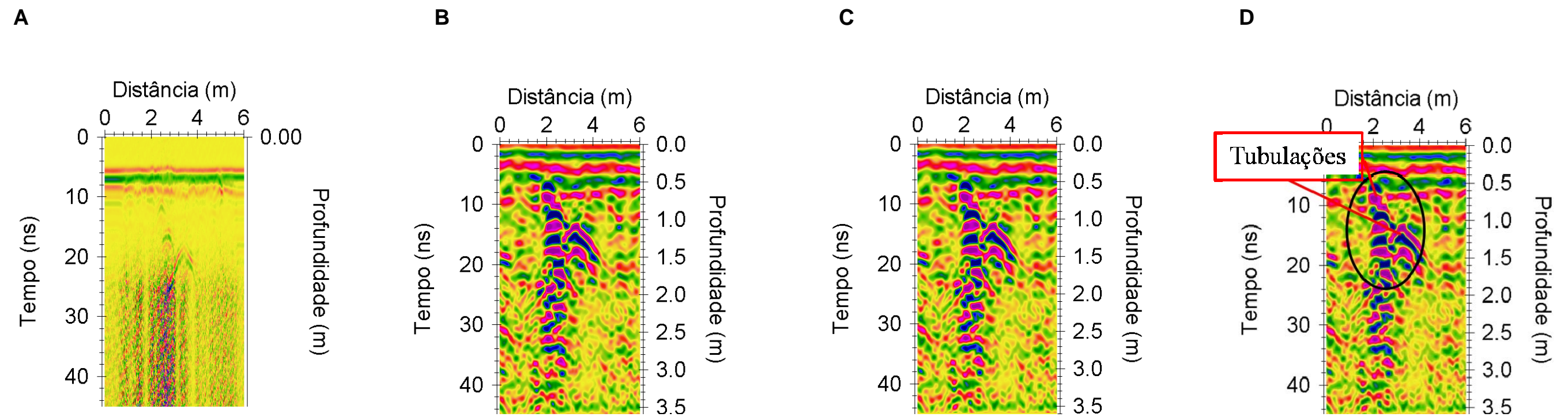


Figura 23 – Perfil teste 2 do Posto Bráz de Aguiar. (A) Dado Bruto. (B) Processado. (C) Migrado. (D) Interpretado.

4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A revisão estruturada da literatura, usada comumente em outras áreas, é uma ferramenta útil para a sistematização e controle da tradicional pesquisa bibliográfica. Neste trabalho, os estudos encontrados servem como referencial teórico para a análise da viabilidade da metodologia GPR aplicado a estudos de contaminação por hidrocarbonetos e os bancos de dados descritos fornecem novas fontes de busca de literaturas sobre o método em estudo. Ela pode ser certamente realizada de modo a cobrir outras fontes de referência, como monografias, dissertações e teses.

Os dados GPR obtidos nos dois postos de serviço, por sua vez, evidenciaram diversas zonas de forte atenuação do sinal de GPR, que sempre localizadas às proximidades de tanques e tubulações subterrâneas. Esse fato e sua correlação com o resultado de levantamentos descritos na literatura sugerem que as atenuações são devidas às contaminações por derivados de hidrocarbonetos. Algumas das zonas de atenuação, entretanto, devido a sua maior profundidade de ocorrência, podem ser relacionadas à maior argilosidade do terreno.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. M. **Estudo da Contaminação por Hidrocarbonetos em Postos de Serviços do Município de Abaetetuba – PA Utilizando o Georadar**. 2007. 142 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Curso de Pós Graduação em Geofísica, Belém, 2007.
- AL-QUADI, I. L.; LAHOUAR, S. Measuring layer thicknesses with GPR – Theory to practice. **Construction and Building Materials**, v. 19, p. 763-772. 2005.
- ATEKWANA, E. A., SAUCK, W. A.; WERKEMA Jr., D. D. Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site. **Journal of Applied Geophysics**, v. 44, p. 167–180. 2000.
- BAUER, A. **Christian Hülsmeier and about the early days of radar inventions - a survey**. Delft: The Netherlands. 2005a. 74 p.
- _____ **Christian Hülsmeier and about the early days of radar inventions - a survey – Part II**. Delft: The Netherlands. 2005b. 18 p.
- BENSON, A.K.; PAYNE, K.L.; STUBBEN, M.A. Mapping Groundwater Contamination using dc Resistivity and VLF Geophysical Methods-a Case Study. **Geophysics**, v. 62 (1), p. 80-86. 1997.
- BERMEJO, J. L.; SAUCK, W. A.; ATEKWANA, E. A. Geophysical Discovery of a New LNAPL Plume at the Former Wurtsmith AB, Oscoda, Michigan. **Fall GWMR**, v. 133, p. 131-137. 1997.
- BORGES, W. R. **Caracterização Geofísica de Alvos Rasos com Aplicação no Planejamento Urbano e Meio Ambiente: Estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP**. 2007. 260 f. (Tese de Doutorado) – Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, São Paulo, 2007.
- BORGES, W. R.; LAGO, A.; FACHIN, S.; ELIS, V.; SANTOS, E. GPR Utilizado na Detecção da Geometria de Cavas Usadas para Disposição de Resíduos de Óleo Lubrificantes. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24 (4), p. 483-494. 2006.
- BRANDWOOD, D. **Fourier Transforms in Radar and Signal Processing**. London: Artech House. 2003. 212 p.
- BREWSTER, M. L.; ANNAN, A. P. Ground-penetrating radar monitoring of a controlled DNAPL release: 200 MHz radar. **Geophysics**, v. 59 (8), p. 1211-1221. 1994.

CASSIDY, N. J. Dielectric and GPR Behaviour of Free-Phase NAPL Mixtures: Implications for the Practical Assessment of Hydrocarbon Contamination. INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND PENETRATING RADAR, 10., 2004. Delft, **The Netherlands**. 2004. p. 182-184.

CASTRO, D. L., BRANCO, R. M. G. C. 4-D ground penetrating radar monitoring of a hydrocarbon leakage site in Fortaleza (Brazil) during its remediation process: a case history. **Journal of Applied Geophysics**, v. 54, p. 127-144. 2003.

CLAERBOUT, J. F.; BLACK, J. L. **Basic Earth Imagins (Version 2.4)**. Blackwell Scientific Publications, 2005. 236 p.

CLARK, M. R.; GILLESPIE, R.; KEMP, T.; MCCANN, D. M.; FORDE, M. C. Etromagnetic properties os railway ballast. **NDT & E International**, v. 32, p. 305-311 2001.

CORSEUIL, H. X.; ALVAREZ, P. J. J. Natural biorremedioation perspective for BTX - contaminated groundwater in Brazil: Effect oh Ethanol. **Wat. Sci. Tech.**, v. 34 (7-8), p. 311-318. 1996.

DANIELS, D. J. **Ground penetrating radar** 2nd edition. London: The Institution of Electrical Engineers. 2004. 761 p.

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

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. Fortaleza: CPRM, LABHID, 1997. 389 p.

FERNANDES, M.; CORSEUIL, H. X. Contaminação de Águas Subterrâneas por Derramamento da Gasolina – Efeito Cossolvência. **ABES**, v. 26, p. 8. 1997.

FRANCISCO, R. H. P. 2004. Terra: Planeta Água. **Revista Eletrônica de Ciências**, v. 28. Disponível em: <<http://www.cdcc.sc.usp.br/ciencia/index.html>> Acesso em: 10 fev. 2008.

GIIMANN. **Gas station**. Disponível em: <<http://www.turbosquid.com>> Acesso em: 25 fev. 2008.

GSSI - GEOPHYSICAL SURVEY SYSTEMS, INC. **Manual do TerraSIRch SIR System-3000.**, 2003. 71 p.

MAHAFZA, B. R. **Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB**. Alabama: Chapman & Hall/CRC, 2000. 533 p.

MESSINGER, J. Effective automatic picking of travelttime data with high precision. International Conference on Ground Penetrating Radar, 10., Delft, **The Netherlands**, 2004. 4 p.

MOREIRA, C. A.; DOURADO, J. C. Análise de Contaminantes de Fase Líquida Não Aquosa (NAPLs) por Aplicação do Método Eletromagnético Indutivo (EM). **Rev. Bras. Geof.**, 23 (3) p. 213 – 220. 2005.

OLHOEFT, G. R. **Application of Ground Penetrating Radar**: in Proceedings of the 6th Int'l. Conf. on Ground Penetrating Radar, GPR'96, Sept 30- Oct 3, Sendai. 1996. 4 p.

ORLANDO, L. Detection and analysis of LNAPL using the instantaneous amplitude and frequency of ground-penetrating radar data. **Geophysical Prospecting**, vol. 50, p. 27-41. 2002.

PETTERSSON, K. J.; NOBES, D. C. Environmental geophysics at Scott Base: ground penetrating radar and electromagnetic induction as tools for mapping contaminated ground at Antarctic research bases. **Cold Regions Science and Technology**, vol. 37, p.187-195. 2003.

SANDMEIR, K. J. **Manual do software REFLEXW** – version 4.2. Karlsruhe. 1998. 408 p.

SAUCK, W.A.; ATEKWANA, E.A.; NASH, M.S. High Conductivities Associated with an LNAPL Plume Imaged by Integrated Geophysical Techniques. **Journal of Environmental and Engineering Geophysics**, vol. 2, p. 203-212. 1998.

SILVA, R. L. B.; BARRA, C. M.; MONTEIRO, T. C. N.; BRILHANTE, O. M. Estudo da contaminação de poços rasos por combustíveis orgânicos e possíveis consequências para a saúde pública no Município de Itaguaí, Rio de Janeiro, Brasil. **Cad. Saúde Pública**, Rio de Janeiro, vol. 18 (6), p. 1599-1607. 2002.

STRANNEBY, D. **Digital Signal Processing**. Oxford: Butterworth-Heinemann Linacre House, Jordan Hill, 2001. 239 p.

YELF, R. Where is True Time Zero? 10th International Conference on Ground Penetrating Radar, Delft, **The Netherlands**, p. 279-282. 2004.

YILMAZ, Ö. **Seismic Data Processing**, Investigation in Geophysics, vol. 2. Tulsa: Soc. Expl. Geophys. 1987. 526 p.