

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RAFAEL ESPINDOLA CANATA

DIAGNÓSTICO DE PARÂMETROS GEOFÍSICOS USADOS EM GEOCIÊNCIAS FORENSES



CURITIBA
2020

RAFAEL ESPINDOLA CANATA

DIAGNÓSTICO DE PARÂMETROS GEOFÍSICOS USADOS EM GEOCIÊNCIAS FORENSES

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Geologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira (UFPR)

Coorientador: Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges (IG-UnB)
Dr. Fábio Augusto da Silva Salvador (INC-DPF)

CIDADE

2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

C213d

Canata, Rafael Espindola

Diagnóstico de parâmetros geofísicos usados em geociências forenses [recurso eletrônico] / Rafael Espindola Canata. – Curitiba, 2020.

Tese - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geologia, 2020.

Orientador: Francisco José Fonseca Ferreira – Coorientador: Welitom Rodrigues Borges - Coorientador: Fábio Augusto da Silva Salvador

1. Geofísica. 2. Prospecção – Métodos geofísicos. 3. Radar em geociências . I. Universidade Federal do Paraná. II. Ferreira , Francisco José Fonseca. III. Borges , Welitom Rodrigues. IV. Salvador, Fábio Augusto da Silva. V. Título.

CDD: 551

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO GEOLOGIA -
40001016028P5

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **RAFAEL ESPINDOLA CANATA** intitulada: **DIAGNÓSTICO DE PARÂMETROS GEOFÍSICOS USADOS EM GEOCIÊNCIAS FORENSES**, sob orientação do Prof. Dr. FRANCISCO JOSÉ FONSECA FERREIRA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 30 de Abril de 2020.

Assinatura Eletrônica

02/05/2020 16:41:05.0

FRANCISCO JOSÉ FONSECA FERREIRA
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

03/05/2020 20:11:44.0

RAIMUNDO MARIANO GOMES CASTELO BRANCO
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ)

Assinatura Eletrônica

03/05/2020 09:36:25.0

MAXIMILIAN FRIES
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

03/05/2020 16:15:35.0

OLEG BOKHONOK
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE CATÓLICA DE SANTOS)

Assinatura Eletrônica

30/04/2020 23:38:16.0

MARCELO DE LAWRENCE BASSAY BLUM
Avaliador Externo (PERITO CRIMINAL FEDERAL)

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA-CENTRO POLITÉCNICO-UFPR - CURITIBA - Paraná - Brasil
CEP 81531-990 - Tel: (41) 3361-3365 - E-mail: posgeol@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.
Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 40437

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp>

“Dedico este trabalho a minha esposa e companheira de todas as horas Fabiana Bettú. E aos meus pais, César e Mary, que estiveram em todos os momentos da minha vida”

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos espíritos de luz pelo caminho de paz e serenidade nesta longa jornada.

Aos meus queridos pais César e Mary, pelo amor e carinho sempre transmitido ao longo destes quatro anos, mesmo com a distância. Obrigado por vocês existirem!!

Aos meus queridos irmãos (Bruna e César), Denis, sobrinhos (Júlio César) e sobrinhas (Alice e Antonella) peço desculpas pelos poucos momentos em que convivemos.

Ao Saulo, Nina, Daniel, Ana, Henrique e Isadora obrigado pelo convívio.

Aos colegas Rodoilton Stevanato e Joelson pelos momentos em que paramos as atividades para conversamos sobre diversos assuntos acompanhado de um bom café (petróleo), cigarros e pela amizade!!

Ao orientador Prof. Francisco Ferreira (grande Chicão) agradeço pelo convívio, dedicação, orientação, confiança e pela amizade que construímos, um muito obrigado Chicão!

Ao coorientador Fábio Augusto da Silva Salvador (Santista) pelo seu entusiasmo em expandir a ciência forense, pela amizade e orientação, muito obrigado!

Ao coorientador Prof. Welitom Rodrigues Borges por transmitir o seu conhecimento, pela dedicação, sugestões e orientação realizada ao longo desta etapa, muito obrigado!

A uma família em especial Welitom Borges, Aline Borges e a princesa Elissa Borges pelo convívio, pela amizade sincera, pelos momentos de diversão, felicidade, respeito que me proporcionaram nas minhas estadas em Brasília. O que vocês fizeram por mim ficará guardado para sempre, muito obrigado!!!

Aos amigos Guilherme, Catarina e Adalene que me acolheram e transformaram minha permanência em Brasília muito abençoada, obrigado por tudo!!

Aos doidos Eduardo, Alexandre, Vicente e Jadson pelas cervejadas em Brasília.

Ao Nonato sempre disposto a arrumar quarto no apartamento de trânsito na Colina-UnB para minhas estadas em Brasília.

A Dona Fátima uma pessoa fantástica e guerreira que trabalha para a qualidade de vida e bem estar dos funcionários no Instituto de Geociências.

As Professoras Alessandra Barros e Camila Athayde pela experiência adquirida no decorrer do estágio de docência.

Aos colegas de pós-graduação do LPGA.

A CAPES pelo fomento da bolsa de Doutorado.

A Universidade Federal do Paraná, ao Programa de Pós-Graduação em Geologia por ter me acolhido e fornecido as condições necessárias para realizar a pesquisa.

A mais importante desta lista minha esposa, Fabiana Bettú, pelo companheirismo, incentivo, compreensão e pelos maravilhosos momentos vividos até hoje!! E ao terremoto e tufão, nossos cachorros.

A todos o meu reconhecimento e gratidão.

“Você que inventou a tristeza
Ora, tenha a fineza
De desinventar
Você vai pagar e é dobrado
Cada lágrima rolada
Nesse meu penar”
(Chico Buarque, 1978)

RESUMO

A investigação no subsolo por evidências antigas e atuais de atividades humanas é o foco das geociências forense. Quando inexitem registros superficiais que evidenciem tais atividades, a equipe de investigadores aplica métodos geofísicos rasos para averiguar o terreno. Dentre os métodos de investigação indireta, o radar de penetração de solo (GPR) tem grande contribuição na área investigativa, visto que é eficiente na localização de estruturas arqueológicas soterradas, determinação dos locais de inumação clandestina de cadáveres, identificação de túneis de acesso à presídios e caixas-fortes, e ocultação de armas e drogas no subsolo. Na área de forense ainda são poucas as pesquisas geofísicas relacionadas à determinação de parâmetros ótimos de aquisição, processamento e interpretação de dados de GPR. A pesquisa objetivou avaliar e definir as melhores rotinas de aquisição, processamento e análise de resultados de GPR para a área de geofísica forense em uma área controlada e em perícias forenses reais. A primeira etapa consistiu em criar uma área controlada para a calibração de resultados com o GPR no Sítio Controlado de Geofísica Forense da UFPR. Nessa área instalaram-se materiais como madeiras petrificadas, armas danificadas, vasos de cerâmica, osso bovino, camiseta, tijolos, extintor. Conseqüentemente houveram aquisições 2D de GPR com antenas blindadas de frequências comumente usadas em perícias (250, 400, 700 MHz) ao longo de todo o SCGF para compor imagens 3D. Os resultados 2D possibilitaram a determinação de hipérboles relacionadas aos alvos e às estruturas de interferência relacionadas a pedras e raízes presentes no aterro. Os principais critérios de distinção 2D dos objetos enterrados no sítio foram o tamanho, a amplitude e a posição das suas respectivas hipérboles de reflexão. Para auxiliar na interpretação das respostas de GPR realizaram-se também modelagens sintéticas para os alvos (raiz, seixo, metal, plástico, osso e cavidade vazia) que são comumente encontrados em investigações forenses. A segunda etapa da pesquisa consistiu em uma perícia conduzida com o GPR na Aldeia Tekoha Jevy que evidenciaram inúmeras anomalias de reflexão relacionadas à objetos arqueológicos presentes na aldeia. Por fim, os dados das perícias realizadas na Guerrilha do Araguaia possibilitaram os melhores parâmetros de aquisição 2D e 3D de dados de GPR, bem como estabelecer uma rotina de processamento de dados eficiente para definição de alvos forenses.

Palavras-chave: Geofísica forense, Radar de penetração de solo, Sítio controlado de Geofísica, Guerrilha do Araguaia.

ABSTRACT

Underground research by ancient and current evidence of human activities is the focus of forensic geosciences. When there is a lack of no superficial records evidence such activities, a team of investigators uses near surface geophysics methodologies to examine the terrain. Among indirect investigation methods, ground penetrating radar (GPR) has been a great contribution in the investigative area, since it is efficient in locating buried archaeological structures, determining clandestine graves, identifying access tunnels to prisons and strongboxes, as well as concealed weapons and drugs underground. In the forensics field, there are still few geophysical surveys related to the determination of optimal parameters for the acquisition, processing, and interpretation of GPR data. This research aimed to evaluate and define the best routines of acquisition, processing, and analysis of GPR results for the field of forensic geophysics in a controlled area and forensic surveys. The first step was to create a controlled area for the calibration of results with GPR at the UFPR Near surface Forensic Geophysical Controlled Test Site (SCGF). In this area materials such as petrified wood, damaged weapons, ceramic vessels, bovine bone, T-shirt, bricks, and extinguisher were installed. Consequently, 2D GPR acquisition were carried using shielded antennas of frequencies commonly used in criminalistics or forensic expertise (250, 400, 700Mhz) throughout the SCGF to compose 3D images. The 2D results enable the determination of hyperbolas related to targets and interference structures related to stones and roots present in the landfill. The main 2D criteria for distinguishing objects buried in the site were the size, amplitude and position of their respective reflection hyperbolas. Synthetic models of common forensic targets were created to assist in the interpretation of GPR responses. The modeled targets comprised root, pebble, metal, plastic, bone, and empty cavity. The second stage of the research consisted of an expertise conducted with GPR in the Tekoha Jevy indigenous village, which showed related numerous reflection anomalies related to archaeological artifacts presented in the village. Finally, the data from the surveys conducted in the Araguaia Guerrilla War area enabled the best 2D and 3D acquisition parameters of GPR data, as well as establishing an efficient data processing routine for the definition of forensic targets.

Keywords: Forensic Geophysics, Ground Penetrating Radar, Forensic Geophysics Controlled Site, Araguaia Guerrilla War.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: ETAPAS NO PROCESSO GPR: (A) FORMAÇÃO DE UM ÚNICO TRAÇADO DE TEMPO DE DADOS, MOSTRANDO A CHEGADA DIRETA E A REFLEXÃO DO OBJETO; (B) MÚLTIPLOS TRAÇOS PARA UMA EXIBIÇÃO DE TRAÇO DE MANOBRA, COM CADA TRAÇO REPRESENTANDO UMA POSIÇÃO DIFERENTE NA SUPERFÍCIE DA TERRA E (C) RESULTADO DE UMA SEÇÃO 2D	43
FIGURA 2: ILUSTRA A RELAÇÃO ENTRE O COMPRIMENTO DE ONDA A PARTIR DA PERMISSIVIDADE DIÉLETRICA.....	45
FIGURA 3: RECONSTRUÇÃO GRÁFICA DE UM PULSO A PARTIR DO NÚMERO DE AMOSTRAS.	46
FIGURA 4: MODELO GEOTÉCNICO APLICADO PARA GERAR O CONJUNTO DE DADOS GPR QUASE-3D. CORTES NA PROFUNDIDADE 1,06 M, EVIDENCIAM AS DISTORÇÕES COM O AUMENTO DA DISTÂNCIA ENTRE OS PERFIS.	47
FIGURA 5: BLOCO DE GPR EM 3D DE EVENTOS HIPERBÓLICOS DERIVADOS DE TUBULAÇÕES METÁLICAS.....	48
FIGURA 6: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA GEOMETRIA PADRÃO DE UMA ANTENA TRANSMISSORA E RECEPTORA, E O CAMINHO DA ONDA ELETROMAGNÉTICA REFLETIDA.	50
FIGURA 7: AJUSTE DO TEMPO ZERO INDICADO PELA LINHA EM VERMELHO (2,5NS) APLICADO SOB O TRAÇO DO RADARGRAMA.	50
FIGURA 8: ILUSTRAÇÃO DA APLICAÇÃO DO FILTRO DEWON PARA ELIMINAR RUIDOS DE BAIXA FREQUENCIA, EXEMPLIFICADO ATRAVÉS DE UM TRAÇO EXTRAÍDO DO RADARGRAMA OBTIDO PELA ANTENA DE 700 MHZ (IDS).	52
FIGURA 9: LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DO SITIO CONTROLADO DE GEOFÍSICA FORENSE DA UFPR, COM A INDICAÇÃO DOS PRINCIPAIS ALVOS.	61
FIGURA 10: PERFIL DE SOLO ALTERADO TÍPICO DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA.	62

FIGURA 11: FOTOGRAFIAS EVIDENCIAM A DELIMITAÇÃO POR ESTACAS DE MADEIRAS DA ÁREA PARA INSTALAÇÃO DO SITIO CONTROLADO (A), E O GEORREFERENCIAMENTO COM UM GPS DE PRECISÃO DE TODOS OS VÉRTICES DA ÁREA (B).....	63
FIGURA 12: FOTOGRAFIAS EVIDENCIAM (A) O EQUIPAMENTO GPR DETECTOR DUO DA IDS (250 MHZ E 700 MHZ) E (B) A AQUISIÇÃO DE DADOS DE GPR ANTES DA INSTALAÇÃO DOS ALVOS NA ÁREA (BACKGROUND).....	63
FIGURA 13: FOTOGRAFIAS EVIDENCIAM: PREPARAÇÃO PARA A INSTALAÇÃO DOS ALVOS NO SCGFR-UFPR (A); ILUSTRAÇÃO DAS MEDIDAS RETIRADAS DE TODOS OS ARTEFATOS (B); MEDIÇÕES REALIZADAS PARA DIMENSIONAR OS BURACOS ESCAVADOS (C); GEORREFERENCIAMENTO DA BASE DO BURACO E DO TOPO DE TODOS OS ALVOS INSTALADOS NO SCGFR-UFPR (D).....	64
FIGURA 14:FOTOGRAFIAS EVIDENCIAM: ESCAVAÇÃO DO BURACO PARA INSTALAÇÃO DOS ARTEFATOS (A); PRIMEIRA CAMADA DE SOLO ORGÂNICO COM 0,19 M DE ESPESSURA (B); CONTATO ENTRE AS CAMADAS I E II SOLO SÍLTICO ARGILOSO (C); EXIBIÇÃO DAS TRÊS CAMADAS DE SOLO DESCRITAS NO SCGF(D); FRAGMENTOS DE QUARTZO OBSERVADOS NA ESCAVAÇÃO (E).....	65
FIGURA 15: FOTOS: DOS ARTEFATOS ARQUEOLOGICOS: VASO DE CERÂMICA (A); VASO DE BARRO (B); VASO DE CERÂMICA (C); D) SEIXOS (D); E) TIJOLOS MACIÇOS (E); TRONCO DE MADEIRA (F-EXCEÇÃO).	67
FIGURA 16: FOTOGRAFIAS DOS ARTEFATOS FORENSES: CAMISETA (G); TAMBOR DE PLÁSTICOS COM ARMAS (H); CALÇA JEANS E TÊNIS (I); SOLO REVIRADO (J); ESPINGARDAS (L); (M) OSSO BOVINO; (N) EXTINTOR.....	68
FIGURA 17: : FOTOGRAFIAS DOS ARTEFATOS DE CAULES FOSSILIZADOS: GIMNOSPERMA OVÓIDE TABULAR (O); GIMNOSPERMA PRISMÁTICO (P); GIMNOSPERMA RETANGULAR (Q); GIMNOSPERMA CILÍNDRICO TABULAR (R); ANGIOSPERMA CILÍNDRICO (S) E (T).	69
FIGURA 18: CROQUI EM PERSPECTIVA 3D DO SCGFR-UFPR COM A INDICAÇÃO DAS PROFUNDIDADES E DESCRIÇÃO DOS ITENS	

INSTALADOS NA ÁREA. PO – PROFUNDIDADE DO TOPO, E PB – PROFUNDIDADE DA BASE.....	70
FIGURA 19: FOTOGRAFIAS EVIDENCIAM A AQUISIÇÃO DE DADOS DE GPR DO BACKGROUND DE PARTE DO SCGFR-UFPR (A E B).....	71
FIGURA 20: FOTOS EVIDENCIAM A AQUISIÇÃO PSEUDO 3D: ILUSTRAÇÃO DA POLIGONAL E DA FITA MÉTRICA PARA ORIENTAÇÃO DOS PERFIS DURANTE A AQUISIÇÃO (A); MARCAÇÃO COM FITA MÉTRICA NAS EXTREMIDADES OPOSTA DA ÁREA INVESTIGADA E O BARBANTE NA PERPENDICULAR PARA AQUISIÇÃO PSEUDO 3D; FITA MÉTRICA INDICANDO A AQUISIÇÃO DOS PERFIS A CADA 0,05M (B); TÉCNICA DE AQUISIÇÃO CONSTANT OF SET COM O IDS E GSSI, RESPECTIVAMENTE (C-D).	72
FIGURA 21: ESPECTRO F-K OBTIDOS ATRAVÉS DAS ANTENAS COM FREQUÊNCIAS DE 250 MHZ (A), 400 MHZ (B) E 700 MHZ (C).....	74
FIGURA 22: ILUSTRAÇÃO DOS RADARGRAMAS, NÃO MIGRADOS, REALIZADOS PARA O BACKGROUND: RESPOSTAS DAS ANTENAS COM FREQUÊNCIAS DE 700 MHZ (A) E 250MHZ (B); RADARGRAMA INTERPRETADO NA RESPOSTA DE 700 MHZ (C).	75
FIGURA 23: RADARGRAMA EVIDENCIA O AJUSTE DE VELOCIDADE REALIZADOS SOBRE AS HIPÉRBOLES RELACIONADAS AO CABEAMENTO DE FIBRA ÓTICA INSTALADO NA ÁREA DO SÍTIO ANTES DA IMPLANTAÇÃO DOS ALVOS.....	76
FIGURA 24: BLOCOS 3D DOS REGISTROS DE GPR CONSTRUÍDOS A PARTIR DE PERFIS PARALELOS EQUIPAÇADOS EM 0,20 M: CONSTRUÍDOS A PARTIR DA ANTENA DE 700 MHZ (A) E 250 MHZ (B); BLOCO SECCIONADO ILUSTRANDO OS CABOS PRESENTE NA ÁREA (C) E O DEPTH SLICE A 0,37M ILUSTRANDO OS CABOS EM PLANTA.....	77
FIGURA 25: (A) SEÇÃO DE GPR SOBRE A L1 COM A IDENTIFICAÇÃO DOS ALVOS RELACIONADOS À FOSSEIS DE MADEIRAS PETRIFICADAS. DETALHE DA SEÇÃO L1 SOBRE OS ALVOS A1 (B), A2 (C), A3 (D), A4 (E) E A5 (F).	79
FIGURA 26: (A) SEÇÃO DE GPR SOBRE A L1 COM A IDENTIFICAÇÃO DOS ALVOS RELACIONADOS À FOSSEIS DE MADEIRAS PETRIFICADAS.	

DETALHE DA SEÇÃO L1 SOBRE OS ALVOS A1 (B), A2 (C), A3 (D), A4 (E) E A5 (F).	79
FIGURA 27: (A) SEÇÃO DE GPR SOBRE A L2 COM A IDENTIFICAÇÃO DOS ALVOS RELACIONADOS À FOSSEIS DE MADEIRAS PETRIFICADAS. DETALHE DA SEÇÃO L2 SOBRE OS ALVOS A6 (B), A7 (C), A8 (D), A9 (E) E A10 (F).	80
FIGURA 28: (A) SEÇÃO DE GPR SOBRE A L2 COM A IDENTIFICAÇÃO DOS ALVOS RELACIONADOS À FOSSEIS DE MADEIRAS PETRIFICADAS. DETALHE DA SEÇÃO L2 SOBRE OS ALVOS A6 (B), A7 (C), A8 (D), A9 (E) E A10 (F).	81
FIGURA 29: (A) SEÇÃO DE GPR SOBRE A L3 COM A IDENTIFICAÇÃO DO VASO DE CERÂMICA. DETALHE DA SEÇÃO L3 SOBRE O ALVO A11 (B)..	82
FIGURA 30: (A) SEÇÃO DE GPR SOBRE A L3 COM A IDENTIFICAÇÃO DO VASO DE CERÂMICA. DETALHE DA SEÇÃO L3 SOBRE O ALVO A11 (B)..	82
FIGURA 31: (A) SEÇÃO DE GPR SOBRE A L4 COM A IDENTIFICAÇÃO DO SEIXOS. DETALHE DA SEÇÃO L4 SOBRE OS ALVOS A12 (B) E A13 (C)..	83
FIGURA 32: (A) SEÇÃO DE GPR SOBRE A L4 COM A IDENTIFICAÇÃO DO SEIXOS. DETALHE DA SEÇÃO L4 SOBRE OS ALVOS A12 (B) E A13 (C)..	83
FIGURA 33: (A) SEÇÃO DE GPR SOBRE A L5 COM A IDENTIFICAÇÃO DO ALVO VASO DE CERÂMICA. DETALHE DA SEÇÃO L5 SOBRE OS ALVOS A14 (B), A15 (C) E A16 (D).	84
FIGURA 34: (A) SEÇÃO DE GPR SOBRE A L5 COM A IDENTIFICAÇÃO DO ALVO VASO DE CERÂMICA. DETALHE DA SEÇÃO L6 SOBRE OS ALVOS A14 (B), A15 (C) E A16 (D).	84
FIGURA 35: (A) SEÇÃO DE GPR SOBRE A L6 COM A IDENTIFICAÇÃO DO ALVO TIJOLO MACIÇO E TÊNIS. DETALHE DA SEÇÃO L6 SOBRE OS ALVOS A17 (B), A18 (C) E A19 (D).	85
FIGURA 36: (A) SEÇÃO DE GPR SOBRE A L6 COM A IDENTIFICAÇÃO DO ALVO TIJOLO MACIÇO E TÊNIS. DETALHE DA SEÇÃO L6 SOBRE OS ALVOS A17 (B), A18 (C) E A19 (D).	85
FIGURA 37: (A) SEÇÃO DE GPR SOBRE A L7 COM A IDENTIFICAÇÃO DO ALVO VASO DE BARRO, TRONCO DE MADEIRA E EXTINTOR. DETALHE DA SEÇÃO L7 SOBRE OS ALVOS A20 (B), A21 (C) E A22 (D).	86

FIGURA 38: (A) SEÇÃO DE GPR SOBRE A L7 COM A IDENTIFICAÇÃO DO ALVO VASO DE BARRO, TRONCO DE MADEIRA E EXTINTOR. DETALHE DA SEÇÃO L7 SOBRE OS ALVOS A20 (B), A21 (C) E A22 (D).	87
FIGURA 39: (A) SEÇÃO DE GPR SOBRE A L8 COM A IDENTIFICAÇÃO DOS ALVOS RELACIONADOS VASO DE CERÂMICA. DETALHE DA SEÇÃO L8 SOBRE OS ALVOS A23 (B), A24 (C).	88
FIGURA 40: (A) SEÇÃO DE GPR SOBRE A L8 COM A IDENTIFICAÇÃO DOS ALVOS RELACIONADOS AOS TAMBORES DE PLÁSTICO. DETALHE DA SEÇÃO L8 SOBRE OS ALVOS A23 (B), A24.	88
FIGURA 41: PARTE DE SEÇÕES DE GPR REALIZADAS COM A FREQUENCIA DE 700MHZ EM DOIS PERÍODOS CLIMÁTICOS DISTINTOS (SECA E CHUVOSO). O AJUSTE HIPERBÓLICO EM ALVOS COM PROFUNDIDADES CONHECIDAS INDICAM DIMINUIÇÃO DA VELOCIDADE COM O AUMENTO DO CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO.	89
FIGURA 42: CROQUI ILUSTRANDO OS PERFIS 2D EQUIESPAÇADOS EM 0,05M E 0,10M ADQUIRIDOS COM A ANTENA COM FREQUÊNCIAS DE 250 MHZ E 700 MHZ.	90
FIGURA 43: DEPTH SLICE ADQUIRIDOS SOB ÁREA QUE CONTÉM OS FÓSSEIS: PROFUNDIDADE DE 0,008M COM AS ANOMALIAS REFERENTES AO CABO DE AÇO E AS CAVAS PARA INSTALAÇÃO DOS FÓSSEIS (A); PROFUNDIDADE DE 0,15M ZONA PONTUAL DE ALTA REFLECTÂNCIA REFERENTES AOS FÓSSEIS INSTALADOS EM AREIA (B); PROFUNDIDADE DE 0,35M ZONAS PONTUAIS DE ALTA REFLECTÂNCIA ASSOCIADOS AOS FÓSSEIS INSTALADOS NO MEIO ARGILOSO (A1) E EM AREIA FINA (A5, A10) (C); PROFUNDIDADE DE ZONA PONTUAL DE ALTA REFLECTÂNCIA REFERENTE AOS FÓSSEIS (A1 E A6) 0,45 M (D)	92
FIGURA 44: RESULTADOS DOS DEPTH SLICES (0,22M - 0,32M) ADQUIRIDOS COM A ANTENA DE 250 MHZ E 700 MHZ SOBRE A PORÇÃO CENTRAL DO SCGF ILUSTRAM GEOMETRIA DOS ALVOS IDENTIFICADOS: ANTENA DE 700 MHZ (A-B); ANTENA 250 MHZ (C-D).	93
FIGURA 45: ILUSTRAÇÃO DAS DISTORÇÕES VISUALIZADAS NA AQUISIÇÃO 3D: RADARGRAMAS 2D DESLOCAMENTO DE POSIÇÃO DOS TRAÇOS (A,B); INTERFERÊNCIA NA IMAGEM FINAL PSEUDO 3D (C).	94

FIGURA 46:LOCALIZAÇÃO DO SCGF-UFPR.....	102
FIGURA 47: FOTOS EVIDENCIAM: O COMPRIMENTO DA ESPINGARDA (A); CONJUNTO DE ESPINGARDAS E A CAIXA DE PAPELÃO QUE FORAM ENTERRADAS (B); RETROESCAVADEIRA UTILIZADA PARA ESCAVAÇÃO DO BURACO (C); O CONTATO ENTRE OS SOLOS (D); DIMENSÃO DO BURACO ESCAVADO (E-F).....	103
FIGURA 48: MODELO USADO NA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DOS DADOS DE GPR COM OS RESPECTIVOS PARÂMETROS ELÉTRICOS PARA CADA CAMADA.....	104
FIGURA 49: RADARGRAMAS SINTÉTICOS GERADOS A PARTIR DE MODELOS ONDE HÁ VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DO CABO DE AÇO. FREQUÊNCIAS SIMULADAS DE 400, 700 E 900 MHZ.....	105
FIGURA 50: RADARGRAMAS SINTÉTICOS GERADOS COM A FREQUÊNCIA DE 700MHZ PARA MODELOS ONDE HÁ VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DO CABO DE AÇO. (A) 1.8MM, (B) 6.55MM, (C) 10MM, E (D) 20MM.....	106
FIGURA 51: A) TRAÇOS DO ÁPICE DAS DIFRAÇÕES PROVENIENTES DOS RADARGRAMAS SINTÉTICOS DE 700MHZ. (B) ENVELOPE DOS TRAÇOS QUE INDICA A VARIAÇÃO DA AMPLITUDE COM A MUDANÇA DO DIÂMETRO DO CABO DE AÇO.....	106
FIGURA 52: SEÇÃO DE GPR EXPLORATÓRIA PARA DEFINIR A RESOLUÇÃO ESPACIAL NA ÁREA (A). ESPECTRO F-K DO RADARGRAMA EXPLORATÓRIO COM A INDICAÇÃO DA ÁREA DE MAIOR ENERGIA (B).	107
FIGURA 53: ILUSTRAÇÃO: FOTO EXIBINDO A AQUISIÇÃO (A). ILUSTRAÇÃO DOS COMPONENTES PRESENTES NA ÁREA INVESTIGADA (B); CABO DE AÇO UTILIZADO NA AQUISIÇÃO (C) E O CROQUI DA AQUISIÇÃO COM A CAVA (D).....	108
FIGURA 54: PARTE DE SEÇÕES DE GPR QUE EVIDENCIAM A HIPÉRBOLE DE DIFRAÇÃO RELACIONADA AO CABO DE AÇO, ANTES DA CORREÇÃO DE POSICIONAMENTO (A) E APÓS A CORREÇÃO (B). CORTES EM PROFUNDIDADE DE BLOCOS DE GPR 3D ANTES DA CORREÇÃO (C) E DEPOIS DA CORREÇÃO (D).	110

FIGURA 55: A) RADARGRAMA ADQUIRIDO SOBRE O CONJUNTO DE ESPINGARDAS MOSTRANDO AS ANOMALIAS ASSOCIADAS A ESCAVAÇÃO E AO CONJUNTO DE ESPINGARDAS; B) ILUSTRAÇÃO DOS REFLETORES INTERROMPIDOS ASSOCIADOS A ESCAVAÇÃO; C-F) IMAGENS DAS DISTINTAS ANOMALIAS HIPERBÓLICAS ASSOCIADAS AO ALVO FORENSE.	112
FIGURA 56: CORTES EM PROFUNDIDADE, DE BLOCOS DE GPR 3D, NAS PROFUNDIDADES DE 0.04M (A-C) E 0.42M (B-D), QUE EVIDENCIAM AS ANOMALIAS REFERENTES AO CABO DE AÇO E AO CONJUNTO DE ESPINGARDAS.	113
FIGURE 57: LOCATION MAP OF THE STUDY AREA (GOOGLE EARTH PRO, SIRGAS 2000 UTM: 21S).....	124
FIGURE 58: (A) CERAMIC FRAGMENTS ON THE SURFACE. (B) ARCHAEOLOGICAL MATERIAL IN THE SOIL PROFILE (SEE L8 IN FIG. 4C).	126
FIGURE 59: MAP OF THE TEKHOHA JEVY INDIGENOUS VILLAGE STUDY AREA INDICATING THE POSITION OF THE GPR PROFILES.....	128
FIGURE 60: RESULTS OF 2D GPR CROSS-SECTIONS. (A) LOCATION OF THE GPR PROFILES INDICATING THE ANOMALIES EXCAVATED AND NOT EXCAVATED. (B) L2 RADARGRAM AND ITS INTERPRETATION (C). (D) L15 RADARGRAM AND ITS INTERPRETATION (E). (F) L8 RADARGRAM AND ITS INTERPRETATION (G).....	130
FIGURE 61: (A) EXCAVATION MADE TO INVESTIGATE THE GPR ANOMALY RECORDED AT THE 1.50 M POSITION, ALONG THE TRAVERSE L1–L3 PROFILES. (B) EVIDENCE OF THE FRAGMENTS DISCOVERED AT A DEPTH OF 0.18 M AND RECOVERED FROM THE EXCAVATION.....	130
FIGURE 62: (A) & (B) SECOND EXCAVATION TO RECOVER THE CERAMIC FRAGMENTS. (C) THE REMOVAL OF THE CERAMIC FRAGMENTS. (D)PHOTOGRAPH TO SHOW THE RELATIVE SIZE OF THE ARCHAEOLOGICAL ARTEFACT.....	131
FIGURE 63: (A) STRATIGRAPHIC 3D BLOCK MODEL DERIVED FROM THE GPR DATA AND ITS INTERPRETATION (B). (C) L2 RADARGRAM AND STRATIGRAPHIC PROFILE OF THE ARCHAEOLOGICAL SITE OBTAINED	

THROUGH INDIRECT AND DIRECT METHODS (D). (E) STRATIGRAPHIC REPRESENTATION OF PART OF THE EXPOSED PROFILE INDICATED IN FIGURE 58B (MODIFIED FROM IPHAN 2015).....	133
FIGURE 64: DEPTH-SLICE PROFILES THROUGH THE GPR DATA AND THE RESPECTIVE HIGH-AMPLITUDE GEOPHYSICAL SIGNATURES OF SITES SHOWING THE POTENTIAL LOCATION OF ARCHAEOLOGICAL ARTEFACTS. D, DEPTH IN M; T, TIME IN NS.....	134
FIGURA 65: IMAGENS DE SATÉLITE COM AS LOCALIZAÇÕES DAS ÁREAS PESQUISADAS COM O GPR. (A) REGIÃO DO BICO DO PAPAGAIO COM A INDICAÇÃO DE ABÓBORA 2, SÃO SEBASTIÃO E BACABA IV. (B) FAZENDA ÁGUA LIMPA COM A INDICAÇÃO DO PONTO DE INUMAÇÃO DE UM SUÍNO.	143
FIGURA 66: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA AQUISIÇÃO DE DADOS DE GPR COM A INDICAÇÃO DE UM TRAÇO DE GPR, UMA SEÇÃO NO MODO WIGGLE E NO MODO DENSIDADE DE CORES.	143
FIGURA 67(A) MODELO FÍSICO USADO PARA CONSTRUÇÃO DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DE OBJETOS QUE NORMALMENTE PODEM SER ENCONTRADOS EM UMA INVESTIGAÇÃO FORENSE. RESPOSTAS SINTÉTICAS DOS ALVOS INSTALADOS EM DISTINTOS AMBIENTES: ARENOSO (B), SILTOSO (C) E ARGILOSO (D).	151
FIGURA 68: TRAÇOS REFERENTES AO ÁPICE DAS HIPÉRBOLES SIMULADAS PARA OS ALVOS ENTERRADOS EM SOLO ARENOSO (A), SILTOSO (B) E ARGILOSO (C).	152
FIGURA 69: COMPARAÇÃO DAS VARIAÇÕES MÁXIMAS DE AMPLITUDES DOS ENVELOPES DOS TRAÇOS DE CADA ALVO INSTALADO EM AMBIENTES ARENOSOS, SILTOSOS E ARGILOSOS. RESPOSTAS DE RAÍZES (A), SEIXOS (B), OSSOS (C), METAIS (D), PLÁSTICOS (E) E VAZIOS (F).....	154
FIGURA 70: RADARGRAMA OBTIDO NA ÁREA DE INUMAÇÃO DE UM SUÍNO NA FAZENDA ÁGUA LIMPA DA UNB, COM DISTINTAS APLICAÇÕES DE GANHOS (AGC, SEC E FUNCTION).	156

FIGURA 71: RESULTADOS DA APLICAÇÃO DE DISTINTOS GANHOS E FILTROS 2D (RUNNING AVERAGE, REMOVE BACKGROUND E SUBTRACTING AVERAGE).....	157
FIGURA 72: ILUSTRAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS APÓS A APLICAÇÃO DO FILTRO 1D (BANDPASS FREQUENCY), POSTERIORMENTE A APLICAÇÃO DOS FILTROS 2D (RUNNING AVERAGE, SUBTRACTING AVERAGE, REMOVE BACKGROUND).....	159
FIGURA 73: SUGESTÃO DE UMA ROTINA DE PROCESSAMENTO 2D (1-8) PARA INVESTIGAÇÕES FORENSES.....	160
FIGURA 74: A) FOTO DA INSTALAÇÃO DE OSSOS BOVINOS (GTT,2009); B) ÁREA DE AQUISIÇÃO DOS DADOS DE GPR; C) <i>DEPTH SLICE</i> PROCESSAMENTO 3D1; D) <i>DEPTH SLICE</i> ATRAVÉS DO PROCESSAMENTO 3D2.....	161
FIGURA 75: ILUSTRAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PELAS MIGRAÇÕES 2D E 3D PARA ANOMALIA: RESULTADOS APRESENTADOS ATRAVÉS DO <i>DEPTH SLICE</i> E DO RADARGRAMA APÓS A MIGRAÇÃO (A-B; E-F); RESULTADOS ILUSTRADOS ATRAVÉS DO <i>DEPTH SLICE</i> E DO RADARGRAMA APÓS A MIGRAÇÃO 3D (C-D; G-H).....	163
FIGURA 76: SUGESTÃO DE UMA ROTINA DE PROCESSAMENTO PARA OTIMIZAR DADOS FORENSES 2D E 3D.	164
FIGURA 77: MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS SEÇÕES DE GPR ADQUIRIDAS NA ÁREA ABÓBORA 2.....	166
FIGURA 78: COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DA ROTINA DE PROCESSAMENTOS: <i>DEPTH SLICE</i> FINAL ELABORADO PELA ROTINA DE PROCESSAMENTO (A); <i>DEPTH SLICE</i> FINAL ELABORADO PELA ROTINA DE PROCESSAMENTO DO GTA/GGTT (B); ANOMALIA RELACIONADA A ESCAVAÇÃO (C-D); ALVO ENCONTRADO NA ESCAVAÇÃO (E).	167
FIGURA 79: MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS SEÇÕES DE GPR ADQUIRIDAS NA ÁREA DA FAZENDA SÃO SEBASTIÃO 2.	168
FIGURA 80: COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DA ROTINA DE PROCESSAMENTOS: <i>DEPTH SLICE</i> FINAL ELABORADO PELA ROTINA DE PROCESSAMENTO (A); <i>DEPTH SLICE</i> FINAL ELABORADO PELA ROTINA	

DE PROCESSAMENTO DO GTA/GGTT (B); ANOMALIA RELACIONADA A ESCAVAÇÃO (C-D); ALVO ENCONTRADO NA ESCAVAÇÃO (E).	169
FIGURA 81: COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DA ROTINA DE PROCESSAMENTOS: <i>DEPTH SLICE</i> FINAL ELABORADO PELA ROTINA DE PROCESSAMENTO (A); <i>DEPTH SLICE</i> FINAL ELABORADO PELA ROTINA DE PROCESSAMENTO DO GTA/GGTT (B); ANOMALIA RELACIONADA A ESCAVAÇÃO (C-D); ALVO ENCONTRADO NA ESCAVAÇÃO (E).	170
FIGURA 82: COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DA ROTINA DE PROCESSAMENTOS: <i>DEPTH SLICE</i> FINAL ELABORADO PELA ROTINA DE PROCESSAMENTO (A); <i>DEPTH SLICE</i> FINAL ELABORADO PELA ROTINA DE PROCESSAMENTO DO GTA/GGTT (B); ANOMALIA RELACIONADA A ESCAVAÇÃO (C-D); ALVO ENCONTRADO NA ESCAVAÇÃO (E).	172

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: PESQUISAS NAS ÁREAS DE GEOCIÊNCIAS FORENSE E ARQUEOLOGIA QUE FIZERAM USO DE MÉTODOS GEOFISICOS.	29
TABELA 2: EXIBE AS PROFUNDIDADES ALCANÇADAS NA INVESTIGAÇÃO REALIZADA NO SITIO CONTROLADO DE GEOFISICA FORENSE DA UFPR, POR MEIO DAS ANTENAS COM FREQUÊNCIAS DE 250, 400 E 700 MHZ. 44	
TABELA 3: PARÂMETROS DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE GPR USADOS NA ÁREA DO SCGFR-UFPR.....	73
TABELA 4: EXIBIÇÃO DOS VALORES MÍNIMOS PARA CADA ESPAÇAMENTO ENTRE OS PERFIS PARA AQUISIÇÃO PSEUDO 3D.	73
TABELA 5: EXIBE AS VELOCIDADES APLICADAS PARA MIGRAÇÃO E CONSTRUÇÃO DO DEPTH SLICE.	90
TABELA 6: PARAMETROS DE CAMPO UTILIZADOS DURANTE AS AQUISIÇÕES DE DADOS DE GPR NAS ÁREAS DE ESTUDO.	144
TABELA 7: PROPRIEDADES FÍSICAS, DOS PRINCIPAIS MATERIAIS IDENTIFICADOS EM ÁREAS FORENSES, USADAS NAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DE GPR.....	150
TABELA 8: EXIBIÇÃO DAS AMPLITUDES DE SINAIS DE CADA MATERIAL E A SUA VARIAÇÃO ENTRE OS SOLOS.....	155

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	HIPÓTESE	28
1.2	JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS	28
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1	CAMPOS DE TESTES OU SÍTIOS CONTROLADOS	30
2.2	GEOFÍSICA APLICADA À FORENSE	32
2.3	GEOFÍSICA APLICADA À ARQUEOLOGIA	36
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	38
3.1	GROUND PENETRATING RADAR	38
3.1.1	Técnicas de aquisição dos dados	42
3.1.2	Parâmetros de aquisição GPR 2D e 3D	43
4	PROCESSAMENTO DE DADOS DE GPR	49
4.1	AJUSTE DO TEMPO ZERO	49
4.2	FILTROS 1D E 2D	51
4.2.1	Filtros Temporal (1D)	51
4.2.2	Filtros espaciais (2D)	52
4.3	GANHOS	53
4.4	FILTRO FK (<i>Frequency-wavenumber</i>)	55
4.5	MIGRAÇÃO	55
5	RESULTADOS	56
5.1	ARTIGO 1	58
5.1.1	Resumo	58
5.1.2	Abstract	58
5.1.3	Introdução	59
5.1.4	Instalação do sítio controlado de geofísica forense	63
5.1.5	Aquisição de dados	71
5.1.6	Resultados do gpr	74
5.1.7	Conclusão	95
5.1.8	Referências	95

5.2	ARTIGO 2.....	98
5.2.1	Resumo.....	98
5.2.2	Abstract.....	99
5.2.3	Introdução.....	100
5.2.4	O sítio controlado de geofísica forense da UFPR.....	101
5.2.5	Simulações numéricas.....	103
5.2.6	Aplicação da metodologia em área controlada.....	106
5.2.7	Resultados.....	111
5.2.8	Conclusões.....	114
5.2.9	Referências.....	114
5.3	ARTIGO 3 (Original no Apêndice 1).....	120
5.3.1	Abstract.....	120
5.3.2	Introduction.....	120
5.3.3	Overview of archaeological geophysics in brazil.....	122
5.3.4	Geology.....	123
5.3.5	Gpr survey.....	124
5.3.6	Results and discussion.....	129
5.3.7	Conclusions.....	135
5.3.8	Referencies.....	136
5.4	ARTIGO 4.....	139
5.4.1	Resumo.....	139
5.4.2	Abstract.....	139
5.4.3	Introdução.....	140
5.4.4	Material e método.....	141
5.4.5	Processamentos.....	144
5.5	MODELAGEM NUMÉRICA.....	149
5.6	DEFINIÇÃO DA ROTINA DE PROCESSAMENTO.....	155
5.7	APLICAÇÃO DA ROTINA DE PROCESSAMENTO.....	165
5.7.1	Área Abóbora 2.....	165
5.7.2	Área São Sebastião.....	167
5.7.3	Área Bacaba IV.....	171
5.8	CONCLUSÃO.....	173
5.8.1	Refêrencias.....	174

6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES.....	178
	REFERÊNCIAS.....	180
	APÊNDICE 1- ARTIGO PUBLICADO.....	195

APRESENTAÇÃO

A presente tese foi dividida em 6 capítulos, mais a conclusão e recomendações para futuras pesquisas:

No Capítulo 1, discorro sobre conceitos relacionados a geociências forense, o maior evento Geofísico Forense-Antropológico (Guerrilha do Araguaia) que aconteceu no Brasil, o que motivou a pesquisa e os objetivos alcançados pela tese. Assim, neste capítulo apresento a Introdução, Hipótese, Justificativa e Objetivos.

No capítulo 2, Revisão Bibliográfica, discorro sobre algumas pesquisas realizadas por cientistas que utilizaram métodos geofísicos para aprimoramento das ciências forense e arqueológica.

No capítulo 3, contextualizou a fundamentação teórica do método radar de penetração de solo

No capítulo 4, descrevi resumidamente os principais processamentos que são aplicados nos dados de GPR em forense.

No capítulo 5, reproduzo os resultados obtidos durante a pesquisa e foram divididos na forma de artigos: 1 publicado, 1 submetido e 2 em fase de revisão para submissão. O capítulo 6 está relacionado a conclusão e recomendações para futuras pesquisas.

Por fim, no Apêndice 1 contém o artigo publicado.

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

As Geociências Forenses constituem um ramo recente das Geociências, no qual os cientistas ou peritos forenses se utilizam dos princípios, práticas e procedimentos geológicos, geofísicos e ambientais com intuito de produzir evidências materiais, e que posteriormente, possam ser aplicadas nos tribunais para provar ou refutar a presença de suspeitos na investigação (MATTOS, 2015; LOURENÇO, 2009;).

Nesta ciência os limites científicos ainda não são exatamente definidos, envolvendo outras especialidades tais como: Geofísica Forense ou Legal, Arqueologia Forense, Engenharia Forense, Botânica Forense, Antropologia Forense, dentre outras (PYE & CROFT, 2004; RUFFEL & McKINLEY, 2008).

A Geofísica Forense e a Geofísica Arqueológica-Antropológica são as novas vertentes na área das Geociências, haja vista que os métodos geofísicos são ferramentas não invasivas que possibilitam a investigação de extensas áreas em um curto espaço de tempo. Eficiente para a descoberta de cadáveres clandestinamente sepultados, escavações irregulares em presídios e outras edificações, ocultamento de peças metálicas e não metálicas, delimitações de plumas de contaminação em aterros sanitários, mapeamento de sítios arqueológicos e covas, dentre outras (BORGES et al., 2015)

Segundo Fenning & Donnelly (2004) a Geofísica Forense é definida como a aplicação de métodos geofísicos relacionados às investigações legais. E a Ge-

ofísica Arqueológica é uma ferramenta de prospecção geofísica para auxiliar arqueólogos a localizarem e mapearem objetos culturais em subsuperfície, ou seja, de maneira complementar aos métodos tradicionalmente usados (CONYERS, 2004). Logo a Geofísica Antropológica se utiliza das propriedades físicas para auxiliar na localização de cadáveres humanos ocultos no meio (subsolo e paredes).

No Brasil houve um aumento na procura por pesquisas associadas a Geofísica Forense, está crescente, se deve principalmente ao maior evento Geofísico Forense-Antropológico que ocorreu no país a partir do ano de 2009. Evento este relacionado a um dos episódios mais tenebrosos e ocultos da ditadura militar Brasileira, implantada após o golpe militar de 1964 -1984, denominado de Guerrilha do Araguaia esta revolução armada aconteceu no período de 1972 a 1974. O movimento armado começou a se instalar na região sudeste do Pará, norte do Goiás (Bico do Papagaio), atual Estado do Tocantins, e oeste do Maranhão, em meados de 1966 (CORRÊA, 2013). Este movimento de luta armada formada em sua grande maioria por jovens universitários, ligados ao Partido Comunista do Brasil, tinha como objetivo combater o regime militar implantado no país e no período que sucedeu o conflito cerca de 59 guerrilheiros foram mortos ou desaparecidos, outros 20 sobreviveram.

No ano de 2003 por meio da sentença judicial (processo nº I-44/82-B) ordenou esforços do Estado a localizar e entregar os corpos dos desaparecidos da Guerrilha do Araguaia. E no ano de 2009, governo do ex presidente Luís Inácio Lula da Silva, a juíza federal Solange Salgado enfatizou o governo a cumprir a ordem judicial. Para localizar estes desaparecidos o então Ministro da Defesa (Nelson Jobim) criou o Grupo de Trabalho Tocantins (GTT), posteriormente foi designado de Grupo de Trabalho do Araguaia (GTA), a qual era formado por familiares, pesquisadores, geólogos, legistas, antropólogos, representantes do governo do Pará e representantes do Partido Comunista do Brasil (CORRÊA, 2013).

E como forma de auxiliar o desenvolvimento da geofísica forense/arqueológica os geocientistas constroem, em diversas regiões do mundo, os sítios controlados caracterizados por serem áreas semelhantes as encontradas em locais de crime ou em sítios arqueológicos, com o objetivo de testar a aplicabilidade de diversos métodos geofísicos. No Brasil existem diversos destes sítios

controlados implantados com o propósito de estudar distintas áreas como a geotecnia, a ambiental, a arqueologia e a forense (PORSANI et al., 2006; BORGES, 2007; BRASIL, 2013; CAVALCANTI, 2017).

Contudo, no Brasil as investigações de cunho forense estão condicionadas principalmente por Institutos de Criminalística dos estados, Departamento de Polícia Federal e em alguns casos especialistas civis indicados por juízes (BORGES et al., 2015). Deste modo, este fato, torna-se uma condicionante para a carência de pesquisas forense e arqueológica associadas à determinação dos melhores parâmetros relacionados a aquisição, o processamento e a interpretação dos dados obtidos. Tradicionalmente, em função da falta de tempo e também de experiência das equipes, realizam-se apenas investigações 2D, o que conduz a inúmeros erros de localização do alvo objetivo. Visto que nas investigações realizadas com o GPR as respostas originadas por alvos pontuais (armas, osada humana, armamentos, raiz, dentre outros) correspondem a hipérboles de difração, assinatura resultante do padrão cônico de radiação da antena, que dificultam a diferenciação dos materiais em subsuperfície (DAVIS & ANNAN, 1989; SYAMBAS, 2012; MERTENS et al, 2016; UTSI, 2017; YUAN & FAN, 2018).

À vista disso, esta pesquisa será desenvolvida a partir de uma lacuna existente, relacionada aos melhores parâmetros de aquisição (intervalo de amostragem espacial e temporal, frequência de amostragem, taxa de transmissão e registro), de processamento (filtros 1D e 2D, filtros temporais e espaciais, tipos de migração), de visualização (2D ou 3D, balanceamento de cores, análise de histogramas de distribuição de amplitude) e de interpretação (tipos de refletores, variações de amplitude em função de impedância elétrica, radarfácies). A determinação dos parâmetros supracitados possibilita respostas mais conclusivas nas investigações geofísicas realizadas pelo método radar de penetração de solo ou *ground penetrating radar* (GPR).

1.1 HIPÓTESE

Considerando que os materiais possuem propriedades físicas, geometria e tamanhos diferentes, esta pesquisa fundamenta-se na hipótese de que as respostas relacionadas as amplitudes de sinais são distintas ou muito semelhantes. À vista disso, é proposto uma rotina de processamento para otimizar as repostas relacionadas a alvo forense e que possa ser replicada em investigações de cunho forense.

1.2 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

O presente trabalho se justifica pelo aumento de pesquisas relacionadas a geofísica forense nos últimos anos no Brasil. O auxílio de métodos geofísicos, principalmente o GPR, tem contribuído de forma satisfatória nas perícias forenses e arqueológicas, entretanto a ausência de pesquisas relacionadas a parâmetros de aquisição, processamento e interpretação corresponde a uma lacuna existente. Dessa maneira, a pesquisa tem como contribuição os seguintes objetivos:

- Instalar uma área controlada com alvos forenses no campus da Universidade Federal do Paraná para calibração de respostas geofísicas;
- Analisar as repostas 2D e 3D GPR (400 MHz e 700 MHz) no Sítio Controlado de Geofísica Forense da Universidade Federal do Paraná.
- Verificar a hipótese de discriminar alvos forenses com composições distintas através da amplitude de sinal por meio de modelos sintéticos;
- Desenvolver um protocolo de aquisição e processamento para auxiliar os peritos forenses nas investigações com o método GPR;
- Acompanhar e auxiliar na perícia forense realizada na cidade de Guaíra-Paraná no sítio arqueológico da aldeia indígena Tekoha Jevy com o método GPR;
- Aplicar uma rotina de processamento padrão para alguns conjuntos de dados de GPR 2D e 3D, de perícias realizadas pelo GTA/GTT na região do sudeste do Pará; e,
- Otimizar as repostas de volumes de GPR3D inserindo-se um alvo linear de alta impedância eletromagnética na superfície do terreno.

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo contextualiza e descreve pesquisas que utilizaram métodos geofísicos como apoio para as ciências Forense e Arqueologia. Na TABELA 1 constam, em ordem cronológica, pesquisas executadas com o uso de métodos geofísicos para estes fins.

TABELA 1: Pesquisas nas áreas de geociências forense e arqueologia que fizeram uso de métodos geofísicos.

Pesquisadores	Geofísica aplicada
Bowders et al. (1982), Sauck (1996), Isaacson et al. (1999), Hildebrand et al. (2002), Rodrigues (2004), Porsani et al. (2006), Rodrigues e Porsani (2006), Borges (2007), Catete (2010), Conyers (2013), Blum (2012), Brasil (2013), Poluha (2017).	Áreas de testes
Bevan (1991), Strongmman (1992), Owsley (1995), Miller (1996), Hammon et al. (2000), Koppenjan et al. (2003), Ruffel (2005), Schultz et al. (2006), Fiedler et al. (2009), Lourenço (2009), Nascimento (2009), Borges et al. (2010), Castelo Branco et al. (2010), Pringle & Jervis (2010), Novo et al. (2011), Pedrosa Junior et al. (2010), Blum e Russo (2011), Pringle et al. (2012), Schultz & Martin (2012), Solla et al. (2012), Alves et al., (2013, 2015), Forbes et al. (2013), Hansen & Pringle (2013), Molina et al. (2014), Pringle et al. (2014), Salsarola et al. (2015), Barone et al. (2015), Barone et al. (2016), Booth & Pringle (2016), Schultz et al. (2016), Widodo et al. (2016), Cavalcanti (2017), Dick et al. (2017), Barone & Maria (2019), Canata et al. (2019).	Forense
Alves (1979), Malagodi et al. (1996), Pipan et al. (1999), Whiting et al. (2001), Conyers (2006), Melo (2007), Furlan (2008), Aragão et al (2009), Negri et al. (2008), Rodrigues (2009), Boniger & Tronicke (2010), Blum et al. (2010), Conyers & Leckebush (2010), Porsani et al. (2010), Souza (2012), Furtado (2013), Gouvêa et al. (2013).	Arqueologia

2.1 CAMPOS DE TESTES OU SÍTIOS CONTROLADOS

No estado de Nova Jersey (EUA) foi construído o primeiro sitio controlado em uma pedreira e teve como intuito estudos geofísicos ambientais com o GPR para avaliar o seu potencial no diagnóstico de resíduos. Os pesquisadores (BOWDERS & KOENER, 1982) enterraram diversos tambores metálicos e de plásticos, vazios ou preenchidos por água salgada/doce e lixos domésticos, simulando lixões. Estes artefatos foram enterrados em distintas profundidades e configurações (vertical ou horizontal), separados ou amontoados. Os resultados mais precisos foram evidenciados nos tambores metálicos ao contrário dos tambores de plásticos vazios que não puderam ser imageados, entretanto quando preenchidos por água foram detectados.

Sauck (1996) pesquisador da Universidade de Western Michigan (EUA) implementou um sitio controlado para atividades didáticas de alunos de graduação e pós-graduação na área de geofísica.

Abordando o contexto de sítios controlados construídos para auxiliar pesquisas arqueológicas destacam-se os trabalhos de Isaacson et al. (1999), Hildebrand et al. (2002) realizados no *Controlled Archaeological Test Site* (CATS). Na cidade de Champaign, estado de Illinois (EUA), criou-se o CATS contextualizado para auxiliar nas pesquisas e treinamento geofísico aplicado a arqueologia. Este sítio replica uma série de artefatos ou monumentos arqueológicos que são encontrados em locais da América do Norte, dentre os quais destacam-se: uma arquitetura monumental na forma de valas e aterros; sepultamento de porcos e cachorros sob pisos ou em caixão; fogueiras, poços, poços de lixo e aglomerados de artefatos; uma parede de tijolos, ou seja distintos materiais com composição e profundidade variadas, entre outros objetos (ISSACSON et al., 1999). Em 2002, os pesquisadores Hildebrand et al. (2002), aplicaram os métodos geofísicos (GPR e sísmica) para averiguar as respostas geofísicas sob um corpo de suíno sepultado em um caixão de madeira no CATS. E os resultados foram satisfatórios para identificação do alvo sepultado.

No ano de 1994 na cidade de Richland (Washington) construiu-se o *Hazardous Materials Management and Emergency Response Training Facility* (HAMMER) com o objetivo de desenvolver pesquisas com ferramentas não destrutivas (geofísicas) para colaborar na identificação de sepultamentos humanos,

sítios e artefatos arqueológicos. O sítio controlado possui três bancadas com profundidades distintas (30 cm, 60 cm e 91,44 cm), e nestes locais foram instalados diversos materiais como rochas amontoadas, rochas em círculos, rejeitos (lixos), mourões de madeira, “fogueira”, e outros materiais. No ano de 2002 foram coletados dados de GPR em condições de solo seco e úmido, deste modo, pode-se comparar através de mapas de amplitude e de perfis de reflexão (2D) os resultados obtidos pelas antenas de 400MHz, 500MHz e 900MHz (CONYERS, 2013).

Em 2004 no Brasil construiu-se o primeiro campo de teste chamado de Sítio Controlado de Geofísica Rasa I do IAG/USP (SCGR-I) com a temática voltada para planejamento urbano, arqueologia e estudos ambientais. O sítio está localizado no campus da USP em São Paulo e possuía uma área de 1500 m², no local foram instalados objetos que possuem geometria e composição distinta como tubulações de metal e plástico, tambores preenchidos com fluidos de água doce e salina, manilhas de concreto, vasos de cerâmica, seixos, muros de tijolos e etc. Ao longo do tempo, diversas pesquisas foram realizadas com objetivo de imagear, calibrar, caracterizar e compreender as assinaturas geofísicas dos artefatos (PORSANI et al., 2004b; RODRIGUES, 2004; PORSANI et al., 2006, BORGES, 2007; PORSANI & SAUCK, 2007; PORSANI et al., 2010).

A partir de 2007 no Brasil houve um crescente interesse de pesquisadores na ciência denominada de geofísica forense. Devido a este fator, em algumas regiões do país foram implantados campos de testes pioneiros como o de Geofísica Forense, Ambiental e de Resgate (FORAMB/Belém/PA), o Sítio Controlado de Criminalística (SITICRIM/Brasília/DF) e o Sítio Controlado de Geofísica Rasa da UnB (SCGR/Brasília/DF).

O FORAMB foi construído no ano de 2007 no cemitério de Tapanã, Belém do Pará, pela Profa. Dra. Lúcia Maria da Costa e Silva em parceria com o Departamento de Necrópoles (DANE) e o Instituto Médico Legal (IML). Neste sítio as pesquisas com métodos geofísicos foram desenvolvidas sob simulacro de armas e túneis, além de um cadáver humano (NASCIMENTO, 2009; SILVA et al., 2008; CATETE, 2010; BRASIL, 2013).

No ano de 2012 o Instituto de Criminalística do Departamento de Polícia Federal (INC/DITEC/DF) inaugurou o SITICRIM cujo objetivo é o treinamento de policiais e o aprimoramento da geofísica forense. Neste local foram enterrados

artefatos como: projéteis, vidros, monitores de computador, porco, armas, drogas, tambores e etc. Pesquisadores do INC e da UnB desenvolveram diversas pesquisas aplicando métodos geofísicos com intuito de minimizar as ambiguidades de investigações forense (BLUM & RUSSO, 2012; ALVES et al. 2013, 2015; BUSO et al., 2016)

No SCGF-UnB está localizado na Fazenda da Água Limpa de propriedade da UnB, com uma área de 600m², foram instalados porcos simulando diferentes cenários de sepultamento. Na pesquisa utilizou-se dos métodos geofísicos (GPR e Eletrorresistividade) com o objetivo de diagnosticar diferentes mecanismos de sepultamentos (CAVALCANTI, 2017).

2.2 GEOFÍSICA APLICADA À FORENSE

Bevan (1991) discutiu a aplicabilidade do GPR para localização de sepulturas em diversas localidades dos EUA, demonstrando que as melhores condições de detecção do radar estão relacionadas a objetos em profundidades rasas, sobretudo quando o meio em subsuperfície é caracterizado por estratificações incipientes e denotam resistividades superiores a 200 Ohm.m.

A Real Polícia Montada do Canadá (R.C.M.P.) testou o GPR na província de British Columbia, próximo a uma montanha localizada na Universidade de Simon Fraser, para verificar a viabilidade do método e identificar sepultamentos ou covas. Para auxiliar na pesquisa foram sepultadas carcaças de urso e bode com intuito de simular cadáveres de crianças e adultos. Através da pesquisa pode-se constatar a aplicabilidade do método na busca por vestígios ou restos mortais (STRONGMAN, 1992).

Hammon III et al. (2000), a partir da aplicação do método das diferenças finitas (2,5 D) realizaram simulações dos padrões de anomalias GPR originadas por partes do corpo humano, causados por diferentes parâmetros como tipos e umidade de solo, distintas frequências e separações de antenas, profundidade de sepultamento, dentre outros.

Koppenjan et al. (2003) aplicou o GPR para imagear o sepultamento de cadáveres suínos, em um sítio controlado da Universidade da Flórida. No campo teste foram inseridos 24 suínos, recobertos com solo arenosos (Neossolo) e ar-

gilosos (Argissolo) mais comum descritos na Flórida. De acordo com os resultados obtidos pelo método aplicado, as respostas geofísicas foram satisfatórias em solo arenosos possibilitando a identificação dos cadáveres sepultados, sua decomposição e os restos mortais (esqueletos); em contrapartida quando sepultados no solo argiloso houve dificuldade para o imageamento dos cadáveres, mesmo tendo sofrido pouca decomposição.

Ruffell (2005) aplicou o GPR na busca por pessoas desaparecidas que foram assassinadas pelo grupo armado *Irish Republic Army* (IRA), esta investigação foi realizada em uma comunidade na Irlanda do Norte. Os resultados dos dados não processados e processados adquiridos com diferentes frequências (100 MHz, 200 MHz, 400 MHz) possibilitaram identificar colapsos de covas oriundas dos anos 1970 e a associação de refletores inclinados que foram relacionados a materiais oriundos de escavações. Contudo, na área em que ocorreu a investigação não foi possível localizar ou identificar os corpos das vítimas.

Schultz et al. (2006) aplicou o método GPR, com a antena de 500 MHz, para monitorar as respostas geofísicas sobre 12 suínos sepultados em diferentes circunstâncias e em covas vazias, utilizando-se do solo típico (arenoso e argiloso) encontrado na cidade de Alachua (Flórida). Os suínos foram sepultados em profundidades distintas: (i) profundidades de 0,50 m a 0,60 m correspondem ao solo arenoso; (ii) profundidades de 1,0m a 1,10m estão associadas as camadas argilosas. O monitoramento destas covas ocorreu em períodos de 12 a 13 meses e de 21 a 21,5 meses, após o sepultamento. As respostas relacionadas ao monitoramento evidenciaram que os suínos sepultados em um solo arenoso foram facilmente detectados, mesmo quando restou apenas a parte óssea dos animais. Por outro lado, os suínos sepultados em um solo argiloso tornaram-se difícil a sua detecção após o primeiro ano de monitoramento, ainda que houvesse a preservação dos tecidos. O pesquisador ao longo de diversos anos desenvolveu outras pesquisas com a mesma finalidade (SHULTZ & MARTIN 2011, SHULTZ & MARTIN, 2012 e SHULTZ et al. 2016).

Novo et al. (2011) em sua pesquisa aplicou simulação numérica e adquiriu dados de GPR (2D e 3D) com a antena de 250 MHz para localizar covas clandestinas e artefatos metálicos, em um ambiente acidentado. As respostas foram em parte satisfatórias para a detecção de determinados alvos e para a malha de

aquisição 3D, entretanto a presença de lixos metálicos na superfície proporcionou falsas anomalias.

Pringle et al. (2012) monitoraram por 3 anos um ambiente controlado, no qual foram depositados, em valas, alguns suínos envoltos em lona e outros em contato direto com o meio, e verificou respostas distintas dos métodos geofísicos GPR e eletrorresistividade. As condutividades dos solos e das águas foram diferentes para corpos naturais e acondicionados, revelando anomalias com baixas e altas resistividades, respectivamente. Com relação ao GPR, as diversas frequências (110-900 MHz) localizaram integral ou parcialmente os corpos embrulhados e os sem proteção. A análise dos dados de condutividade do solo e água mostrou um incremento no 1º ano, um leve aumento no 2º ano e uma diminuição no 3º ano.

Molina et al. (2015) realizaram a primeira pesquisa em geofísica forense na América Latina, mais precisamente na Colômbia, com intuito de aprimorar as técnicas na busca por vestígios de pessoas desaparecidas. No auxílio a pesquisa foram realizadas aberturas de 4 covas, sendo que três delas simularam sepultamentos clandestinos e uma permaneceu vazia para servir de controle. Nas que simularam sepultamentos os pesquisadores enterraram um suíno envolto em uma vestimenta, um esqueleto humano e parte de ossadas humana incineradas, todos foram enterrados em profundidades rasas (0,80 m até 1,20 m). Deste modo, realizou-se o monitoramento com o método GPR (250 MHz) ao longo de 38 semanas. Os resultados 2D evidenciaram que o suíno pode ser detectado ao longo do período de monitoramento; o imageamento do esqueleto mostrou eventos de baixa amplitude de reflexão hiperbólica até 19ª semana após o sepultamento, mas não puderam ser visualizadas após esse tempo; e as ossadas humanas não obtiveram respostas significativas. Através dos mapas *depth slice* pode-se observar as covas (alta amplitude) até a 19ª semana de monitoramento para todos os alvos, e ocorreu um decaimento na amplitude de sinal associados aos alvos do esqueleto humano e das ossadas ao longo das 38 semanas.

No Brasil a primeira dissertação com foco para área da geofísica forense ambiental foi realizada pela Universidade do Pará, e ocorreu em dois cemitérios Tapanã e Bengui, aplicando-se métodos geofísicos eletromagnéticos (GPR e o

Sligram). No cemitério Tapanã implantou-se o FORAMB para desenvolver respostas geofísicas através do imageamento de alvos forenses (cadáver, simulação de túnel e simulacro de arma) e detectar o nível hidrostático. Os resultados com o método geofísico GPR foram satisfatórios indicando os alvos forense e detectando o nível hidrostático presente na área, em contrapartida o *Sligram* não forneceu as respostas necessárias (NASCIMENTO, 2009).

Os pesquisadores (BORGES et al., 2010; CASTELO BRANCO et al., 2010; PEDROSA JUNIOR et al., 2010) executaram a primeira investigação de cunho geofísico forense em ambiente real, ou seja, que não estão relacionadas a sítios controlados e sim a situações reais. As pesquisas foram realizadas pelo Grupo de Trabalho do Tocantins (GTT) na região do Araguaia com intuito de buscar restos mortais de pessoas desaparecidas na Guerrilha do Araguaia. Os pesquisadores utilizaram-se do método GPR para detecção das ossadas remanescentes ou de anomalias relacionadas a possíveis inumações.

Brasil (2013) realizou investigação geofísica forense e antropológica através do método GPR nos cemitérios do Tapanã e do Mosqueiro, na região de Belém-PA. Os resultados mostraram que no cemitério do Tapanã, o GPR foi eficiente para a identificação dos alvos rasos, em solo arenoso e saturado. No Mosqueiro, em decorrência dos alvos serem antigos, houve dificuldade de localização dos restos mortais, sendo mais evidente a caracterização das descontinuidades dos solos. A investigação geofísica mostrou a importância da visualização e interpretação dos resultados em 2D e 3D.

Blum & Russo (2011), com o intuito de localizar covas clandestinas com vestígios de desaparecidos políticos vinculados a ditadura militar (1964-1985) utilizaram-se da aplicação do método GPR *Detector Duo* (250 MHz – 700 MHz) no cemitério da vila formosa em São Paulo. Os especialistas através dos resultados 2D e pseudo 3D evidenciaram estruturas similares a túmulos em subsuperfície que ao serem escavadas evidenciaram a descoberta de sacolas plásticas com a presença de ossadas.

Almeida (2016) na pesquisa de doutorado desenvolveu uma metodologia de análise e interpretação de dados de GPR (270 MHz, 400 MHz e 900 MHz) a partir da técnica de tomografia de micro-ondas para alvos arqueológicos e forense (suíno). Esses alvos foram monitorados em um período de 18 meses. Para inversão dos resultados do GPR o pesquisador implementou linguagem Matlab

e aplicou ferramentas de remoção de *background* para auxiliar nas interpretações. As imagens tomográficas permitiram imagear com clareza os alvos investigados e as escavações realizadas para a instalação dos objetos, portanto esta técnica mostrou-se eficaz para ciência arqueológica e forense.

2.3 GEOFÍSICA APLICADA À ARQUEOLOGIA

Alves (1979), pela primeira vez no Brasil, aplicou os métodos geofísicos eletrorresistividade (ER) e magnético (Mag) em sítios arqueológicos no Pará, com intuito de detectar feições arqueológicas em subsuperfície. O método magnético foi aplicado no sítio arqueológico Areão e os métodos ER e Mag na Ilha dos Bichos na fase Marajoara. Através da aplicação do método de eletrorresistividade foi possível a detecção de camadas relacionadas a antigas ocupações indígenas e a identificação de camadas de argila, planas e horizontais vinculadas à arqueologia. Já o método magnético detectou antigos locais de cremação e urnas funerárias em decorrência da magnetização das argilas presentes no local.

Malagodi et al. (1996) descrevem a eficiência da aquisição de dados de GPR em 3D e os mapas em *time slice* como forma de auxiliar a detecção de artefatos arqueológicos. O sítio arqueológico investigado está localizado na cidade de Montelibretti (Roma) e as investigações foram executadas com o GPR-SIR 10 (100 MHz, 300 MHz e 500 MHz), com perfis equipados 0,20 m. Os resultados indicam que a aquisição de dados tridimensionais, o processamento e a representação dos mapas em *time slice* podem ajudar a determinar a localização, a profundidade e as formas dos elementos enterrados.

Conyers (2006) cita a complexidade de aquisições tridimensionais em ambientes antrópicos, como exemplo realizou-se uma investigação de GPR (400 MHz) no estacionamento na cidade de Santa Fé, Novo México, para localizar povos pré-históricos. A interferência de materiais antrópicos em subsuperfície influenciam como “ruídos” dificultando a visualização dos dados, deste modo para amenizar estes ruídos o processamento é um fator fundamental, possibilitando uma melhor imagem dos resultados mesmo em ambiente antrópico.

Melo (2007) utilizou-se da aplicação dos métodos GPR e Magnético para encontrar restos de ocupação antiga e fundações no Engenho do Murutucu (PA).

Através da correlação dos resultados dos dois métodos serviu de guia para futuras intervenções arqueológicas no local estudado.

Rodrigues (2009) aplicou o GPR e o eletromagnético indutivo (EM-38) em sítios arqueológicos de sambaqui na cidade de Jaguaruna - SC. Os resultados funcionaram como guia para as escavações arqueológicas e contribuiu para um maior conhecimento dos sítios estudados na região de Santa Catarina.

Blum et al. (2010) realizaram investigação geofísica forense no sítio arqueológico de Porto Esperidião (Mato Grosso). O objetivo da pesquisa foi identificar a presença deste patrimônio cultural através do GPR (400 MHz) e verificar a ocorrência de danos ao mesmo. Os resultados obtidos evidenciaram anomalias sugestivas de artefatos arqueológicos (fragmentos de cerâmica), que posteriormente foram confirmadas com dados diretos de investigação (escavação), portanto a ferramenta não destrutiva foi de suma importância para auxiliar na investigação forense.

CAPÍTULO 3

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, pretendo salientar determinados aspectos relacionados ao método GPR como: a equação de propagação da onda eletromagnética, a equação de atenuação, teoria de amostragem espacial e temporal 2D e 3D e a relação de impedância e amplitude.

3.1 GROUND PENETRATING RADAR

O método GPR é baseado na teoria eletromagnética que está fundamentada nas equações de Maxwell, para maiores informações verificar (STRATTON, 1941; WARD, 1990; TELFORD et al. 1993; ANNAN, 2001; EVERETT, 2013). Entretanto, sabe-se que um determinado meio existente (rocha, solo, materiais de qualquer natureza) possuem diferentes propriedades elétricas e magnéticas. Deste modo para que se possa relacionar as equações de Maxwell com um determinado meio, necessita-se adicionar as relações constitutivas, as quais permitem compreender a interação existente entre o campo eletromagnético e o meio estudado, através das propriedades físicas denominadas permissividade dielétrica (ϵ), condutividade elétrica (σ) e permeabilidade magnética (μ).

A interação do campo elétrico com os materiais ocorre através de dois tipos de correntes: por condução e por deslocamento (OLHOEFT, 1998). Na corrente de condução um campo elétrico é aplicado e as cargas livres passam a se mover e, ao cessar o campo as cargas desaceleram e retornam ao seu equilíbrio; e na corrente de deslocamento o campo elétrico aplicado ocasiona o rompimento do estado de equilíbrio da carga que armazena a energia para seu deslocamento, e quando se cessa a interação a energia desta carga é liberada fazendo com que retorne ao seu estado estacionário original (ANNAN, 1992; JOL, 2009).

A capacidade de armazenar cargas elétricas ao se aplicar um determinado campo elétrico em um material é definida como permissividade dielétrica (ϵ) e sua unidade corresponde a farads por metro (F/m). A influência desta propriedade nas aquisições de GPR está relacionada a velocidade de propagação da onda eletromagnética e ao comprimento de onda.

A condutividade elétrica (σ) representa a facilidade do material em conduzir uma corrente elétrica através da aplicação de um campo elétrico, ou seja, nas rochas e em outros materiais, há presença de cargas livres (íons) e ao aplicar um campo elétrico essas cargas sofrem uma força elétrica impulsionando o movimento desses íons pelo material (OLHOEFT, 1998) e sua unidade é expressa por Siemens por metro (S/m) ou milisiemens por metro (mS/m). Essa propriedade é afetada pela porosidade, saturação do fluido e pelo tipo de fluido contido no espaço poroso, a concentração de argilominerais e minerais metálicos, portanto o aumento gradativo torna o material mais condutivo influenciando diretamente na atenuação da onda eletromagnética.

A energia dissipada pelo transporte de carga e a energia armazenada nos deslocamentos de carga podem ser afetadas pela frequência, devido à natureza (ϵ) e (σ). Abaixo de uma frequência de transição (10-300 MHz), ocorre o predomínio da corrente de condução, deste modo a propagação será dispersiva. Superior a frequência de transição, ocorre o predomínio da corrente de deslocamento, característico da propagação da energia e a perda desta energia se dá por espalhamento.

A velocidade da onda eletromagnética depende de parâmetros como a velocidade da onda no vácuo ($c_0 = 3 \times 10^8 \text{ m/ns}$), permissividade relativa (ϵ_r), permeabilidade magnética relativa e condutividade elétrica. E esta relação é expressa pela equação matemática (1):

$$v = \frac{C_0}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r \frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon}\right)^2}}{2}}} \quad (1)$$

Onde $(\sigma/\omega\varepsilon)$ representa a perda de energia e ω corresponde a frequência angular.

Contudo, em um meio geológico com baixa perda, a velocidade de propagação da onda eletromagnética depende principalmente das constantes dielétricas (permissividade dielétrica), ou seja, a influência da condutividade é mínima assumindo que $\sigma/\omega\varepsilon = 0$, deste modo a velocidade (v) é inversamente proporcional a raiz quadrada da permissividade dielétrica relativa (ε_r) do material (DAVIS & ANNAN, 1989, REYNOLDS, 1997, JOL, 2009) :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2)$$

Quando se tem um meio dielétrico com perdas de energia, ocorre a atenuação da onda em função do tempo de propagação ao longo do meio específico. A taxa de diminuição da amplitude é denominada de constante de atenuação (α) e decresce exponencialmente com a distância (z) percorrida pela onda em subsuperfície (Van Dam, 2001), sendo definida pela equação (3):

$$A = A_0 e^{-\alpha z} \quad (3)$$

Desse modo, adota-se o número de onda complexo (κ), expresso pela equação 4, haja vista que agora a condutividade é um parâmetro a ser considerado. Segundo Stratton (1941), o (κ) é composto por uma parte real chamada de constante de atenuação (α) e uma parte imaginária denominada de constante de propagação (β), as quais são expressas pelas equações (4 e 5):

$$\kappa = \alpha + i\beta \quad (4)$$

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu \varepsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon}\right)^2} - 1 \right)} \quad (5)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} + 1 \right)} \quad (6)$$

Segundo Annan (2001), em sistemas de alta frequência, caso do GPR, as constantes de atenuação e propagação são obtidas pela expansão da série de potenciais $\left(\frac{\sigma^2}{\omega^2\varepsilon^2}\right)$ aplicadas nas equações (5 e 6), resultando nas equações 7 e 8:

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (7)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\mu\varepsilon} \quad (8)$$

Em se tratando de GPR, as propriedades elétricas das interfaces controlam a propagação e reflexão das ondas eletromagnéticas e estima-se que essas ondas se propaguem com uma incidência perpendicular à interface das camadas (ANNAN, 2001). A diferença de propriedade elétrica entre as camadas ocasiona uma impedância (Z) que corresponde a quantidade de sinal refletido, a qual é definida através das propriedades físicas de um meio (WARD, 1990; VAN DAM, 2001; NEAL, 2004):

$$Z = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\sigma + i\omega\varepsilon}} \quad (9)$$

Essa relação é válida apenas para sedimentos homogêneos sem contraste de impedância. Quando uma onda eletromagnética em propagação encontra um contraste de impedância, parte da energia é refletida e proporcional a magnitude da mudança. E ao desconsiderar a corrente de condução ($i\omega\mu\sigma$), deste modo a equação (10) pode ser simplificada e expressa pela equação 11:

$$RC = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (10)$$

$$RC = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r1}} - \sqrt{\varepsilon_{r2}}}{\sqrt{\varepsilon_{r1}} + \sqrt{\varepsilon_{r2}}} \quad (11)$$

3.1.1 Técnicas de aquisição dos dados

O avanço tecnológico das últimas décadas possibilitou o desenvolvimento do sistema de GPR quanto a sua dimensão, sistema de aquisição, número de canais, armazenamento de dados, formato de dados de saída, intervalo de digitalização, número de amostra de varredura e principalmente a blindagem da antena.

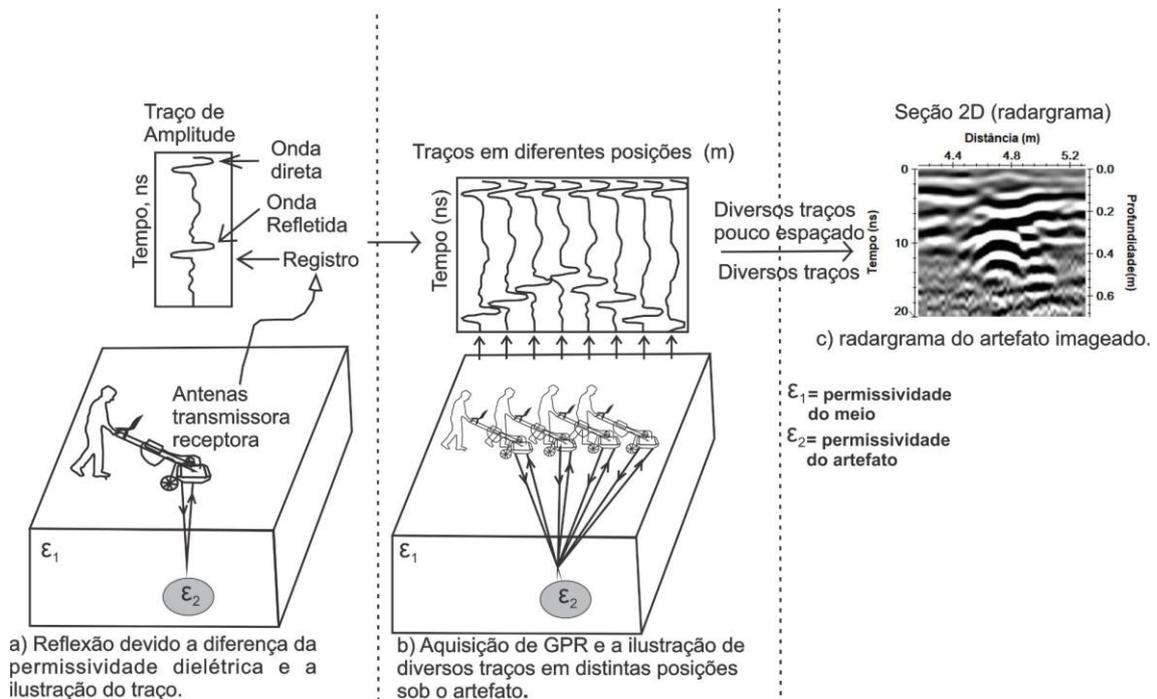
As antenas com sistemas não blindados são mais antigas, podem ser classificadas como monoestática e biestática, preferencialmente possuem baixa frequência e estão suscetíveis a interferência de ruídos externos da superfície. E as antenas que possuem blindagem são normalmente de altas frequências, biestática, dispostas com distância e orientação fixa, e são aplicadas assiduamente nas aquisições de perfis constantes de afastamento (ANNAN, 2002; JOL, 2009).

Em diversas áreas como a forense, arqueológica, geológica, geotécnica, estratigráfica e ambiental preferencialmente usa-se a técnica perfil de reflexão constante (CONYERS et al., 2013; MOLINA et al., 2014; CARLING et al., 2016; BURDS et al., 2018). Nessa técnica as antenas transmissora e receptora estão espaçadas a uma mesma distância e são movimentadas no mesmo sentido na superfície investigada (FIGURA 1a). A antena transmissora irradia constantemente pulsos curtos de onda eletromagnética para a subsuperfície e ao se deparar com materiais que possuam propriedades elétricas distintas, estes ocasionam a mudança de velocidade da onda e a reflexão de parte do sinal para a superfície. O sinal refletido é captado pela antena receptora e o tempo de viagem da onda transmitida, refletida e captada é denominado de tempo duplo de trânsito da onda (TWT) medido em nanosegundos (10^{-9}), FIGURA 1b.

Os dados são registrados e representados na forma de traços de reflexão e as junções desses traços ao longo do levantamento geofísico origina o radargrama, que são imagens bidimensionais onde o eixo-x representa a distância percorrida na aquisição e o eixo-y corresponde a profundidade investigada (FIGURA 1c). Esses traços são curtos pulsos de energia eletromagnética e correspondem a amplitude e o tempo de propagação. O primeiro pulso presente no

traço normalmente está associado a onda aérea com uma velocidade de propagação correspondente a (0,3 m/ns), e o segundo corresponde a chegada da onda direta no solo.

FIGURA 1: Etapas no processo GPR: (a) formação de um único traçado de tempo de dados, mostrando a chegada direta e a reflexão do objeto; (b) múltiplos traços para uma exibição de traço de manobra, com cada traço representando uma posição diferente na superfície da Terra e (c) resultado de uma seção 2D



FONTE: Modificado de Daniels et al. (2008).

3.1.2 Parâmetros de aquisição GPR 2D e 3D

Antes de qualquer aquisição, deve-se estabelecer qual o objetivo da investigação levando-se em conta algumas perguntas (ANNAN & COSWAY, 1992):

- Em que profundidade aproximada se encontra o alvo?
- Qual a geometria do alvo e quais as suas propriedades elétricas?
- Em que meio se encontra o alvo e qual o seu ambiente de investigação?

Quando se obtêm o conhecimento prévio destas informações, aumentam-se as chances de êxito em uma investigação geofísica, porque torna-se mais apropriada a escolha de certos parâmetros, tais como: a frequência da antena,

o espaçamento espacial e temporal, os números de amostra, janela temporal, dentre outros.

Frequência central e profundidade de investigação

Na prática, quando se aplica o método GPR, existe uma associação entre a frequência central (f_c) com a resolução e a profundidade de investigação (ANNAN, 2002). Segundo o autor, os sistemas de GPR possuem uma largura da banda de espectro aproximadamente parecida com a frequência central (f_c) da antena aplicada, e deste modo, um pulso típico emitido possui sua energia variando entre 0,5 até 1,5 da frequência central. E a sua maior amplitude de sinal está próxima a frequência central da antena.

A profundidade de investigação está relacionada a fatores como a escolha da frequência da antena, as propriedades elétricas dos materiais, o teor de umidade e água em subsuperfície, o espalhamento geométrico, a atenuação da onda e a velocidade de onda eletromagnética. Normalmente, quando se pretende alcançar maiores profundidades na investigação, deve-se utilizar antenas com frequências menores. A TABELA 2 exemplifica as profundidades alcançadas pelas diferentes frequências de antenas de GPR no local em que foi implantado o primeiro sitio controlado de geofísica forense da UFPR.

TABELA 2: Exibe as profundidades alcançadas na investigação realizada no sitio controlado de geofísica forense da UFPR, por meio das antenas com frequências de 250, 400 e 700 MHz.

Frequência Central (MHz)	Profundidade de investigação (m)
700	0,6
400	0,8
250	1,2

Resolução vertical e lateral

A resolução compreende o registro e delineamento da espessura, tamanho e geometria do objeto investigado, e consiste de dois componentes denominados de resolução vertical (Δt) e de resolução horizontal (Δx).

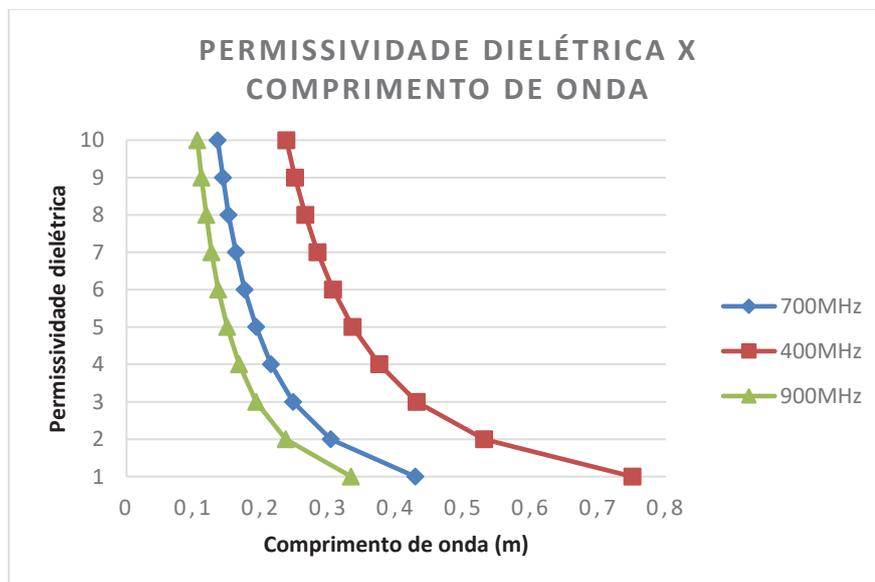
A resolução vertical é caracterizada pela à capacidade de distinguir visualmente dois sinais próximos em função do tempo e depende da frequência central. Portanto, para imagear o alvo com precisão é necessário que a resolução vertical possa diferenciar com clareza as reflexões do topo e da base de um

objeto, que possui determinada espessura em um meio qualquer (ANNAN, 1996). Segundo Conyers (2004) a capacidade de se identificar objetos em sub-superfície está atrelada a frequência da antena e ao comprimento de onda (λ), portanto o alvo imageado deve ser maior que $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda. O comprimento de onda é definido pela frequência central e pela permissividade dielétrica do meio (equação 12):

$$\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{v}{f} \quad (12)$$

A relação entre a permissividade dielétrica do meio com o comprimento de onda para distintas frequências de GPR podem ser observadas na FIGURA 2. Um aumento da permissividade dielétrica do meio e da frequência faz com que ocorra uma diminuição no comprimento de onda, conforme descrito pela equação 12.

FIGURA 2: Ilustra a relação entre o comprimento de onda a partir da permissividade dielétrica.



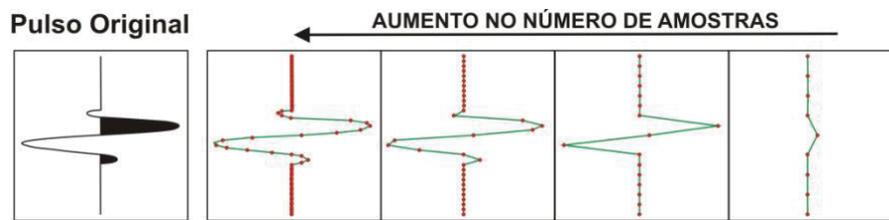
FONTE: Conyers, 2004.

Número de amostras

Este parâmetro indica a quantidade de pontos que são amostrados ao longo do tempo, aplicado para reconstruir os pulsos em um traço de GPR (FIGURA 3). Quanto mais amostras digitais houver para definir uma onda, mais precisa será a construção do traço, entretanto há um aumento no armazenamento do arquivo. Uma janela temporal com maior abertura necessita um maior

número de amostras para que se possa definir com maior precisão o traço de reflexão.

FIGURA 3: Reconstrução gráfica de um pulso a partir do número de amostras.



Fonte: Borges (2002).

Frequência de amostragem

A frequência de amostragem está relacionada com toda banda de frequência amostrada durante uma investigação com o GPR. Essa amostragem deve ser duas vezes o valor da maior frequência do sinal amostrado e por segurança este valor é dobrado. Desse modo, a frequência de amostragem deve ser seis vezes o valor nominal da frequência da antena e no máximo trinta vezes ($6f_c < f_a < 30f_c$).

Para que ocorra a reconstrução de um sinal contínuo o intervalo de amostragem deve estar de acordo com o teorema de Nyquist, ou seja, uma amostragem de um sinal contínuo deve ser no máximo metade do período do sinal de frequência mais alta no registro:

$$f_N = \frac{1}{2\Delta t} \quad (13)$$

Janela temporal (Time Window)

O parâmetro janela temporal ou *time window* está relacionado com o período de tempo durante o qual os dados de reflexão são registrados pelo equipamento, ou seja, o tempo duplo de traslado da onda, e é medido em ns. Este fator pode ser calculado através da relação do número de amostra pela frequência de amostragem, expressa da seguinte forma:

$$time\ window = \frac{número\ de\ amostras}{f_a} \quad (14)$$

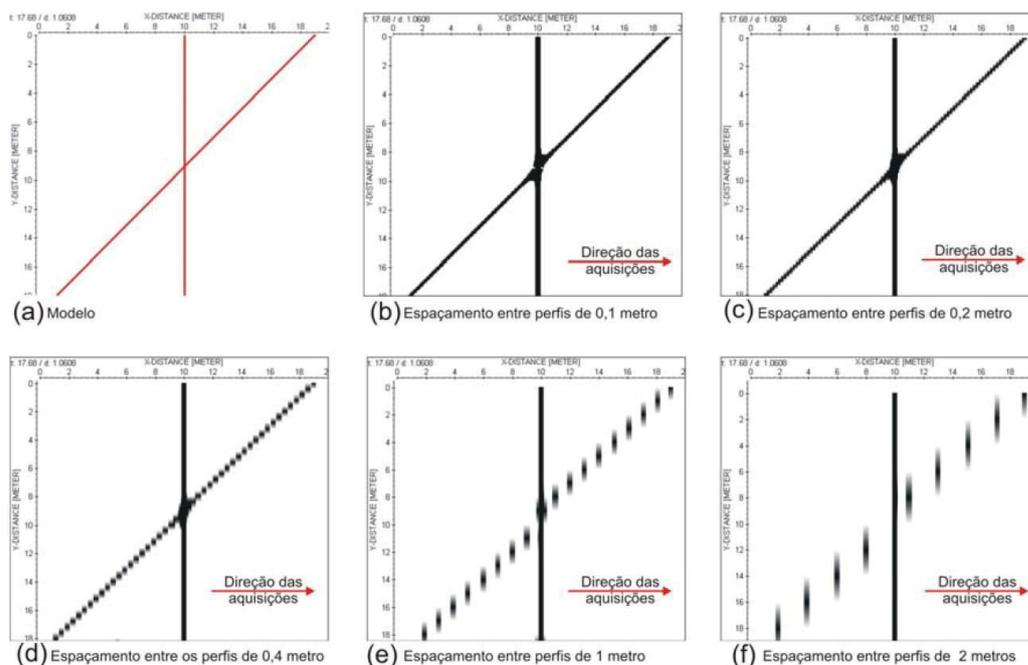
Amostragem espacial (Δx)

Nas aquisições 2D a escolha do espaçamento entre os traços influencia na resolução espacial, portanto para uma melhor resolução é necessário a escolha de pequenos espaçamentos. Em se tratando de aquisições pseudo 3D a resolução está relacionada com o intervalo entre os perfis adquiridos ao longo da área de investigação.

Deste modo, a obtenção de resultados 3D de GPR sem erros de amostragem espacial devem ser realizadas com pequenos espaçamentos entre os traços e os perfis, desta forma tenta-se amostrar os pontos de difração (DANIELS, 2000; LUALDI et al., 2003; GRASMUECK et al., 2005).

Borges (2007) elaborou um modelo sintético com dutos transversais para evidenciar a perda da resolução lateral através da escolha do espaçamento entre os perfis, utilizando distâncias entre 0,1 m a 2 m de distância. Através dos resultados sintéticos pode-se constatar que um adensamento permitiu a visualização clara dos dutos (FIGURA 4b), em contrapartida um aumento do espaçamento prejudica consideravelmente a reconstrução dos dutos (FIGURA 4f).

FIGURA 4: Modelo geotécnico aplicado para gerar o conjunto de dados GPR Quase-3D. Cortes na profundidade 1,06 m, evidenciam as distorções com o aumento da distância entre os perfis.



FONTE: Borges (2007).

As aquisições de GPR 3D são inexecutáveis muito em decorrência de fatores como: o espaçamento entre as antenas transmissoras e receptoras tem que possuir um afastamento proporcional ao dos traços e deste modo as aquisições devem ser realizadas com diversos receptores; e em investigações executadas em áreas com grandes extensões a energia de transmissão não será captada pela antena receptora, aumentando consideravelmente o tempo e o custo da aquisição (BORGES 2007). Por causa destes fatores assiduamente aplica-se aquisições de GPR pseudo 3D ou quase 3D, que corresponde a interpolação de diversos perfis bidimensionais.

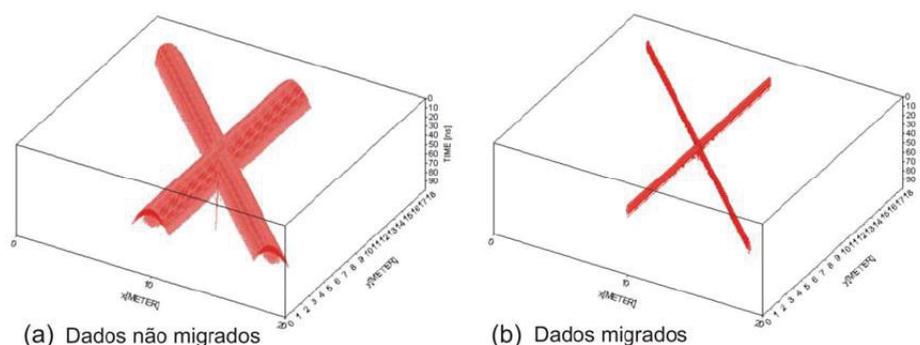
Dentro deste contexto, para obter de forma satisfatória aquisições em pseudo 3D é necessário pré-estabelecer alguns parâmetros como: amostragem espacial, o correto posicionamento dos traços e a uma migração 3D adequada. A escolha da amostragem a princípio deve ser condizente com a teoria da amostragem de *Nyquist*, portanto a amostragem espacial (Δx) deve satisfazer a relação a seguir:

$$\Delta x \leq \frac{\lambda}{2} \quad a \leq \frac{\lambda}{4} \quad (15)$$

O posicionamento correto dos traços resulta em um melhor imageamento espacial dos refletores. Normalmente instrumentos como trenas e *global navigation satellite system* (GNSS) são utilizados para auxiliar as aquisições, entretanto a utilização de trenas para o posicionamento dos perfis, por melhor acurácia que se tenha na aquisição, ainda existe a possibilidade de ocorrer erros de posicionamento dos traços.

As migrações em dados de GPR são realizadas com intuito de colapsar os pontos difratores para o seu ápice possibilitando identificar de forma satisfatória a posição espacial, espessura e profundidade real dos refletores/alvos em subsuperfície. Borges (2007) ilustrou o efeito da migração através de modelos geofísicos sintéticos construídos por tubulações metálicas que se seccionam, através do resultado pode-se demonstrar o desaparecimento das difrações e evidenciar o acúmulo da energia para uma posição real (FIGURA 5).

FIGURA 5: Bloco de GPR em 3D de eventos hiperbólicos derivados de tubulações metálicas.



FONTE: Borges (2007).

CAPÍTULO 4

4 PROCESSAMENTO DE DADOS DE GPR

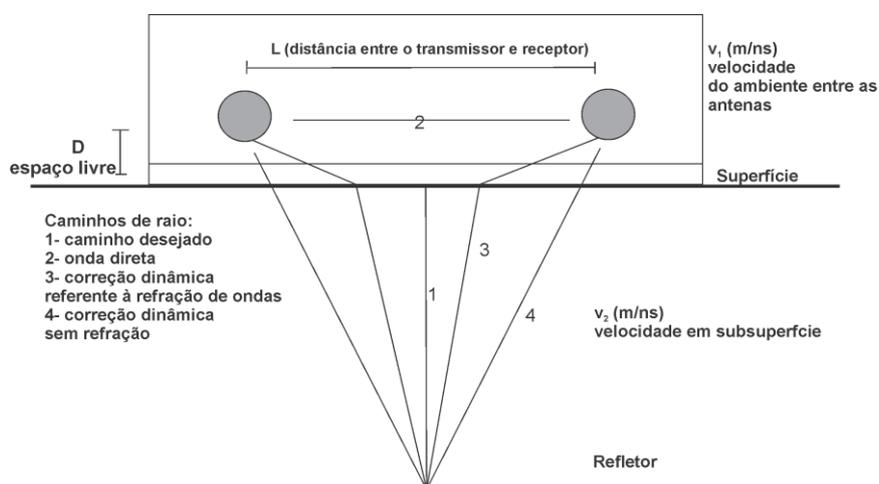
Neste capítulo serão explicados os principais filtros, ganhos e migrações que normalmente são aplicados nos dados de GPR, e que foram utilizados nos dados adquiridos nesta pesquisa.

4.1 AJUSTE DO TEMPO ZERO

O ajuste do tempo zero é aplicado com intuito de controlar a posição vertical da reflexão da superfície, ou seja, deslocar o primeiro pulso do radar para a posição do subsolo. Este procedimento é necessário devido ao tempo que a onda aérea leva para ir da antena transmissora até a receptora, e que pode ocasionar erros de posicionamento dos artefatos em profundidade (FIGURA 6) *FIGURA 6: Representação esquemática da geometria padrão de uma antena transmissora e receptora, e o caminho da onda eletromagnética refletida.*

Deste modo, quando há o ajuste de todos os traços para a posição comum a zero faz com que os refletores coincidam com a topografia local.

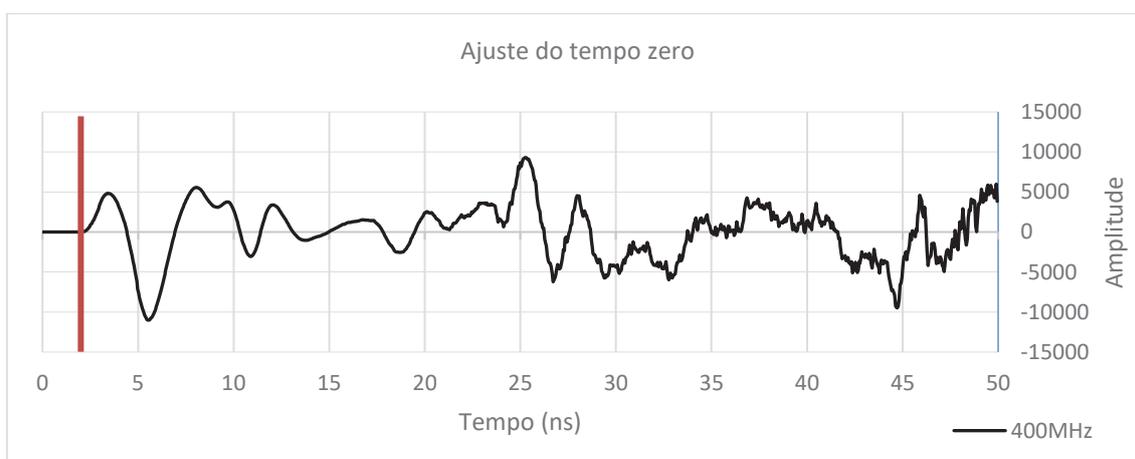
FIGURA 6: Representação esquemática da geometria padrão de uma antena transmissora e receptora, e o caminho da onda eletromagnética refletida.



FONTE: Modificado de Sandmeier (2006).

Para a realização deste procedimento deve-se aplicar uma correção estática que está baseada na velocidade da onda direta no solo e do conhecimento da distância entre a antena transmissora e receptora. A aplicação deste filtro pode ser exemplificada através da FIGURA7 que ilustra um traço extraído do radargrama obtido por meio da antena com frequência de 400MHz, a linha em vermelho na posição 2,5 ns indica o tempo zero marcado para realização do ajuste do tempo zero.

FIGURA 7: Ajuste do tempo zero indicado pela linha em vermelho (2,5ns) aplicado sob o traço do radargrama.



4.2 FILTROS 1D E 2D

4.2.1 Filtros Temporal (1D)

Os filtros 1D têm como principal objetivo realçar estruturas investigadas ou eliminar sinais espúrios (ruídos) que estão vinculados a transientes de frequências muito baixas a muito altas. Dentre os filtros temporais 1D que serão aplicados no processamento dos radargramas destacam-se: *subtract-mean (dewow)*, passa banda (*bandpassfrequency*).

Subtract-mean (dewow) visa corrigir o efeito de saturação da amplitude originado a partir de componentes difusos de baixa frequência e pela decorrência de indução eletromagnética existente entre as antenas transmissora e receptora. Esta energia de baixa frequência produz frequentemente um componente de variação lenta no tempo para os dados de campo medidos (JOL, 2009).

Para eliminar este ruído de baixa frequência e preservar o sinal de alta frequência aplica-se o filtro *dewow* que atua em cada traço de forma independente através de um valor médio de execução que é calculado para cada traço e esta média é subtraída do ponto central. A janela de tempo para cálculo do valor médio de execução é definida para cerca de um período principal (SANDMEIER, 2016). A FIGURA 8: exibe o traço extraído de um radargrama sem a aplicação do *dewow* (linha azul) e após a aplicação do filtro (vermelho), observa-se que houve uma projeção do traço para próximo do eixo vertical (amplitude zero). Este filtro pode ser expressado pela seguinte equação (16)

FIGURA 8: Ilustração da aplicação do filtro *dewon* para eliminar ruídos de baixa frequência, exemplificado através de um traço extraído do radargrama obtido pela antena de 700 MHz (IDS).



$$A'_n(t) = A_n(t) - \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N A_n(t) \quad (16)$$

Onde $A_n(t)$ = dado da amostra não processada, $A'_n(t)$ = dado de amostra processado e n = número de amostra (DANIELS, 2004).

Passa Banda (*bandpass frequency*) - os filtros de frequências são aplicados com intuito de limpar as frequências espúrias, relacionadas a frequências muito baixas ou altas, permitindo a passagem de sinais entre duas frequências específicas. O filtro passa banda tipo trapezoidal funciona no domínio da frequência e está baseado na transformada de Fourier (FFT). Esse filtro é especificado pelo ajuste de quatro valores de frequência: o primeiro ponto determina a frequência de corte baixo, o segundo platô frequência inferior da banda passante, o terceiro frequência superior da banda passante e o quarto corresponde a frequência de corte superior.

4.2.2 Filtros espaciais (2D)

Os filtros (2D) espaciais atuam nos dados do radargrama na direção espacial/temporal e quando aplicados eliminam os refletores horizontais. Tendem a adotar filtros de média ou média simples que abrangem um número definido de traços e são normalmente usados para enfatizar ou suprimir características

específicas na seção (CASSIDY, 2009). Dentre os mais comuns tem-se o *running average*, *subtracting average* e *background removal*.

O *running average* aplica uma média de número de traços e como resultado suaviza os dados na horizontal, enfatiza os refletores de superfície plana enquanto suprime os refletores de imersão ou difração. Sua aplicação funciona melhor através de um número relativamente grande de traços na janela do filtro (SANDMEIER, 2006).

O *subtracting average* realiza uma média de subtração sobre um número de traços selecionável para cada etapa de tempo. O valor médio é subtraído do valor da amostra atual e o resultado é atribuído à amostra atual como um novo valor. A sua eficiência está calcada na escolha de um menor número de traços e como resultado enfatiza as difrações (SANDMEIER, 2006).

A remoção de fundo (*background removal*) remove sinais de baixa frequência eliminando refletores na horizontal e realçando refletores pontuais e/ou anomalias. Esse filtro atua no número escolhido de traços e executa uma subtração de um traçado médio (*trace range*) que é construído a partir do intervalo de tempo/distância escolhido no radargrama, ou seja, realiza-se uma média da amplitude dos traços do radargrama, a partir de uma janela definida, e subtrai esta média dos traços originais (SANDMEIER, 2006).

As remoções podem ser obtidas pela principal equação (17):

$$A'_{n,a}(t) = A_{n,a}(t) - \frac{1}{Na} \sum_{a=1}^{Na} A_{n,a}(t) \quad (17)$$

Onde $n=1$ para N (números de amostras), $a = 1$ para Na (número de forma de onda A ou B-Scan), $A_{n,a}(t)$ = não processado e $A'_{n,a}(t)$ = processado.

4.3 GANHOS

As ondas eletromagnéticas são rapidamente atenuadas à medida que se propagam para o solo, assim os sinais em maiores profundidades são mais fracos. Para compensar esta perda de energia aplica-se a função de ganho com variação no tempo (JOL, 2009). Desse modo, nos processamentos de GPR exis-

tem diversos tipos de ganho variante no tempo dentre os quais podem ser citados: ganho automático (*automatic gain control - AGC*), decaimento de energia (*energy decay*) e função ganho (*gain function*).

O ganho automático (*automatic gain control - AGC*) atua em cada traço de forma independente e facilita a criação de amplitudes igualmente distribuídas na direção y (normalmente, eixo de tempo) dentro de uma janela pré-definida. Assim é calculado inicialmente uma amplitude média ao longo do intervalo total de tempo de cada traço, e posteriormente há um dimensionamento de cada valor de amplitude de modo que a amplitude média tenha o mesmo valor para cada janela selecionada em torno do valor atual do traço (SANDMEIER, 2016). Quanto menor o tamanho da janela maior a distribuição da amplitude, conforme se vê na equação (18):

$$g(t) = \frac{\text{desired rms}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x_i]} \quad (18)$$

Portanto, x_i amplitude do traço e N corresponde ao número de amostra na janela (YILMAZ, 1987).

O decaimento de energia (*energy decay*) atua de forma independente em cada traço do radargrama. Inicialmente, uma curva de decaimento média é determinada a partir da análise de todos os traços no radargrama. Então, após a aplicação de um filtro mediano a essa curva, cada amostra rastreada é dividida pelo valor da curva de decaimento (SANDMEIER, 2006).

O ganho de função (*gain function*) atua em cada traço de forma independente no radargrama. Este ganho possibilita multiplicar os pontos dos dados por uma determinada função $g(t)$ que consiste de uma parte linear e exponencial, conforme a equação (19):

$$g(t) = (1 + a * t) * e^{(b * t)} \quad (19)$$

Deste modo, $a = a' / \text{largura de pulso}$ e $b = b' * v / 8,69$ com $v = 0,1 \text{ m / ns}$. Os dois parâmetros de filtro a' (ganho linear) e b' (expoente) devem ser inseridos.

4.4 FILTRO FK (*Frequency-wavenumber*)

Este filtro atua sobre a área de dados escolhida. O filtro fk permite aplicar um filtro bidimensional definido dentro do domínio de número de ondas de frequência a uma faixa de dados selecionada no *fk-spectrum*, que resulta na reconstituição total do campo das ondas eletromagnéticas. Como resultado ocorre a supressão de ruídos inclinados e os horizontais relacionados a reverberação podem ser suprimidos ao extrair o número de onda zero (SANDIMEIER, 2006).

4.5 MIGRAÇÃO

A etapa de migração possibilita corrigir espacialmente os refletores distorcidos ou hiperbólicos, originados do tempo de viagem percorrido pela onda eletromagnética do transmissor até o receptor. Desse modo, a energia é focada para pontos de origem movendo os refletores para posições corretas encontradas em subsuperfície. Dentre as migrações que serão aplicadas ao longo da pesquisa destaca-se a *diffraction stack*, *Kirchoff migration* e *Stolt*.

A *Diffraction stack* definida como migração de tempo simples resultando em um empilhamento de difração, que está condicionada a uma velocidade constante extraída de um perfil de radargrama 2D. Esta migração é realizada nas direções x-t, a partir de uma soma não ponderada para cada ponto da hipérbole que é calculada a partir da largura da banda (número de traços) definida.

A migração *Stolt* se assemelha ao método *Kirchoff*, contudo a diferença ocorre pela implantação da transformada de Fourier no algoritmo (STOLT, 1978). Ao se aplicar uma velocidade média constante ocorre a conversão da frequência temporal (ω) para número de onda vertical (k_z), equação (20). A *Stolt* é demonstrada pela equação (21):

$$k_z = \pm \sqrt{\frac{\omega^2}{v^2} - k_x^2} \quad (20)$$

$$P(k_x, k_z, t = 0) = \left[\frac{v}{2} \frac{k_z}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right] P \left[k_x, 0, \omega = \frac{v}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2} \right] \quad (21)$$

Onde $P(k_x, z = 0, \omega)$ é o zero-offset da seção e $P(k_x, k_z, t = 0)$ corresponde a seção migrada para o domínio frequência do número de onda.

CAPÍTULO 5

5 RESULTADOS

Nesta tese optou-se pela apresentação dos resultados por área investigada.

O primeiro conjunto de resultados da pesquisa refere-se àqueles obtidos com o GPR antes e após a instalação do Sítio Controlado de Geofísica Forense da UFPR. Os resultados possibilitaram a elaboração do artigo intitulado “Analysis of 2D and 3D GPR in the Federal University of Paraná Forensic Geophysics Controlled Site- a case study”, foi submetido ao *Brazilian Journal of Geophysics*.

Durante o processamento dos dados de GPR 3D verificaram-se distorções no posicionamento de anomalias causados devido à posição incorreta dos inícios dos perfis de GPR 2D. Assim, propôs-se uma metodologia prática para eliminar as distorções em volumes de GPR 3D e assim resolver melhor as imagens para as áreas de forense, arqueologia e ciências correlatas. Os resultados possibilitaram a elaboração do artigo intitulado “Practical procedure to eliminate GPR positioning errors in 3D data for forensic purposes”, que será submetido para o *Journal of Applied Geophysics*.

Os resultados da segunda área investigada provêm de uma perícia realizada com o GPR em uma área da aldeia indígena Tekoha Jevy. Como consequência deste trabalho elaborou-se o artigo intitulado “The Forensic Application of Ground Penetrating Radar, Tekoha Jevy Indigenous Village, Paraná, Brazil”, foi submetido e publicado na *The Geological Society London Special Publications* (<http://dx.doi.org/10.1144/sp492-2017-329>).

Os dados analisados da terceira área referem-se às investigações de GPR 2D e 3D obtidas em perícias desenvolvidas pelo Grupo de Trabalho Araguaia. Além da discussão dos procedimentos de aquisição, processamento e interpretação dos dados em 2D e em 3D, os resultados possibilitaram a elaboração e preparação do artigo intitulado “Proposal of practical procedures for the acquisition and processing of 2D and 3D GPR data for forensic and archaeological purposes”, que será submetido para a revista *Forensic Science International*.

5.1 ARTIGO 1

Análise das respostas de GPR 2D e 3D no Sítio Controlado de Geofísica Forense da UFPR

5.1.1 Resumo

Em 2016, o Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada (LPGA), da Universidade Federal do Paraná, em parceria com a Polícia Federal do Paraná e a Universidade de Brasília, instalaram um Sítio Controlado de Geofísica Forense (SCGF) para o fortalecimento das ciências forenses no Estado do Paraná. No SCGF foram instalados inúmeros objetos que simulam alvos forenses, arqueológicos e paleontológicos. Os alvos foram inseridos em profundidades inferiores a 1 metro, em um solo argiloso, típico da região em que se localiza o campus Jardim das Américas da UFPR. Este estudo objetiva a verificação das respostas 2D e 3D do método radar de penetração no solo (GPR) aplicada aos alvos instalados no SCGF. Nas aquisições de dados GPR foram usadas antenas blindadas de 250 MHz, 400 MHz, 700 MHz, com perfis 2D paralelos e equiespaçados em 0,05 m e 0,01m e realizadas em períodos de seca e precipitação. Através dos resultados obtidos pode-se definir padrões de refletores associados aos alvos, as escavações e do meio investigado.

Palavras-chave: Ground penetrating radar; solo argiloso; alvos; ciência forense

5.1.2 Abstract

In 2016, the Laboratory for Research in Applied Geophysics of the Federal University of Parana (LPGA-UFPR) in partnership with the Federal Police of the State of Parana state and the University of Brasilia built a Forensic Geophysics Controlled Site (FGCS) for the improvement of forensic sciences in state of Parana. In the FGCS has installed numerous objects that simulate forensic, archaeological and paleontological targets. The targets were buried in depths of less than 1 meter in a very clay soil typical of the region. This study aims to verify the 2D and 3D responses of the ground penetration radar method (GPR) applied to the targets installed in the FGCS. In the data acquisition were used shielded antennas of 250 MHz, 400 MHz, 700 MHz with 2D parallel profiles spaced of 0.05 meter and 0.10 meter, with acquisition realized in periods of drought and precipitation. Through the results obtained, it is possible to define reflector patterns associated with the targets, the excavations and the environment investigated.

Keywords: Ground penetrating radar; clay soil; targets; forensic sciences

5.1.3 Introdução

Em diversos países os geocientistas desenvolvem suas pesquisas nos sítios controlados que são contextualizados como áreas semelhantes as encontradas em distintos casos de investigação atrelados a diversas áreas como a ambiental, arqueológica e forense (BOWDERS et al., 1982; BEVAN, 1991; STRONGMMAN, 1992; ISAACSON et al., 1999; HILDEBRAND et al., 2002; PRINGLE et al., 2012; MOLINA et al., 2015). Os campos de testes visam verificar a aplicabilidade, o aprimoramento e o desenvolvimento de métodos e técnicas geofísicas com o objetivo de minimizar as ambiguidades de respostas geofísicas.

Em 2004, no Brasil, construiu-se o primeiro campo de teste denominado de Sítio Controlado de Geofísica Rasa I do IAG/USP (SCGR-I) com a temática voltada para planejamento urbano, arqueologia e estudos ambientais. O campo teste possuía uma área de 1500 m² localizada no campus da Universidade de São Paulo (USP). Nesse local foram instalados objetos com propriedades físicas distintas, tais como: tubulações de metal e plástico, tambores preenchidos com fluidos de água doce e salina, manilhas de concreto, vasos de cerâmica, seixos, muros de tijolos. Ao longo do tempo, diversas pesquisas foram realizadas com objetivo de imagear, calibrar, caracterizar e compreender as assinaturas geofísicas dos artefatos (PORSANI et al., 2004a; RODRIGUES, 2004; PORSANI et al., 2006; BORGES, 2007).

A partir de 2007 no Brasil houve um crescente interesse de pesquisadores na ciência denominada de geofísica forense. Como decorrência, em algumas regiões do país foram implantados campos de testes pioneiros como o de Geofísica Forense, Ambiental e de Resgate (FORAMB em Belém – PA; Nascimento, 2009), o Sítio Controlado de Criminalística (SITCRIM em Brasília – DF; BLUM & RUSSO, 2012) e o Sítio Controlado de Geofísica Rasa da UnB (SCGR em Brasília – DF; CAVALCANTI et al., 2018).

O FORAMB foi construído no ano de 2007 no cemitério de Tapanã, Belém do Pará, pela Profa. Dra. Lúcia Maria da Costa e Silva em parceria com o Departamento de Necrópoles (DANE) e o Instituto Médico Legal (IML). Neste sítio as pesquisas com métodos geofísicos foram desenvolvidas sob simulacro de armas e túneis, além de um cadáver humano (SILVA et al., 2008; NASCIMENTO, 2009; CATETE, 2010; BRASIL, 2013).

No ano de 2012 o Instituto de Criminalística do Departamento de Polícia Federal (INC/DITEC/DPF) inaugurou o SITCRIM, cujo objetivo é o treinamento de policiais e o aprimoramento da geofísica forense. Nesse local, foram enterrados artefatos como: projéteis, vidros, monitores de computador, ossadas e carcaças de animais, revólveres, drogas, tambores plásticos, cápsulas de projéteis, dentre outros. Na área, os pesquisadores do INC e da UnB desenvolveram e aplicaram inúmeros métodos geofísicos para obter as respostas características dos alvos enterrados em áreas de latossolo vermelho (BLUM & RUSSO, 2012; ALVES et al., 2013, 2015; BUSO et al., 2016).

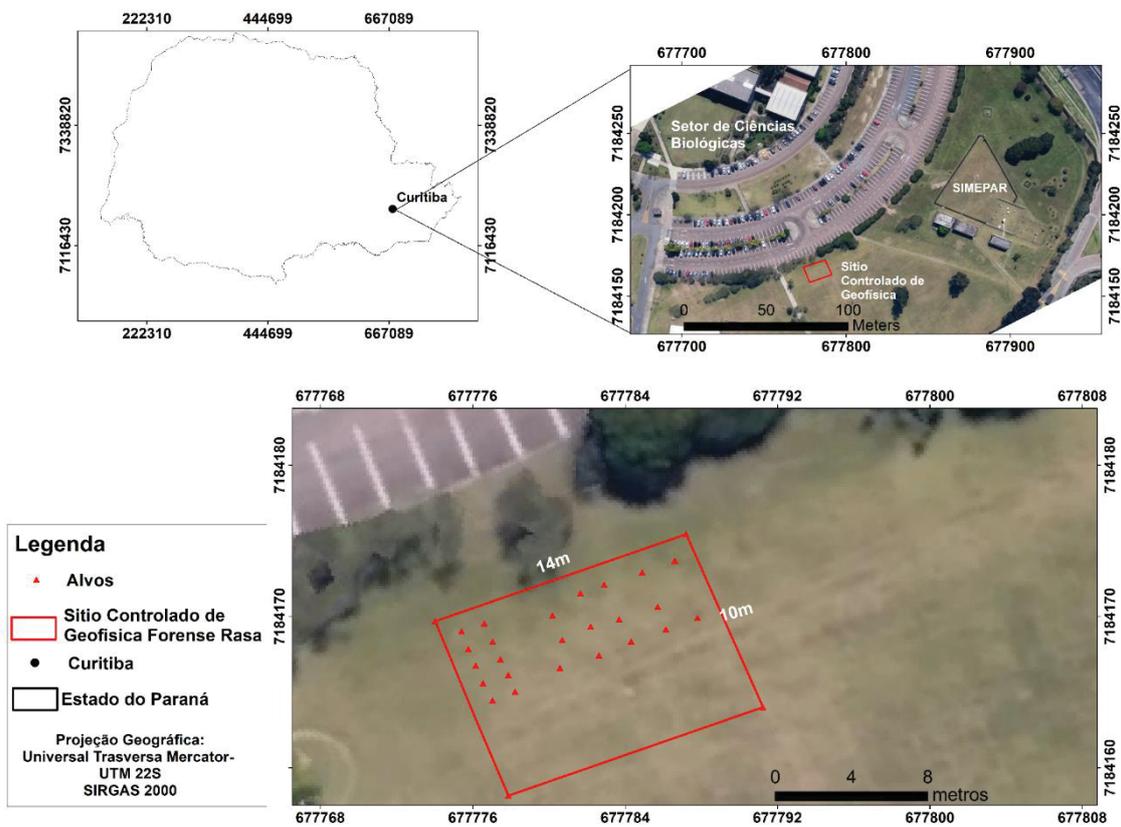
O SCGF-UnB, com uma área de 600 m², está localizado na Fazenda Água Limpa, de propriedade da UnB. Nessa área inumaram-se várias carcaças de porcos simulando diferentes cenários de sepultamento em área de latossolo vermelho. Cavalcanti (2017) aplicou os métodos elétrico (eletrorresistividade) e eletromagnético (GPR) com o objetivo de diagnosticar distintos mecanismos de sepultamentos.

Embora existam diversos sítios controlados no Brasil, a implantação de novos campos forenses é de fundamental importância para o aprimoramento da geofísica, tendo em vista distintos cenários pedológicos encontrados no país.

Os aspectos discutidos nos primeiros capítulos desta pesquisa deixam claro a importância da instalação de novos sítios controlados pelo Brasil, principalmente devido a existência de diferentes características geológicas e pedológicas encontradas no país.

No início de dezembro de 2016 a Superintendência de Infraestrutura da Universidade Federal do Paraná (SUINFRA-UFPR) disponibilizou uma área para implantação do primeiro Sítio Controlado de Geofísica Forense da UFPR (SCGF-UFPR), localizado no Campus Centro Politécnico - Jardim das Américas (FIGURA 9). A área escolhida situa-se em frente ao estacionamento do Setor de Ciências Biológicas e próximo ao edifício do Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR).

FIGURA 9: Localização da área do Sítio Controlado de Geofísica Forense da UFPR, com a indicação dos principais alvos.

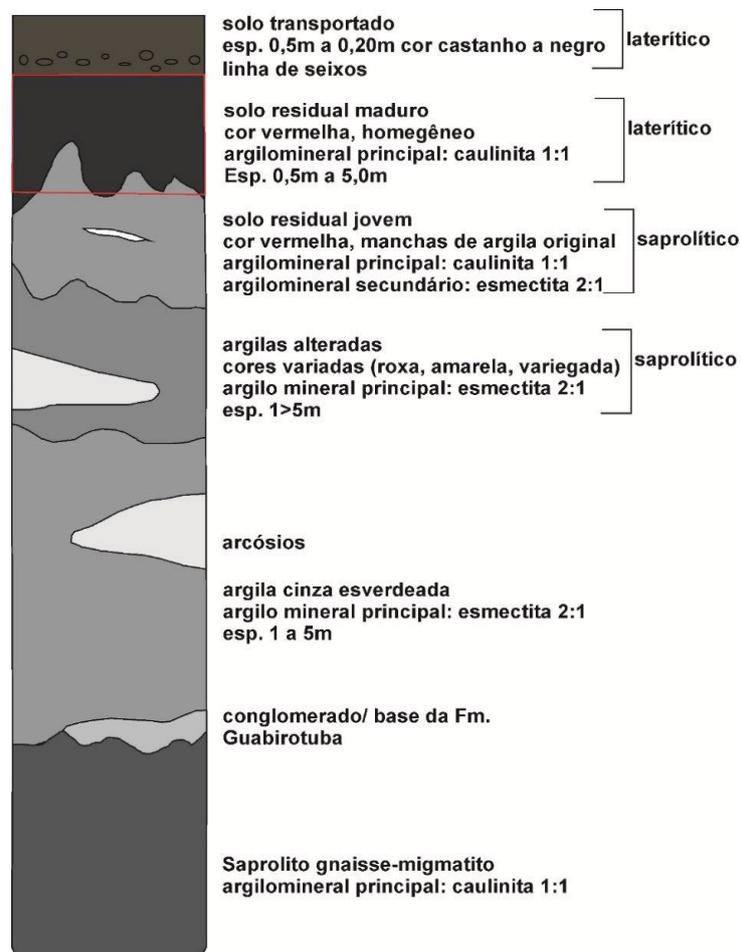


A respeito da contextualização geológica o sítio controlado está inserido na Formação Guabirotuba, designada primeiramente por Bigarella et al. (1961), a qual encontra-se sobreposta ao embasamento ou Complexo Atuba (migmatitos e gnaisses) e está inserida na Bacia de Curitiba. Segundo estes autores a formação é caracterizada por distintos litotipos como argilitos, os arcósios, os depósitos conglomeráticos e os depósitos carbonáticos (caliche). Felipe (2011) atribui aos sedimentos uma idade de deposição compreendida no intervalo de 23 a 1,8 milhões de anos que estão associados aos períodos Paleógeno – Quaternário.

Os argilitos ou sedimentos argilosos que predominam na Formação Guabirotuba possuem tonalidades diferentes em decorrência do processo de intemperismo: as colorações esverdeadas, cinza e marrom estão associadas ao baixo intemperismo, em contrapartida, quando há existência de um forte intemperismo pode ocorrer o processo de laterização e contribuir para uma coloração avermelhada a amarelada.

O solo característico do local do sitio está intrinsecamente relacionado a Formação Guabirotuba, ou seja, são solos argilosos. Felipe (2011) descreve um perfil típico de alteração do solo característico desta Formação. O autor classifica distintos materiais: (i) solo transportado com linha de seixos; (ii) solo residual maduro com intercalação de arcósios; (iii) solo residual jovem; (iv) argilas alteradas; (v) conglomerado e saprólito gnaiss-migmatito. Na FIGURA 10, a marcação em vermelho está relacionada à camada de solo do sitio controlado.

FIGURA 10: Perfil de solo alterado típico da Formação Guabirotuba.



FONTE: modificado de Felipe (2011).

5.1.4 Instalação do sítio controlado de geofísica forense

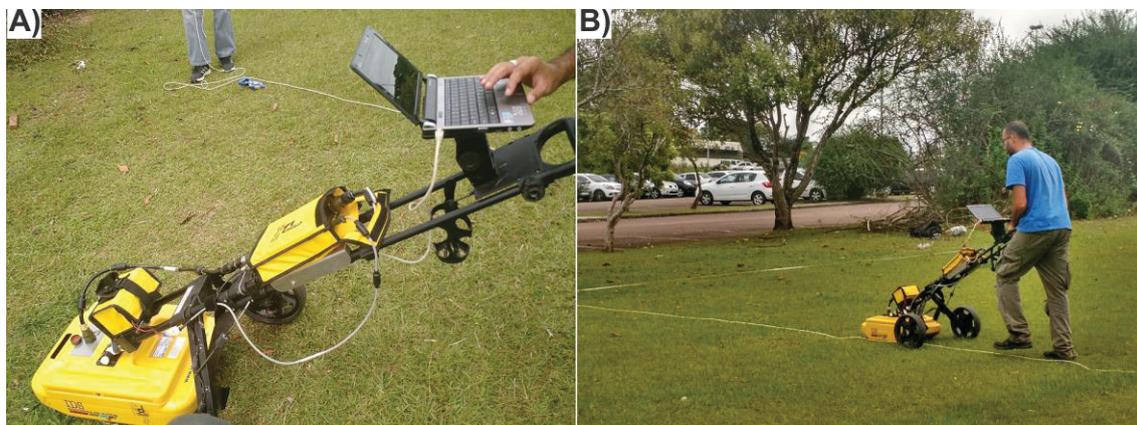
Após a disponibilização do local indicado para a construção do SCGF da UFPR foi realizada a demarcação e o georreferenciamento dos vértices da poligonal (140 m²) para a futura aquisição do background do local e instalação dos alvos, FIGURA 11a e 11b.

FIGURA 11: Fotografias evidenciam a delimitação por estacas de madeiras da área para instalação do Sítio Controlado (A), e o georreferenciamento com um GPS de precisão de todos os vértices da área (B).



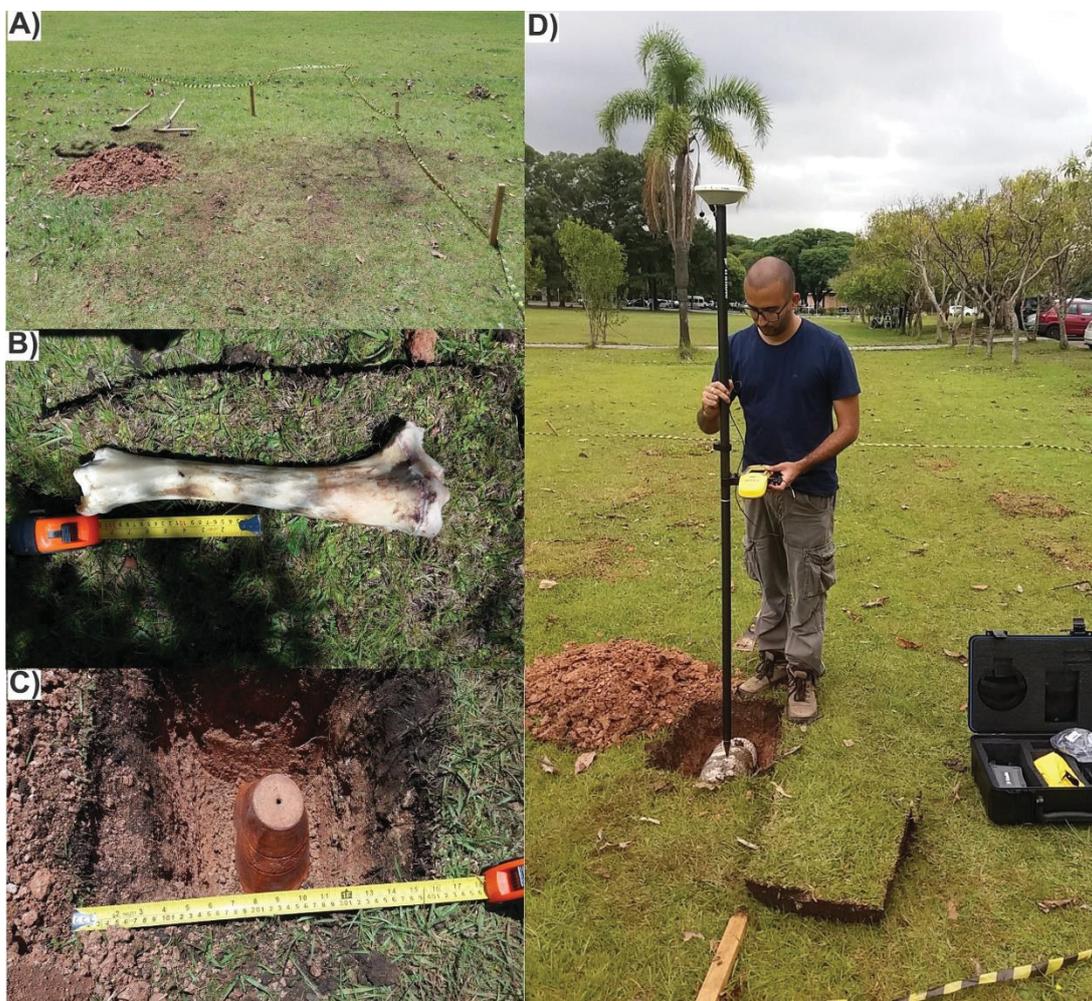
Posteriormente a demarcação da área do SCGFR-UFPR foram realizados os primeiros levantamentos geofísicos para obtenção do background da área com o método *Ground Penetrating Radar* (equipamento Detector Duo) com antenas de 250 MHz e 700 MHz (FIGURA 12).

FIGURA 12: Fotografias evidenciam (A) o equipamento GPR Detector Duo da IDS (250 MHz e 700 MHz) e (B) a aquisição de dados de GPR antes da instalação dos alvos na área (*background*).



A área total em que os artefatos foram instalados no SCGFR-UFPR corresponde a 84 m² (14 m x 6 m). Os outros 56 m², situados na porção sudeste, foram anexados ao sítio devido a presença de materiais (cabos de fibra óptica) que podem ser utilizados para a calibração dos sistemas de GPR. Nas escavações (manuais) utilizaram ferramentas como pás, cortadeiras, alavancas, fitas métricas para medir as dimensões do buraco e dos artefatos, bem como a utilização do GPS para georreferenciar as posições espaciais e as profundidades da base e do topo dos artefatos enterrados (FIGURA 13a, 13b, 13c e 13d).

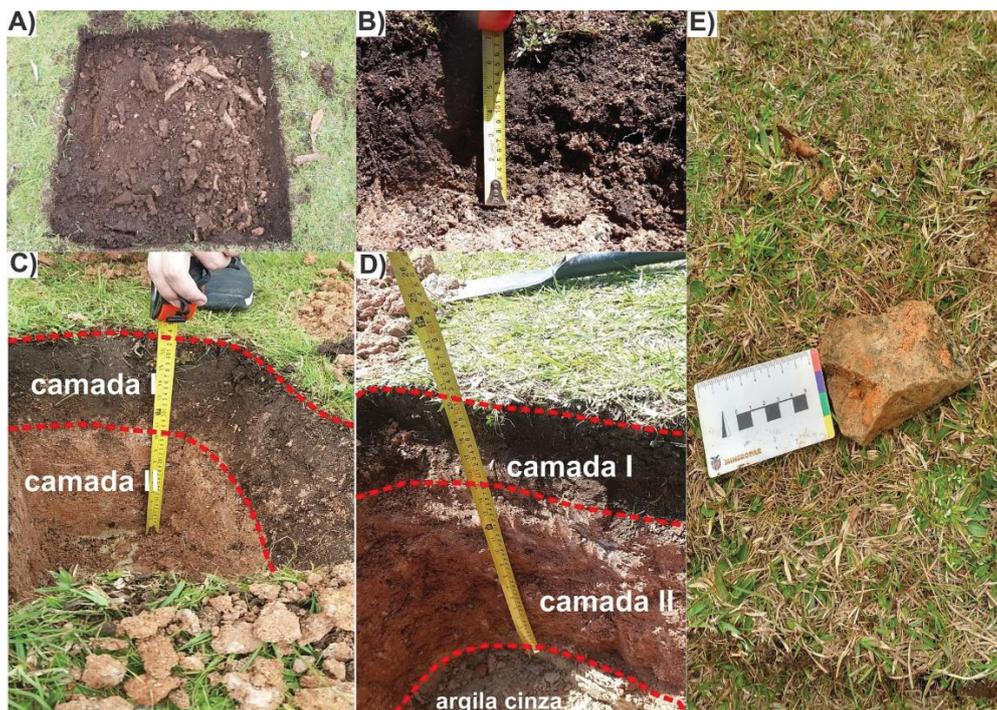
FIGURA 13: Fotografias evidenciam: Preparação para a instalação dos alvos no SCGFR-UFPR (A); Ilustração das medidas retiradas de todos os artefatos (B); Medições realizadas para dimensionar os buracos escavados (C); Georreferenciamento da base do buraco e do topo de todos os alvos instalados no SCGFR-UFPR (D).



Durante as escavações o perfil de solo presente no local foi descrito através do método tátil-visual e pode observar a distinção de duas camadas de solos

(FIGURA 14a, 14b, 14c, 14d e 14e). A camada (I) – camada superficial evidencia a presença de um solo com coloração marrom escuro, característico de matéria orgânica. Essa camada possui uma espessura que varia de 0,15 m a 0,20 m. Na camada (II) – sobrejacente a primeira camada, observou-se um solo de coloração castanho avermelhado, por vezes, ocorre uma alternância de tons amarelados e cinza intercalados a tonalidade principal. Esse solo é composto predominantemente por argila e silte, em alguns locais foram evidenciadas lentes de um material muito intemperizado caracterizado como arcósio, além da presença de fragmentos de quartzo. Em outros locais existem a presença de camadas incipientes de sedimentos argilosos com coloração cinza que foram observados em profundidades que variam entre 0,45 m a 0,50 m.

FIGURA 14: Fotografias evidenciam: Escavação do buraco para instalação dos artefatos (A); Primeira camada de solo orgânico com 0,19 m de espessura (B); Contato entre as camadas I e II solo siltico argiloso (C); Exibição das três camadas de solo descritas no SCGF(D); Fragmentos de quartzo observados na escavação (E).



O solo descrito na área de instalação do SCGFR-UFPR possui semelhança com as observadas por Kormann (2002). Este autor estudou o comportamento geomecânico da Formação Guabirotuba por meio de ensaios geotécnicos e de laboratórios (difração de raio-X). As investigações se concentraram em duas áreas (A1- próximo ao Laboratório de Pesquisa Hidrogeológicas - LPH e A2-

próximo ao Edifício Professor João José Bigarella) localizadas no Campus do Centro Politécnico da UFPR.

Os ensaios geotécnicos obtidos caracterizaram um solo com presença de argila e silte, com tonalidades variadas (cinza, avermelhado, marrom e amarelo), com diferentes graus de alteração intempérica e presença de lentes arcossianas. As análises de difração de raios-x diagnosticaram a presença de argilominerais do grupo da esmectita, caulinita e illita.

Os alvos arqueológicos, forenses e paleontológicos (FIGURA 15, 16 e 17) foram instalados em profundidades rasas (0,18 m a 0,45 m) devido ao contexto geológico e pedológico presentes na área.

O croqui do SCGFR, ilustrado pela FIGURA 18, indica as posições geográficas e as cotas em que foram instalados os artefatos que estão distribuídos em sete fileiras, que totalizam 24 buracos.

FIGURA 15: Fotos: dos artefatos arqueológicos: Vaso de cerâmica (A); Vaso de barro (B); Vaso de cerâmica (C); d) Seixos (D); e) Tijolos maciços (E); Tronco de madeira (F-exceção).

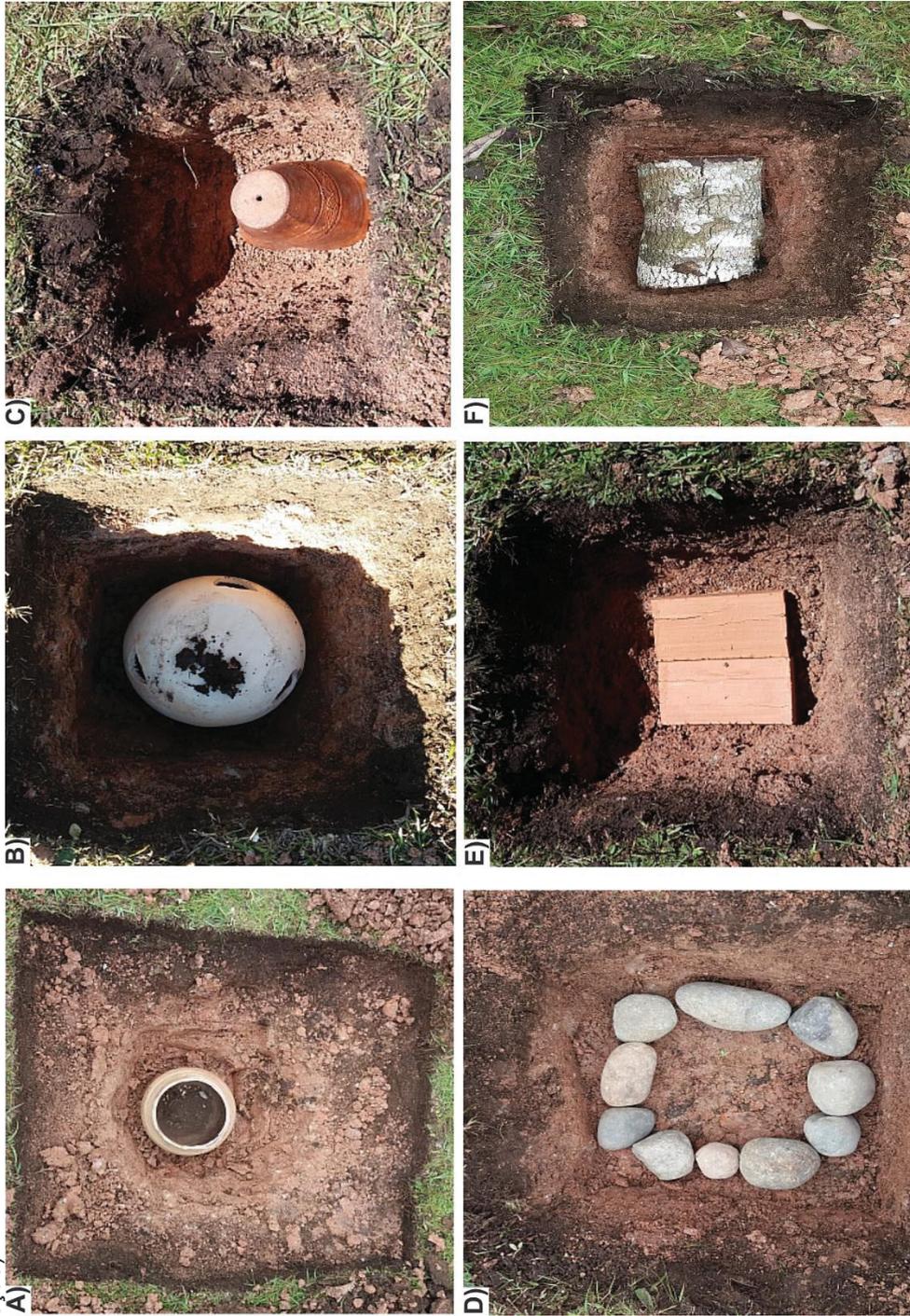


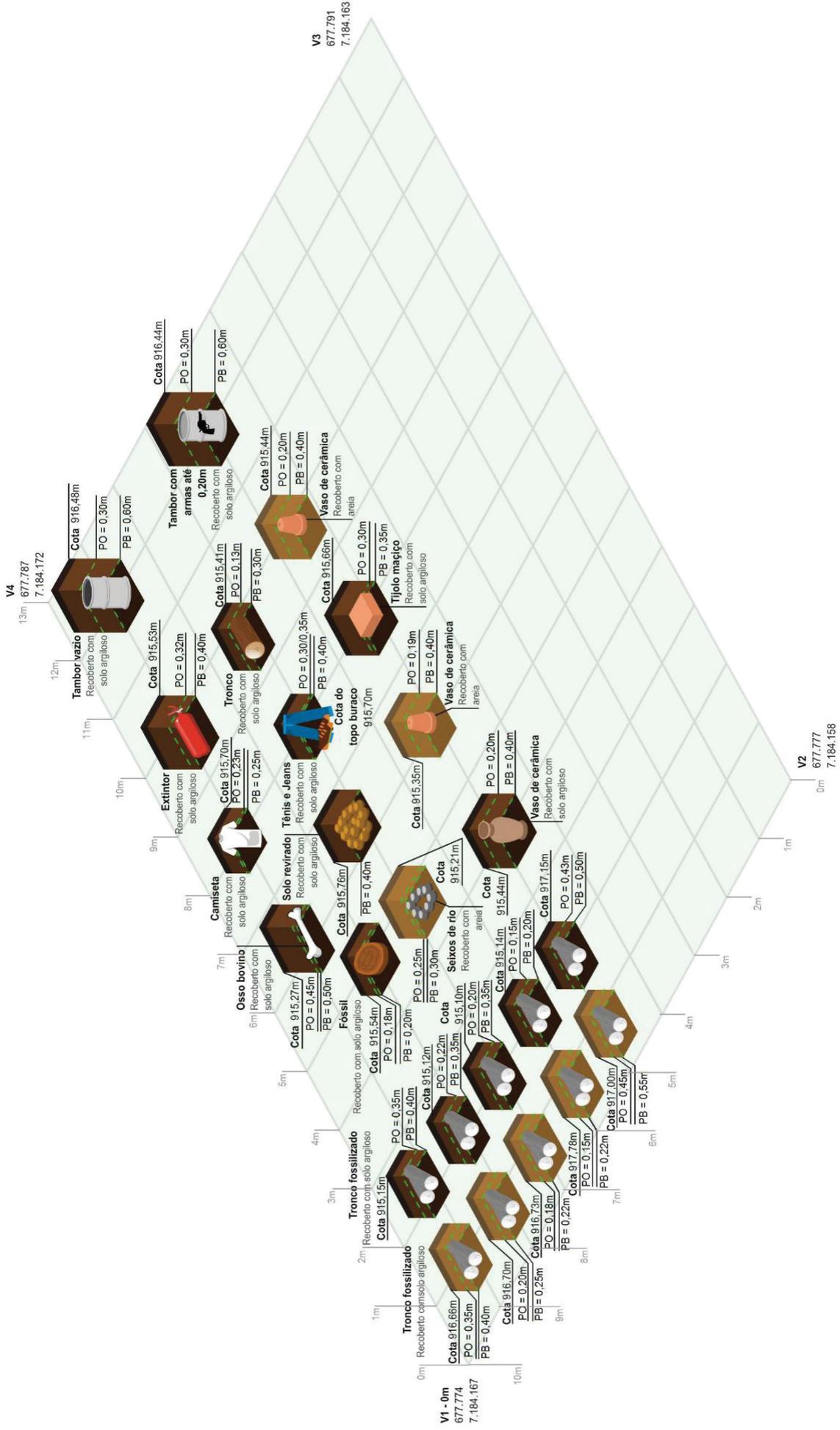
FIGURA 16: Fotografias dos artefatos forenses: Camiseta (G); Tambor de plásticos com armas (H); Calça Jeans e tênis (I); Solo revirado (J); Espingardas (L); (M) Osso bovino; (N) Extintor.



FIGURA 17: : Fotografias dos artefatos de caules fossilizados: Gimnosperma ovóide tabular (O); Gimnosperma prismático (P); Gimnosperma retangular (Q); Gimnosperma cilíndrico tabular (R); Angiosperma cilíndrico (S) e (T).



FIGURA 18: Croqui em perspectiva 3D do SOGFR-UFRP com a indicação das profundidades e descrição dos itens instalados na área. PO – profundidade do topo, e PB – profundidade da base.



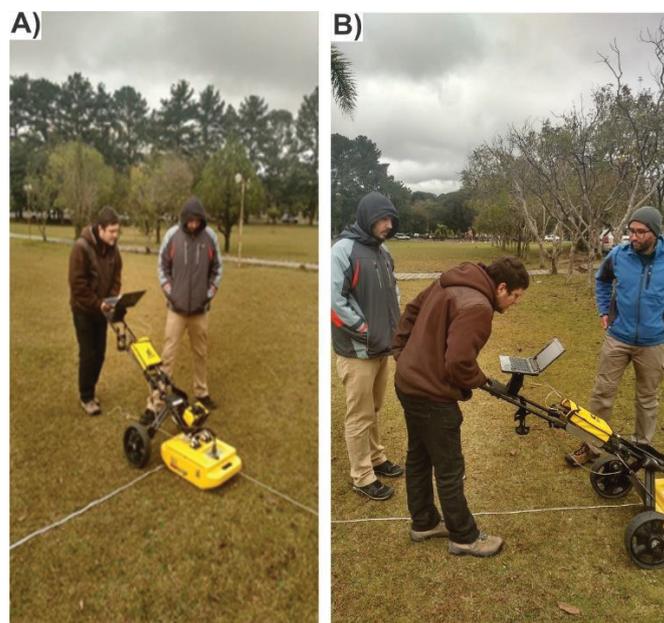
5.1.5 Aquisição de dados

5.1.5.1 Antes dos alvos serem instalados

Na aquisição dos dados de *background* usou-se o equipamento *Detector Duo* (*Ingegneria Dei Sistemi - IDS Georadar*) de propriedade do Setor Técnico Científico do Departamento de Polícia Federal do Paraná – SETEC/PR. Este sistema funciona acoplado a uma antena blindada de dupla frequência (250 MHz e 700 MHz) que possibilita a aquisição simultânea de duas seções de GPR.

As aquisições aconteceram no modo afastamento constante (*common offset*), e os parâmetros usados em campo foram 512 amostras por traço, intervalo entre os traços de 0,027 metro e janela temporal de 120 ns. Desse modo, na área de 8 m² foram adquiridos perfis com espaçamento de 0,20 m totalizando 41 seções 2D de GPR na direção S-N (FIGURA 19a e 19b).

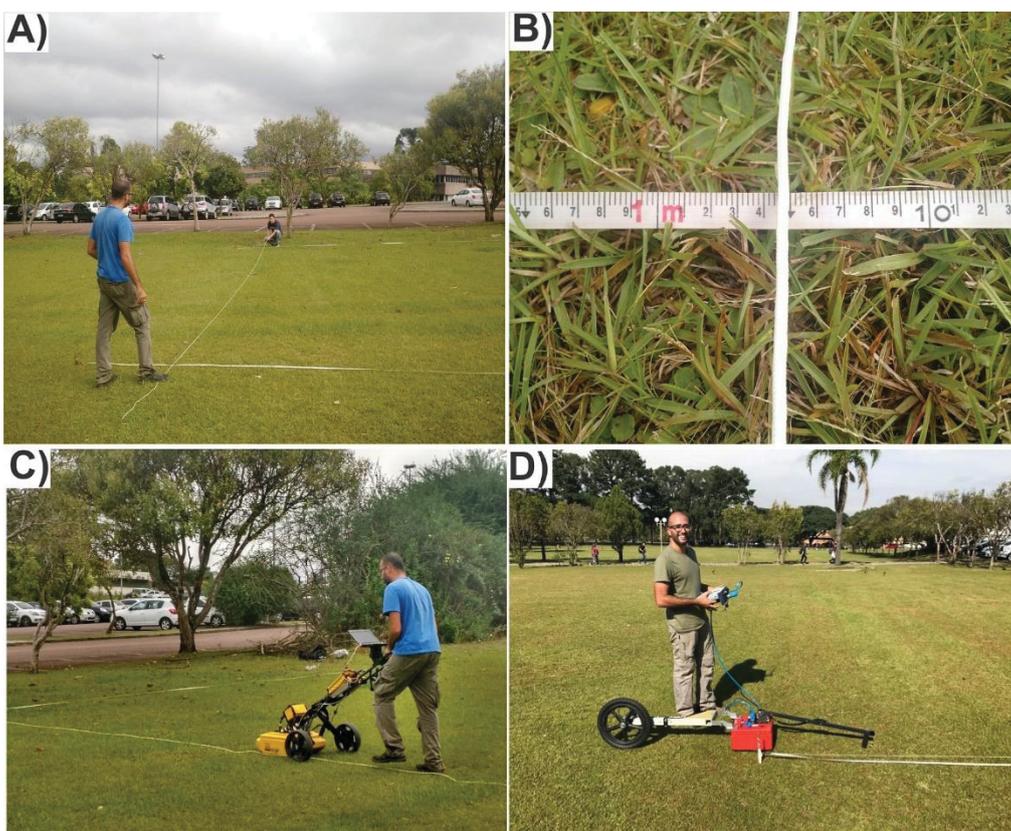
FIGURA 19: Fotografias evidenciam a aquisição de dados de GPR do background de parte do SCGFR-UFPR (A e B).



5.1.5.2 Após a instalação dos alvos

As primeiras aquisições de GPR 2D e “Pseudo 3D” foram realizadas uma semana após a instalação dos primeiros alvos no ano de 2016, e posteriormente entre os anos de 2017 e de 2018. As FIGURA 20a,20b, 20c, 20d ilustram as aquisições de campo realizadas com os dois modelos de equipamentos geofísicos. Até a presente etapa da pesquisa foram executados 300 perfis de 10 m cada na direção aproximada S-N, e todas as aquisições foram adquiridas no modo afastamento constante.

FIGURA 20: Fotos evidenciam a aquisição pseudo 3D: Ilustração da poligonal e da fita métrica para orientação dos perfis durante a aquisição (A); Marcação com fita métrica nas extremidades oposta da área investigada e o barbante na perpendicular para aquisição pseudo 3D; Fita métrica indicando a aquisição dos perfis a cada 0,05m (B); Técnica de aquisição *constant of set* com o IDS e GSSI, respectivamente (C-D).



Para obtenção dos dados geofísicos foram utilizados os equipamentos *Detector Duo* da IDS com antena blindada (250MHz e 700MHz) e o SIR-3000 da GSSI com antena blindada de (400MHz), e os equipamentos foram emprestados pelo SETEC-PR e pela Universidade do Desenvolvimento do Estado de Santa

Catarina (UDESC), respectivamente. A TABELA 3 descreve o número de perfis adquiridos e os parâmetros de aquisição de campo.

TABELA 3: Parâmetros de aquisição de dados de GPR usados na área do SCGFR-UFPR.

DESCRIÇÃO	PARÂMETROS		
	Detector Duo	Detector Duo	SIR-3000
Equipamento de GPR	Detector Duo	Detector Duo	SIR-3000
Frequência Central da Antena (MHz)	250	700	400
Número de amostras por traço	512		512/1024
Intervalo entre os traços (m)	0,027		0,02
Janela temporal (ns)	120		50
Intervalo de amostragem temporal (ns)	0,25		0,09
Frequência de amostragem (MHz)	1996	1996	5000
Espaçamento entre os perfis GPR (m)	0,05/0,10	0,05/0,10	0,10
Número de seções para compor o 3D	181/81	181/81	140

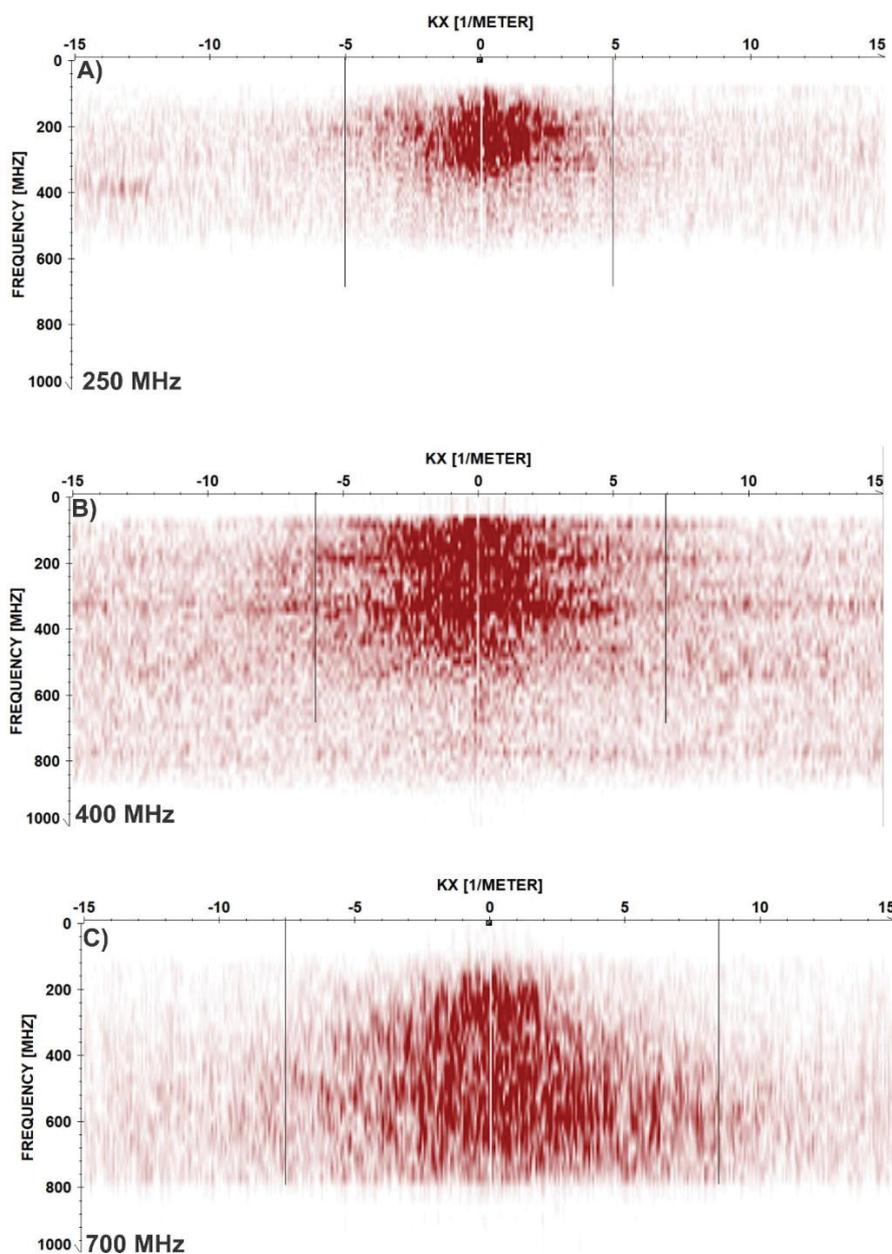
Para a aquisição no modo pseudo 3D para que se tenha uma reconstituição total do campo das ondas eletromagnéticas, pode-se utilizar um intervalo de amostragem espacial obtido após a análise do espectro f-k extraído de um perfil 2D de GPR na área de pesquisa (GRAUSMECK et al, 2005). Ao aplicar o método especificado nos radargramas, adquiridos sobre as madeiras petrificadas, com as frequências de 250 MHz, 400 MHz, 700 MHz possibilitou a análise do espectro F-K (Kx) extraíndo os intervalos das maiores energias que compreendem ± 5 (250 MHz), $\pm 6,5$ (400 MHz), $\pm 7,5$ (700 MHz), conforme a FIGURA 21. Ao inserir os resultados obtidos na equação 22 obtêm-se o espaçamento (amostragem espacial) entre os radargramas para cada frequência (TABELA 4).

$$\Delta_{xN} = \frac{1}{2 Kx} \quad (22)$$

TABELA 4: Exibição dos valores mínimos para cada espaçamento entre os perfis para aquisição pseudo 3D.

FREQUÊNCIAS ANTENAS (MHz)	Kx (1/m)	Espaçamento entre os radargramas (m)
250	5	0,10
400	6,5	0,076
700	7,5	0,066

FIGURA 21: Espectro F-K obtidos através das antenas com frequências de 250 MHz (A), 400 MHz (B) e 700 MHz (C).



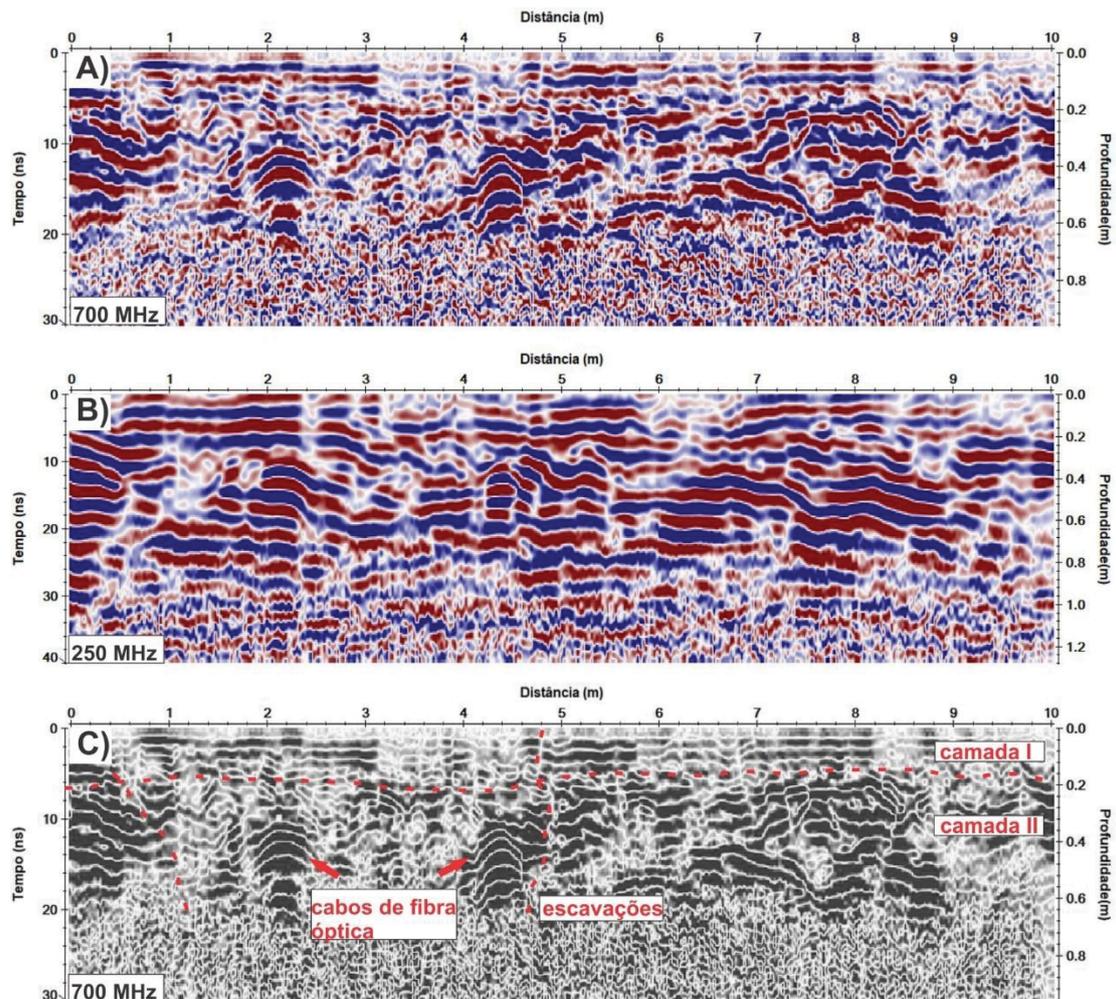
5.1.6 Resultados do gpr

5.1.6.1 Background

Os resultados obtidos nas seções de background adquiridas com o *Detector Duo* (700 MHz e 250 MHz) contribuíram para relacionar com os dados diretos das escavações executadas durante a implantação dos alvos (FIGURA 22a e 22b). Os refletores mais homogêneos e lineares observados até a profundidade aproximada de 0,15 m estão associados a um solo mais orgânico. No

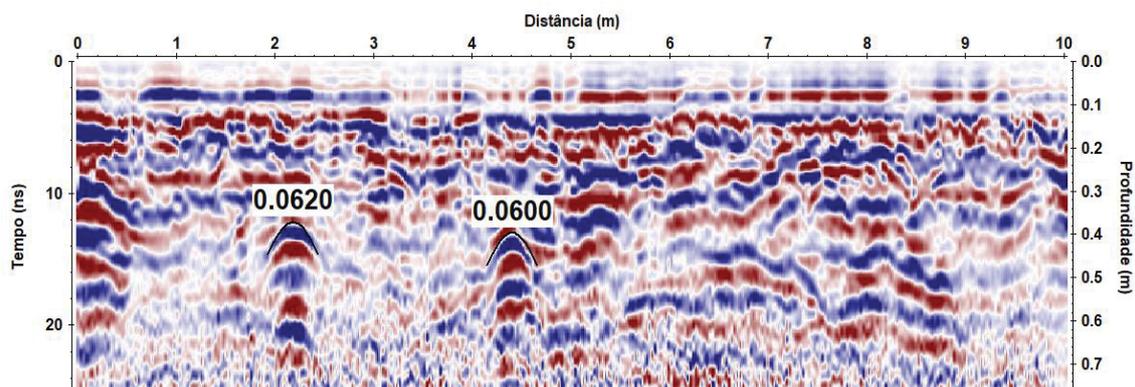
intervalo entre 0,15 m até 0,65 m os refletores heterogêneos foram associados ao material silítico-argiloso, nesta camada são observadas hipérboles de difração em uma profundidade estimada de 0,35 m que estão associadas aos cabos de fibra óptica que passam na área do sítio.

FIGURA 22: Ilustração dos Radargramas, não migrados, realizados para o Background: Respostas das antenas com frequências de 700 MHz (A) e 250MHz (B); Radargrama interpretado na resposta de 700 MHz (C).



Com as hipérboles de difração (FIGURA22), extraíram-se as velocidades dos materiais geológicos da área referente ao *background* (0,060 m/ns a 0,062 m/ns), desta maneira, usando-se as equações (23 e 24) calculou-se a constante dielétrica do meio em 20.

FIGURA 23: Radargrama evidencia o ajuste de velocidade realizados sobre as hipérbolas relacionadas ao cabeamento de fibra ótica instalado na área do sítio antes da implantação dos alvos.



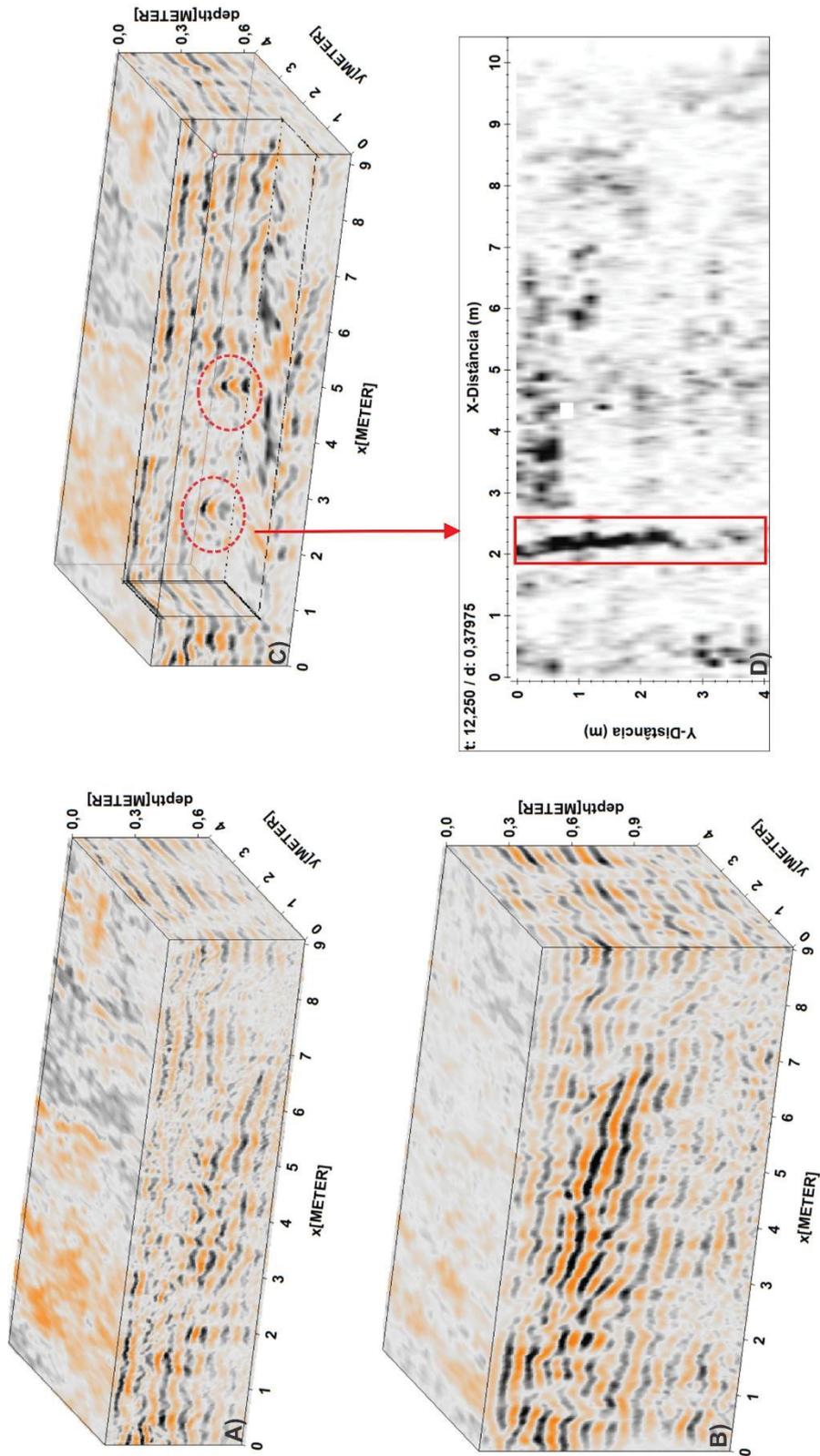
$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (23)$$

$$\epsilon = \epsilon_r \chi \epsilon_0 \quad (24)$$

A FIGURA 24 exemplifica os blocos pseudo-3D resultantes da interpolação de perfis 2D paralelos de 0,20 m. Nos blocos 3D (a e b) resultantes da aquisição com a antena de 700 MHz, observa-se com maior nitidez as duas interfaces (solo orgânico - síltico argiloso) supracitadas nos radargramas 2D e refletores inclinados sugerindo um aumento da espessura dessa camada de sedimentos argilosos. Na distância (0 a 3 m) no eixo X os refletores interrompidos e heterogêneos indicam o local de passagem do cabo de fibra ótica, que secciona o SCGFR-UFPR.

Os resultados obtidos com a antena de alta frequência possibilitam uma melhor visualização dessas interfaces, o que já era esperado devido à alta resolução. Contudo a antena de baixa frequência registra refletores em profundidades de até 1 m, sugerindo a continuidade desta camada argilosa.

FIGURA 24: Blocos 3D dos registros de GPR construídos a partir de perfis paralelos equipaçados em 0,20 m: construídos a partir da antena de 700 MHz (A) e 250 MHz (B); Bloco seccionado ilustrando os cabos presente na área (C) e o *Depth Slice* a 0,37m ilustrando os cabos em planta.



5.1.6.2 Após a instalação dos alvos

As respostas dos alvos localizados pelo imageamento do GPR estão associadas ao ápice das hipérboles de difração que foram identificadas em diferentes intervalos de tempos entre 5 ns a 20 ns. Outro parâmetro obtido foi o intervalo de velocidade da onda eletromagnética no meio resultando em uma variação de 0,052 m/ns a 0,07 m/ns refletindo solos com alta condutividade elétrica que resulta na atenuação dessa onda. Essa variabilidade na velocidade indica heterogeneidades texturais provocados pela ocupação antrópica.

As camadas de solo indicaram o sinal eletromagnético na forma de refletores contínuos e aleatórios de baixa a média amplitude. A interrupção da continuidade lateral desses refletores indica a presença de estruturas de escavação, ou seja, identifica a localização das cavas realizadas para a instalação dos alvos no sítio. Os resultados que melhor detectaram os alvos correspondem as frequências intermediária e alta (400 MHz e 700 MHz) a diferença das respostas dos refletores entre os resultados hiperbólicos (padrão de GPR) está condicionado ao imageamento em detalhe do topo e base do alvo, que por vezes pode ser detectado com a antena de alta frequência.

A rotina de processamento adotada para os dados de GPR consistiu em aplicar um filtro dewow (apenas para o resultado de 700 MHz), correção do tempo zero, remoção de ganho, aplicação de ganho de decaimento de energia, remoção de background, filtragem 1D do tipo passa banda, e migração 3D (fk migração-*stolt* apenas para o volume 3D).

Com o objetivo de analisar os padrões de GPR para madeiras petrificadas, realizou-se a seção L1 no local que transpassa cinco desses alvos (FIGURA 25 e 26). O alvo A1 foi recoberto com um solo argiloso/areia/solo argiloso e os fósseis A2 a A5 foram instaladas em meio a um solo síltico argiloso. Conforme observado os objetos são evidenciados pelos ápices das hipérboles de difração (alta amplitude) com tempo de das hipérboles correspondem entre 5 ns a 15 ns. Na anomalia A1 no tempo de 10 ns observa-se uma alta amplitude que está relacionada interface argila/areia, que pode ter comprometido a identificação em maior detalhe do alvo e a sua baixa amplitude está associada a condutividade que aumenta com a profundidade, prejudicando sua visualização.

FIGURA 25: (A) Seção de GPR sobre a L1 com a identificação dos alvos relacionados à fosseis de madeiras petrificadas. Detalhe da seção L1 sobre os alvos A1 (B), A2 (C), A3 (D), A4 (E) e A5 (F).

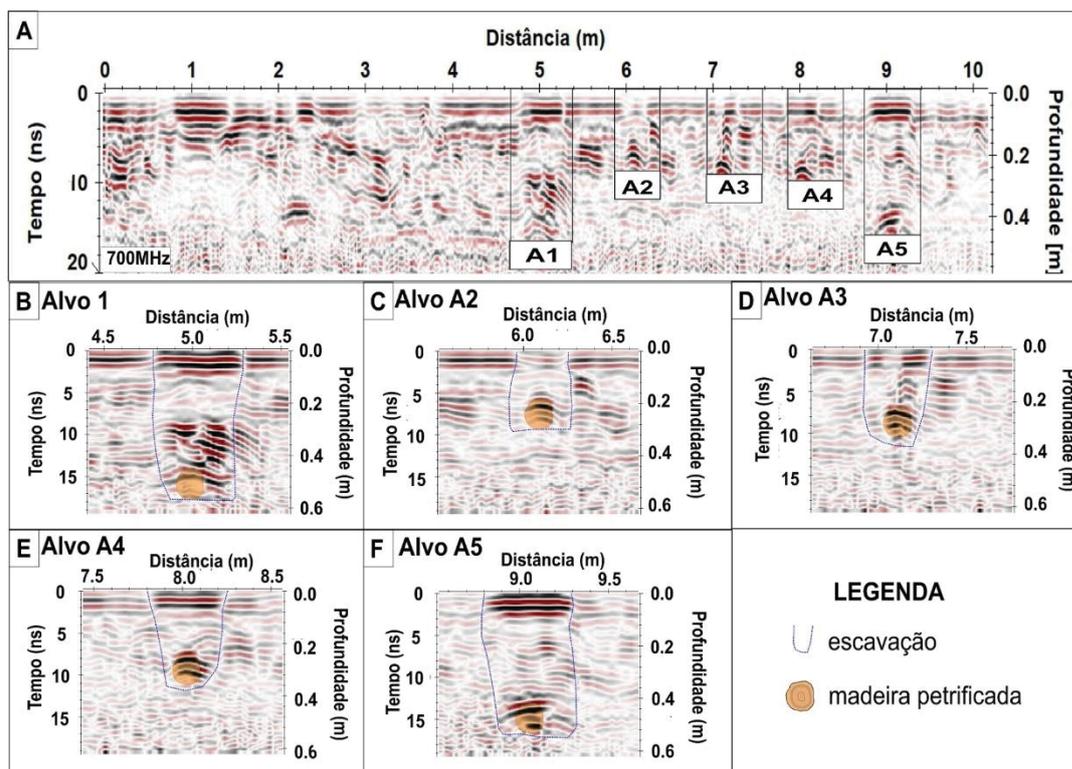
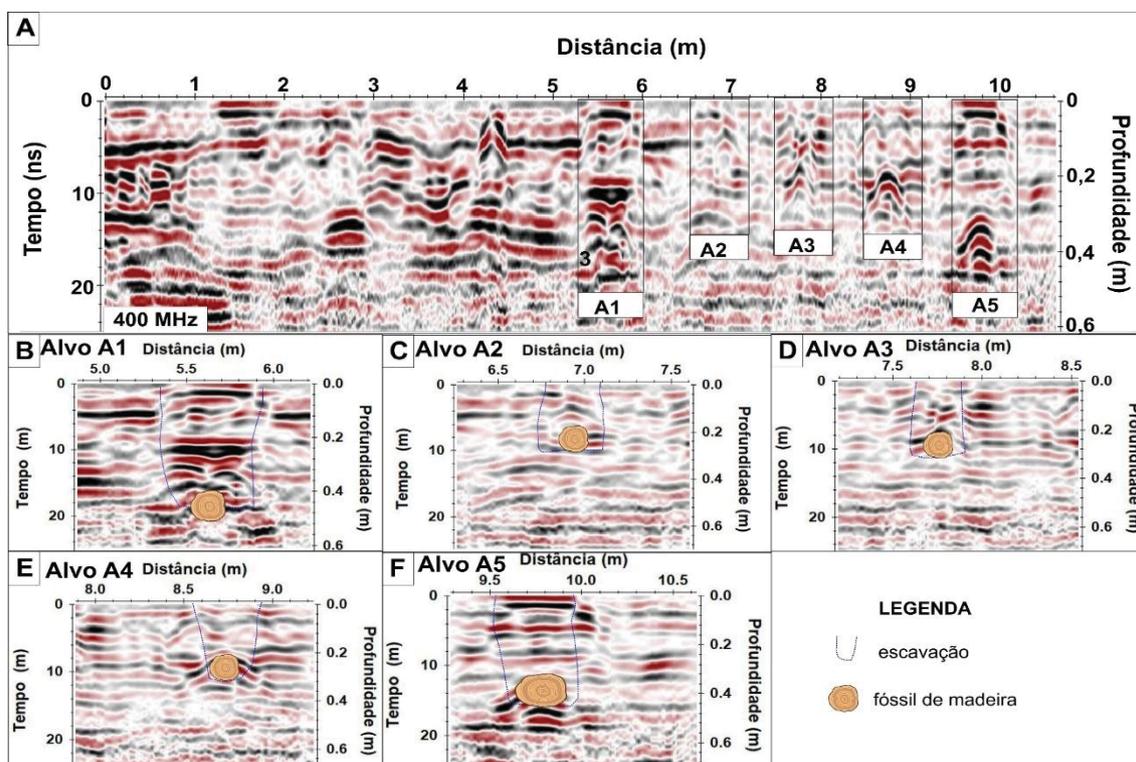


FIGURA 26: (A) Seção de GPR sobre a L1 com a identificação dos alvos relacionados à fosseis de madeiras petrificadas. Detalhe da seção L1 sobre os alvos A1 (B), A2 (C), A3 (D), A4 (E) e A5 (F).



Na seção L2 as madeiras petrificadas foram recobertas com areia fina (A7-A10) com exceção do alvo A6 (recoberto com areia/solo argiloso/areia) (FIGURA 27 e 28). Conforme mencionado anteriormente as anomalias hiperbólicas de alta amplitude assinalam os fósseis. Nota-se que nas cavas estão associadas a alta reflectância decorrência da presença de areia que intensifica a reflexão do sinal eletromagnético e ocorre uma melhor visualização das hipérboles. Quando se compara os resultados das duas primeiras seções observa-se que as anomalias da linha 2 tornam-se mais evidentes e maiores devido ao contraste dielétrico do meio da cava.

FIGURA 27: (A) Seção de GPR sobre a L2 com a identificação dos alvos relacionados à fosséis de madeiras petrificadas. Detalhe da seção L2 sobre os alvos A6 (B), A7 (C), A8 (D), A9 (E) e A10 (F).

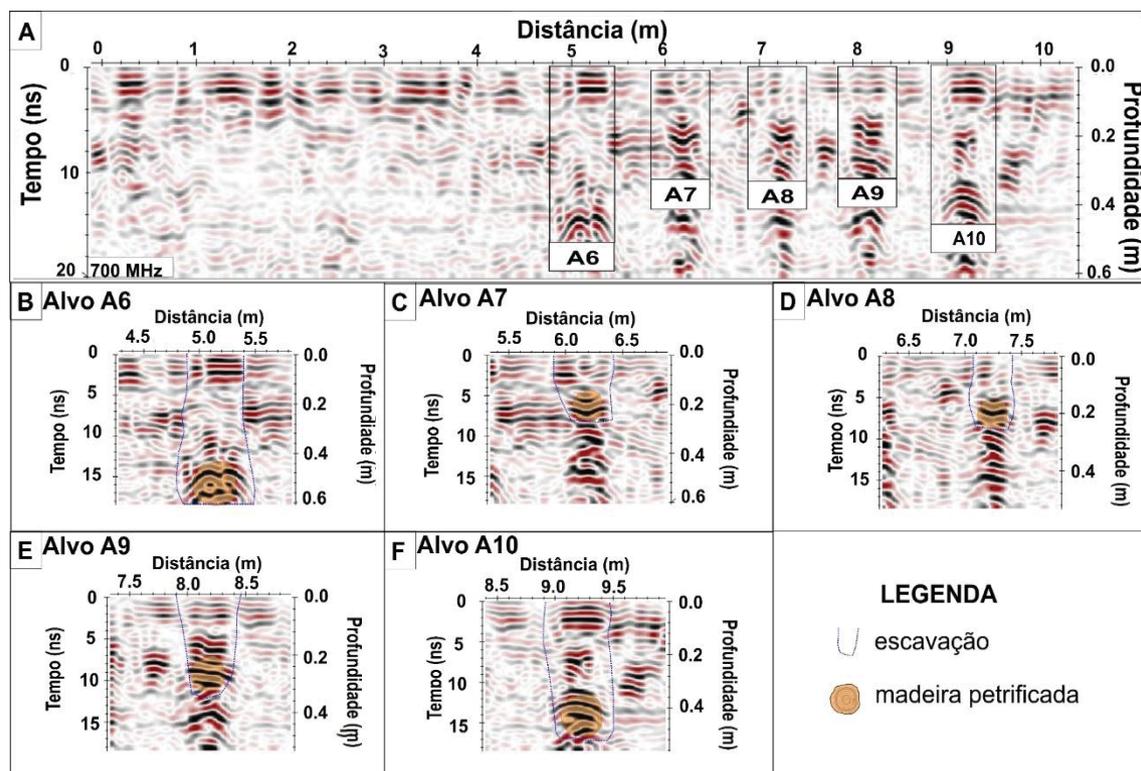
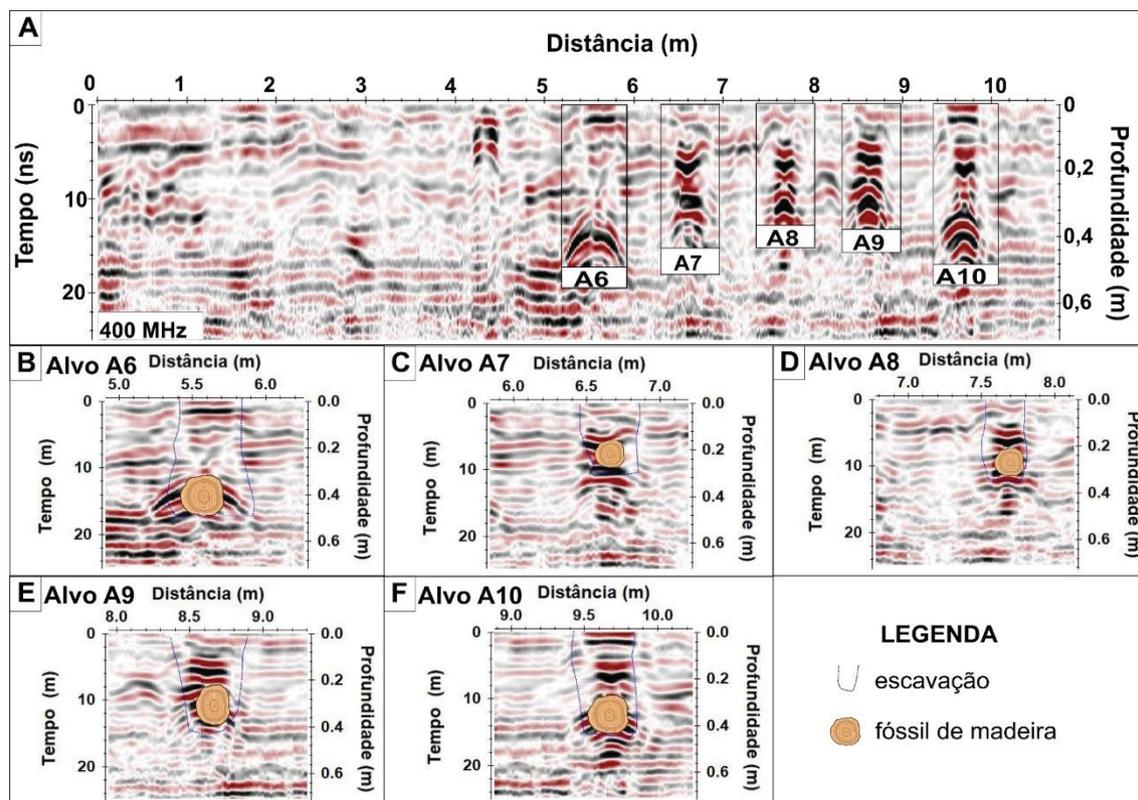


FIGURA 28: (A) Seção de GPR sobre a L2 com a identificação dos alvos relacionados à fosséis de madeiras petrificadas. Detalhe da seção L2 sobre os alvos A6 (B), A7 (C), A8 (D), A9 (E) e A10 (F).



A seção L3 que passa através do vaso de cerâmica recoberto com solo argiloso, evidenciou-se uma pequena hipérbole de difração no tempo de 8 ns (topo) a 13 ns (base). Devido ao contraste dielétrico do solo e do artefato dificultou e muito a sua visualização, outro fator que pode ser levado em conta foi a maneira em que foi alocado o objeto no solo, FIGURA 29 e 30.

FIGURA 29: (A) Seção de GPR sobre a L3 com a identificação do vaso de cerâmica. Detalhe da seção L3 sobre o alvo A11 (B).

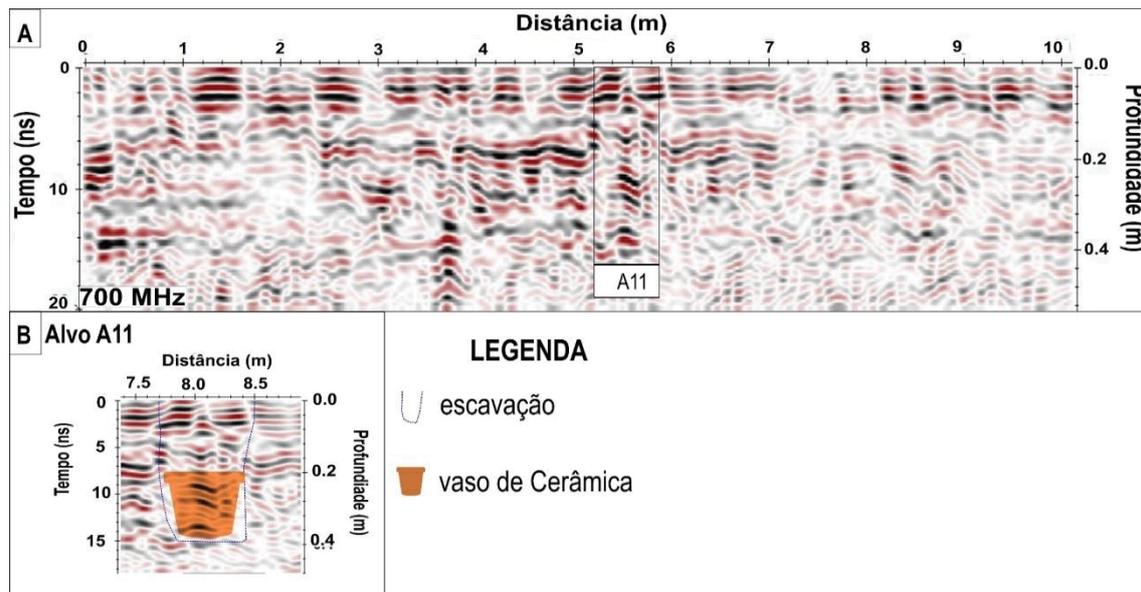
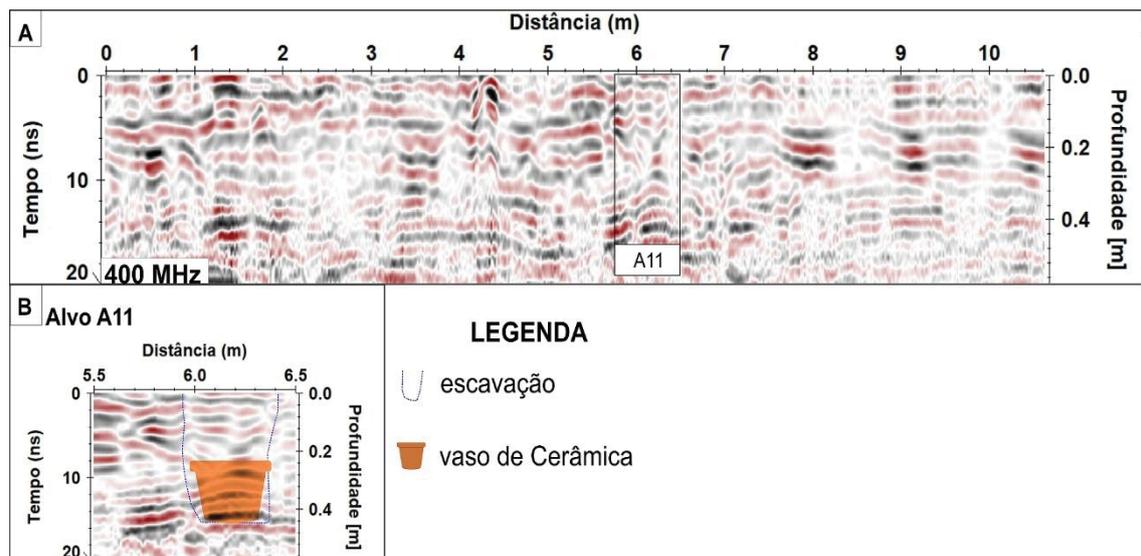


FIGURA 30: (A) Seção de GPR sobre a L3 com a identificação do vaso de cerâmica. Detalhe da seção L3 sobre o alvo A11 (B).



As FIGURA 31 e 32 ilustram a aquisição na seção L4 que transpassa os alvos seixos e um pequeno fósil (todos recobertos com solo argiloso). O topo dos seixos foi caracterizado por refletor hiperbólicos que se intersectam no tempo de 8ns, a origem deste efeito está relacionada pelas hipérbolas terem sua origem nas extremidades dos seixos (pontos de difração). A resposta do fósil corresponde a uma reflexão hiperbólica de dimensões pequenas devido à sua geometria.

FIGURA 31: (A) Seção de GPR sobre a L4 com a identificação do seixos. Detalhe da seção L4 sobre os alvos A12 (B) e A13 (C).

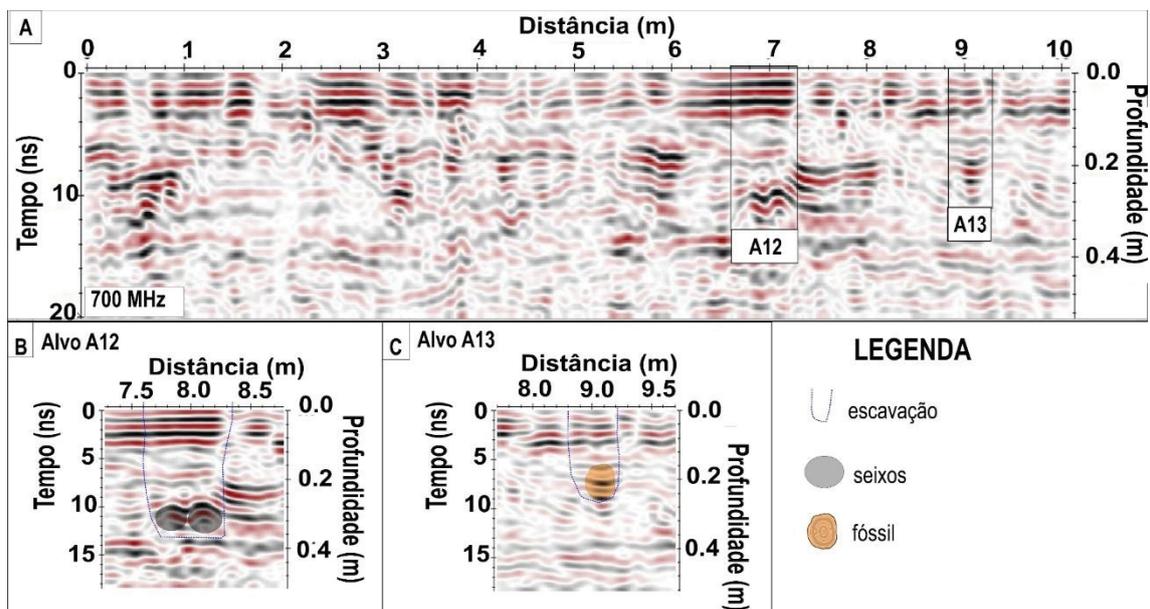
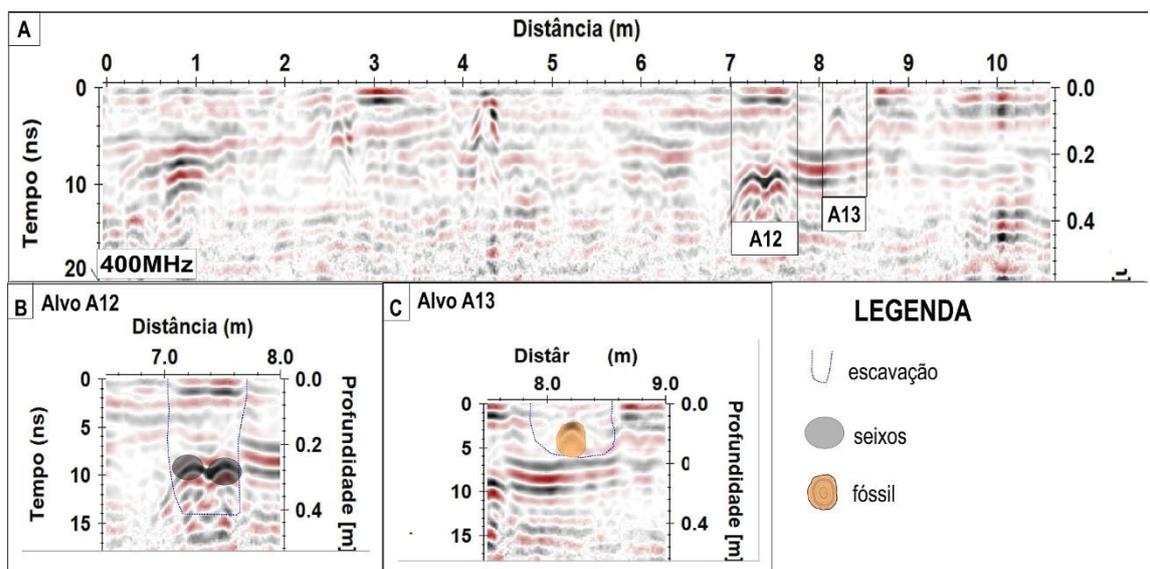


FIGURA 32: (A) Seção de GPR sobre a L4 com a identificação do seixos. Detalhe da seção L4 sobre os alvos A12 (B) e A13 (C).



A seção L5 que secciona os alvos vaso de cerâmica (recoberto com areia fina), solo revirado e osso bovino fêmur (solo argiloso), FIGURA 33 e 34. Apenas o alvo A14 pode ser detectado e com forte reflexão de sinal, tanto o topo quanto a base (10 ns e 15 ns), e o tamanho da hipérbole torna-se maior em decorrência do meio mais resistivo, quando comparado ao alvo A11 (L3). Os outros dois artefatos não foram detectados provavelmente em função do solo apresentar uma homogeneidade (material orgânico/argiloso), e com relação ao osso bovino a

sua não detecção está relacionada ao contraste muito próximo entre o objeto e o meio investigado, além da condutividade do meio.

FIGURA 33: (A) Seção de GPR sobre a L5 com a identificação do alvo vaso de cerâmica. Detalhe da seção L5 sobre os alvos A14 (B), A15 (C) e A16 (D).

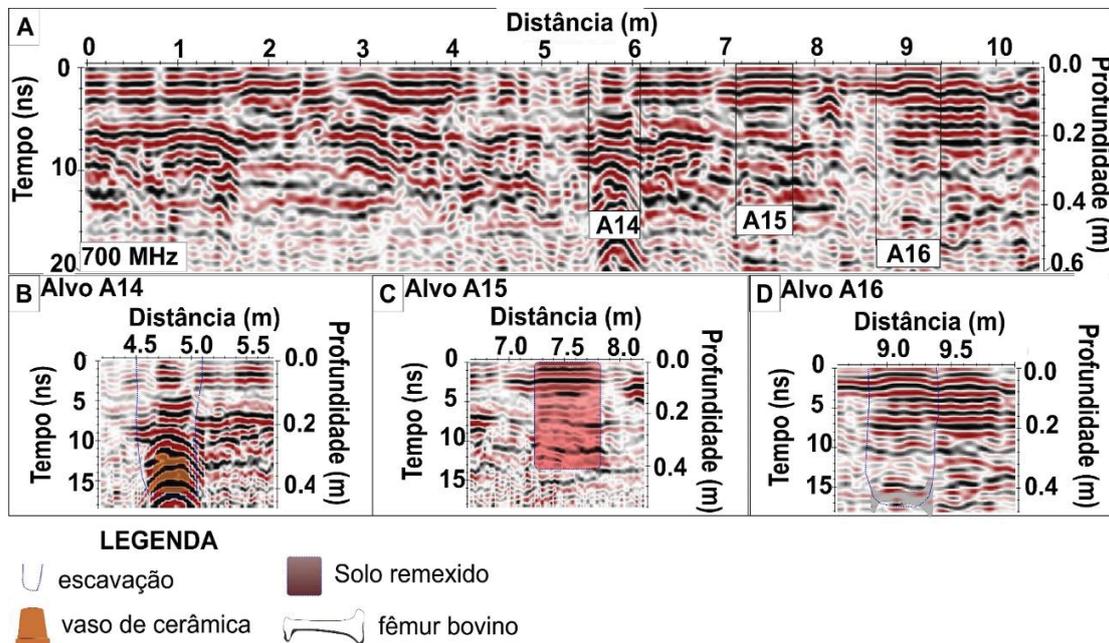
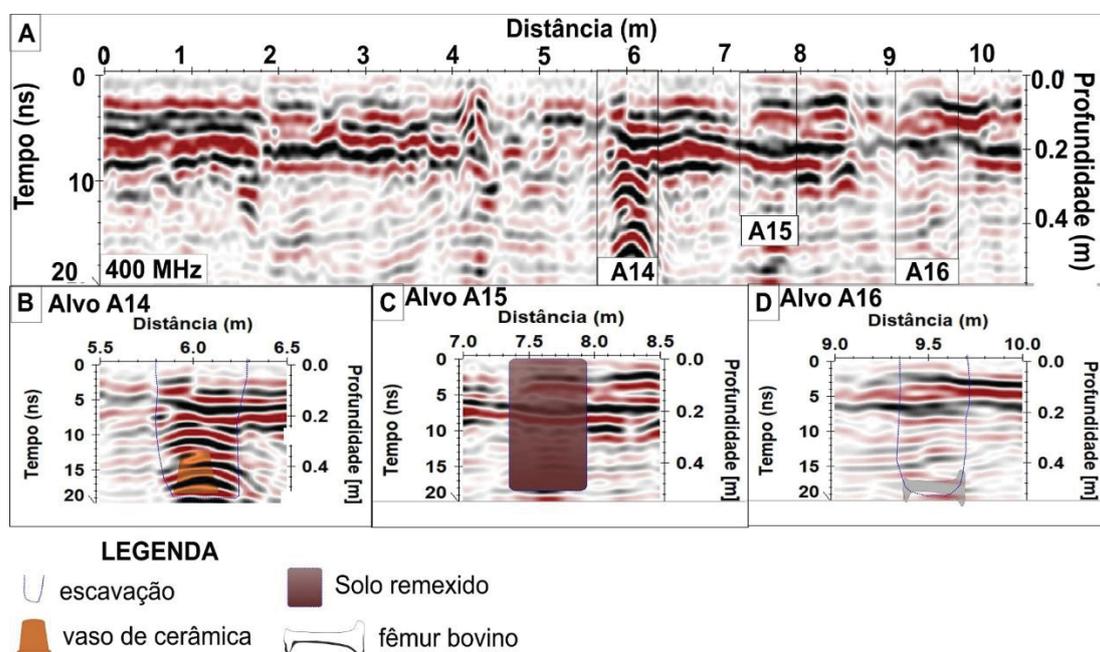


FIGURA 34: (A) Seção de GPR sobre a L5 com a identificação do alvo vaso de cerâmica. Detalhe da seção L6 sobre os alvos A14 (B), A15 (C) e A16 (D).



As FIGURA 35 e 36 ilustram os resultados sobre a seção L6 que secciona os alvos correspondentes aos tijolos maciços, ao tênis e a camiseta que foram recobertos com o solo argiloso. As hipérbolas de detecção com amplitude de

sinhal alta referem-se aos alvos de tijolos maciços e tênis que são observadas no tempo de 12 ns e 14 ns, respectivamente. Nota-se que o material que melhor obteve a resposta foi o tijolo maciço, muito em decorrência da sua composição. As escavações auxiliaram na detecção dos alvos evidenciados com hipérboles de tamanhos reduzidos (tênis e camiseta).

FIGURA 35: (A) Seção de GPR sobre a L6 com a identificação do alvo tijolo maciço e tênis. Detalhe da seção L6 sobre os alvos A17 (B), A18 (C) e A19 (D).

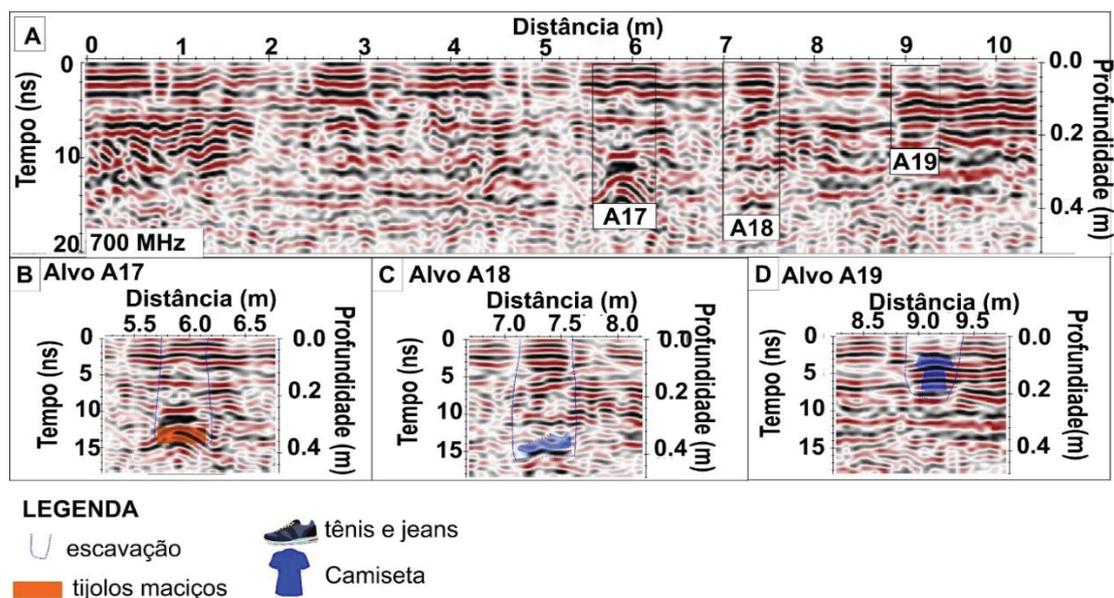
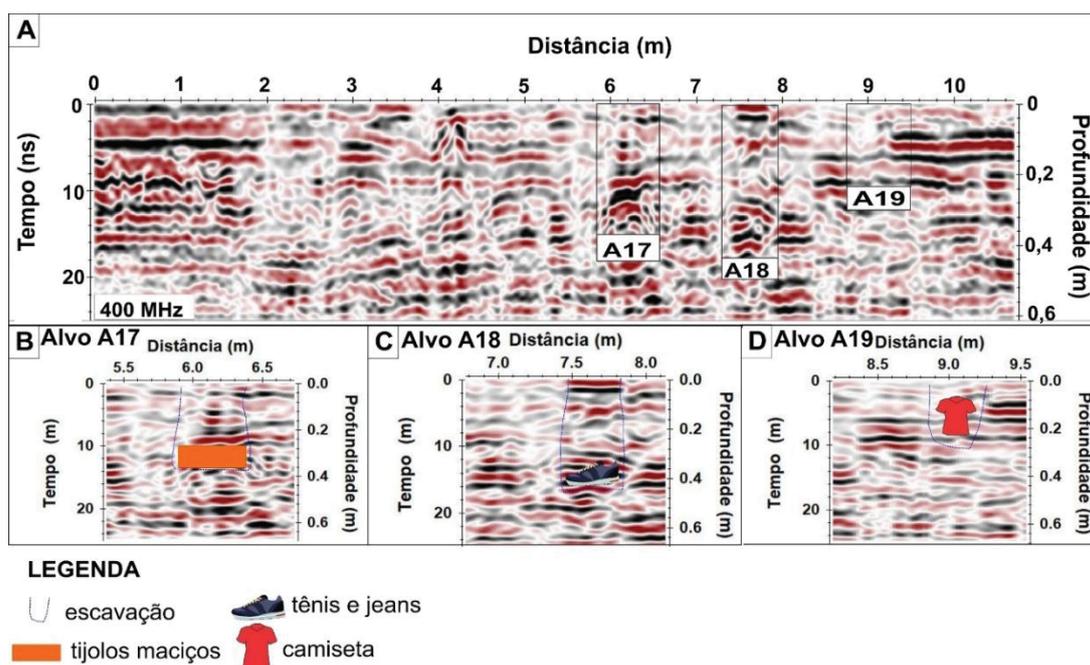


FIGURA 36: (A) Seção de GPR sobre a L6 com a identificação do alvo tijolo maciço e tênis. Detalhe da seção L6 sobre os alvos A17 (B), A18 (C) e A19 (D).



As FIGURA 37 e 38 ilustram os resultados referentes a seção L7 que transecta os alvos vaso de barro (A20), tronco de madeira (A21) e extintor (A22) que foram recobertos com solo argiloso. As detecções dos alvos estão associadas as hipérboles de difração evidenciadas entre os tempos de 8 ns a 15 ns. Nos alvos (A20 e 21) observam-se duas hipérboles em tempos distintos relacionadas ao topo e a base dos artefatos, assim como o topo do Alvo 22. Percebe-se que as hipérboles possuem padrões distintos (tamanho e abertura) que estão associados ao formato dos objetos.

FIGURA 37: (A) Seção de GPR sobre a L7 com a identificação do alvo vaso de barro, tronco de madeira e extintor. Detalhe da seção L7 sobre os alvos A20 (B), A21 (C) e A22 (D).

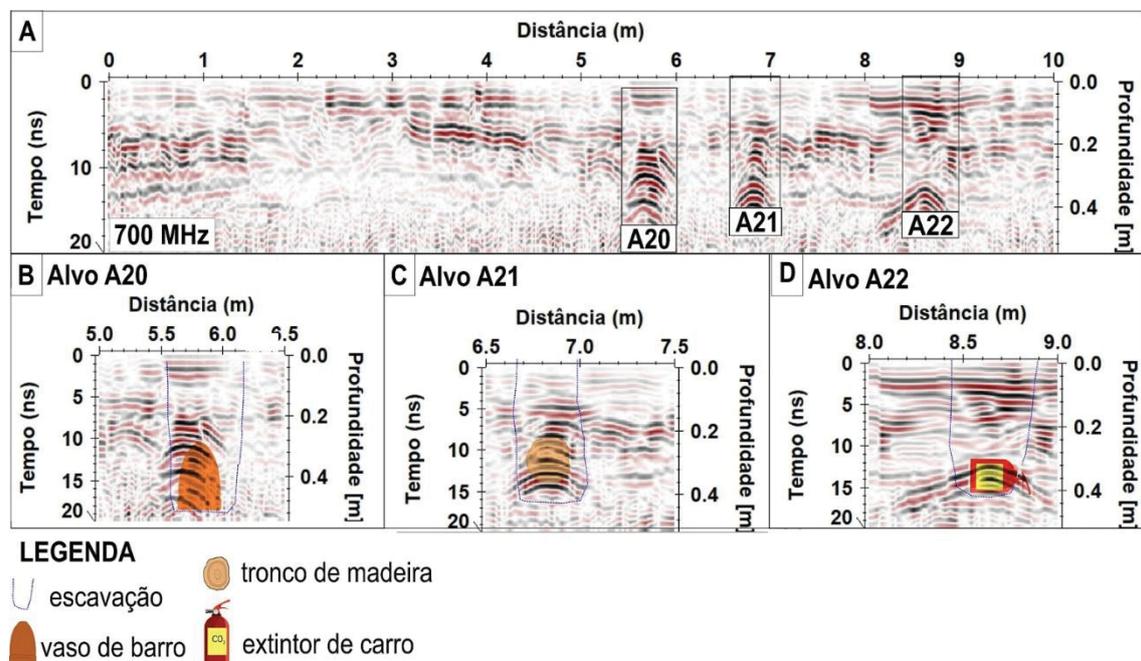
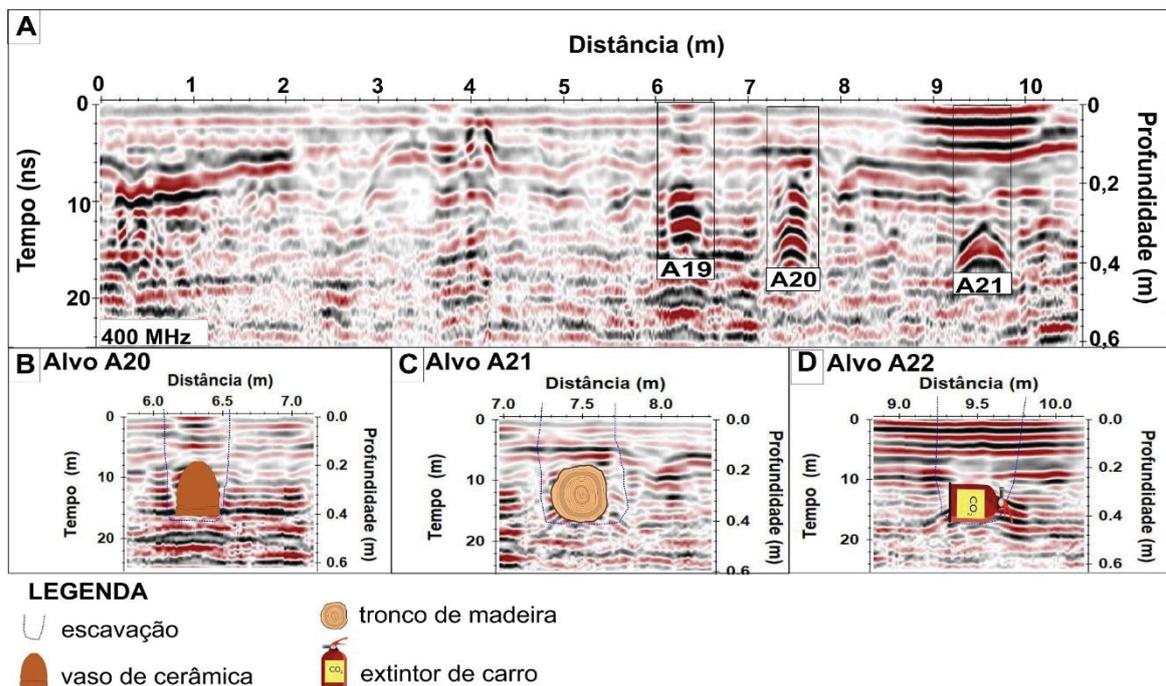


FIGURA 38: (A) Seção de GPR sobre a L7 com a identificação do alvo vaso de barro, tronco de madeira e extintor. Detalhe da seção L7 sobre os alvos A20 (B), A21 (C) e A22 (D).



As FIGURA 39 e 40 correspondem a transecta sobre a seção L8 caracterizada pela presença de presença de tambores de plástico (30L) semipreenchido com armas danificadas (Alvo 23) e vazio (Alvo 24). Através dos resultados pode-se observar a detecção dos dois tambores de plástico associados a anomalias hiperbólicas com fortes reflexões no topo. No A23 observa-se duas reflexões distintas que estão relacionadas ao topo e a base do tambor principalmente no resultado da frequência de 400 MHz, isso se deve a presença de “metais” em seu interior. Em contrapartida, no alvo A24 não pode identificar claramente o topo e a base do objeto devido a mudança brusca de velocidade que ocorre na interface (solo/plástico/ar).

FIGURA 39: (A) Seção de GPR sobre a L8 com a identificação dos alvos relacionados vaso de cerâmica. Detalhe da seção L8 sobre os alvos A23 (B), A24 (C).

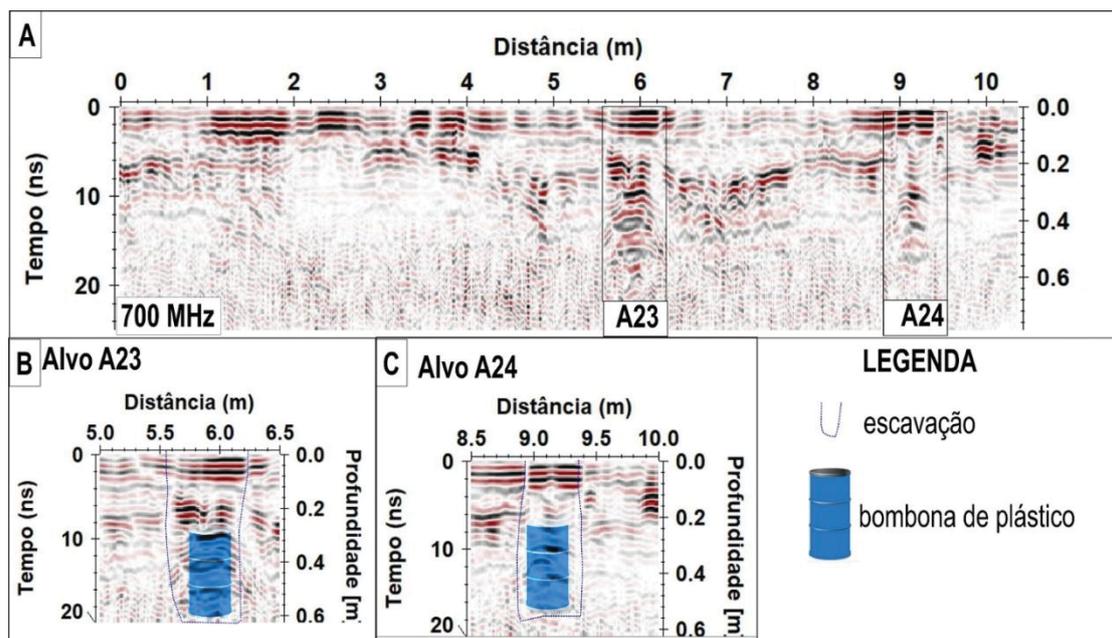
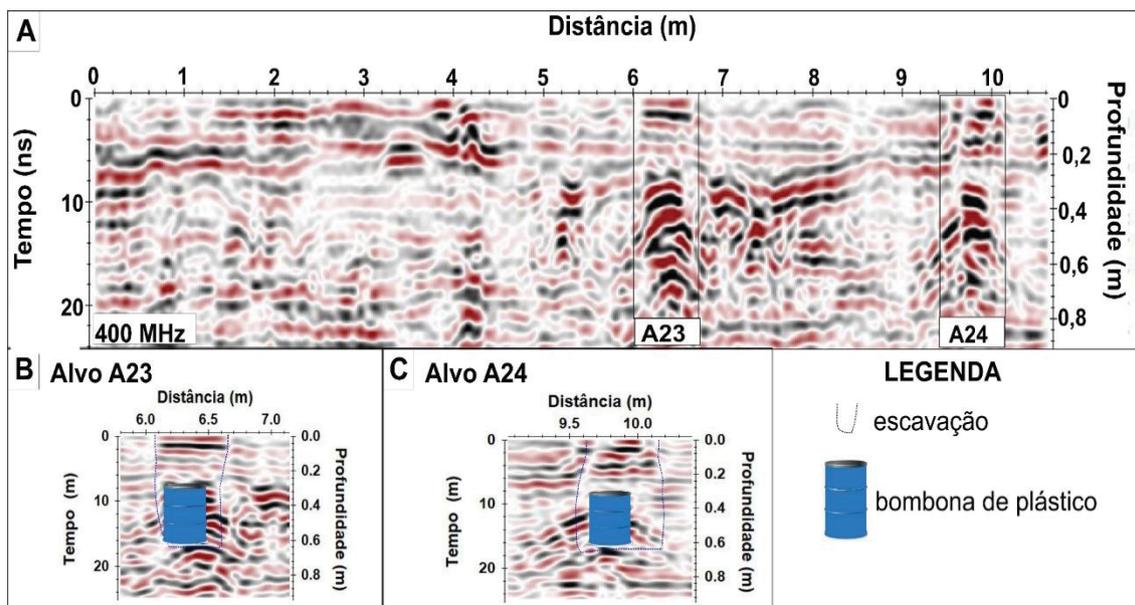


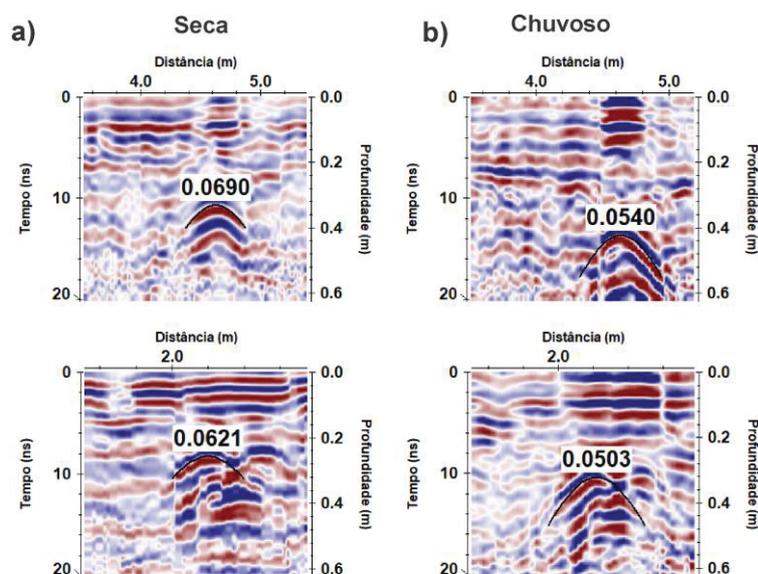
FIGURA 40: (A) Seção de GPR sobre a L8 com a identificação dos alvos relacionados aos tambores de plástico. Detalhe da seção L8 sobre os alvos A23 (B), A24.



5.1.6.3 Comparação das velocidades obtidas na estiagem x chuva

A comparação entre os radargramas adquiridos no período de estiagem com aqueles do período de chuva evidenciou alterações na velocidade da onda eletromagnética. No período da estiagem (fevereiro/2017) os alvos nos radargramas apresentaram valores de velocidade entre 0,051 m/ns a 0,069 m/ns, enquanto que no período chuvoso (agosto/2017) estes valores de velocidade diminuíram para 0,050 m/ns a 0,055 m/ns (FIGURA 41). Essa alteração se deve aos efeitos da umidade do solo sobre a propagação do sinal eletromagnético. As comparações das velocidades das ondas eletromagnéticas foram realizadas a partir das aquisições executadas com a antena de frequência de 700 MHz (IDS).

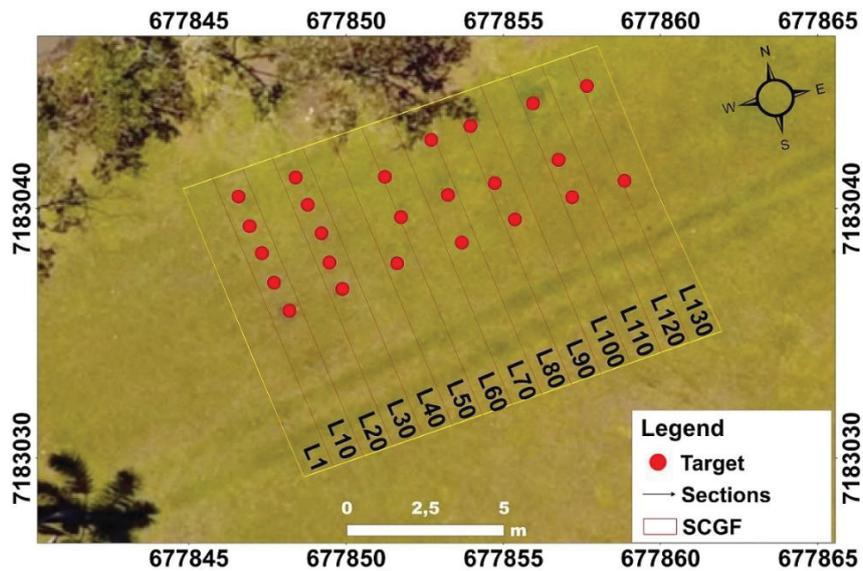
FIGURA 41: Parte de seções de GPR realizadas com a frequência de 700MHz em dois períodos climáticos distintos (seca e chuvoso). O ajuste hiperbólico em alvos com profundidades conhecidas indicam diminuição da velocidade com o aumento do conteúdo de água no solo.



5.1.6.4 Gpr pseudo 3D

A interpolação dos dados de GPR 2D possibilitou a geração de blocos 3D e de cortes em profundidades (*depth slices*) para realizar uma análise quanto a estimativa de profundidade dos alvos investigados, o posicionamento espacial e respectivas geometrias. A aquisição das seções 2D ocorreram paralelas e equiespaçadas em 0,05m e 0,10m com antenas blindadas de frequências de 250MHz, 400MHz, 700MHz (FIGURA 42).

FIGURA 42: Croqui ilustrando os perfis 2D equiespaçados em 0,05m e 0,10m adquiridos com a antena com frequências de 250 MHz e 700 MHz.



Com as velocidades do meio calculadas a partir dos alvos dispostos no sítio (TABELA 5), realizaram-se as migrações do conjunto de dados (migração 3D FK-Stolt).

TABELA 5: Exibe as velocidades aplicadas para migração e construção do *depth slice*.

ARTEFATOS	VELOCIDADE CALCULADA (m/ns)	ANTENA (MHZ)
Fósseis	0,058	400
Seixos	0,062	700/250
Tijolos	0,066	700/250
Extintor	0,066	700/250
Tambores	0,074	400/900

As FIGURA 43a, 43b, 43c e 43d ilustram os cortes em profundidade horizontal (*depth slice*) adquiridos pela antena de 400 MHz sobre os fósseis de madeiras petrificadas, após uma precipitação. Os cortes em profundidades foram realizados nas profundidades de 0,008m, 0,15m, 0,35m, 0,45m ilustrando o cabo de aço (média amplitude) e as madeiras petrificadas associadas a zonas anômalas pontuais com alta amplitude de sinal que foram assinalados por quadradinhos pretos. Nesse caso as madeiras petrificadas com tamanhos maiores e que foram recobertas com areia fina evidenciaram as melhores respostas que foram observadas entre as profundidades de 0,15 m a 0,45 m. Nos tempos de 0,008

ns e 15 ns ocorre uma reflectância linear com média a alta amplitude que está associada ao cabo de aço aplicado para otimizar as imagens pseudo-3D.

O *depth slice* nas profundidades de 0,23 m, 0,32 m, adquiridos com as antenas de 250 MHz e 700 MHz, indicam os artefatos de seixos e extintor evidenciados pelas altas refletâncias pontuais. Os resultados evidenciam que os alvos foram melhor mapeados e delineados pela antena de alta frequência, decorrência de uma melhor resolução vertical, conforme FIGURA 44a, 44b, 44c e 44d.

As distorções verificadas no posicionamento das anomalias no sítio controlado devido ao posicionamento incorreto do início dos perfis de GPR2D, conforme FIGURA 45, propiciaram desenvolver uma metodologia prática para eliminar as distorções otimizando as imagens 3D para área de forense e arqueológica.

FIGURA 43: *Depth slice* adquiridos sob área que contém os fosséis: Profundidade de 0,008m com as anomalias referentes ao cabo de aço e as cavas para instalação dos fosséis (A); Profundidade de 0,15m zona pontual de alta reflectância em areia (B); Profundidade de 0,35m zonas pontuais de alta reflectância associados aos fosséis instalados no meio argiloso (A1) e em areia fina (A5, A10) (C); Profundidade de zona pontual de alta reflectância referente aos fosséis (A1 e A6) 0,45 m (D).

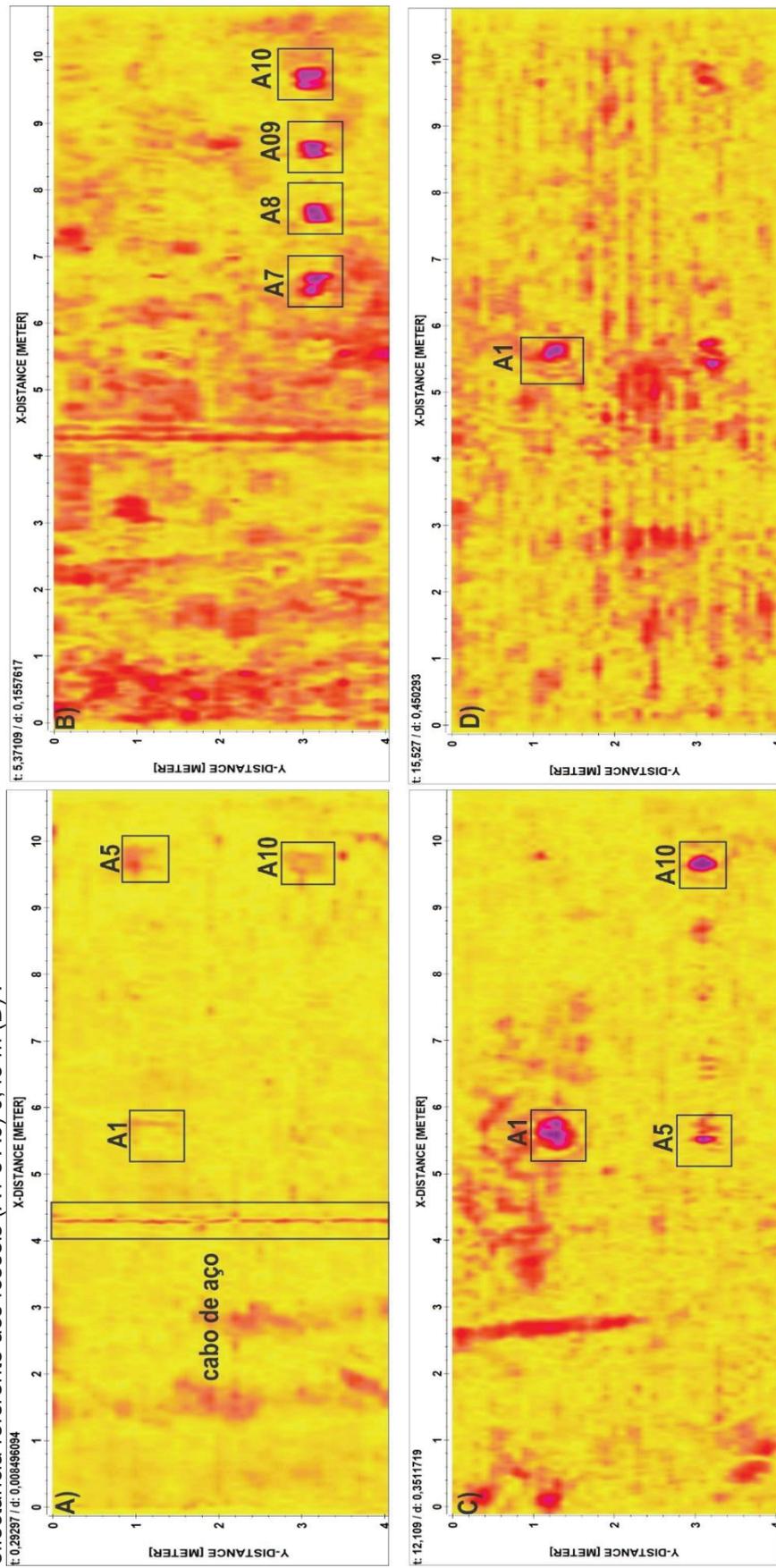


FIGURA 44: Resultados dos *depth slices* (0,22m - 0,32m) adquiridos com a antena de 250 MHz e 700 MHz sobre a porção central do SCGF ilustram geometria dos alvos identificados: antena de 700 MHz (A-B); antena 250 MHz (C-D).

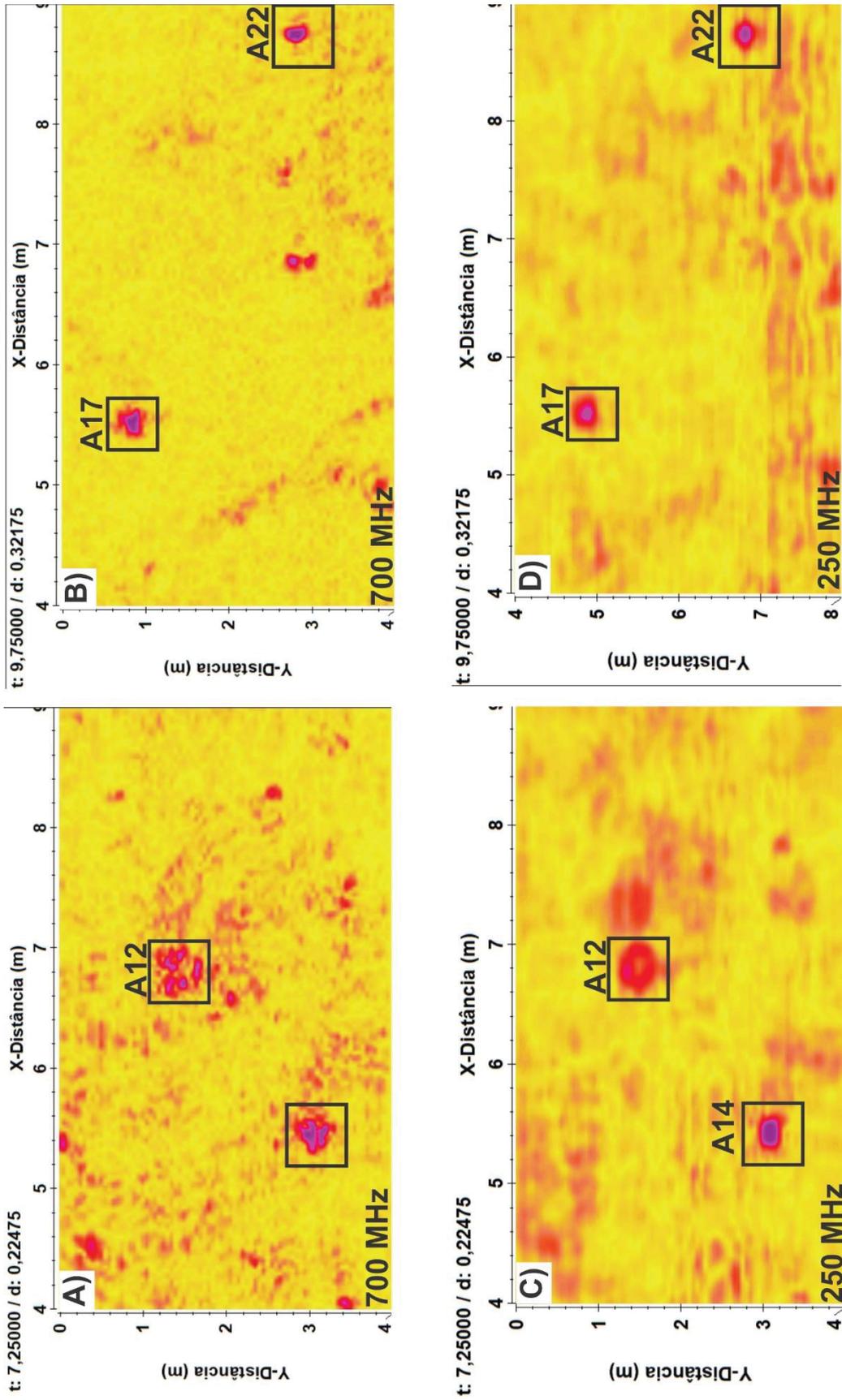
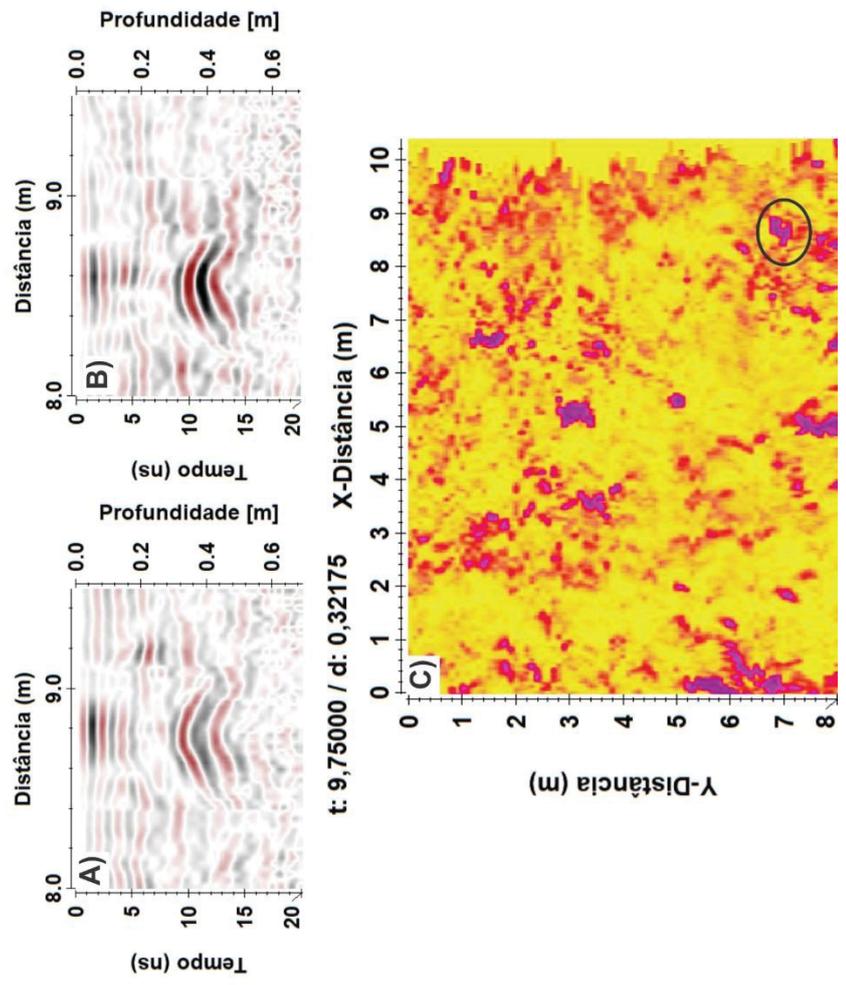


FIGURA 45: Ilustração das distorções visualizadas na aquisição 3D: Radargramas 2D deslocamento de posição dos traços (A,B); Interferência na imagem final pseudo 3D (C).



5.1.7 Conclusão

A implantação do primeiro sítio controlado no Estado do Paraná mostrou-se importante para a divulgação e o aprendizado de geofísica nos cursos de graduação e pós-graduação em geologia da UFPR, bem como para o treinamento em geofísica de futuros profissionais de diversas áreas.

A aplicação de GPR com distintas frequências (250 MHz, 400 MHz e 700 MHz) no SCGF possibilitou calibrar padrões de reflexão de distintos materiais que foram enterrados em um solo siltico argiloso com alta condutividade elétrica, assim como propiciou a caracterização de refletores associados às escavações no terreno.

As aquisições 2D e 3D realizadas em períodos de maior precipitação pluviométrica confirmaram a diminuição da velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio, além de diminuir a impedância entre o solo e os alvos como tênis, calça jeans, camisetas e madeiras petrificadas. Em contrapartida a impedância entre os alvos e a areia fina aumentou, o que refletiu na melhora no imageamento do GPR.

Os modelos pseudo 3D evidenciaram de forma satisfatória as profundidades, as formas geométricas e espaciais dos alvos presentes no SCGFR. Os possíveis erros de posicionamento dos traços que resultam em distorções nas imagens, induziram ao desenvolvimento de uma metodologia prática para otimizar as imagens 3D.

As respostas de GPR obtidas nas seções 2D, em alguns casos, foram mais eficientes que as observadas no bloco 3D. Entretanto, a aquisição e a interpretação conjunta são de fundamental importância para caracterizar e diferenciar os tipos de alvos presentes no subsolo.

5.1.8 Referências

AIVES LK, BORGES WR & BLUM MLB. 2013. Mapeamento de alvos forenses com GPR 3D. In: International congress of the brazilian geophysical society, 13., 2013, Rio de Janeiro. Proceedings...Rio de Janeiro, Brazil: SBGF, 2013. CD-ROM.

- ALVES LK, BORGES WR & BLUM MLB. 2015. Análise forense de dados de gpr 3D usados para identificar ossada de animais e recipientes de vidro. In: International congress of the brazilian geophysical society, 14., 2015, Rio de Janeiro. Proceedings...Rio de Janeiro, Brazil: SBGF, 2013. CD-ROM.
- BEVAN WB. 1990. The search for graves. *Geophysics*, 56(9): 1310-1319.
- BORGES WR. 2007. Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no planejamento urbano e meio ambiente: Estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP. Programa de Pós-graduação em Geofísica, Universidade de São Paulo, Brazil, 2007. 260pp.
- BOWDERS JJJr, KOERNER RM & LORD AEJr. 1982. Buried container detection using ground-probing radar. *Journal of Hazardous Materials*, 7: 1-17.
- BLUM MLB & RUSSO D. 2012. SITICRIM – Brazilian Test Site for Forensic Geophysical Research. In: European academy of forensic science conference, 2012, The Hague: EAFS, pôster.
- BRASIL DL. 2013. Investigação Geofísica forense e antropológica com método GPR no cemitério do Tapanã e no cemitério perdido de Mosqueiro (Belém, Pará). Master Dissertation on Geophysics - Programa de Pós-graduação em Geofísica, Universidade do Pará, Brazil, 2013. 94pp.
- CATETE CP. 2010. Investigações ambiental e forense com os métodos geofísicos radar de penetração do solo, polarização induzida e eletrorresistividade no cemitério do Tapanã, Belém/Pará. Master Dissertation on Geophysics - Programa de Pós-graduação em Geofísica, Universidade Federal do Pará, 2010. 90pp.
- CAVALCANTI M. 2017. Estudos das respostas geofísicas em diferentes cenários de sepultamentos. PhD Thesis on Geophysics - Programa de Pós-graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, Universidade de Brasília, 2017. 197p.
- DELAZARI LS, ERCOLIN FILHO L. 2018. Projeto UFPR CampusMap. Curitiba: UFPR, CEPAG – Centro de Pesquisas Aplicadas em Geoinformação. Projeto em andamento. Disponível em: www.campusmap.ufpr.br/. Acesso em: 15/08/2019.
- HILDEBRAND JA, WIGGINS SM, HENKART PC & CONYERS LB. 2002. Comparison of seismic reflection and ground-penetrating radar imaging at controlled archaeological test site. *Archaeological Prospection*, 9: 9-21.

- ISAACSON J, Hollinger ER, Grundum D. & Baird JA. 1999. A controlled archaeological test site facility in Olinois: Training and Research in Archaeogeophysics. *Journals of field Archaeological*, 26 (2): 227-236.
- MOLINA CM, PRINGLE JK, SAUMENTT M. & HERNÁNDEZ O. 2015. Preliminary results of sequential monitoring of simulated clandestine graves in Colombia, South America, using ground penetrating radar and botany. *Forensic Science International*, 248: 61-70.
- NASCIMENTO WG. 2009. Investigação geofísica ambiental e forense nos cemitérios do Bengui e do Tapanã (Belém, Pa). Master Dissertation on Geophysics - Programa de Pós-graduação em Geofísica, Universidade Federal do Pará, 2009, 153p.
- PORSANI JL, BORGES WR, ELIS VR; DIOGO LA, HODO FY, MARRANO A & BIRELLI CA. 2004a. Investigações Geofísicas de Superfície e de Poço no Sitio Controlado de Geofísica Rasa do IAG-USP. *Revista Brasileira de Geofísica*, 22(3): 245-258.
- PORSANI JL, BORGES WR, RODRIGUES SI & HODO FY. 2006. O sítio controlado de geofísica rasa do IAG-USP: Instalação e resultados GPR 2D-3D. *Revista Brasileira de Geofísica*, 24 (1): 49-61.
- PRINGLE JK, JERVIS JR, HANSEN JD, JONES GM, CASSIDY NJ & CASSELLA J.P. 2012. Geophysical monitoring of simulated clandestine graves using electrical and ground penetrating radar methods: 0-3 years after burial. *Journal of Forensic Science*, 57: 1467-1486.
- RODRIGUES SI. 2004. Caracterização GPR de tambores metálicos e plásticos: Estudos sobre o sitio controlado do IAG/USP. Master Dissertation on Geophysics - Programa de Pós-graduação em Geofísica, Universidade de São Paulo, 2004, 102p.
- SILVA LMC, NASCIMENTO WG, LUIZ JG, COSTA AAS & CATETE CP. 2008. FORAMB: campo de testes controlados para Geofísica Forense, Ambiental e de Resgate, Belém/PA. In: III SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA, Belém, 2008.
- STRONGMAN KB. 1992. Forensic applications of ground penetrating radar. *Geological Survey of Canada*, 90 (4): 203-211.

5.2 ARTIGO 2

Practical procedure to eliminate GPR positioning errors in 3D data for forensic purposes

5.2.1 Resumo

A aquisição de dados de GPR 2D para compor blocos 3D depende muito das condições físicas do terreno, visto que pequenas irregularidades no solo provocam deslocamentos nas posições dos refletores do GPR. Em periciais criminais, estes deslocamentos podem causar erros nas interpretações e eventualmente induzir a escavações em locais errados, impossibilitando o sucesso na resolução do crime. Este trabalho propõe o uso de um cabo metálico, com diferentes diâmetros de 1.8 mm, 6.55 mm, 10 mm e 20 mm, instalados na superfície para corrigir o georreferenciamento das seções de GPR. Para determinar o diâmetro ideal para cada frequência do GPR, realizaram-se simulações numéricas usando-se a frequências de 400, 700 e 900 MHz. Os resultados indicaram que cabos com pequenos diâmetros mostram baixa resposta em simulações numéricas, assim com o aumento do diâmetro aumenta-se a amplitude até o diâmetro coincidir com o comprimento de onda do pulso eletromagnético. Para verificar a consistência dos resultados aplicou-se a metodologia em uma área controlada com alvos forenses. Nesta área, houve a implantação de espingardas no subsolo na profundidade de 0,35 m. As aquisições de GPR aconteceram com as frequências de 250 e 700 MHz, realizando-se seções a cada 0,05 m. O cabo de aço guia, com diâmetro de 6,55 mm, cruzou a área perpendicular à direção das aquisições de GPR. Após a correção do posicionamento das seções notou-se que a anomalia referente à espingarda coincidiu com a geometria da mesma. Os resultados do uso de cabo de aço no auxílio do georreferenciamento das seções possibilitaram uma melhora representativa nas imagens do subsolo, o que justifica o uso de cabos de aço em futuras aquisições de GPR 3D.

Palavras-chave: GPR 3D, investigação forense, SCGF-UFPR.

5.2.2 Abstract

The acquisition of 2D GPR data to compose 3D blocks depends on the physical conditions of the terrain, since small irregularities in the ground cause displacements in the positions of the GPR reflectors. In criminal experts, these displacements can cause errors in interpretations and eventually lead to excavations in the wrong places, making success in solving the crime impossible. This work proposes the use of a metallic cable with different diameters of 1.8 mm, 6.55 mm, 10 mm and 20 mm installed on the surface to correct the georeferencing of the GPR sections. To determine the ideal diameter for each GPR frequency, numerical simulations were performed using frequencies of 400, 700 and 900 MHz. The results indicated that cables with small diameters show low response in numerical simulations, as well as the increase in diameter the amplitude is increased until the diameter matches the wavelength of the electromagnetic pulse. To verify the consistency of the results, the methodology was applied in a controlled area with forensic targets. In this area, shotguns were implanted underground at a depth of 0.35 m. The GPR acquisitions took place with the frequencies of 250 and 700 MHz, with sections taking place every 0.05 m. The guide wire cable, with a diameter of 6.55 mm, crossed the area perpendicular to the direction of the GPR acquisitions. After correcting the positioning of the sections, it was noted that the anomaly related to the shotgun coincided with its geometry. The results of the use of steel cable in the aid of the georeferencing of the sections enabled a representative improvement in the images of the subsoil, which justifies the use of steel cables in future acquisitions of 3D GPR.

Key-words: GPR 3D, forensic investigation, SCGF-UFPR.

5.2.3 Introdução

Em determinadas cenas de crime, a polícia científica ou pesquisadores forenses, precisam localizar objetos enterrados, como: por exemplo drogas, armas, sepultamento de cadáveres, túneis clandestinos, dentre outros. Como forma de preservar o local de crime e investigar extensas áreas em um curto espaço de tempo nas investigações forenses a utilização de métodos geofísicos são os mais adequados (BORGES et al., 2015). Comumente, o método geofísico mais efetivo nas investigações forenses é o método *ground penetrating radar* (GPR) em razão da possibilidade de visualizar as respostas geofísicas em tempo real que estão relacionadas as variações das propriedades físicas do meio investigado com o alvo ocultado (DANIELS, 1989; ANNAN, 1996; JOL, 2009; EVERETT, 2013).

Diversas são as pesquisas que utilizam o GPR com o intuito de localizar cadáveres clandestinamente sepultados, sepulturas em cemitério, mapeamento de sítios arqueológicos, busca por artefatos bélicos, dentre outras (RUFFELL, 2005; RUFFELL & MCKINLEY, 2005; SCHULTZ et al, 2006; FIEDLER et al, 2009; NASCIMENTO, 2009; BORGES et al, 2010; NOVO et al, 2011; PRINGLE et al, 2012; SCHULTZ et al, 2012; SOLLA et al, 2012; SALSAROLA et al, 2015; BARONE et al, 2016; CAVALCANTI et al, 2018; RUFFELL & WACH, 2018).

Constantemente os resultados obtidos a partir de imagens 2D se tornam complexos para identificar o tamanho e geometria dos alvos investigados, por esse motivo na maioria das investigações aplicam-se em conjunto aquisições GPR 3D a fim de visualizar espacialmente a subsuperfície (ANNAN, 2004; HANSEN et al, 2014).

Para que este tipo de aquisição seja satisfatória e possibilite uma visualização espacial adequada, determinados parâmetros devem ser adotados, tais como: o espaçamento entre os traços deve ser o menor possível para amostrar totalmente os pontos de difração evitando o erro de amostragem espacial; posicionamento correto dos pontos dos refletores no espaço e uma migração adequada 3D (SLOB et al, 2003; GRASMUECK et al, 2004; BORGES, 2007; NOVO et al, 2010).

O principal erro que ocorre em aquisições de GPR 3D é o georreferenciamento das seções 2D. Muitos equipamentos dispõem de softwares de aquisição 3D que automaticamente interrompem a coleta de informações e consequentemente criam os dados em 3D, entretanto no processamento usam-se filtros de suavidade que aumentam o volume das anomalias em função de erros de posicionamento.

No campo, o principal erro é colocar a antena na posição correta de início dos perfis. Os erros acontecem principalmente quando as áreas investigadas tem grandes dimensões e para georreferenciar as seções usam-se trenas que consequentemente deformam-se com o tempo. Os posicionamentos corretos dos traços vão refletir em uma melhor ou pior identificação espacial dos refletores.

Em diversas situações, o desenvolvimento e aprimoramento da geofísica forense ocorre através das pesquisas realizadas em áreas controladas, que possuem como propósito testar métodos geofísicos em áreas análogas a locais de crime (MOLINA et al, 2015). No Brasil existem poucas áreas em função dos poucos pesquisadores que trabalham na área forense (NASCIMENTO, 2009; BLUM & RUSSO, 2012; BRASIL, 2013; ALVES et al, 2013; ALMEIDA, 2016; BUSO et al, 2016; CAVALCANTI, 2017).

Assim neste trabalho, apresenta-se uma proposta metodológica para o melhor georreferenciamento de dados de GPR 3D usando-se um cabo de aço guia na superfície do terreno. O trabalho foi desenvolvido no Sítio Controlado de Geofísica Forense da Universidade Federal do Paraná (UFPR), situado em Curitiba-Brasil, onde existem inúmeros alvos que simulam situações forenses, entre eles uma cava onde existe um conjunto de espingardas.

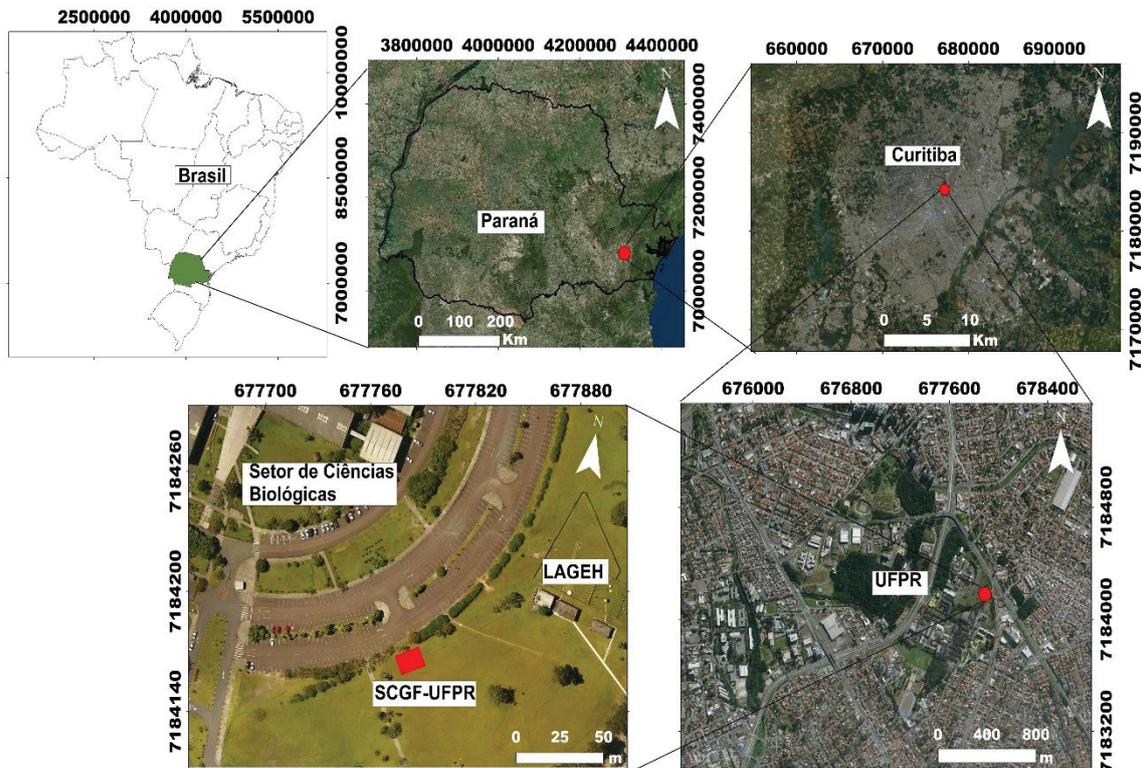
5.2.4 O sítio controlado de geofísica forense da UFPR

O Sítio Controlado de Geofísica Forense da UFPR (SCGF-UFPR) está localizado no Campus Centro Politécnico, Curitiba, Paraná, Brasil (FIGURA 46).

No SCGF encontram-se implantados materiais arqueológicos, paleontológicos e forenses instalados em sedimentos argilosos da Formação Guabirota, originados a partir da decomposição química das rochas pré-cambrianas do entorno da bacia em clima úmido e depositados em condições semi-áridas através

de extensos leques aluviais e fluviais com idade de deposição entre 23 a 1.8 milhões de anos, correspondentes aos períodos Paleógeno a Quaternário (BIGARELLA & SALAMUNI, 1961; FELIPE 2011).

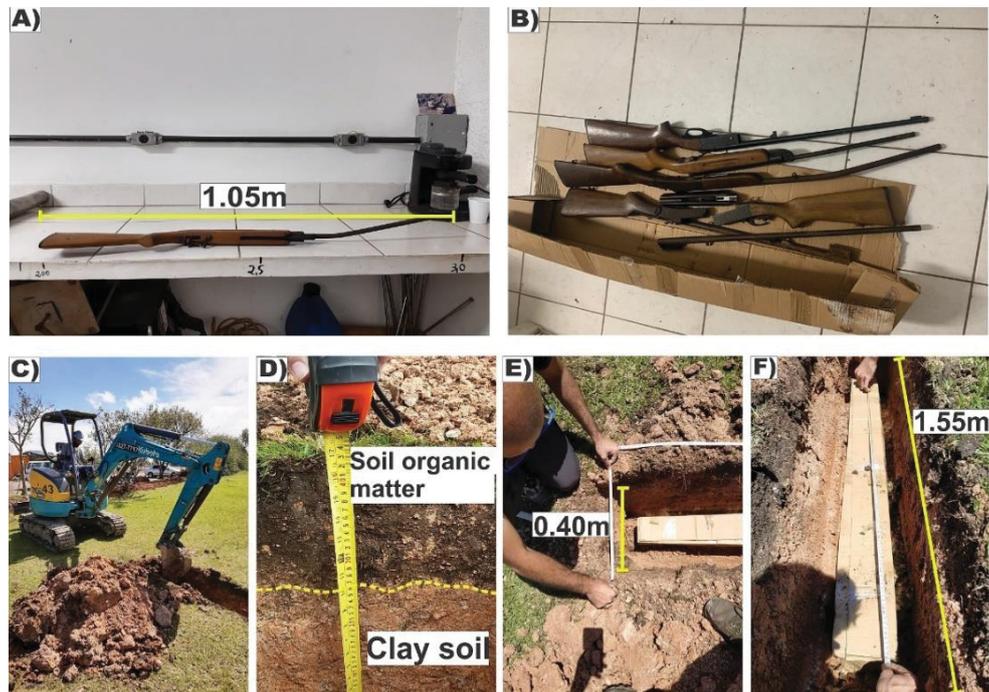
FIGURA 46:Localização do SCGF-UFPR.



Durante a realização da cava (1.55m x 0.55m x 0.40m) para a implantação das espingardas danificadas evidenciou-se um perfil de solo com duas camadas distintas: camada superficial de um solo orgânico com coloração marrom escura, e com espessura de 0.15m; e uma camada subjacente de solo argiloso com coloração castanha avermelhada, por vezes com alternância de tons amarelados e acinzentados.

As espingardas danificadas ($\pm 1.05\text{m} \times 0.0356\text{m} \times 0.18\text{m}$) foram ocultadas dentro de uma caixa de papelão (1.35m x 0.30m x 0.20m) e o topo deste conjunto de armas encontra-se em uma profundidade de 0.42m da superfície (FIGURA 47). As espingardas instaladas no SCGF-UFPR foram cedidas pelo Departamento de Polícia Federal do Paraná.

FIGURA 47: Fotos evidenciam: O comprimento da espingarda (A); Conjunto de espingardas e a caixa de papelão que foram enterradas (B); Retroescavadeira utilizada para escavação do buraco (C); O contato entre os solos (D); Dimensão do buraco escavado (E-F).



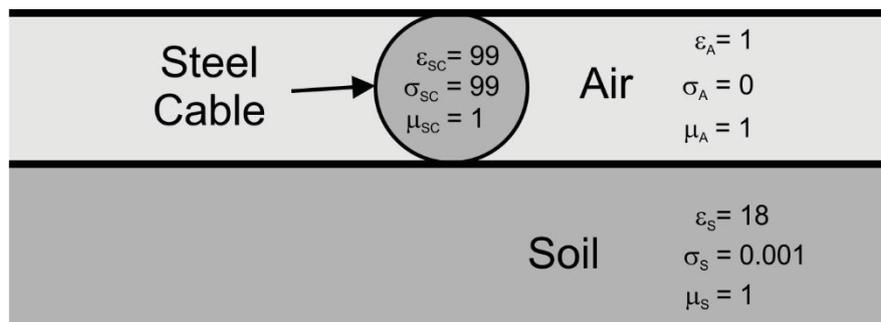
5.2.5 Simulações numéricas

Antes de realizar a aquisição na área do SCGF-UFPR realizaram-se simulações numéricas com cabos de aço de diferentes diâmetros. As simulações aconteceram com as frequências entre 400 a 900 MHz que são as frequências típicas de uso em perícias forenses e investigações arqueológicas.

A modelagem foi realizada no software *ReflexW* (SANDMEIER, 2018) e consistiu na elaboração de um modelo com um cabo de aço na superfície de um solo oxidado típico do Brasil (Latosolo Vermelho). Os parâmetros elétricos de cada meio foram: permissividade dielétrica (ϵ) do ar (ϵ_A) de 1, do solo (ϵ_S) de 18, e do cabo de aço (ϵ_{SC}) de 99; permeabilidade magnética (μ) igual a 1 para todos; e condutividade elétrica (σ) do ar (σ_A) de zero, do solo (σ_S) de 0.001 mS/m, e do cabo de aço (σ_{SC}) de 99 mS/m (FIGURA 48). A escolha desses parâmetros é baseada no intervalo padrão de valores encontrados na literatura, para o metal os valores ultrapassaram os limites do programa, que é 99 para ϵ e também para σ .

Na simulação numérica usou-se o método das diferenças finitas no domínio do tempo (AKINSUNMADE et al, 2019). Os parâmetros usados nas modelagens foram $\Delta x = 0.01$ metro, $\Delta t = 0.01667$ ns, $T_{max} = 10$ ns, boundary contours = exponential absorbing-range, tipo de fonte = onda plana, tipo de sinal = Kuepper, e excitação do campo eletromagnético na direção do campo elétrico perpendicular à simulação (E_y).

FIGURA 48: Modelo usado na simulação numérica dos dados de GPR com os respectivos parâmetros elétricos para cada camada.



Nas modelagens, usaram-se as frequências de 400, 700 e 900 MHz visto que são frequências típicas de equipamentos de GPR usados em perícias forenses. Os modelos foram gerados para cabos com diâmetros de 1.8 mm, 6.55 mm, 10 mm e 20 mm (FIGURA 49). A escolha desses diâmetros aconteceu em função da praticidade em verificar os padrões de anomalias simulados em levantamentos reais. Os radargramas sintéticos evidenciam o registro da difração do cabo de aço em todas as frequências e diâmetros. As difrações mostram muita similaridade nas mesmas frequências, independente do diâmetro do cabo, ou seja, as difrações tem a mesma geometria até o diâmetro de 20 mm, onde a partir deste ponto, há reflexão no topo do cabo de aço.

Como a simulação foi desenvolvida com a onda plana, e existe uma camada de ar acima do solo, optou-se pela aplicação de um filtro 2D na frequência de 700 MHz, para a remoção da reflexão horizontal relacionada à primeira chegada da onda (FIGURA 50). Analisando-se apenas o traço central das hipérboles provenientes dos modelos sintéticos de 700 MHz (FIGURA 51), nota-se que a amplitude da hipérbole de reflexão aumenta com acréscimo do diâmetro do cabo de aço.

FIGURA 49: Radargramas sintéticos gerados a partir de modelos onde há variação do diâmetro do cabo de aço. Frequências simuladas de 400, 700 e 900 MHz.

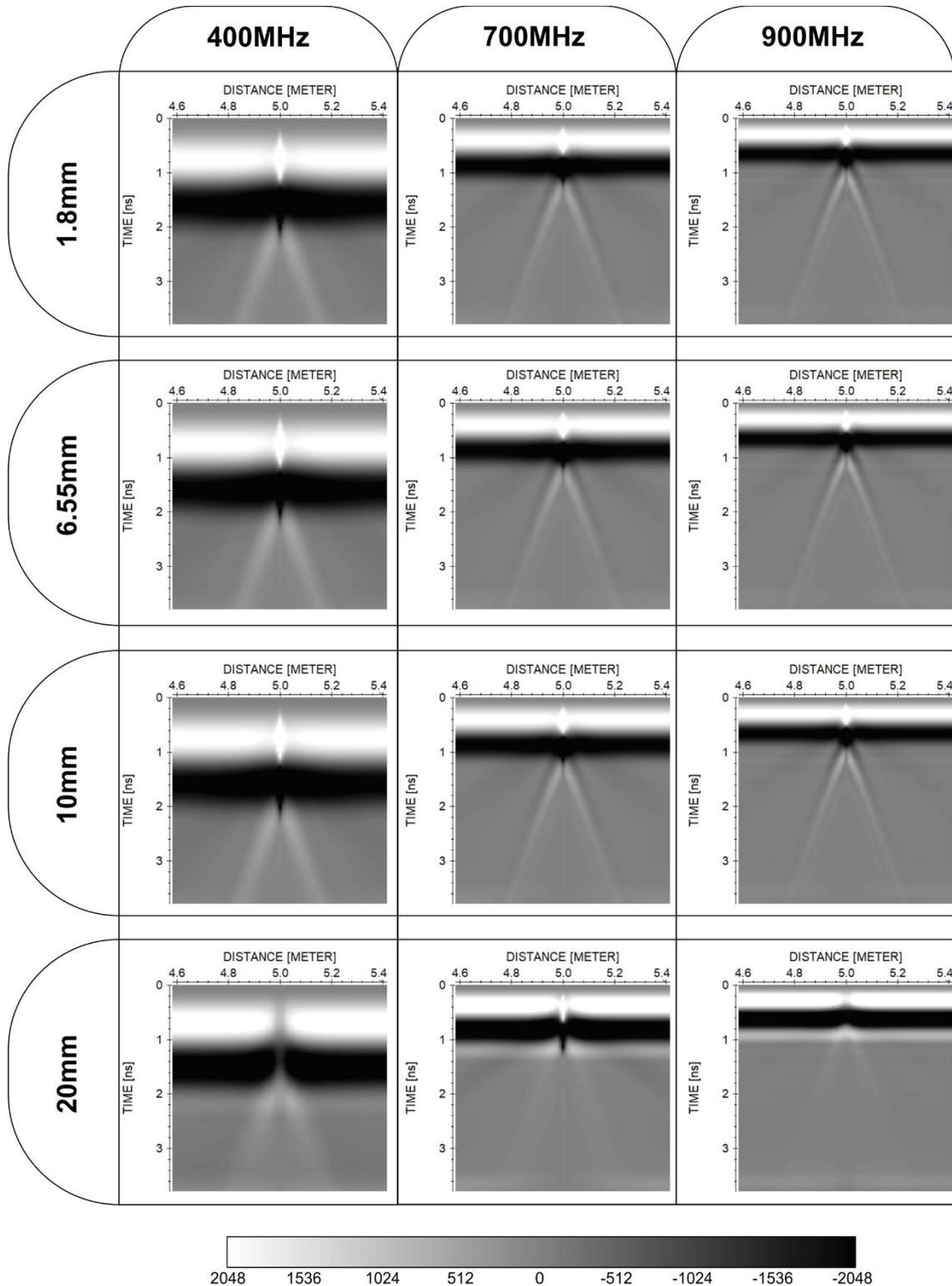


FIGURA 50: Radargramas sintéticos gerados com a frequência de 700MHz para modelos onde há variação do diâmetro do cabo de aço. (A) 1.8mm, (B) 6.55mm, (C) 10mm, e (D) 20mm.

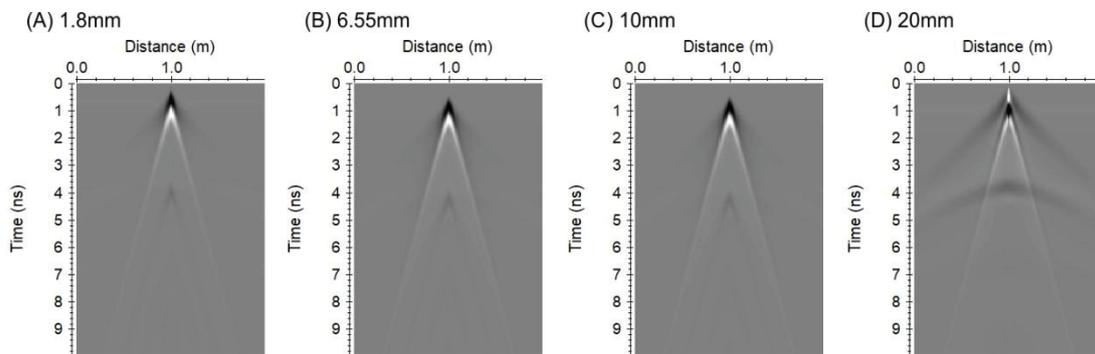
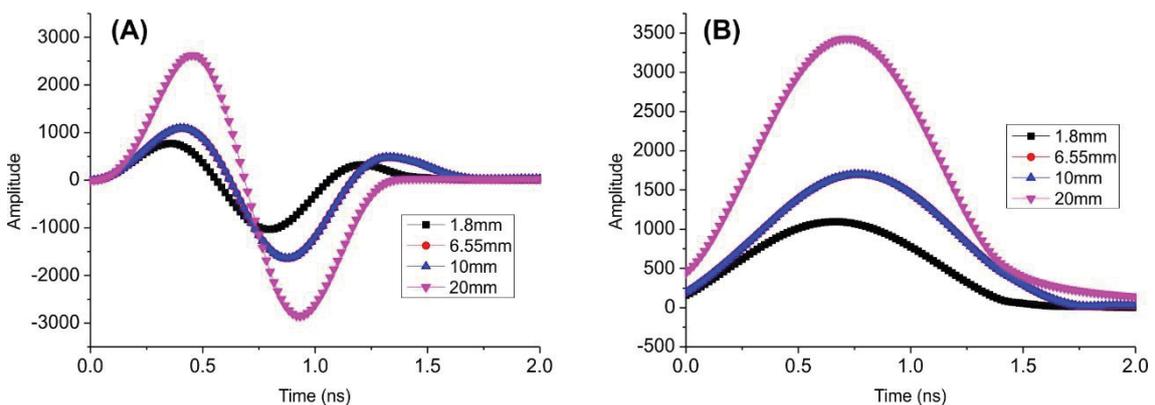


FIGURA 51: (A) Traços do ápice das difrações provenientes dos radargramas sintéticos de 700MHz. (B) Envelope dos traços que indica a variação da amplitude com a mudança do diâmetro do cabo de aço.



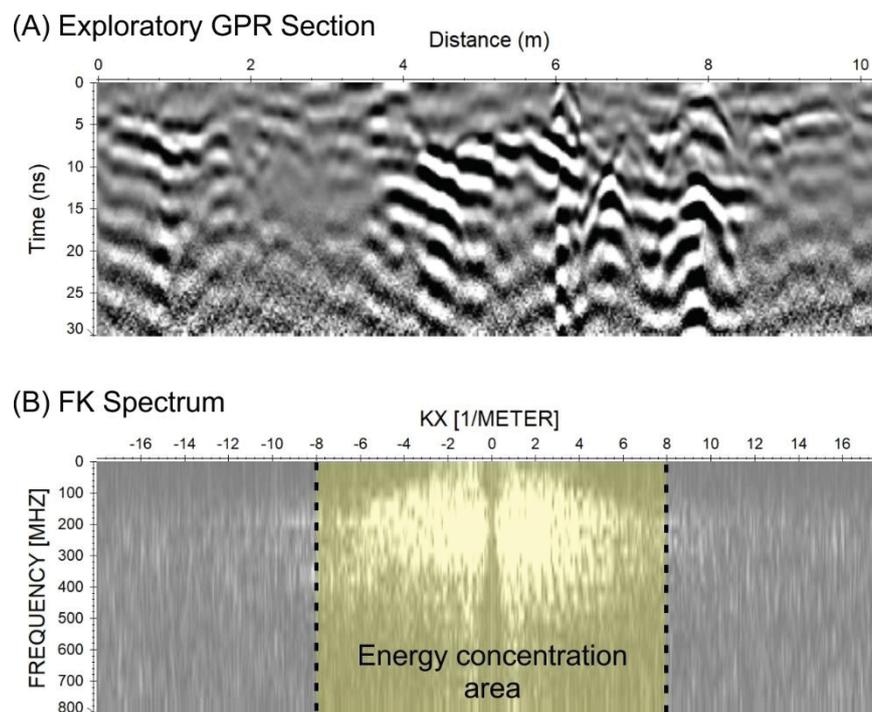
5.2.6 Aplicação da metodologia em área controlada

Para obtenção dos dados de GPR utilizou-se uma aquisição pseudo 3D que significa a junção de diversos radargramas 2D equiespaçados sobre um local de investigação. A definição do espaçamento (Δx) entre os perfis foi obtida através da análise do número de onda no domínio da frequência ($f-k$), resultando na reconstituição total do campo das ondas eletromagnéticas. Esta análise é realizada no domínio $f-k$, deste modo o conteúdo do sinal relacionado a frequência temporal e espacial pode ser associado ao intervalo de amostragem espacial (Δx) considerando o ajuste $f-k$ para os valores do menor comprimento de onda (k_x) no teorema da amostragem de Nyquist (GRASMUECK et al, 2005).

Deste modo, se executou um perfil GPR-2D sobre a área adjacente ao SCGF e ao analisar o espectro f-k (Kx) extraiu-se a maior energia representativa que corresponde a um intervalo de ± 8 Kx (1/m) verificado para todo o campo de onda (Figura 52). Ao inserir o intervalo na equação (25) obtêm-se o espaçamento entre os traços e os perfis para aquisição pseudo 3D, que resultou num intervalo de 0,0625 m.

$$\Delta_{xN} = \frac{1}{2xKx} \quad (25)$$

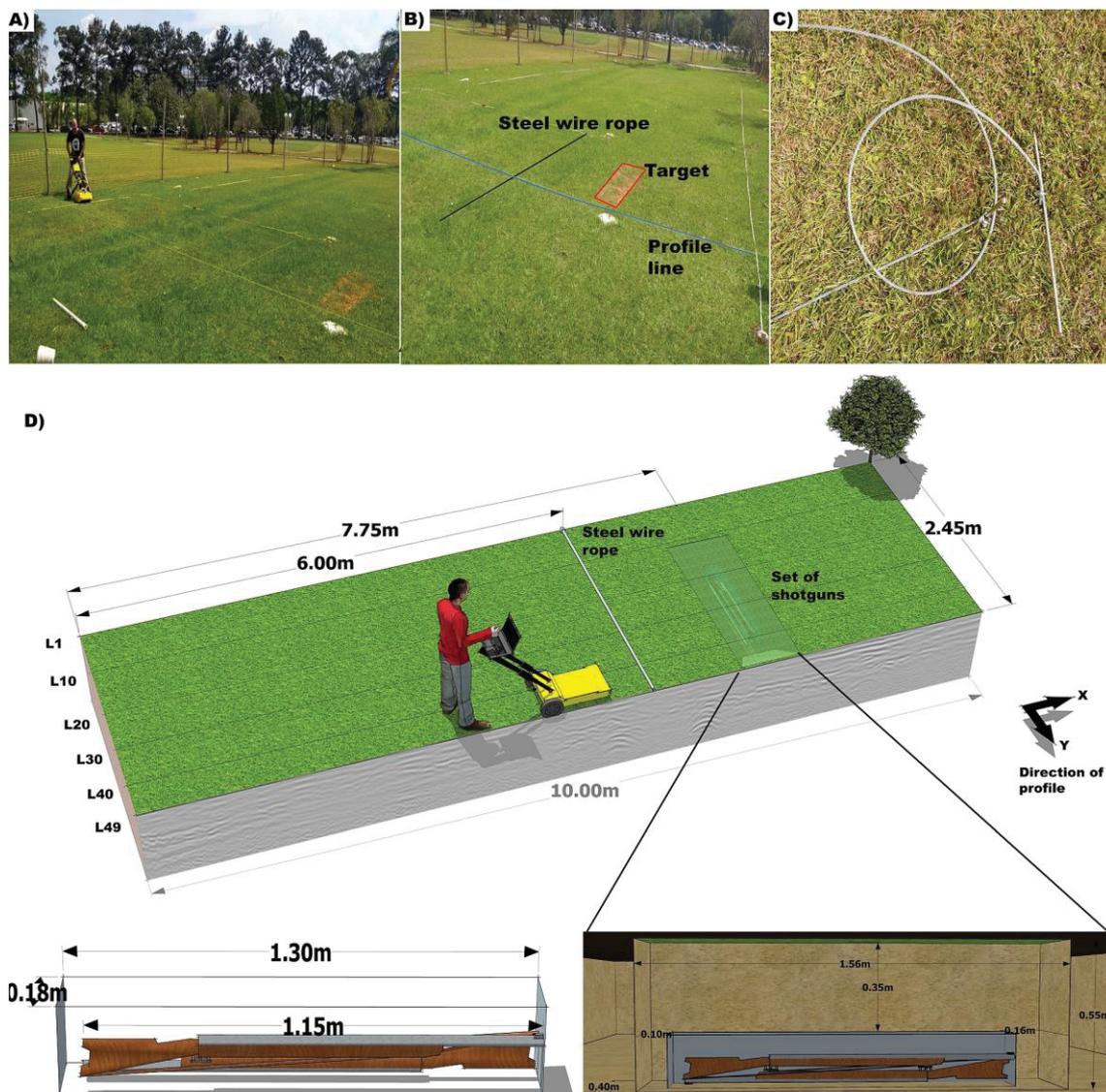
FIGURA 52: Seção de GPR exploratória para definir a resolução espacial na área (A). Espectro F-K do radargrama exploratório com a indicação da área de maior energia (B).



Após a definição do espaçamento iniciou-se a pesquisa de campo em uma poligonal de 2,55m x 10m (FIGURA 53). Os perfis 2D foram adquiridos com o equipamento Detector Duo, com as antenas blindadas de 250 e 700 MHz obtidos no modo afastamento constante (*constant offset*) e os perfis equiespaçados em 0,05 m, totalizando 51 seções. Os parâmetros de aquisição utilizados no campo

foram: número de amostras 512, amostragem temporal 0,25, amostragem espacial 0,027 e janela temporal 120 ns.

FIGURA 53: Ilustração: Foto exibindo a aquisição (A). Ilustração dos componentes presentes na área investigada (B); Cabo de aço utilizado na aquisição (C) e o croqui da aquisição com a cava (D).



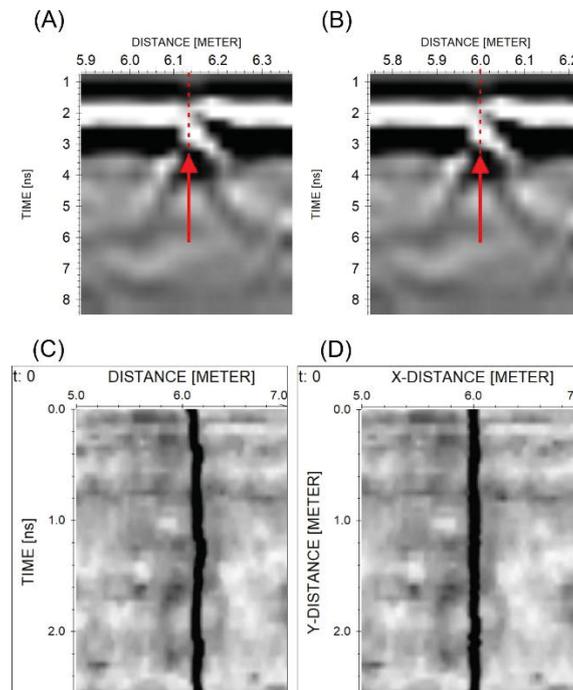
Em uma aquisição no modo pseudo 3D podem ocorrer problemas relacionados a diferentes posicionamentos dos traços, decorrente da posição inicial dos perfis, que propiciam distorções nos resultados das imagens 3D (GROENEBOOM & ZEEMAN, 2001; LUALDI et al, 2003; BORGES, 2007). Normalmente em sítios controlados uma solução adotada para correção deste problema é a instalação de um vergalhão de ferro em subsuperfície como forma de auxiliar as

aquisições. Em perícias forenses a escavação só acontece após a definição de áreas anômalas, assim é inviável a escavação do solo para a instalação de canos/fios guias. Assim, usou-se um cabo de aço na superfície para verificar a sua aplicabilidade em futuras perícias forenses que usem o GPR. O cabo de aço utilizado na pesquisa possui um comprimento de 4m e diâmetro de 6,55mm, o qual foi fixado na posição $X=6m$ na poligonal de estudo.

Para a interpretação dos resultados utilizou-se do software ReflexW, versão 8.2 (SANDMEIER, 2018). A rotina de processamento foi dividida em 3 etapas: (1) georreferenciamento das seções com o auxílio do refletor proveniente do cabo de aço; (2) processamento de um radargrama padrão e criação de um fluxo de processamento que foi aplicado aos demais dados; (3) criação de um volume de dados de GPR 3D e análise dos resultados.

Na etapa de georreferenciamento dos dados, usando-se as informações das aquisições, nota-se uma deformação na anomalia do cabo (FIGURA 54A), assim propôs-se identificar a posição do cabo em todos os radargramas (RC) e comparar com a posição real do cabo em superfície (PR). Se $RC > DC$ então a diferença deve ser subtraída do início do perfil, assim como $RC < DC$ a diferença deve ser acrescida. Deste modo, a posição horizontal dos refletores ao longo de todo o terreno será corrigida (FIGURA 54B). Nos cortes em profundidade dos blocos de GPR 3D essa correção fica mais visível, visto que o refletor do cabo de aço transforma-se em uma reflexão reta (FIGURA 54C e 54D).

FIGURA 54: Parte de seções de GPR que evidenciam a hipérbole de difração relacionada ao cabo de aço, antes da correção de posicionamento (A) e após a correção (B). Cortes em profundidade de blocos de GPR 3D antes da correção (C) e depois da correção (D).



A rotina de processamento para as duas etapas seguintes seguiram as seguintes fases: *dewow* (visa corrigir o efeito de saturação da amplitude originado a partir de componentes difusos de baixa frequência); correção do tempo zero (define o primeiro registro do sinal GPR para tempo zero no solo); corte de tempo 20 ns (limita o registro de tempo GPR, maximizando o tempo de processamento); ganhos de decaimento de energia e de funções linear e exponencial (aumenta a amplitude do sinal perdida em decorrência da atenuação da onda durante sua propagação), filtro 2D – subtração do traço médio (elimina ruídos coerentes como múltiplas provenientes da reverberação do sinal eletromagnético em camadas de alta impedância); filtro passa banda (os filtros de frequências são aplicados com intuito de limpar as frequências espúrias, relacionadas a frequências muito baixas ou altas, permitindo a passagem de sinais entre duas frequências específicas), migração 2D e 3D (fk migração-*stolt*) e conversão de tempo/profundidade (converte os eventos de reflexão em uma posição real em termos de profundidade abaixo do nível do solo).

A velocidade de propagação da onda eletromagnética é necessária para realizar a conversão do tempo em profundidade nos resultados dos radargramas, além de utiliza-la na migração. Neste trabalho optou-se por calcular a velocidade através da equação (26) que resultou em aproximadamente 0,066 m/ns,

esta técnica foi aplicada por se tratar de um ambiente controlado em que se conhece a profundidade real do alvo enterrado. Essa velocidade foi aplicada nas seções de GPR para migração 2D e 3D, além da conversão da seção de tempo em profundidade.

$$v = \frac{2h}{t} = \frac{2 \times 0,4}{12,13} = \frac{0,0659m}{ns} \quad (26)$$

Onde, v é a velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio investigado, h a profundidade do alvo enterrado e t o tempo de trânsito da onda eletromagnética correspondente a reflexão da onda no alvo.

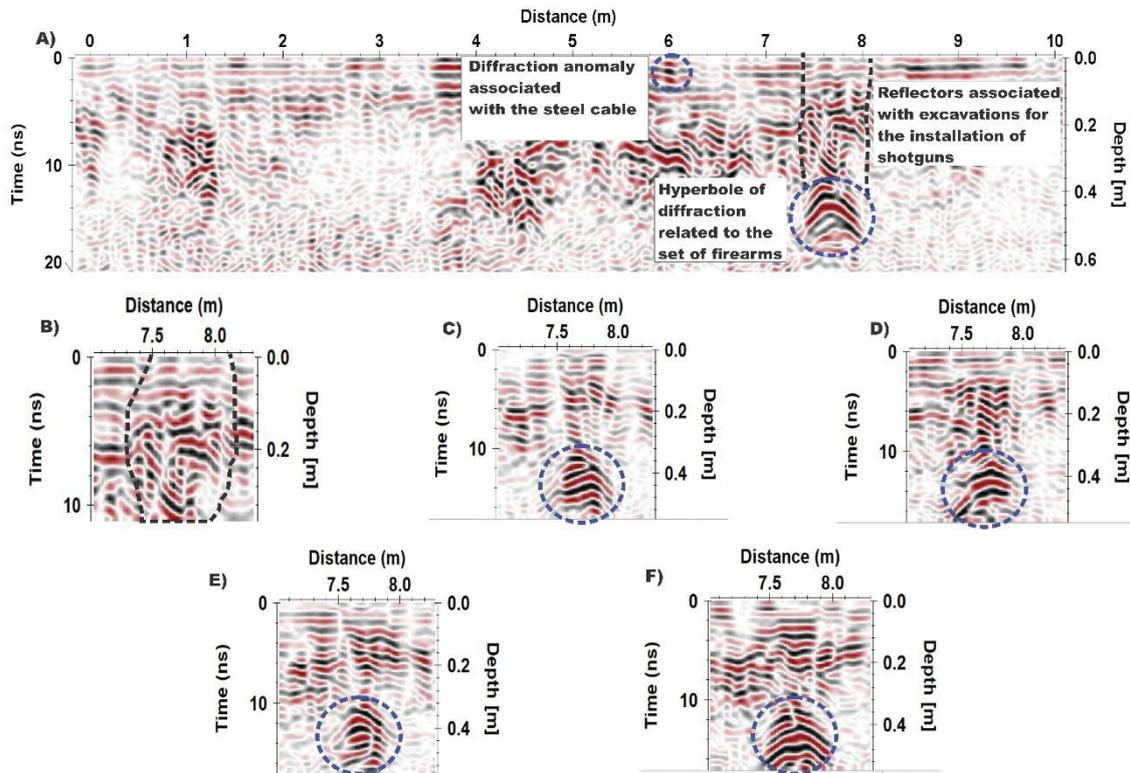
5.2.7 Resultados

As análises dos resultados das seções GPR2D propiciaram caracterizar diferentes padrões de refletores que estão relacionados ao cabo de aço, as perturbações realizadas no solo e os conjuntos de espingardas.

As anomalias relacionadas ao cabo de aço possuem pequenas reflexões na superfície no tempo de 0,8 ns e na distância de 6m, normalmente foram assinaladas com baixa a média amplitude. A assinatura observada nas respostas 2D condizem com os resultados oriundos das modelagens numéricas que assinalaram uma baixa reflexão e amplitude de sinal, FIGURA 55.

As escavações nos solos possuem normalmente como assinaturas interrupções de refletores contínuos e/ou locais que possuam um acumulado de difratores (GTA, 2009), este padrão anômalo foi observado nas seções de GPR 2D no tempo de 0 ns a 13 ns e na distância ente 7,40 m a 7,80m, FIGURA 55a e 55b. Quando se tem objetos ocultados por ação antrópica frequentemente abaixo dos refletores associados a perturbações no solo visualiza-se hipérboles de difração. Este parâmetro relacionado a ocultação pode ser visualizado nas seções de radargramas sendo identificados nas profundidades de 0,35 m e detectados em um tempo de 12 ns. As hipérboles de difrações apresentaram distintas formas, tamanhos e aberturas ao longo da investigação resultantes da estrutura que compõem as armas de fogo, FIGURA 55c, 55d, 55e e 55f.

FIGURA 55: a) Radargrama adquirido sobre o conjunto de espingardas mostrando as anomalias associadas a escavação e ao conjunto de espingardas; b) Ilustração dos refletores interrompidos associados a escavação; c-f) Imagens das distintas anomalias hiperbólicas associadas ao alvo forense.



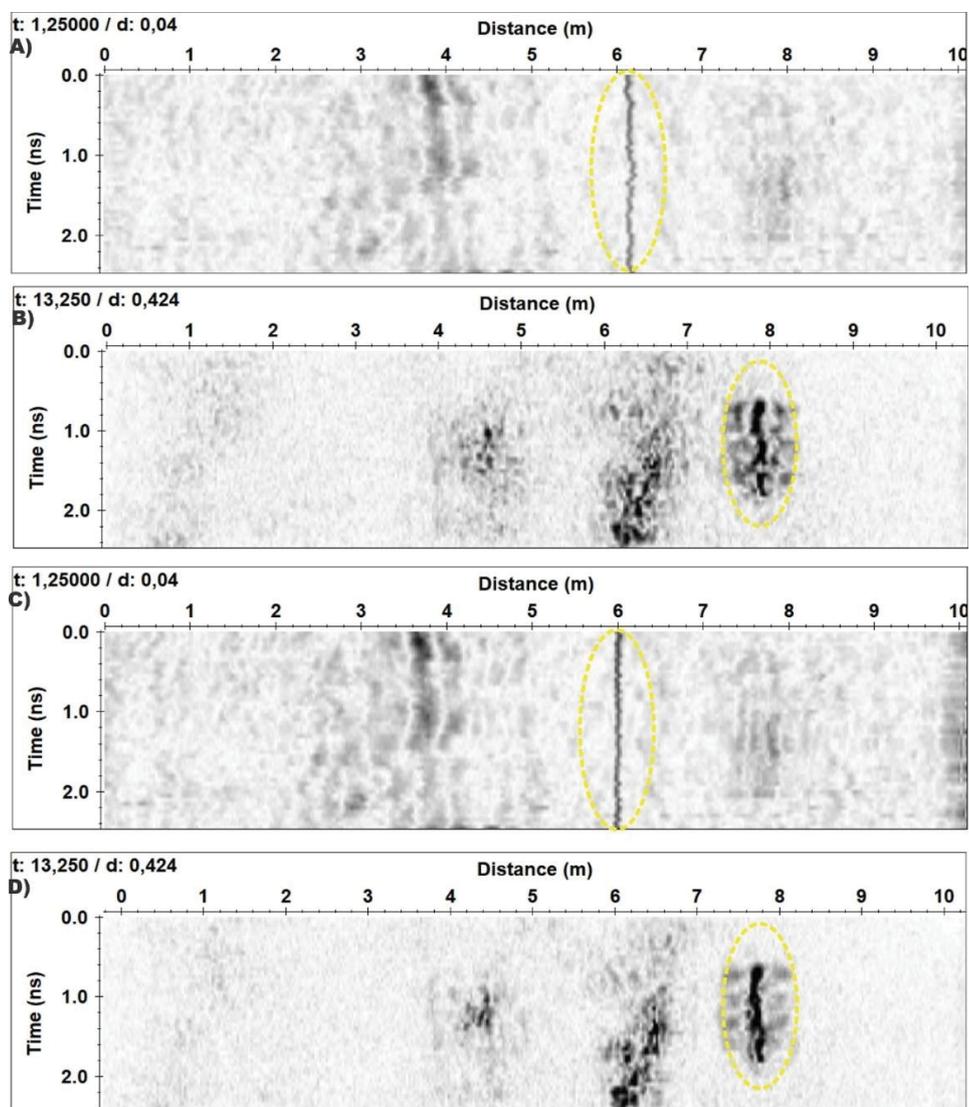
A utilização da visualização em 3D nas investigações forenses é uma ferramenta primordial para a interpretação espacial e geométrica dos artefatos forenses permitindo reconstruir a imagem em subsuperfície. Essas imagens podem ser visualizadas por meio de cortes em profundidades (*depth slice*) e na forma de cubo 3D que identificam ao longo do tempo padrões anômalos de reflexão.

Deste modo, os *depth slice* originados nas profundidades de 0,04 m e 0,42 m, exibem a imagem da aquisição original (FIGURA 56a e 56b) e a imagem corrigida através do cabo de aço (FIGURA 56c e 56d). Na análise ao longo do tempo pode-se observar dois padrões anômalos distintos com diferentes amplitudes de sinais que distingue do meio argiloso investigado de baixa amplitude, as quais estão assinaladas por círculos amarelos. A primeira anomalia possui média amplitude de sinal e com uma forma linear que secciona toda a poligonal investigada que se encontra situada na posição (X-distância: 6 m e/ou 6,10 m) e profundidade de 0,04 m ou 1,25 ns. A segunda anomalia a mais representativa possui

uma alta amplitude de sinal e corresponde ao conjunto de espingardas, esse padrão anômalo encontra-se na posição (X-distância: 7,75 m) e profundidade de 0,42 m ou 13,25 ns.

A ferramenta aplicada para auxiliar a investigação de campo permitiu eliminar distorções que prejudicavam a visualização geométrica da zona anômala pontual, ou seja, os refletores puderam ser aglutinados propiciando uma imagem mais real do conjunto de espingardas, FIGURAS 56b e 56d.

FIGURA 56: Cortes em profundidade, de blocos de GPR 3D, nas profundidades de 0.04m (A-C) e 0.42m (B-D), que evidenciam as anomalias referentes ao cabo de aço e ao conjunto de espingardas.



5.2.8 Conclusões

A metodologia prática desenvolvida na pesquisa mostrou-se uma ferramenta eficaz para o aprimoramento das investigações forenses, arqueológicas e áreas correlatas. A utilização de um cabo de aço para auxiliar as investigações pseudo 3D propiciaram a otimização da zona anômala relacionada as armas de fogos ocultadas em um SCGF.

Os resultados das modelagens numéricas realizadas para verificar as respostas do cabo de aço nas distintas frequências que comumente são aplicadas para a área da geofísica forense, evidenciaram a detecção do objeto em todas as antenas aplicadas. A análise do sinal do refletor propiciou correlacionar a variação da amplitude de sinal com a impedância do material independente do diâmetro do cabo.

Conforme os dados analisados e interpretados através dos resultados 2D observou-se padrões de reflexão relacionados a escavação e as armas de fogo ocultadas. A rotina que possibilitou uma melhor visualização do objeto em estudo está condicionada ao processamento de um conjunto 2D no formato 3D e aplicação de uma migração 3D.

Por fim, a aplicação desta metodologia de aquisição em futuras investigações de cunho forense e arqueológico pode auxiliar no mapeamento geométrico dos artefatos e no georreferenciamento dos refletores em subsuperfície e possivelmente diminuir as respostas ambíguas em aquisições 3D.

5.2.9 Referências

AKINSUNMADE, A; KARCZEWSKI, J; MAZURKIEWICZ, E; TOMECKA-SUCHOŃ, S. 2019. Finite-difference time domain (FDTD) modeling of ground penetrating radar pulse energy for locating burial sites. **Acta Geophysics**, 67:1945–1953. <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00352-9>.

ALMEIDA, ER. 2016. Análise da tomografia de micro-ondas em dados GPR sob condições controladas: aplicações em arqueologia e estudos forenses. Programa de Pós-Graduação em Geofísica (**Tese de Doutorado**), Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 189p.

ALVES, LK; BORGES, WR; BLUM, MLB. 2013. Mapeamento de alvos forenses com GPR 3D. In: International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 13, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 1 Cd-rom.

ANNAN, AP. 1996. Transmission dispersion and GPR. **Journal of Environmental and Engineering Geophysics**, 2:125 – 136.

ANNAN, AP. 2001. Ground penetrating radar workshop notes. Sensors; Software, Inc. **Internal Report**, p.130. 2001.

ANNAN, AP. 2004. Applications of ground penetrating radar in archaeological and forensic contexts. **First Break**, 22:41 – 44.

BARONE, PM; SWANGER, KJ; STANLEY-PRICE, N; THURSFIELD, A. 2016. Finding graves in a cemetery: Preliminary forensic GPR investigations in the Non-Catholic Cemetery in Rome (Italy). **Measurement**, 80:53-57.

BIGARELLA, JJ; SALAMUNI, R; AB`SABER, AN. 1961. Origem e ambiente de deposição da Bacia de Curitiba. **Boletim Paranaense de Geografia, UFPR**, Curitiba, 4:71-81.

BLUM, MLB; RUSSO, D. 2012. SITICRIM – Brazilian Test Site for Forensic Geophysical Research. In: **European Academy of Forensic Science Conference**, The Hague: EAFS 2012.

BORGES, WR; BLUM, MLB; SALVADOR, F; CAVALCANTI, M; SILVA, LMC; ANDRADE, LB; BRANCO, MLB. 2015. Geofísica Forense no Brasil. **Boletim SBGF**, Rio de Janeiro, 94:16-18.

BORGES, WR. 2007. **Caracterização Geofísica de Alvos Rasos com Aplicações no Planejamento Urbano e Meio Ambiente**: Estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP. Programa de Pós-Graduação em Geofísica (Tese de Doutorado), Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, São Paulo, 260p.

BORGES, WR; BLUM, MLB; BRANCO, RMGC; SILVA, LMC; PORSANI, MJ; BRICHTA, A; AMORIM, AN; PEDROSA JUNIOR, N; SANTOS, VRN; BRAGA, LRC; ALBUQUERQUE SOBRINHO, J; MACEDO, PB; SANTOS, EC; SOUZA, JCF; BRASIL, DL; MACHADO, MA; MARTINS, JA; MELLO, GA. 2010. Aplicação

de geofísica forense na busca de vestígios de pessoas desaparecidas na Guerilha do Araguaia. In: IV Simpósio Brasileiro de Geofísica, 2010, Belém. **Anais...** Belém, Cd-rom.

BRASIL, DL. 2013. **Investigação Geofísica forense e antropológica com método GPR no cemitério do Tapanã e no cemitério perdido de Mosqueiro** (Belém, Pará). Dissertação (mestrado em Geofísica) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 94p.

BUSO, DSO; BLUM, MLB; BORGES, WR. 2016. Imageamento GPR 3D de alvos forenses na área do sítio controlado de criminalística (SITCRIM). In: **Anais do VII Simpósio Brasileiro de Geofísica**, Ouro Preto, MG, SBGf, 6p.

CASSIDY, JN. 2009. Ground penetrating radar data processing, modelling and analysis. In: JOL, MH. **Ground Penetrating Radar: Theory and Applications**. Elsevier Science, Oxford.

CAVALCANTI, M. **Estudos da resposta geofísica em diferentes cenários de sepultamentos**. 197 f. Tese (Doutorado de Geofísica) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

Cavalcanti, MM; Rocha, MP; Blum, MLB; BORGES, WR. 2018. The Forensic Geophysical Controlled Research Site of the University of Brasilia, Brazil: Results from Methods GPR and Electrical Resistivity Tomography. **Forensic Science International**. <https://doi:10.1016/j.forsciint.2018.09.033>.

DANIELS, DJ. 2004. **Ground Penetrating Radar**. The Institution of Electrical Engineers, London, UK, 761p.

Daniels, JJ. 1989. Fundamentos do radar de penetração no solo. Simpósio de Aplicação de Geofísica a Problemas de Engenharia e Ambientais 1989. <https://doi:10.4133/1.2921864>.

EVERETT, ME. 2013. **Near Surface Applied Geophysics**. Cambridge: Cambridge University Press, UK, 441p.

FELIPE, RS. 2011. **Características Geológico-Geotécnicas na Formação Guabirotuba Erosão- movimentos Gravitacionais de Massa**. Curitiba: MINE-ROPAR-Serviço Geológico do Paraná.

FIEDLER, S; ILLICH, B; BERGER, J; GRAW, M. 2009. The effectiveness of ground-penetrating radar surveys in the location of unmarked burial sites in modern cemeteries. **Journal of Applied Geophysics**, v. 68: 380-385.

GRASMUECK, M, WEGER, R; HORSTMAYER, H. 2004. Three-dimensional ground-penetrating radar imaging of sedimentary structures, fractures, and archaeological features at sub-meter resolution. *Geology*, 32(11), 933. <https://doi:10.1130/g20776.1>.

GRASMUECK, M; WEGER, R; HORSTMAYER, H. 2005. Full-resolution 3D GPR imaging. **Geophysics**, v. 70 (1): K12-K19.

GROENEBOOM, JK; ZEEMAN, JH. 2001. 3D GPR data acquisition and the influence of positioning errors on image quality. In: **63rd Conference and Technical Exhibition**, Amsterdam.

HANSEN, JD; PRINGLE, JK; GOODWIN, J. 2014. GPR and bulk ground resistivity surveys in graveyards: Locating unmarked burials in contrasting soil types. *Forensic Science International*, 237:e14–e29. <http://dx.doi.org/10.1016/j.forensiint.2014.01.009>.

JOL, MH. 2009. **Ground Penetrating Radar: Theory and Applications**. Elsevier Science, Oxford.

LUALDI, M.; ZAUZI, L.; BINDA, L. Acquisition and Processing requirements for high quality 3D reconstructions from GPR investigations. In: International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering. Disponível em: <http://www.ndt.net/article/ndtce03/papers/v073/v073.htm> acessado em 25/08/2017.

MOLINA, CM; PRINGLE, JK; SAUMETT, M; HERNÁNDEZ, O. 2015. Preliminary results of sequential monitoring of simulated clandestine graves in Colombia, South America, using ground penetrating radar and botany. **Forensic Science International**, 248: 61-70.

NASCIMENTO, WG. 2009. Investigação geofísica ambiental e forense nos cemitérios do Bengui e do Tapanã (Belém, Pa). **Dissertação** (Mestrado em Geofísica) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 153p.

NOVO, A; LORENZO, H; RIAL, FI; SOLLA, M. 2010. Three-dimensional ground-penetrating radar strategies over an indoor archaeological site: Convent of Santo Domingo (Lugo, Spain). **Archaeological Prospection**, 17(4): 213–222. <https://doi:10.1002/arp.386>.

NOVO, A; LORENZO, H; RIAL, FI; SOLLA, M. 2011. 3D GPR in forensics: Finding a clandestine grave in mountainous environments. **Forensic Science International**, v. 201: 134-138.

PORSANI, JL. 1999. Ground penetrating radar (GPR): Proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado – SP. 145 f. **Tese** (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campus Rio Claro, Universidade Estadual Paulista- São Paulo.

PRIGLE, JK; JERVIS, JR; HANSEN, JD; JONES, GM; CASSIDY, NJ; CASSELLA, JP. 2012. Geophysical Monitoring of Simulated Clandestine Graves Using Electrical and Ground-Penetrating Radar Methods: 0-3 Years After Burial. **Journal of Forensic Science**, 57(6): 1467-1486.

RUFFEL, A. 2005. Searching for the IRA “Disappeared”: Ground-penetrating Radar Investigation of a Churchyard Burial Site, Northern Ireland. **Journal of Forensic Sciences**, 50(6): 1-6.

RUFFELL, A; WACH, GD. 2018. Location of the Brecourt (Normandy, France) WW2 Howitzer battery using a geoforensic search strategy. **Journal of Conflict Archaeology**, 13(3): 154–166. <https://doi:10.1080/15740773.2018.1583480>.

RUFFELL, A; MCKINLEY, J. 2005. Forensic geoscience: applications of geology, geomorphology and geophysics to criminal investigations, **Earth-Sci. Rev.** 69:235–247, [https://doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.08.002](https://doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.08.002).

SALSAROLA, D; POPPA, P; AMADASI, A; MAZZARELLI, D; GIBELLI, D; ZANOTTI, E; CATTANEO, C. 2015. The utility of ground-penetrating radar and its time-dependence in the discovery of clandestine burials. **Forensic Science International**, 253: 119–124.

SANDMEIER, KJ. 2016. REFLEXW Version 8.2, Windows XP/7/8/10. Program for the processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction and transmission data. Manual do Software, Karlsruhe, Germany, 664p.

SCHULTZ, JJ; COLLINS, EM; FALSETTI, AB. 2006. Sequential monitoring of burials containing large pig cadavers using ground-penetrating radar. **Journal of Forensic Sciences**, 51(3): 607-616.

SCHULTZ, JJ; MARTIN, MM. 2012. Monitoring controlled graves representing common burial scenarios with ground penetrating radar. **Journal of Applied Geophysics**, 83:74-89.

Slob, EC; Groenenboom, J; Fokkema, JT. 2003. **Subsurface Sensing Technologies and Applications**, 4(1): 5–18. <https://doi.org/10.1023/a:1023007313060>.

SOLLA, M; RIVEIRO, B; ALVARÉS, XM; ARIAS, P. 2012. Experimental forensic scenes for the characterization of ground penetrating radar wave response. **Forensic Science International**, 220: 50-58.

5.3 ARTIGO 3 (Original no Apêndice 1)

The forensic application of ground-penetrating radar, Tekoha Jevy indigenous village, Paraná, Brazil

5.3.1 Abstract

Any archaeological site, according to the Brazilian Federal Constitution, is a patrimony of the Union; consequently, when crimes against this cultural patrimony occur, it becomes the responsibility of the Federal Police of Brazil. In 2013, there was a complaint to the Brazilian Federal Public Prosecutor's Office about the depredation of an archaeological site and forced withdrawal of the indigenous people because of the construction of a multimodal port in the city of Guaíra, in the state of Paraná, in southern Brazil. Thus, the Technical–Scientific Sector of the Federal Police Department, in partnership with Brazilian universities, used standard geophysical methods such as ground-penetrating radar (GPR) to investigate and locate buried archaeological targets. This paper discusses the results of 2D and 3D investigations in the Tekoha Jevy indigenous village, located in Guaíra County. In the field, 32 parallel sections of GPR data were acquired using 250 and 700 MHz shielded antennas. The results showed several anomalies, two of which were subjected to field checks using excavations, which revealed several artefacts such as ceramic fragments associated with ancient indigenous occupations on the banks of the Paraná River.

5.3.2 Introduction

According to Article 2, of the Brazilian Law number 3,924, dated 1961, archaeological heritage is protected, which is consistent with several countries. These protected items includes archaeological monuments and prehistoric deposits (these are locally known as sambaquis, tesos, deposits, steels and earthen), sites and human remains that represent the culture of the paleoamerindians of Brazil.

Archaeological sites found throughout Brazil are of different origins. For instance, they may be related to the following:

- Rock art found in the Serra da Capivara National Park, in the state of Piauí;

- Sites in the central and south region inhabited by ancient indigenous people, as indicated by the presence of ceramic fragments on the ground surface;
- Man-made hills that acted as barriers to protect indigenous villages and cemeteries associated with flooding caused by fluctuations in the levels of the Amazon River (known as tesos), located on the islands of Marajó and Pará; and
- Accumulations of organic materials, limestone, fish bones, shells and other food remains (known as sambaquis) found in coastal locations and associated with ancient communities (Buco 2014).

In the State of Paraná, archaeological sites related to indigenous tribes are located to the east of the Paraná River. In the western region of Paraná, between the cities of Terra Roxa and Guaíra, thirteen indigenous villages of the Avá-Guarani ethnic group were identified. This included the village Tekoha Jevy that is believed by archaeologists to be related to the Tupi-Guarani tradition characterized by the presence of ceramic fragments (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, IPHAN 2015).

Associated with the construction of a port at Guaira in 2012 and the year of 2013 the Brazilian Federal Public Prosecutor's Office (MPF) reported the breach of an archaeological site. MPF subsequently commissioned the Technical-Scientific Sector, of the Federal Police Department, of the State of Paraná, to conduct an investigation into the alleged destruction of archaeological artifacts at the site. A multidisciplinary team was formed that included Federal Police experts, geologists from the Federal University of Paraná, archaeologists and anthropologists from the Institute of Historical Heritage, and National Artistic (IPHAN). In period from 07/10/2014 to 16/10/2014 this team visited the site to identify the presence of any archaeological artifacts and including ceramic vase.

The objectives of the investigation team were as follows:

- Verify archaeological evidence on the ground surface;
- Identify boundaries of the archaeological site;
- Define the most appropriate geophysical methods to investigate the site;

- Deploy a geophysical survey, including the analysis and interpretation of geophysical data, identification of any geophysical anomalies that may be consistent with archaeological remains; and
- Invasive verification of geophysical anomalies, identification and recording of the targets.

5.3.3 Overview of archaeological geophysics in Brazil

Further information on the suitability of geophysical methods to map archaeological sites are found in (Conyers & Lucius 1996; Conyers & Goldman 1997; Conyers 2004; Conyers 2006; Conyers & Leckebusch 2010; Conyers 2012; Zhao et al. 2013; Allen et al. 2017). Whereas, the applications of 2D and 3D ground penetrating radar (GPR) for archaeological sites has been discussed by; Goodman et al. 1995; Malagodi et al. 1996; Groenenboom et al. 2001; Novo et al. 2008). These include the influence of data acquisition parameters for generating 3D time slices, such as the spacing between profiles, spatial and temporal sampling intervals and sampling frequency.

In Brazil, Alves (1979) was the first to apply geophysical techniques for the investigation of archaeological sites, which included magnetic and electromagnetic methods. Later, Roosevelt (1991) used the electrical resistivity, magnetic, electromagnetic and GPR methods to map in detail the sites of the Marajó Island, in Pará. Gomes (2004) integrated geophysical, electromagnetic and radiometric data with archaeological data at three sites of sambaqui fluviais located in the State of São Paulo, resulting in the identification of archaeological features in subsurface.

Rodrigues et al. (2009) developed geophysical surveys using the GPR with a frequency of 200 MHz, and inductive electromagnetic methods under three sambaqui archaeological sites located in the coastal region of Santa Catarina. The integration of these complementary methods was found to be effective in guiding archaeological surveys, discovering new artifacts, and mapping the strata of the sambaquis.

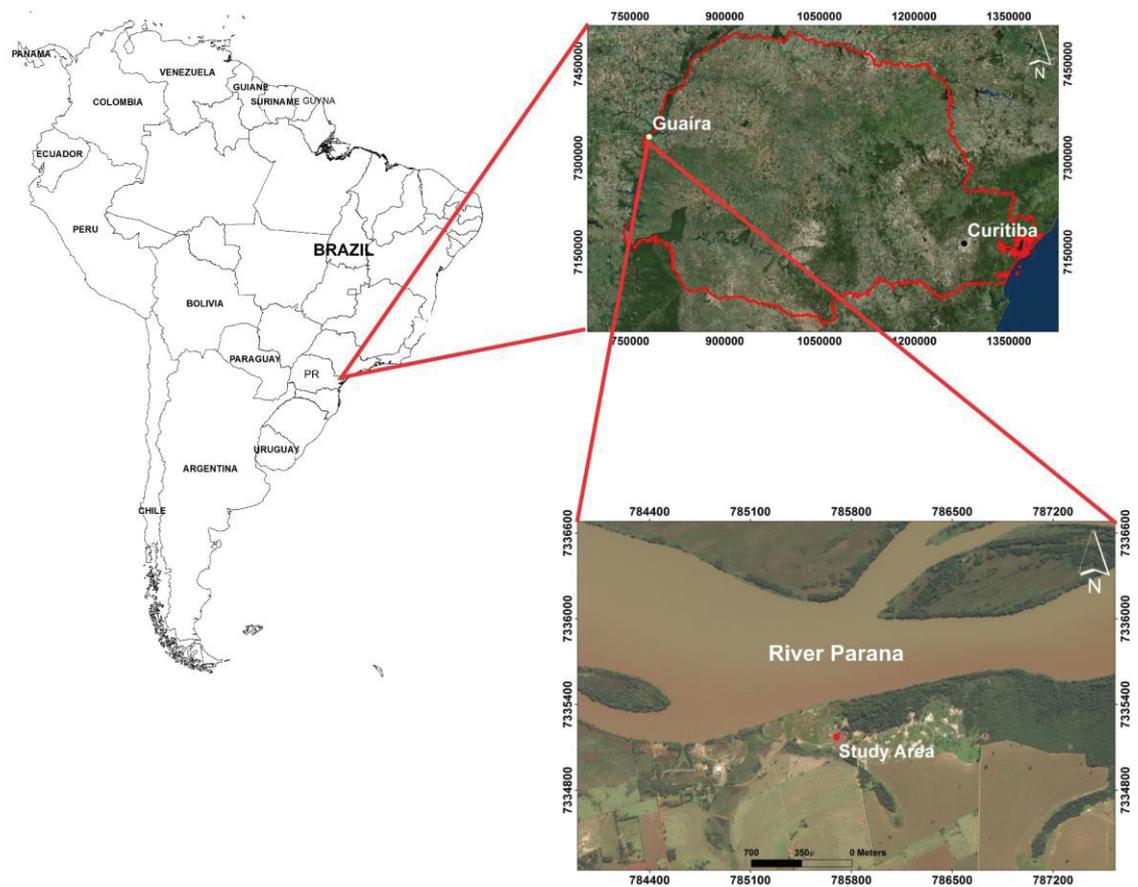
Aragão et al. (2010) carried out geophysical surveys using magnetic, gamma radiation and GPR methods to guide archaeological excavations at two sites; Bittencourt and Jambuaçu, which are located west of Belém do Pará. The

magnetic responses and GPR profiles indicated the presence of several ceramic fragments. The gamma spectrometry enabled the differentiation of alternating clay and sand soil layers, which corresponded to past human occupation. Other authors have also successfully used geophysics to assist with the investigation of archaeological sites and to guide investigations (Cezar et al. 2001; Porsani et al. 2010; Souza 2012; Gouvêa *et al* 2013; Rocha et al. 2014).

5.3.4 Geology

The study area is located in the Paraná-Etendeka Igneous Province (PEIP), which represents a major magmatic event during the Lower Cretaceous (Janasi et al. 2011) and precedes the fragmentation of southern Gondwana, and opening of the South Atlantic Ocean (Licht 2016). The province covers approximately 1.2×10^6 km² largely within the South America continent, and there are equivalent terrains in parts of Africa. The bedrock predominantly comprises lava formed mainly of basalts and basaltic andesites with minor quantities of acidic rocks. Figure 57 shows the location of the city of Guaíra, State of Paraná, in the vicinity of Rio Paraná, and the position of Tekoha Jevy village.

FIGURE 57: Location map of the study area (Google Earth Pro, SIRGAS 2000 UTM: 21S).



5.3.5 Gpr survey

5.3.5.1 Method

GPR is a geophysical that uses electromagnetic waves (radar pulses) to image the ground. The frequencies vary between 10 MHz and 3 GHz, and are generated by a transmitting antenna. Variations in the electrical properties of the ground (and any associated anthropogenic features) that occur at the interfaces cause part of the transmitted signal to be reflected, which is then captured and recorded by another antenna, called a receiver. In this way, the captured signal is amplified, digitized and stored in a control unit to be viewed and processed (e.g. Davis & Annan 1989).

5.3.5.2 Theory

Rocks, soils and man-made objects buried in the ground have specific physical properties, such as dielectric permittivity (ϵ), electrical conductivity (σ) and magnetic permeability (μ). However, the same material can present variations of physical properties, due to for example; the amount of water, porosity, clay content and mineralogy. For GPR applications, dielectric permittivity is the most important parameter (Jol 2009), and is often expressed as follows:

$$k = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (27)$$

Where (k) is the dielectric constant and (ϵ_0) the dielectric permittivity.

The dielectric permittivity directly influences the velocity of propagation (v) of the electromagnetic wave in the ground while the electrical conductivity (σ) is reflected in the attenuation of the electromagnetic signal (α) (Davis & Annan 1989; Conyers 2004; Daniels 2004). The relationships among the variables are indicated in the expressions below:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon x \sigma}} = \frac{c}{\sqrt{k}} = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{k}} \quad (28)$$

$$\alpha = 1,636x \frac{\sigma_0}{\sqrt{\epsilon_0}} \quad (29)$$

where c is the velocity of the electromagnetic wave in the vacuum ($3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$).

In the GPR method, to generate significant expressive reflections a significant contrast of dielectric permittivity is required between the interfaces, that is, between the host (ϵ_1) and the target (ϵ_2) (Annan & Coways, 1992). Therefore, the reflection coefficient (r_{gpr}) can be expressed by equation (30):

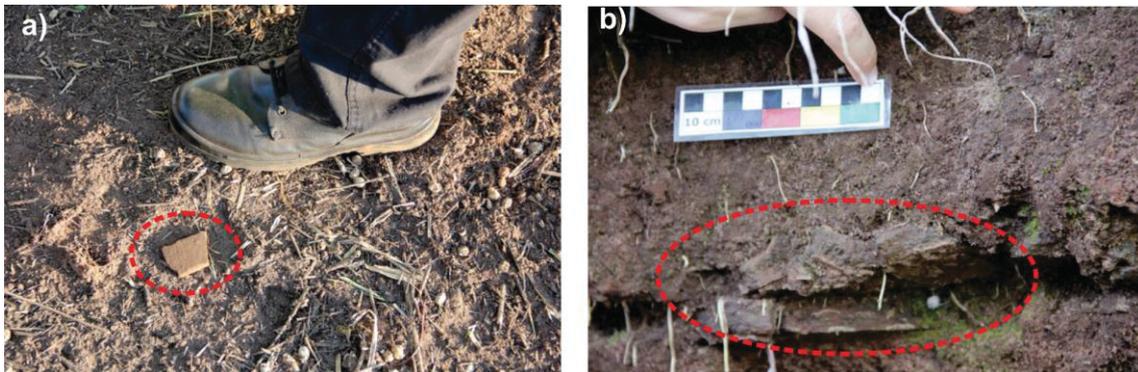
$$r_{gpr} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \quad (30)$$

5.3.5.3 Data acquisition and processing

Following the site inspection of the indigenous village at Tekoha Jevy, a site was selected for the deployment of the GPR survey. This was primarily based on the following:

- An indication of the most preserved area of the site as determined by the IPHAN archeology team. This was based on the recovery of archaeological materials that could be identified and their original depositional context;
- The presence on the surface artifacts (
- FIGURE 58a);
- The verification of the presence of a ceramic fragment preserved in the soil profile (FIGURE 58b).

FIGURE 58: (a) Ceramic fragments on the surface. (b) Archaeological material in the soil profile (see L8 in Fig. 4c).



For the implementation of the geophysical surveys the vegetation was cleared. In addition, pebbles, rock fragments and other materials that could also potentially compromise the deployment of the instruments or data quality were also cleared.

The geophysical data were acquired using the Duo Detector (Ingeneria Dei Sistemi - IDS), composed of three interconnected modules. The first module comprised a set of shielded antennas with frequencies in the range of 250 MHz

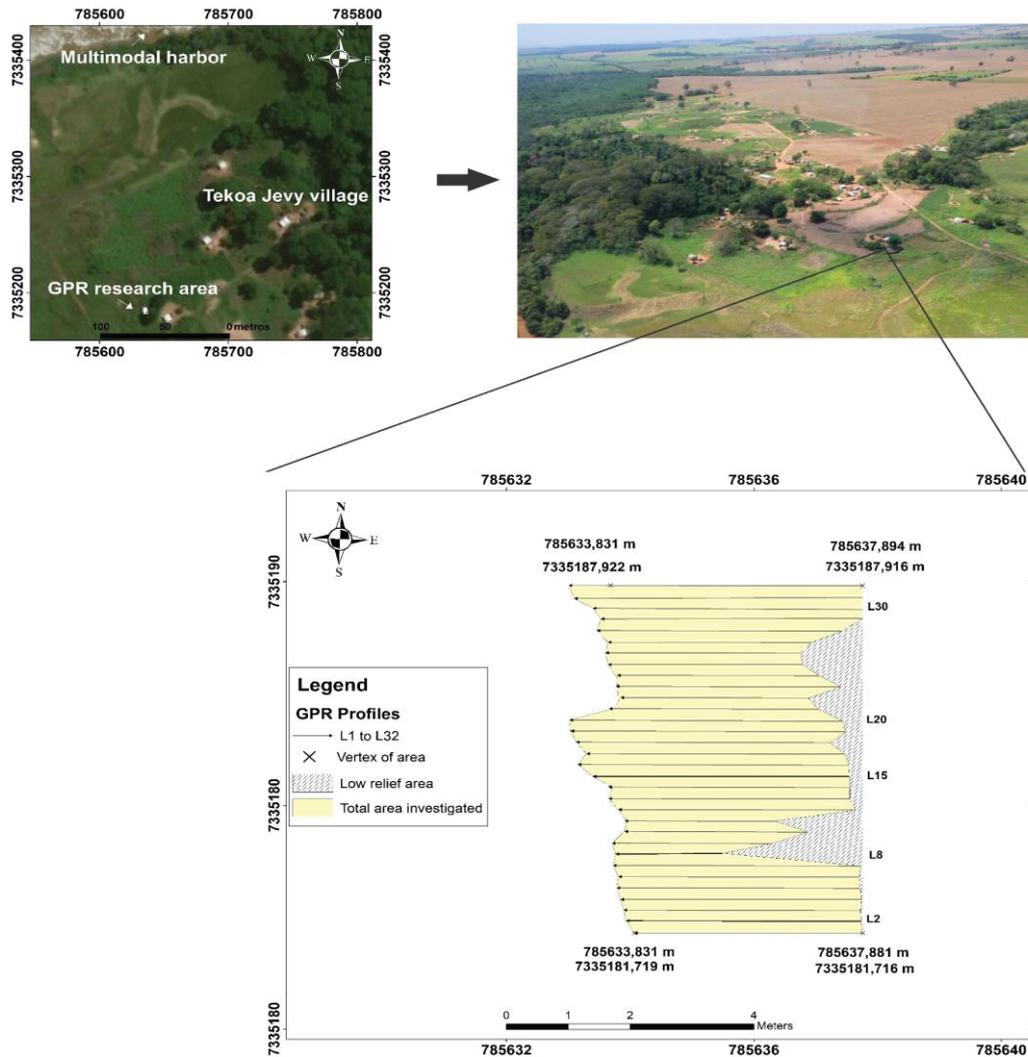
and 700 MHz. The second corresponded to the control unit and the third included a data storage unit or netbook (IDS, 2009). Data were recorded continuously, with the following acquisition parameters, (a) trace spacing of 0.02 meters, (b) 512 samples per trace, and (c) temporal window of 120 ns.

The geophysical survey resulted in 32 profiles oriented in an E-W direction. These were spaced at 0.02 m apart and the length of each traverse varied from between 1.72 m and 4.68 m, due to irregularities in the terrain (FIGURE 59). The results of the survey were analyzed in real time, through the visualization of the respective sections. Any anomalies detected by the GPR were identified by means of flags that was inserted into the ground to denote the sub-surface position of each anomaly as shown on the radargram.

The data were processed in ReflexW software, version 7.0 (Sandmeier 2010). The processing routine for 2D and 3D sections are described below:

- Subtract-mean dewow (removes low-frequency electronic noise);
- Station correction (sets the first record of the GPR signal to zero time in the ground);
- Time cut (limits GPR time logging by maximizing processing time to 25ns);
- Energy decay (raises the signal amplitude because of the wave attenuation during its wave propagation);
- Removes background (eliminates coherent events such as horizontal reflectors);
- Filter 1D (removes incoherent noises); and
- Migration and time/depth conversion (converts the reflection events in a real position in terms of depth below ground level).

FIGURE 59: Map of the Tekoha Jevy indigenous village study area indicating the position of the GPR profiles.



To obtain the electromagnetic velocity of the ground (soils) a control test was performed whereby the metal part of a hoe was buried in a cavity at a depth with 0.25 meters below ground level. The velocity obtained was approximately 0.109 m/ns, which was subsequently used on the data (conversion time-to-depth).

During the production of the depth slice sections, the instantaneous amplitude, trace envelope, was applied to better define the archaeological artifacts. This parameter is a measure of the reflectivity force, which is proportional to the square root of the complete energy of the signal at an instant of time and allows an evaluation of the distribution of reflected energy along the trace (Hahn, 1996).

5.3.6 Results and discussion

GPR has been deployed applied to archaeological investigations whereby high frequency antennas were used due to their lower depth of penetration and providing results with higher lateral resolution. For these reasons the results of 2D and 3D surveys are presented using the 700 MHz antenna. The location of the GPR profiles indicating the excavated and unexcavated anomalies are shown in FIGURE 60a.

The radargrams for the 2D data (FIGURES 60b, 60d, 60f) show reflectors up to 25 ns, which correspond to a depth of 1.25 m. Anomalies with dimensions between 0.10 m and 0.35 m, are shown to exist at a depth between 0.12 m and 0.40 m. These were later proven to correspond fragments of indigenous ceramics. At depths between 0.50 m and 1.20 m, other anomalies were between 0.60 m and 0.80 m wide was observed. These anomalies interpreted as representing ceramics vase, based on the dimensions of vase observed in the village (see FIGURE 63) and also by the interruption of the subsurface reflectors observed in the radargrams (FIGURES 60c, 60e, 60g).

To verify the results of the GPR, as shown on the radargrams, two excavations were dug. The first one located approximately 1.50m along profiles L1 to L3, as shown in FIGURE 60a, with 0.60 m x 0.60 m wide, and 0.18 m deep (see FIGURES 60b and 60c). The excavation revealed the archaeological artifacts that included ceramic fragments, varying from 0.05 m to 0.25 m, e presence of these in site archaeological had been identified until the depth of 0.35 m. The first hollowing and recuperation of the ceramics fragments can be seen in FIGURES 61a and 61b.

FIGURE 60: Results of 2D GPR cross-sections. (a) Location of the GPR profiles indicating the anomalies excavated and not excavated. (b) L2 radargram and its interpretation (c). (d) L15 radargram and its interpretation (e). (f) L8 radargram and its interpretation (g).

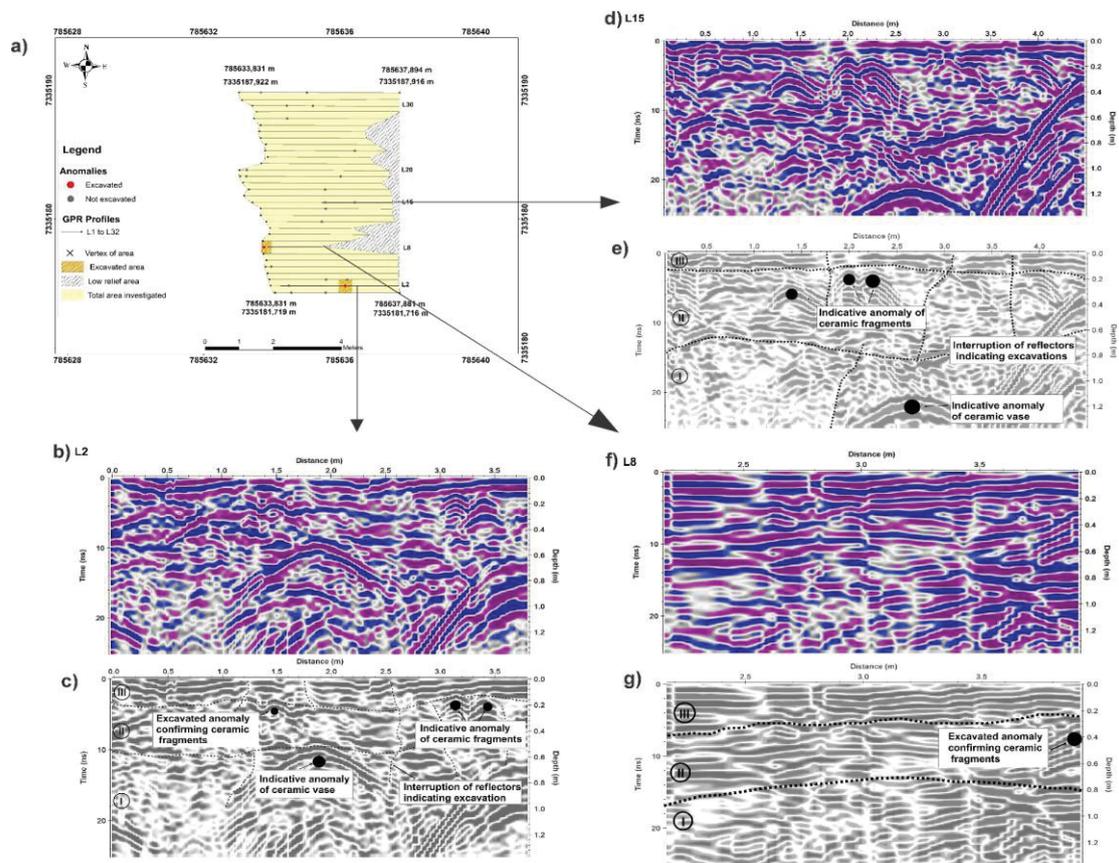


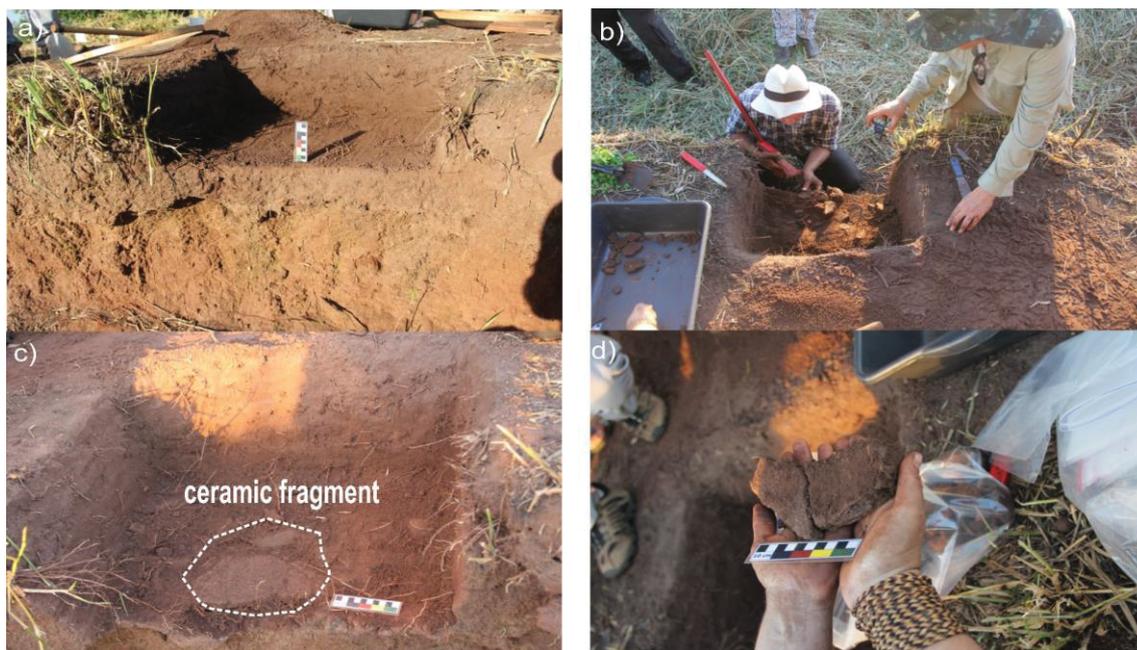
FIGURE 61: (a) Excavation made to investigate the GPR anomaly recorded at the 1.50 m position, along the traverse L1–L3 profiles. (b) Evidence of the fragments discovered at a depth of 0.18 m and recovered from the excavation.



The second excavation located approximately 3.7 m along the profiles L7 to L9 (see FIGURE 60a) and was performed on the semi-hyperbolic anomaly representing the ceramic fragment preserved in the soil profile (see FIGURE

58b). As interpreted in the radargram (see FIGURE 60g) the ceramic artifact is at a depth of approximately 0.37m, and through this excavation can recover several fragments of ceramics with dimensions ranging from 0.10 m to 0.30 m (FIGURES 62a and 62b). No rock boulders or bedrock were found in the excavations that related to the GPR radargrams anomalies.

FIGURE 62: (a) & (b) Second excavation to recover the ceramic fragments. (c) The removal of the ceramic fragments. (d) Photograph to show the relative size of the archaeological artefact.



Based on the result and interpretations of the 2D and 3D GPR and the ground-truthing excavations a stratigraphic profile of the soil and the archaeological artifacts was produced (FIGURES 63a, 63b, 63c, 63d). This showed three distinct layers, as follows:

- Upper layer III: Non-archaeological layer with small roots and sand-silt soil with organic matter (thickness of 0.18 m).
- Middle layer II: Archaeological layer with ceramic fragments, small roots, coal concretions and sand soil that measured 0.18 m to 0.50 m.
- Lower layer I: Soil layer no excavated suggesting ceramic vase, was indicated on the GPR radargrams at a depth around 0.50 m to 1.30 m.

The profile derived from the geophysical interpretation showed similarities with the interpretation prepared by the team of IPHAN archaeologists. According to the IPHAN (2015) in the archaeological layer (see FIGURE 63e), located in the

area of GPR acquisition, it was possible to identify a dark soil, anthropogenic soil and several quantities of ceramic fragments. The archaeological site has a depth of 0.70 m. However, some GPR results indicate hyperbolic anomalies depths greater than 0.80 m suggesting the presence of other artifacts (ceramic vase).

Conyers (2004) describes high amplitudes areas, shown in depth slice cross sections, to indicate sites with marked contrasts in physical property. Where these are detected these may be associated with potential archaeological artifacts. As such, from the interpolation of the 2D profiles, depth-slice cross-sections obtained during this investigation the deployment of the GPR successfully located the archaeological artefacts.

FIGURE 63: (a) Stratigraphic 3D block model derived from the GPR data and its interpretation (b). (c) L2 radargram and stratigraphic profile of the archaeological site obtained through indirect and direct methods (d). (e) Stratigraphic representation of part of the exposed profile indicated in Figure 58b (modified from IPHAN 2015).

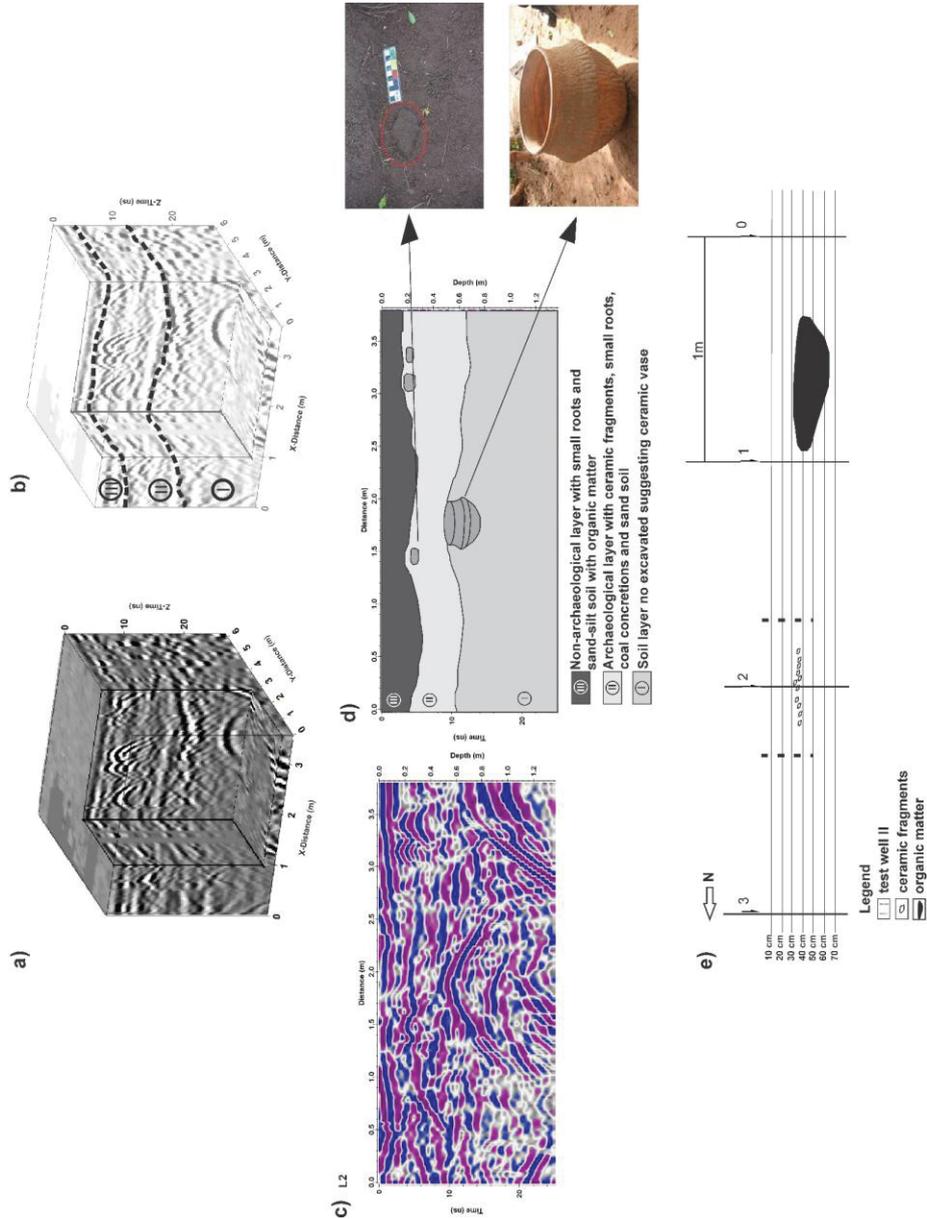
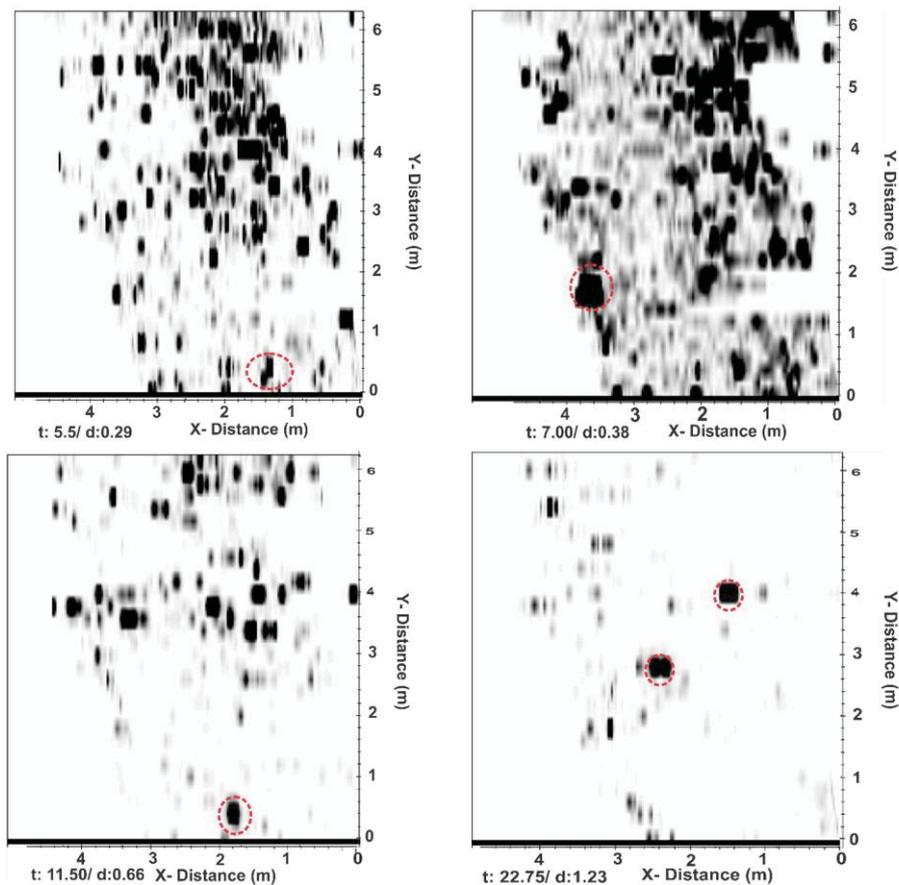


Figure 64 illustrates depth slice cross section at 5.50 ns -22.75 ns. This correspond to 0.29 m - 1.23 m. The anomalies denoted in the form of dotted circles were indicated reflected waves with high amplitudes and associated with materials that had a marked contrast in physical properties. Similarly, the interval range of 5.5 ns -7.0 ns corresponds to small hyperboles interpreted in sections 2D as ceramics fragments and verified by two excavations. From 7.5 and 22.75ns the reflections correspond to larger anomalies, which suggestive represent ceramic vase interpreted in layer I (see FIGURES 63b and 63c). The interpretations of the anomalies indicated in FIGURE 64 had occurred through the associates of the results 2D and 3D.

The vegetation roots, which are usually interpreted as continuous and branched reflectors along several directions, were not identified. This is thought to be probably due to the spatial high resolution of the survey, ie, the traverses were spaced at 0.20 m.

FIGURE 64: Depth-slice profiles through the GPR data and the respective high-amplitude geophysical signatures of sites showing the potential location of archaeological artefacts. d, depth in m; t, time in ns.



5.3.7 Conclusions

The acquisition of GPR data, using a 700 MHz antenna, resulted in positive responses to help locate archaeological artifacts. Several 2D profiles were produced that indicated anomalies, shown on radargrams, to have different dimensions. These were proven in two excavations to correspond to indigenous ceramic fragments, found in a soil layers at depths between 0.18 m and 0.5 m. The largest hyperboles on the radargrams corresponded to depths of between 0.5 m and 1.30 m and represented ceramic vase.

Depth-slice cross sections of the radargrams, at spacing's of 0.20 m revealed the relative position and dimensions of these buried archaeological targets as verified by the of ground-truthing excavations. The integration of the 2D GPR data combined with the depth-slice cross sections was an important step in the investigation as this reduce excavation error and enabled the archaeologists and recovery teams to precisely locate ceramics fragments.

The GPR has therefore proved to be an effective method in assisting the Brazilian Federal Police investigate and recover archaeological artifacts at Tekoha Jevy indigenous village attesting that the area investigated is an archaeological site. In this way, those responsible for damages to the cultural heritage may suffer criminal penalties established by law. Finally, the partnership between public security institutions and universities is of fundamental importance for the growth of forensic science in Brazil.

Acknowledgements

The authors would like to thank the forensic criminologist unit of the Federal Police in Brazil, specifically in the technical and scientific sector, Paraná, the Laboratory of Mineral and Rock Analysis of the Federal University of Paraná and the National Institute of Historic and Artistic Heritage for their collaboration in research.

Funding F.J.F. Ferreira was supported in this research by a fellowship from the National Council for Scientific and Technological Development, CNPq (ID: 303826/2018-5) and R.E. Canata was supported in this research by a fellowship

from the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel, CAPES (ID: 03741868981), Ministry of Education, Brazil.

5.3.8 Referencies

Allen, J.S., Porsani, L.J. & Poluha, B. 2017. Geofísica arqueológica no ambiente da arqueologia urbana: proposta metodológica para projetos públicos. *Revista de Arqueologia*, **30 (1)**, 235-254.

Alves, A.J.J. 1979. *Métodos geofísicos aplicados à arqueologia no Estado do Pará*. Dissertação de Mestrado pela Universidade Federal do Pará, Belém, **55**.

Annan, A.P. & Cosway, S.W. 1992. *Ground penetrating radar Survey Design*. Sensors & Software Inc. Mississauga, Ontario, Canada.

Aragão, R.C., Luiz, J.G. & Lopes, P.R.C. 2010. Metodologia Geofísica Aplicada ao Estudo Arqueológico dos Sítios Bittencourt e Jambuaçu, Estado do Pará. *Revista Brasileira de Geofísica*, **28 (2)**, 249-263 <http://www.scielo.br/pdf/rbg/v28n2/v28n2a09.pdf>

Buco, A.C. 2014. Sítios arqueológicos brasileiros/ Brazilian archaeology sites. UNESCO and Editora Brasileira de Arte e Cultura, **199**.

Cezar, G., Rocha, P., Buarque, A. & Da Costa, A. 2001. Two Brazilian archaeological sites investigated by GPR Serrano and Morro Grande. *Journal of Applied Geophysics*, Amsterdam, **47**, 227–240.

Conyers, L.B., & Lucius, J.E. 1996. Velocity analysis in archaeological ground-penetrating radar studies. *Archaeological Prospection*, **3**, 25-38.

Conyers, L.B., & Goodman, D. 1997. *Ground-penetrating radar: An Introduction for Archaeologists*. Altamira Press, Walnut Creek, California, **232**.

Conyers, L.B. 2004. *Ground Penetrating Radar for Archaeology*. Altamira Press, Walnut Creek, California, **224**.

Conyers, L.B. 2006. Innovative Ground-penetrating radar Methods for Archaeological Mapping. *Archaeological Prospection*, **13**, 139-141.

Conyers, L.B., Leckbusch, J. 2010. Geophysical Archaeology Research Agendas for the future: Some Ground Penetrating Radar Examples. *Archaeological Prospection*, Published online in Wiley InterScience, DOI: 10.1002, arp.379.

- Conyers, L.B. 2012. Advances in ground-penetrating radar exploration in southern arizona. *Journal of Arizona Archaeology*, **2**, 80-91.
- Daniels, J.D. (eds) 2004. *Ground Penetrating Radar*. The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, **761**.
- Davis, J.L. & Annan, A.P. 1989. Ground Penetrating Radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, **37**, 531-551.
- Gomes, M.J.S. 2004. *Utilização de métodos geofísicos em sambaquis fluviais, região do Vale do Ribeira de Iguape- SP/PR*. Dissertação de mestrado na Universidade de São Paulo, São Paulo, **135**.
- Goodman, D., Nishimura, Y. & Rogers, J.D. 1995. GPR time-slices in archaeological prospection. *Archaeological Prospection*, **2**, 85-89, <https://www.researchgate.net/publication/230930249>
- Groenenboom, J., Van der Krunk, J. & Zeeman, A.J. 2001. 3D GPR data acquisition and the influence of positioning errors on image quality. *63rd Conference and Technical exhibition*, Amsterdam, 11-15.
- Gouvêa, J.L., Gomes, D.M.C., Moraes, C.P. & Py-Daniel, A.R. 2013. GPR applied to archaeology on the campus of UFOPA, Santarém, Pará. *13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society*. Rio de Janeiro, August 26-29. <https://www.researchgate.net/publication/269250639>
- Hahn, S.L. 1996. *Hilbert Transforms in Signal Processing*. Artech House Signal Processing Library, **460**.
- Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional. 2015. Informação Técnica Conjunta: Vistoria em área de sítio arqueológico localizado na aldeia Tekoha Jev, município de Guaíra/PR. *Informação técnica nº13*, **1-25**.
- Janasi, V.A., Freitas, V.A., Heaman, L.H. 2011. The onset of flood basalt volcanism Northern Paraná Basin, Brazil: a precise U/PB baddeleyite/zircon age for a Chapecó- type dacite. *Earth and PlanetScienceLetter*, **302**, 147-153. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X10007570>
- Jol, M.H. (eds) 2009. *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Elsevier Science, Oxford, **402**.
- Licht, O.A.B. 2016. A revised chemo-chromo-stratigraphic 4-D model for the extrusive rocks of the Paraná Igneous Province. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **23**.

- Malagodi, S., Orlando, L., Piro, S. & Rosso, F. 1996. Location of archaeological structures using GPR method: three-dimensional data acquisition and radar signal processing. *Archaeological Prospection*, **3**, 13-23.
- Novo, A., Gasmuek, M., Viggiano, A.D. & Lorenzo, H. 2008. 3D GPR in Archaeology: What can be gained from dense Data Acquisition and Processing? *12th International Conference on Ground Penetrating Radar*, June 16-19, Birmingham, UK. <https://www.researchgate.net/publication/228986985>
- Porsani, J.L., Jangelme, G.M. & Kipnis, R. 2010. GPR survey at Lapa do Santo archaeological site, Lagoa Santa karstic region, Minas Gerais state, Brazil. *Journal of Archaeological Science*, **37**, 1141-1148, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305440309004877>
- Rocha, H.O., Silva, M.W.C., Marques, F.L.T. & Filho, D.C.L. 2014. Gradiometria magnética e radar de penetração de solo aplicados em Esterias de Penalva (MA). *Revista do Instituto de Geociências da USP*, **15 (1)**, 3-14.
- Rodrigues, S.I., Porsani, J.L., Santos, V.R.N., DeBlasis, P.A.D., Giannini, P.C.F. 2009. GPR and inductive electromagnetic surveys applied in three coastal sambaqui (shell mounds) archaeological sites in Santa Catarina State, South Brazil. *Journal of Archaeological Science*, **36**, 2081–2088.
- Roosevelt, A. 1991. *Moundbuilders of the Amazon: Geophysical Archaeology on Marajo Island, Brazil*. San Diego, Academic Press, **480**.
- Souza, D.M. 2012. *GPR aplicado à arqueologia nas áreas do porto da Cargill (Santarém/PA) e no palacete Faciola (Belém/PA)*. Dissertação de mestrado pelo Programa de Pós-Graduação do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, **61**.
- Zhao W., Forte, E., Pipan, M. & Tian, G. 2013. Ground Penetrating Radar (GPR) attribute analysis for archaeological prospection. *Journal of Applied Geophysics*, **97**, 107-117.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985113000906>

5.4 ARTIGO 4

Proposal of practical procedures for the acquisition and processing of 2D and 3D GPR data for forensic purposes

5.4.1 Resumo

Os geocientistas forenses na maioria das investigações criminais e arqueológicas utilizam-se do método GPR para auxiliar na localização de drogas, na busca por restos mortais, túneis clandestinos, armas de fogo, salvamento de artefatos arqueológicos devido a sua versatilidade, eficiência e respostas em tempo real. Apesar de propiciar excelentes resultados nas investigações ainda existem erros quando se indicam locais para serem escavados resultante de falsas anomalias originadas por rocha, raiz, contato pedológico, ou seja, materiais que possam apresentar respostas similares quanto a amplitude de sinal em determinado ambiente. Além de uma acurácia na aquisição dos dados, o processamento torna-se uma das etapas mais importante para viabilizar com sucesso a procura do objeto alvo. Os resultados desta pesquisa oriundos de um suíno adquirido na Fazenda da UnB e de uma ossada de um campo teste na região do Araguaia possibilitaram a elaboração de uma rotina de processamento para a otimização das respostas de alvos forenses 2D e 3D. Esta rotina de processamento foi replicada em dados oriundos da maior perícia geofísica forense realizada para localizar os corpos de guerrilheiros desaparecidos na Guerrilha do Araguaia, evento este que ocorreu na época da ditadura militar. Por fim, a sugerida rotina de processamento possibilitou uma melhora na visualização das anomalias de raiz, tronco, rocha registradas.

Palavras-Chave: geofísica forense, geofísica arqueológica, GPR, Guerrilha do Araguaia.

5.4.2 Abstract

Forensic geoscientists in most criminal and archaeological investigations use the GPR method to help locate drugs, search for remains, clandestine tunnels, firearms, save archaeological artifacts due to its versatility, efficiency and real-time responses. Although it provides excellent results in investigations there are still errors when indicating sites to be excavated resulting from false anomalies originated by rock, root, pedological contact, i.e., materials that may present similar responses as to signal amplitude in a given environment. In addition to accuracy in data acquisition, processing becomes one of the most important steps to successfully search for the target object. The results of this research coming from a pig acquired at UnB Farm and from a test field bone in the Araguaia region enabled the elaboration of a processing routine for the optimization of 2D and 3D forensic target responses. This processing routine was replicated in data from the largest forensic geophysical survey conducted to locate the bodies of guerrillas who disappeared in the Araguaia Guerrilla, an event that occurred at the time of the military dictatorship. Finally, the suggested processing routine allowed an improvement in the visualization of the root, trunk and rock anomalies recorded.

Key words: forensic geophysical, archaeology geophysical, GPR, Araguaia Guerrilla.

5.4.3 Introdução

Atualmente a aplicação de GPR na busca de vestígios relacionados a crimes e a estudos arqueológicos é uma prática comum visto sua grande praticidade, agilidade e eficiência (BEVANS, 1990; KING et al., 1993; MALAGODI et al. 1996; NOBES, 1999; PIPAN et al. 1999; WHITING et al. 2001; KOPPENJAN et al, 2003; RUFFELL, 2005; SHULTZ et al, 2006; CONYERS 2006; MELO 2007; NEGRI et al. 2008; THABIT et al, 2019; WISNIEWSKI et al. 2019; YILMAZ et al, 2019). Grande parte do sucesso do GPR nestas áreas ocorre em função da pequena profundidade dos alvos. Quando os alvos encontram-se em ambientes geológicos desfavoráveis para a propagação da onda eletromagnética do GPR, há consequentemente insucesso nas investigações.

Em locais de solos argilosos com grande condutividade elétrica (menor que 300 Ohm.m) o GPR não funciona em grandes profundidades, entretanto para a detecção de alvos rasos, menos de 0,5 metro o mesmo apresenta resposta se houver um processamento criterioso dos dados (WEAVER, 2006; LOPERA et al, 2007; ODEN et al, 2007; GOMEZ-ORTIZ, 2010). Em alguns casos, quando há a aplicação de técnicas de balanceamento espectral obtém-se maiores profundidades e melhores resoluções em profundidades maiores (ECONOMOU & VAFIDIS, 2010).

Atualmente a maioria dos usuários de GPR utilizam softwares de processamento de dados de GPR que dispõem apenas de equações básicas aplicados a registros digitais (FISHER, et al., 1992; GRANDJEAN & DURAND, 1999). Quando há necessidade de aplicação de equações complexas os usuários recorrem aos softwares de sísmica ou implementam as equações em softwares de programação (KIM et al, 2007; CHEN & JENG, 2011).

Apesar do cuidado no processamento, existem inúmeros casos de interpretações erradas relacionadas a registros de ruídos aleatórios, ruídos coerentes, cáusticas, reverberações simples e múltiplas (JACOB & HERMANCE, 2005; PEREIRA et al, 2005; ZHAO et al, 2010; LAPAZARAN et al, 2016). Este fato é relacionado ao despreparo dos usuários nos procedimentos básicos de aquisição, processamento e de interpretação dos registros de GPR.

Na área de perícia forense e arqueológica os peritos e pesquisadores envolvidos possuem expertise no desenvolvimento das atividades de campo, além

disto estão em constante atualização para ampliar seus conhecimentos e obter maior assertividade na emissão de laudos técnicos (RUFFEL & MCKINLEY, 2008; RIBAUX & WRIGHT, 2014; EDMOND et al, 2017).

O aprimoramento das análises e rotinas de processamentos integradas de dados 1D, 2D, 3D e das modelagens inversas interpretação mais precisa da reconstrução dos locais investigados e quando possível diferenciação dos materiais (SOLLA et al., 2012; ALMEIDA, 2016; GIANNAKIS et al., 2016; LUO et al., 2019)

Os resultados desta pesquisa foram almeçados através de dados oriundos de campo teste que possibilitaram a elaboração de uma de rotina de processamento que otimizassem a visualização dos alvos de GPR2D e 3D para forense. Os quais foram replicados e comparados com os resultados de pericias realizadas no local em que ocorreu a Guerrilha do Araguaia.

5.4.4 Material e método

A Guerrilha do Araguaia foi um dos episódios mais tenebrosos e ocultos da ditadura militar Brasileira, implantada após o golpe militar de 1964, esta revolução armada aconteceu no período de 1972 a 1974. O movimento armado começou a se instalar na região sudeste do Pará (Bico do Papagaio), norte do Tocantins, e oeste do Maranhão, em meados de 1966 (CORRÊA, 2013). Este movimento de luta armada formada em sua grande maioria por jovens universitários, ligados ao Partido Comunista do Brasil, tinha como objetivo combater o regime militar implantado no país e no período que sucedeu o conflito cerca de 59 guerrilheiros foram mortos.

No ano de 2003, a sentença judicial ordenou esforços do Estado a localizar e entregar os corpos dos desaparecidos da Guerrilha do Araguaia. E no ano de 2009, a juíza federal Solange Salgado enfatizou o governo a cumprir a ordem judicial. Para localizar estes desaparecidos o então Ministro da Defesa criou o Grupo de Trabalho Tocantins (GTT), posteriormente designado de Grupo de Trabalho do Araguaia (GTA), a qual era formado por familiares, pesquisadores, geólogos, geofísicos, legistas, antropólogos, representantes do governo do Pará e representantes do Partido Comunista do Brasil (CORRÊA, 2013).

As expedições realizadas pelo GTT/GTA aconteceram na região entre Xambioá/TO e Marabá/PA, em razão da extensa área e dos diversos registros de inumações dos guerrilheiros as etapas das pesquisas foram divididas em 3 fases diferentes (pré-guerrilha, início da guerrilha e final da guerrilha). Na pesquisa investigaram-se mais de 40 áreas e encontraram-se inúmeras anomalias de GPR, as quais eram escavadas, analisadas e interpretadas pela equipe de campo.

Dentre as diversas áreas investigadas pela equipe, neste trabalho mostram-se apenas três áreas (São Domingos, Bacaba IV e Abóbora) e um pequeno campo teste criado com ossadas bovinas para calibrar o equipamento de GPR em campo, além de uma pequena área de testes na cidade de Brasília (Fazenda Água Limpa da UnB) usada para a inumação de um suíno (FIGURA 65).

Nas investigações das áreas usou-se o método GPR em função da sua eficácia na localização de ossadas humanas. O método GPR consiste na irradiação contínua de ondas eletromagnéticas através de uma antena transmissora; as ondas que se propagam no meio podem sofrer reflexão e/ou difração consequência da diferença de impedância elétrica (ANNAN, 2001). Assim, o sinal refletido é captado pela antena receptora que se encontra na superfície e o tempo de viagem da onda transmitida, refletida e captada é denominado de tempo duplo de trânsito da onda (TWT) medido em nanosegundos (10^{-9} segundos; Figura 66).

FIGURA 65: Imagens de satélite com as localizações das áreas pesquisadas com o GPR. (A) Região do Bico do Papagaio com a indicação de Abóbora 2, São Sebastião e Bacaba IV. (B) Fazenda Água Limpa com a indicação do ponto de inumação de um suíno.

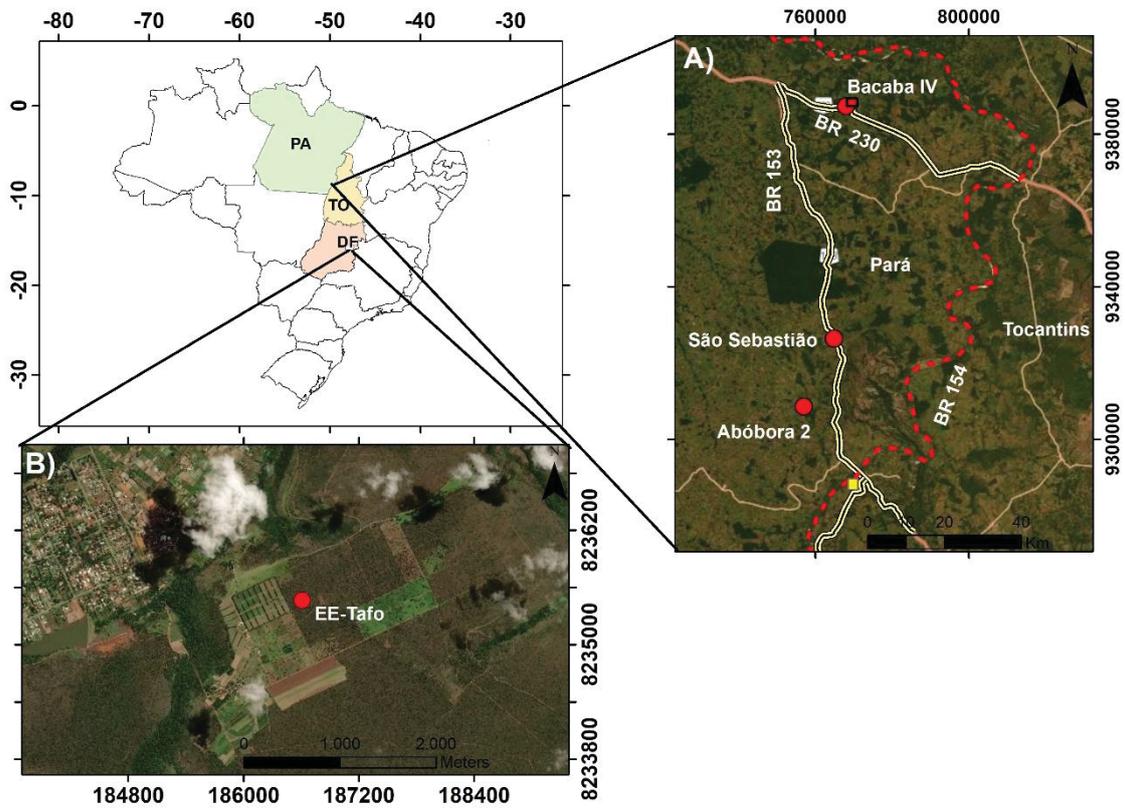
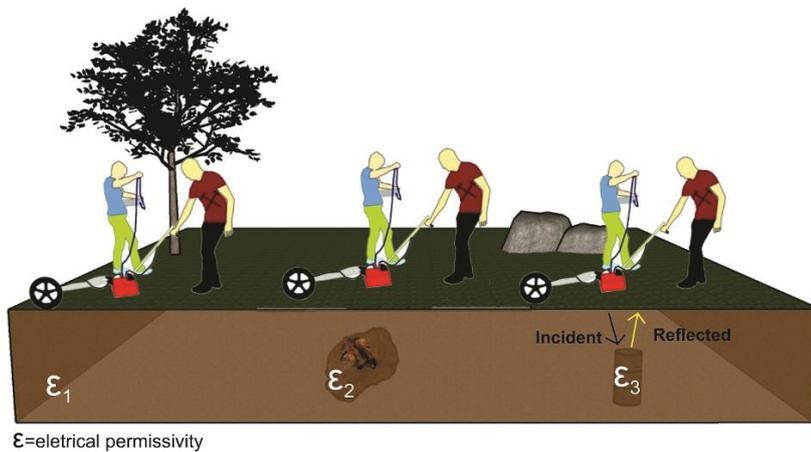
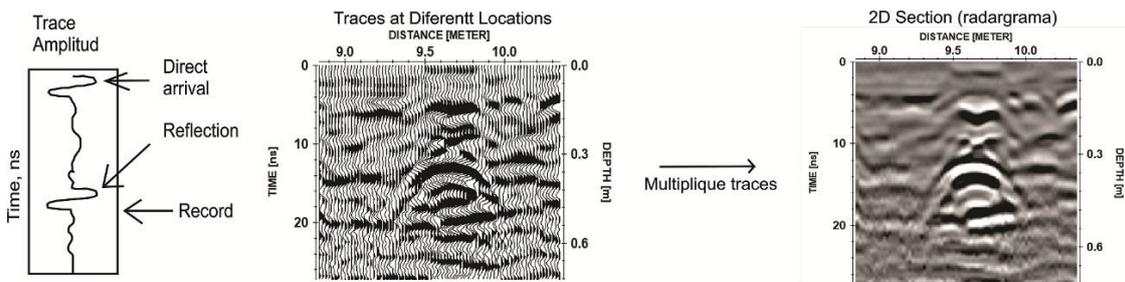


FIGURA 66: Representação esquemática de uma aquisição de dados de GPR com a indicação de um traço de GPR, uma seção no modo wiggle e no modo densidade de cores.



Na aquisição de dados de GPR a equipe do GTT/GTA utilizou o sistema SIR3000 (GSSI) com a antena blindada de 400 MHz. Os registros de traços ocorreram no modo *constant offset* (técnica em que as antenas transmissora e receptora estão espaçadas a uma mesma distância e são movimentadas no mesmo sentido na superfície investigada). Os parâmetros de aquisição aplicados nas áreas investigadas constam na TABELA 6.

TABELA 6: Parâmetros de campo utilizados durante as aquisições de dados de GPR nas áreas de estudo.

Parâmetro	Área			
	Abóbora 2	São Sebastião 2	Bacaba IV	Teste Osada
Espaçamento entre os traços (m)	0,2			0,1
Número de amostras por traços	1024			
Janela temporal (ns)	60	55	100	60
Frequência de amostragem (MHz)	2400			2000
Espaçamento entre os perfis 2D (m)	0,10	0,50	0,10	0,10
Número de Perfis 2D	50	70	100	31

5.4.5 Processamentos

A etapa de processamento corresponde a uma das mais importantes e que normalmente causa controvérsias e dúvidas entre os usuários. Em diversos casos, quando o ambiente é muito dielétrico, a aplicação de um processamento básico possibilita respostas satisfatórias, em outros, quando o meio é condutivo, há necessidade de uso de rotinas avançadas de processamento (CASSIDY, 2009).

Normalmente principais rotinas de processamento aplicadas em dados de GPR são o ajuste do tempo zero, os filtros 1D, os filtros 2D no domínio do tempo, os ganhos, os filtros no domínio FK, e a migração. (ROBINSON et al, 2013; BARONE et al, 2016; CATAPANO et al, 2019).

5.4.5.1 Ajuste do tempo zero

O ajuste do tempo zero é usado com o intuito de controlar a posição vertical da reflexão da superfície do terreno devido a alguns fatores como a variação na diferença da onda aérea e a antena, variações térmicas, diferença do comprimento de cabos e instabilidades eletrônicas. Este procedimento é necessário

devido ao tempo que a onda aérea leva para ir da antena transmissora até a receptora, e que pode ocasionar erros de posicionamento dos artefatos em profundidade. Deste modo, quando há o ajuste de todos os traços, para a posição comum a zero, faz com que os refletores coincidam com a superfície do terreno (CASSIDY, 2009; ROBSON et al. 2013).

5.4.5.2 Filtros 1D

Os filtros 1D têm como principal objetivo realçar as estruturas investigadas e eliminar sinais espúrios (ruídos) que estão vinculados a transientes de frequências muito baixas a muito altas. Entre os filtros temporais 1D destacam-se: *subtract-mean (dewow)*, passa banda (*bandpassfrequency*).

- *Subtract-mean (dewow)* visa corrigir o efeito de saturação da amplitude originado a partir de componentes difusos de baixa frequência e pela decorrência de indução eletromagnética existente entre as antenas transmissora e receptora. Esta energia de baixa frequência produz frequentemente um componente de variação lenta no tempo para os dados de campo medidos (Jol, 2009). Para eliminar este ruído de baixa frequência e preservar o sinal de alta frequência aplica-se o filtro *dewow* que atua em cada traço de forma independente através de um valor médio de execução que é calculado para cada traço e esta média é subtraída do ponto central. A janela de tempo para cálculo do valor médio de execução é definida para cerca de um período principal (Sandmeier, 2006).

$$A'_n(t) = A_n(t) - \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N A_n(t) \quad (31)$$

Onde $A_n(t)$ = dado da amostra não processada, $A'_n(t)$ = dado de amostra processado e n = número de amostra (DANIELS, 2004).

- Passa Banda (*bandpass frequency*) - os filtros de frequências são aplicados com intuito de limpar as frequências espúrias, relacionadas a frequências muito baixas ou altas, permitindo a passagem de

sinais entre duas frequências específicas. O filtro passa banda tipo trapezoidal funciona no domínio da frequência e está baseado na transformada de Fourier (FFT). Este filtro é especificado pelo ajuste de quatro valores de frequência: o primeiro ponto determina a frequência de corte baixo, o segundo ponto (platô) frequência inferior da banda passante, o terceiro ponto frequência superior da banda passante e o quarto ponto corresponde a frequência de corte superior.

5.4.5.3 Filtros espaciais (2D)

Os filtros (2D) espaciais atuam nos dados do radargrama na direção espacial/temporal e quando aplicados eliminam os refletores horizontais. E tendem a adotar filtros de média ou média simples que abrangem um número definido de traços e são normalmente usados para enfatizar ou suprimir características específicas na seção (CASSIDY, 2009). Dentre os mais comuns tem-se o *running average*, *subtracting average* e *background removal*.

- O *running average* aplica uma média de número de traços e como resultado suaviza os dados na horizontal, enfatiza os refletores de superfície plana enquanto suprime os refletores de imersão ou difração. E sua aplicação funciona melhor através de um número relativamente grande de traços na janela do filtro (SANDMEIER, 2006).
- O *subtracting average* realiza uma média de subtração sobre um número de traços selecionável para cada etapa de tempo. O valor médio é subtraído do valor da amostra atual e o resultado é atribuído à amostra atual como um novo valor. A sua eficiência está calcada na escolha de um menor número de traços e como resultado enfatiza as difrações (SANDMEIER, 2016).
- A remoção de fundo (*background removal*) remove sinais de baixa frequência eliminando refletores na horizontal e realçando refletores pontuais e/ou anomalias. Este filtro atua no número escolhido de traços e executa uma subtração de um traçado médio (trace

range) que é construído a partir do intervalo de tempo/distância escolhido no radargrama, ou seja, realiza-se uma média da amplitude dos traços do radargrama, a partir de uma janela definida, e subtrai esta média dos traços originais (SANDMEIER, 2006). As remoções podem ser obtidas pela principal equação (2):

$$A'_{n,a}(t) = A_{n,a}(t) - \frac{1}{Na} \sum_{a=1}^{Na} A_{n,a}(t) \quad (32)$$

Onde $n=1$ para N (números de amostras), $a = 1$ para Na (número de forma de onda A ou B-Scan), $A_{n,a}(t)$ = não processado e $A'_{n,a}(t)$ = processado.

5.4.5.4 Ganhos

As ondas eletromagnéticas são rapidamente atenuadas à medida que se propagam para o solo, assim os sinais em maiores profundidades são mais fracos. Para compensar esta perda de energia aplica-se a função de ganho com variação no tempo (JOL, 2009). Deste modo, nos processamentos de GPR existem diversos tipos de ganho variante no tempo dentre os quais podem ser citados: ganho automático (*automatic gain control - AGC*), decaimento de energia (*energy decay*) e função ganho (*gain function*).

- O ganho automático (*automatic gain control - AGC*) atua em cada traço de forma independente e facilita a criação de amplitudes igualmente distribuídas na direção y (normalmente, eixo de tempo) dentro de uma janela pré-definida. Assim é calculado inicialmente uma amplitude média ao longo do intervalo total de tempo de cada traço, e posteriormente há um dimensionamento de cada valor de amplitude de modo que a amplitude média tenha o mesmo valor para cada janela selecionada em torno do valor atual do traço (Sandmeier, 2016). Quanto menor o tamanho da janela maior a distribuição da amplitude, conforme visto na equação (33):

$$g(t) = \frac{\text{desired rms}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x_i]} \quad (33)$$

Portanto, x_i amplitude do traço e N corresponde ao número de amostra na janela (YILMAZ, 1987).

- O decaimento de energia (*energy decay*) atua de forma independente em cada traço do radargrama. Inicialmente, uma curva de decaimento média é determinada a partir da análise de todos os traços no radargrama. Então, após a aplicação de um filtro mediano a essa curva, cada amostra rastreada é dividida pelo valor da curva de decaimento (SANDMEIER, 2006).
- O ganho de função (*gain function*) atua em cada traço de forma independente no radargrama. Este ganho possibilita multiplicar os pontos dos dados por uma determinada função $g(t)$ que consiste de uma parte linear e exponencial, conforme a equação (34):

$$g(t) = (1 + a * t) * e^{(b * t)} \quad (34)$$

Deste modo, $a = a' / \text{largura de pulso}$ e $b = b' * v / 8,69$ com $v = 0,1 \text{ m / ns}$. Os dois parâmetros de filtro a' (ganho linear) e b' (expoente) devem ser inseridos.

5.4.5.5 Filtro FK (Frequency-wavenumber)

Este filtro atua sobre a área de dados escolhida. O filtro fk permite aplicar um filtro bidimensional definido dentro do domínio de número de ondas de frequência a uma faixa de dados selecionada no *fk-spectrum*, que resulta na reconstituição total do campo das ondas eletromagnéticas. Como resultado ocorre a supressão de ruídos inclinados e os horizontais relacionados a reverberação podem ser suprimidos ao extrair o número de onda zero (SANDMEIER, 2006).

5.4.5.6 Migração

A etapa de migração possibilita corrigir espacialmente os refletores distorcidos ou hiperbólicos, originados do tempo de viagem percorrido pela onda eletromagnética do transmissor até o receptor. Deste modo, a energia é focada para

pontos de origem movendo os refletores para posições corretas encontradas em subsuperfície. Dentre as migrações que serão aplicadas ao longo da pesquisa destaca-se a *diffraction stack*, *Kirchoff migration* e *Stolt*.

- A *Diffraction stack* definida como migração de tempo simples resultando em um empilhamento de difração, que está condicionada a uma velocidade constante extraída de um perfil de radargrama 2D. Esta migração é realizada nas direções x-t, a partir de uma soma não ponderada para cada ponto da hipérbole que é calculada a partir da largura da banda (número de traços) definida.
- A migração Stolt se assemelha ao método Kirchoff, contudo a diferença ocorre pela implantação da transformada de Fourier no algoritmo (Stolt, 1978). Quando se aplica uma velocidade média constante, ocorre a conversão da frequência temporal (ω) para número de onda vertical (k_z), equação (35). A Stolt é demonstrada pela equação (36):

$$k_z = \pm \sqrt{\frac{\omega^2}{v^2} - k_x^2} \quad (35)$$

$$P(k_x, k_z, t = 0) = \left[\frac{v}{2} \frac{k_z}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right] P \left[k_x, 0, \omega = \frac{v}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2} \right] \quad (36)$$

Onde $P(k_x, z = 0, \omega)$ é o zero-offset da seção e $P(k_x, k_z, t = 0)$ corresponde a seção migrada para o domínio frequência do número de onda.

5.5 MODELAGEM NUMÉRICA

Ainda que a experiência do GPR propicie informações pertinentes do local investigado, diversos são os materiais em subsuperfície que podem causar uma falsa anomalia como a presença de blocos de rochas, raízes, buracos de pequenos animais, restos de madeiras (raízes e troncos), lixo doméstico e estruturas

antrópicas. Assim, a aplicação de rotinas adequadas de processamentos, em conjunto com a análise de amplitude hiperbólica das anomalias, pode corroborar com a distinção dos objetos em subsuperfície.

As modelagens numéricas bidimensionais buscam simular as respostas dos dados reais, auxiliando na interpretação dos resultados e na determinação dos parâmetros para uma aquisição otimizada. A modelagem 2D de dados de GPR foi realizada através do Método da Diferenças do Domínio do Tempo – FDTD, para maiores informações sobre FDTD visualizar os seguintes autores (YEE, 1966; TAFLOVE & HAGNESS, 1990; SANDMEIER, 2006).

Os modelos sintéticos foram construídos no software ReflexW 8.22 (SANDMEIER, 2006), com a intenção de simular uma aquisição de GPR *zero-offset* adquirida por meio de uma antena de frequência de 400MHz, com intervalos de amostragem espacial (Δx) de 0,02m e temporal (Δt) de 0,033 ns. O campo de onda aplicado foi gerado a partir da onda plana e com a polarização das antenas no modo TE, que corresponde a posição das antenas paralelas e perpendiculares ao perfil de aquisição.

O estudo sintético foi construído para simular e ilustrar alvos pontuais (raiz, seixos, osso, metal, plástico e vazio) que estão locados em solos arenoso, siltoso e argiloso, que são os solos mais comuns de serem encontrados em investigação forense. Para construção do modelo sintético utilizou-se uma média dos valores das propriedades físicas dos materiais (TABELA 7).

TABELA 7: Propriedades físicas, dos principais materiais identificados em áreas forenses, usadas nas simulações numéricas de GPR .

Componentes do modelo	ϵ_r	μ	σ (S/m)
Solo arenoso	5-10	1	0,000014
Solo siltoso	4-8		0,0001-0,001
Solo argiloso*	18		0,01-1
Raiz	2-5		<0,1
Seixo	4-6		0,00001-0,001
Ossos	10-13		0,2-0,1
Metal	300		99
Plástico	3-3,4		0

Ar	1		0
----	---	--	---

FONTE: Adaptado de ANNAN, 1992; ZENG & MCmechan, 1997; DANIELS, 2004; LECKEBUSCH, 2006.

Nos resultados dos radargramas sintéticos as detecções dos alvos pontuais estão assinaladas através do ápice das reflexões hiperbólicas de difração (Figura 67). Nesses distintos modelos pode-se observar uma variação e uma similaridade visual na amplitude de sinal, uma diferença no tamanho e abertura das hipérbolas e o tempo de detecção dos alvos. Desse modo, em um ambiente resistivo nota-se que as amplitudes de sinais, a abertura e o tamanho das hipérbolas são maiores do que em ambientes condutivos. Contudo, ao realizar uma análise individual de cada modelo observa-se que determinados alvos possuem uma semelhança visual nas amplitudes de sinais, que como consequência podem resultar em interpretações equivocadas no momento da investigação.

Ao analisar os traços centrais de cada alvo (Figura 68), observa-se que há similaridade do sinal de amplitude em quase todos os alvos e que as maiores amplitudes estão relacionadas ao ambiente arenoso. A variação da amplitude que ocorre entre os alvos está assinalada pelo contraste de impedância existente entre o meio pedológico e os materiais, quando há um alto contraste resulta em amplitudes maiores como o exemplo do metal.

FIGURA 67(A) Modelo físico usado para construção das simulações numéricas de objetos que normalmente podem ser encontrados em uma investigação forense. Respostas sintéticas dos alvos instalados em distintos ambientes: arenoso (b), siltooso (c) e argiloso (d).

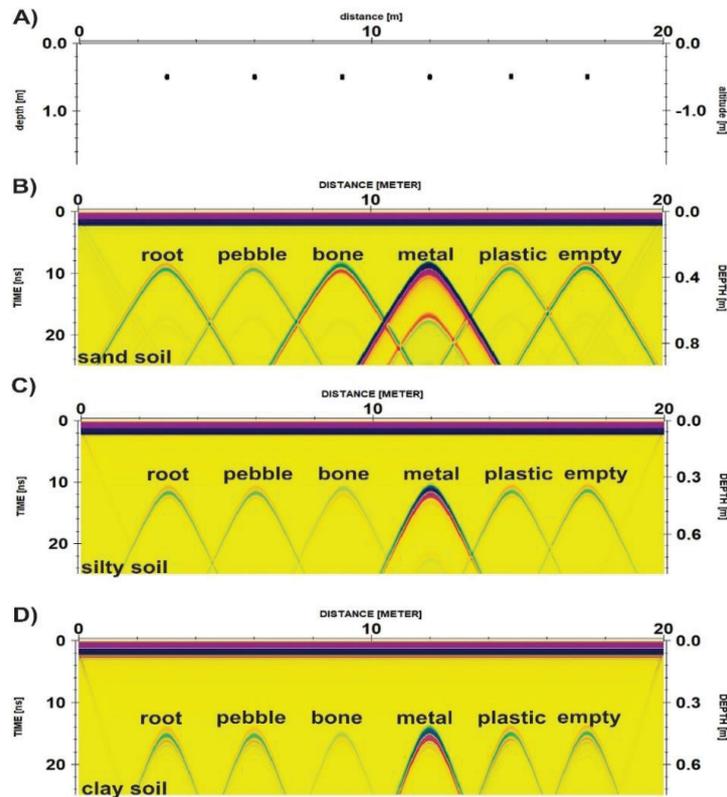
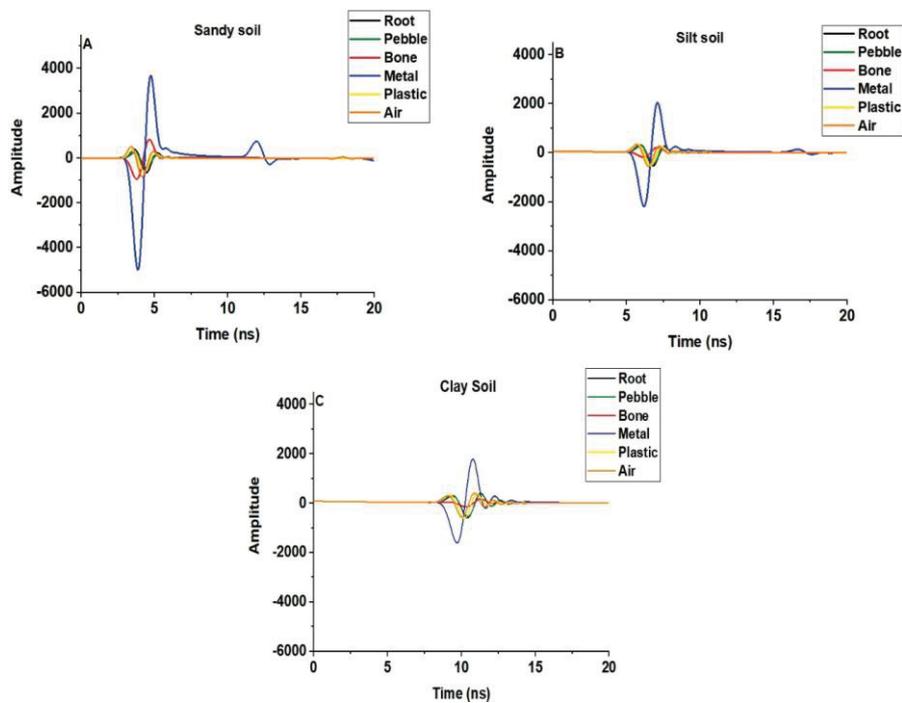


FIGURA 68: Traços referentes ao ápice das hipérbolas simuladas para os alvos enterrados em solo arenoso (A), siltoso (B) e argiloso (C).



Para ilustrar e calcular a variação de amplitude existente de determinado alvo, quando alocado em um diferente tipo de solo, aplicou-se o envelope¹ nos traços dos alvos que transformam as amplitudes verdadeiras (positivo e negativo) em apenas uma fase de amplitude (positiva) (Figura 68). Pelos gráficos de amplitude de cada alvo percebe-se com eficácia a variação de amplitude existente entre cada um desses alvos, normalmente a tendência de valores altos de amplitudes está relacionada ao solo arenoso. A exceção está exibida nos gráficos 69b e 69e que apresentam valores altos de amplitudes associados ao solo argiloso, consequência do alto contraste de impedância entre o meio pedológico e os objetos presentes (seixos e plástico).

A Tabela 8 exhibe os dados quantitativos da variação da amplitude de sinal dos materiais nos três tipos de solos, conforme os resultados exibidos pela tabela os objetos possuem uma tendência de amplitude muito similar mesmo em solo diferente. A variação brusca do osso em um solo arenoso em relação ao solo argiloso e siltoso é justificado pelo alto contraste de impedância.

¹ O envelope traço é calculado a partir da transformada de Hilbert, sendo uma medida da intensidade da refletividade, que é proporcional à raiz quadrada da energia completa do sinal em um determinado instante do tempo. O envelope permite uma avaliação da distribuição da energia ao longo do traço e auxilia na determinação do início do refletor (Borges, 2007; Sandmeier, 2006).

FIGURA 69: Comparação das variações máximas de amplitudes dos envelopes dos traços de cada alvo instalado em ambientes arenosos, siltosos e argilosos. Respostas de raízes (A), seixos (B), ossos (C), metais (D), plásticos (E) e vazios (F).

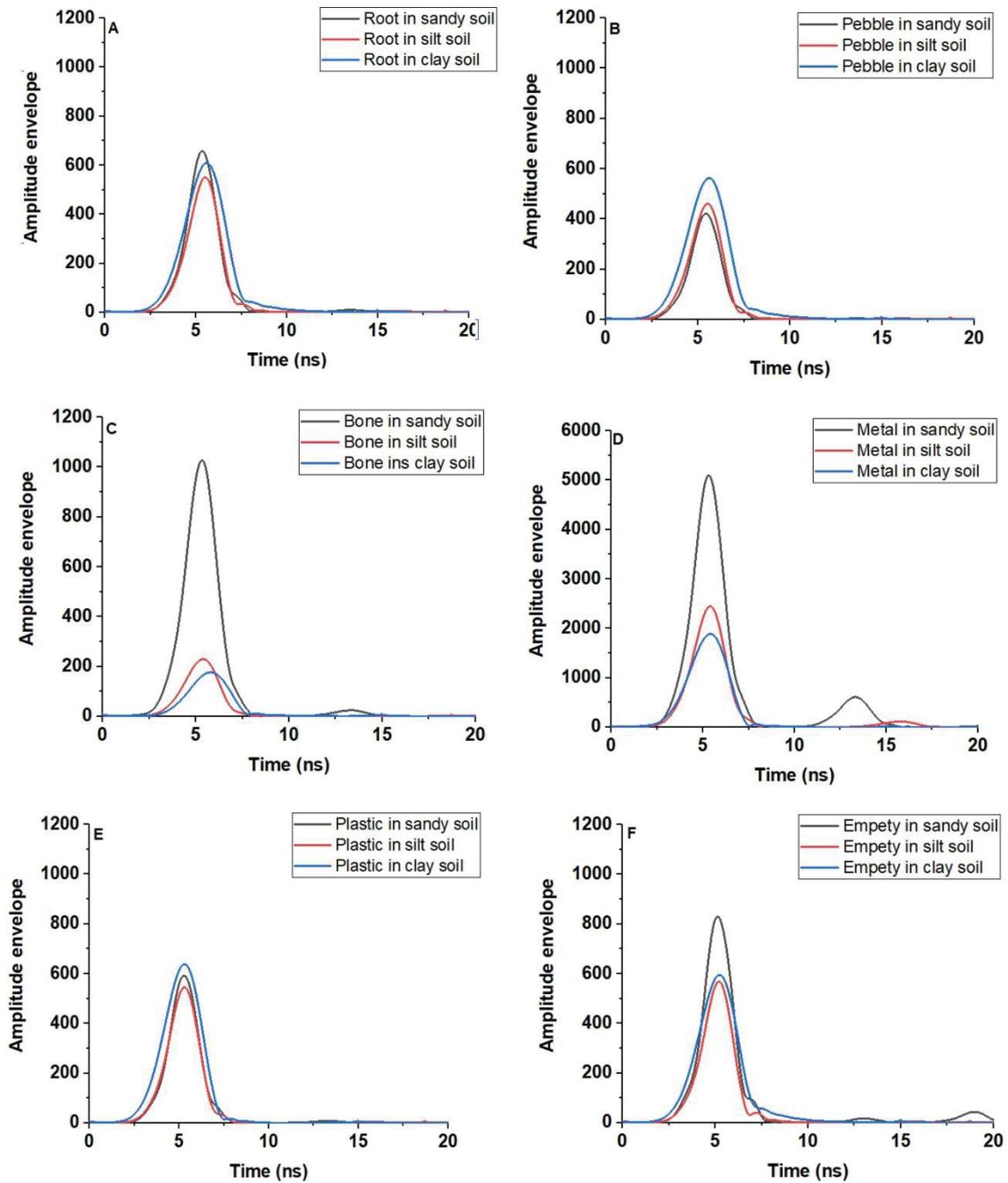


Tabela 8: Exibição das amplitudes de sinais de cada material e a sua variação entre os solos.

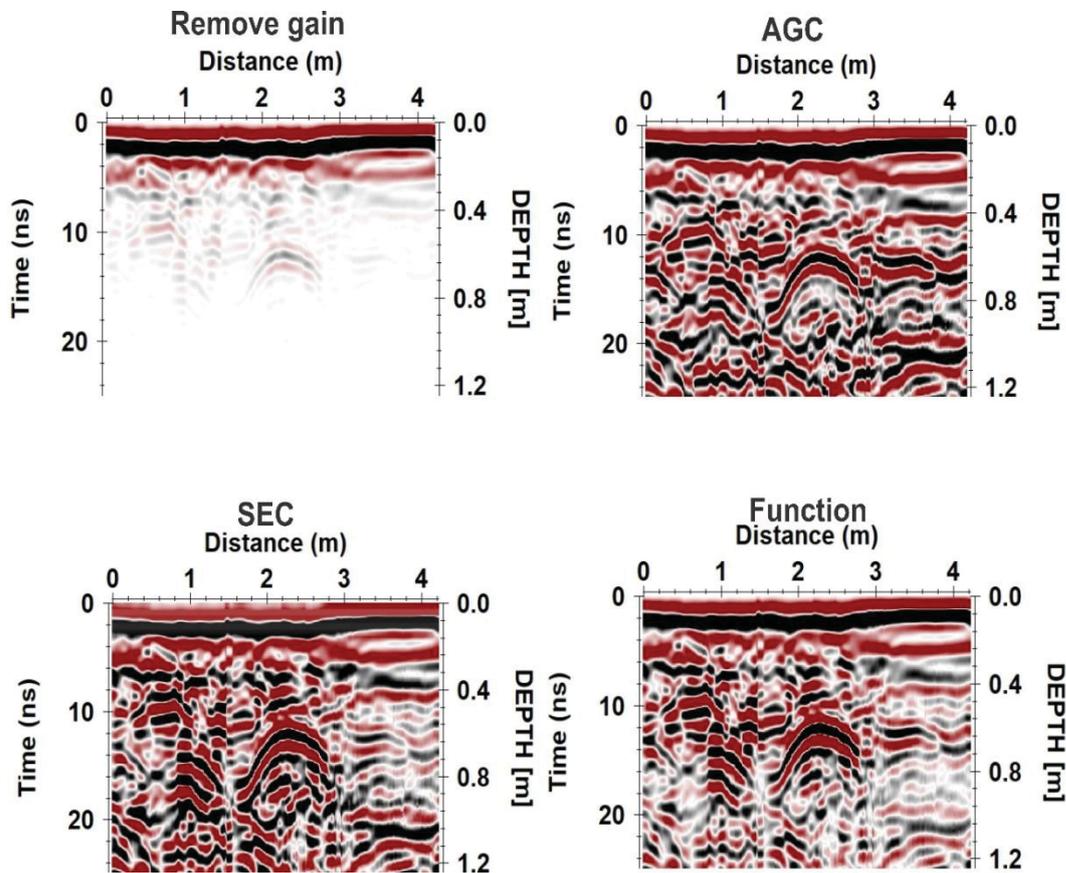
Alvos	Amplitude em solo arenoso	Amplitude em solo silteoso	Amplitude em solo argiloso	Varição máxima de Amplitude entre os tipos de solo
Raiz	658	550	609	108
Seixos	421	460	552	131
Osso	1027	229	175	852
Metal	5052	2440	1886	3166
Plástico	589	545	638	93
Vazio	829	568	594	261

5.6 DEFINIÇÃO DA ROTINA DE PROCESSAMENTO

Para averiguar uma rotina adequada de processamento 2D e 3D utilizou-se dados relacionados às investigações de cunho forense, cujo os quais foram adquiridos sobre um sepultamento de um suíno em um latossolo e em ossadas bovinas instaladas em um solo areno argiloso. A escolha desses dados se deve a duas respostas geofísicas assiduamente examinadas nas buscas por ocultação de cadáveres: a interrupção de refletores associados a escavações/perturbações no solo e a visualização de hipérboles de difração que podem estar associadas à ossos.

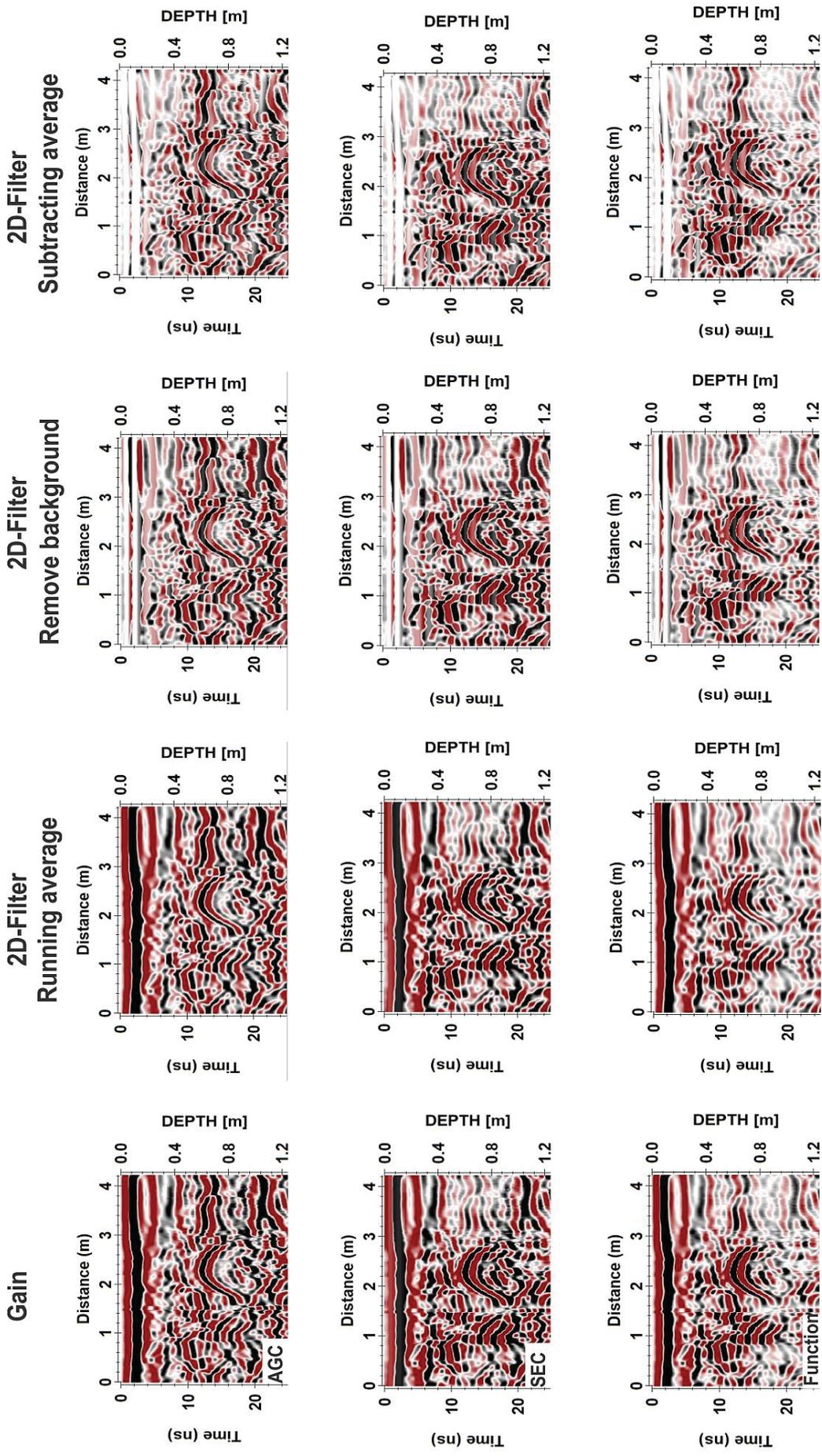
Partiu-se da premissa que a escolha da aplicação do ganho (AGC, decaimento de energia e funcional) em uma rotina de processamento é fundamental para discriminar a anomalia hiperbólica em relação ao meio investigado (Figura 70). Quando se aplica o AGC os refletores são amplificados e equalizados constantemente, embora a região de interesse seja visível, ainda assim torna-se difícil discriminar visualmente a anomalia hiperbólica dos refletores adjacentes. O efeito da aplicação do ganho SEC tem como resposta uma amplificação dos refletores não contínua ilustrando possíveis contrastes de materiais do meio investigado, conforme visto na posição de 3-4m. Por fim, o ganho função corresponde a uma associação de ganhos linear e exponencial (aplicação de 1,5 e 4, respectivamente), como resposta observa-se uma diferenciação na amplificação dos refletores adjacentes e inferiores a hipérbole de difração, possibilitando uma otimização da hipérbole e da escavação realizada para o sepultamento.

FIGURA 70: Radargrama obtido na área de inumação de um suíno na Fazenda Água Limpa da UnB, com distintas aplicações de ganhos (AGC, SEC e Function).



Após visualizar as respostas obtidas com os ganhos, foi verificado os resultados da aplicação dos filtros 2D (*running average*, *subtracting average* e *background remove*), que teve como intuito a remoção dos refletores horizontais relacionada a primeira chegada da onda e remoção de ruídos de fundo. O *running average* possibilitou uma suavização dos refletores e da hipérbole de difração (suíno), entretanto não foi possível remover os refletores horizontais. Enquanto que os filtros remoção de *background* e *subtracting average* subtraíram com mais eficácia os refletores horizontais e ruídos de fundo que poderiam estar mascarando outros refletores, como os que podem ser observados nos primeiros 10 ns (FIGURA 71).

FIGURA 71: Resultados da aplicação de distintos ganhos e filtros 2D (*running average, remove background, remove background e subtracting average*).



Após esta etapa de procedimento, aplicou-se filtro 1D (*bandpass frequency*) para restringir as frequências desejadas possibilitando uma melhor visualização do radargrama. Para definir a escolha do intervalo de frequência aplicada utilizou-se a região simétrica ao intervalo correspondente ao maior pico de frequência registrada.

A aplicação do filtro 1D após o *running average* apenas suavizou os refletores, não possibilitando uma visualização dos refletores nos primeiros 5 ns (escavação) que estão sendo mascarados pelas reflexões horizontais (FIGURA 72a). Em contrapartida, a aplicação do *bandpass frequency* posterior aos filtros 2D (*subtracting average* e *remove background*), além de suavizar os refletores possibilitou a visualização do sepultamento representado por refletores interrompidos observados na posição de 1,5m e 2,8m no radargrama (FIGURAS 72b e 72c).

A aplicação do filtro FK possibilitou uma eliminação de ruídos que persistiram ao longo da rotina de processamento, após a sua aplicação, a hipérbole de difração tornou-se mais delineada eliminando pequenos ruídos. Os filtros que possibilitaram enfatizar os refletores associados ao sepultamento e a anomalia relacionada ao alvo estão ilustrados na FIGURA 73.

FIGURA 72: Ilustração dos resultados obtidos após a aplicação do filtro 1D (*bandpass frequency*), posteriormente a aplicação dos filtros 2D (*running average*, *subtracting average*, *remove background*).

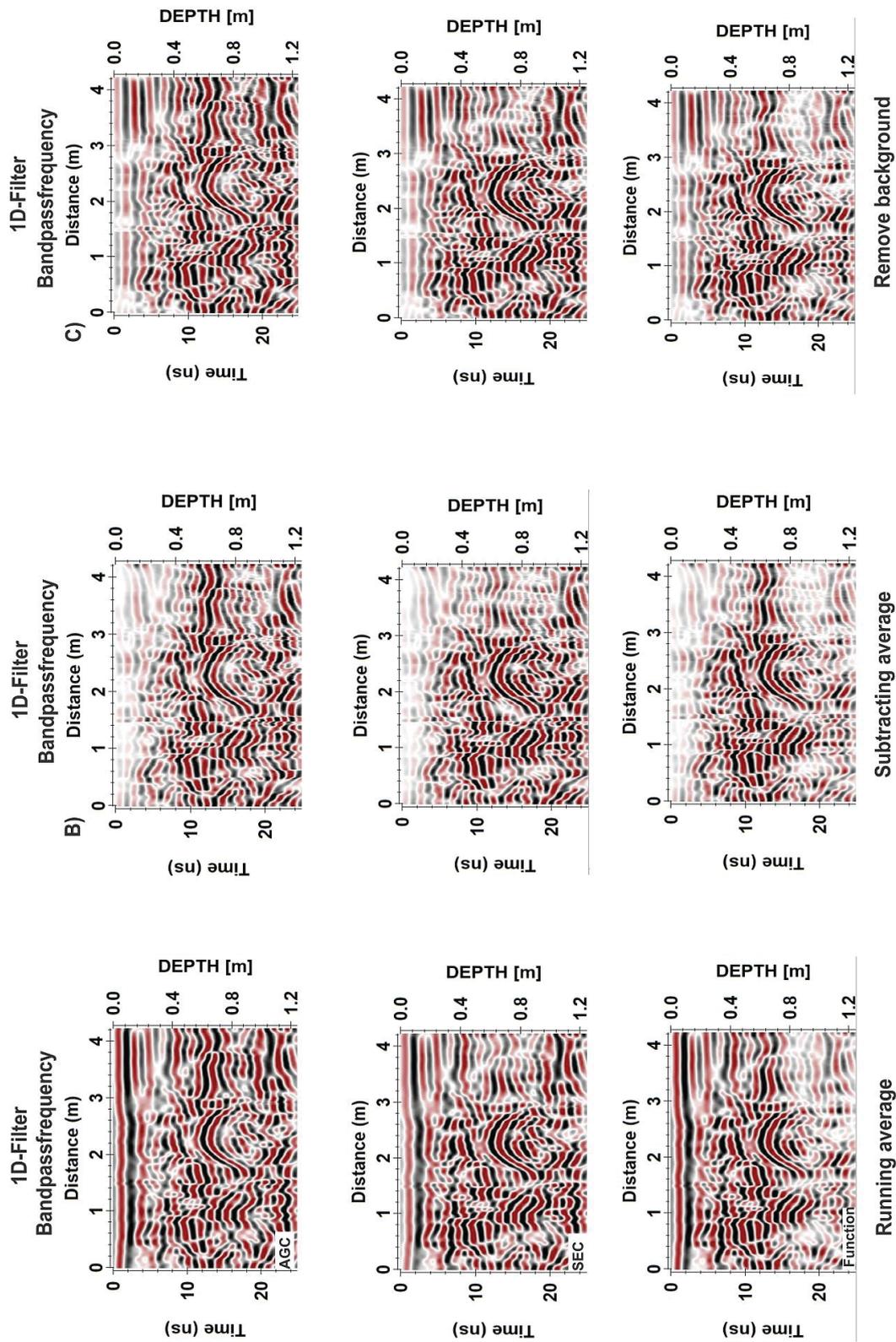
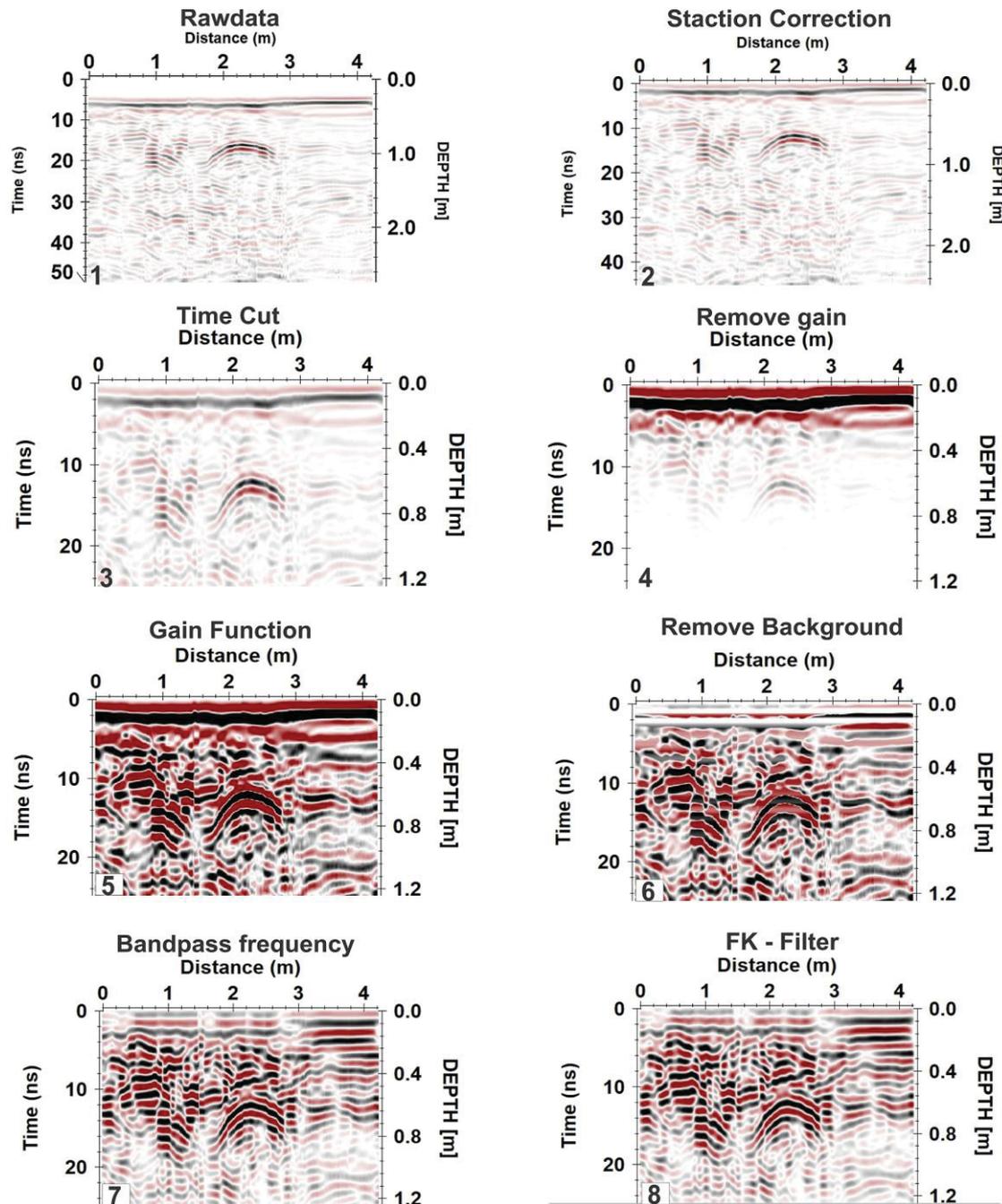


FIGURA 73: Sugestão de uma rotina de processamento 2D (1-8) para investigações forenses.

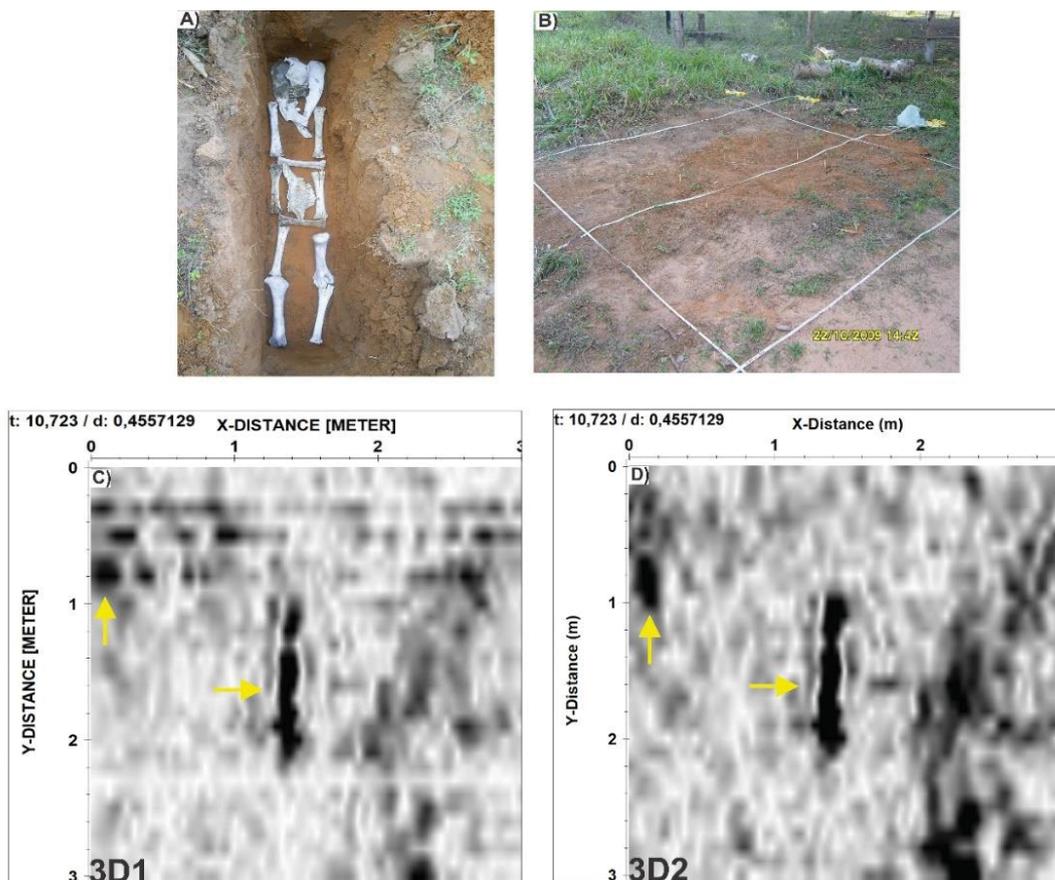


Após a definição da melhor rotina de processamento 2D verificou-se a rotina de processamento 3D em um dado adquirido sobre ossadas de bovino, FIGURAS 74a e 74b. Este processamento ocorreu de duas maneiras distintas: na primeira etapa foi realizado o processamento 2D e posteriormente foi gerado um modelo 3D a partir dos dados 2D processados (3D1) e na segunda etapa criou-se um modelo 3D a partir de dados 2D (brutos) e foi processado este conjunto 3D no modo 2D, denominada de 3D2. Outro fator levado em consideração

foram os efeitos causados após a migração destes dados, no qual aplicou-se migrações 2D e 3D *diffraction* e *FK-Stolt*.

Os resultados analisados por meio do *depth slice*, extraído do volume 3D na profundidade de 0,45m proporciona verificar espacialmente e geometricamente a zona anômala de interesse ao longo do tempo, os dados foram migrados (*FK-Stolt*). Ao analisar as duas rotinas de processamentos (3D1 e 3D2) observa-se a no *depth slice* (3D1) demonstrou alguns ruídos aleatórios paralelo ao longo do tempo que não foram suprimidos pela rotina, além de diminuir o foco da dispersão da energia da onda eletromagnética relacionado a zona anômala, FIGURA 74c. Em contrapartida, o resultado obtido no *depth slice* (3D2) removeu os ruídos aleatórios, houve um maior foco da energia otimizando a zona anômala, FIGURA 74d.

FIGURA 74: a) Foto da instalação de ossos bovinos (GTT,2009); b) Área de aquisição dos dados de GPR; c) *Depth Slice* processamento 3D1; d) *Depth slice* através do processamento 3D2.



O desempenho qualitativo das migrações *diffraction stack* e *FK-Stolt* (2D e 3D) aplicadas na etapa de processamento 3D2 podem ser verificados pelos *depth slice* das FIGURAS 75a, 75b, 75c e 75d. Quando se compara os resultados finais observa-se que a aplicação de uma migração *FK-Stolt* 3D resulta em uma otimização e em um maior delineamento geométrico da zona anômala central (alta amplitude de sinal) e também apresenta uma diminuição de ruídos aleatórios associados ao meio investigado, FIGURA 75d.

A aplicação de migração 3D resulta em refletores mais lineares e menos espessos e com um foco de energia maior do que nas migrações 2D, figuras 75g e 75h. Por fim, a migração *diffraction stack* quando aplicada propicia refletores mais lineares, com um maior foco de energia e espessura, além de deixar mais concêntrico o ponto de colapso da hipérbole de difração em relação a migração *FK-Stolt*, figuras 75e e 75f. Entretanto, a aplicação da migração *diffraction stack* resultam em um *depth slice* com ruídos aleatórios mais dispersos, o que pode colaborar com falsas anomalias. rotinas 2D e 3D possibilitaram

A aplicação de diferentes filtros e ganhos possibilitou verificar a rotina de processamento que melhor otimiza os alvos forenses 2D e 3D nas áreas de estudo, FIGURA 76.

FIGURA 75: Ilustração dos resultados obtidos pelas migrações 2D e 3D para anomalia: Resultados apresentados através do *depth slice* e do radargrama após a migração (A-B; E-F); Resultados ilustrados através do *depth slice* e do radargrama após a migração 3D (C-D; G-H)

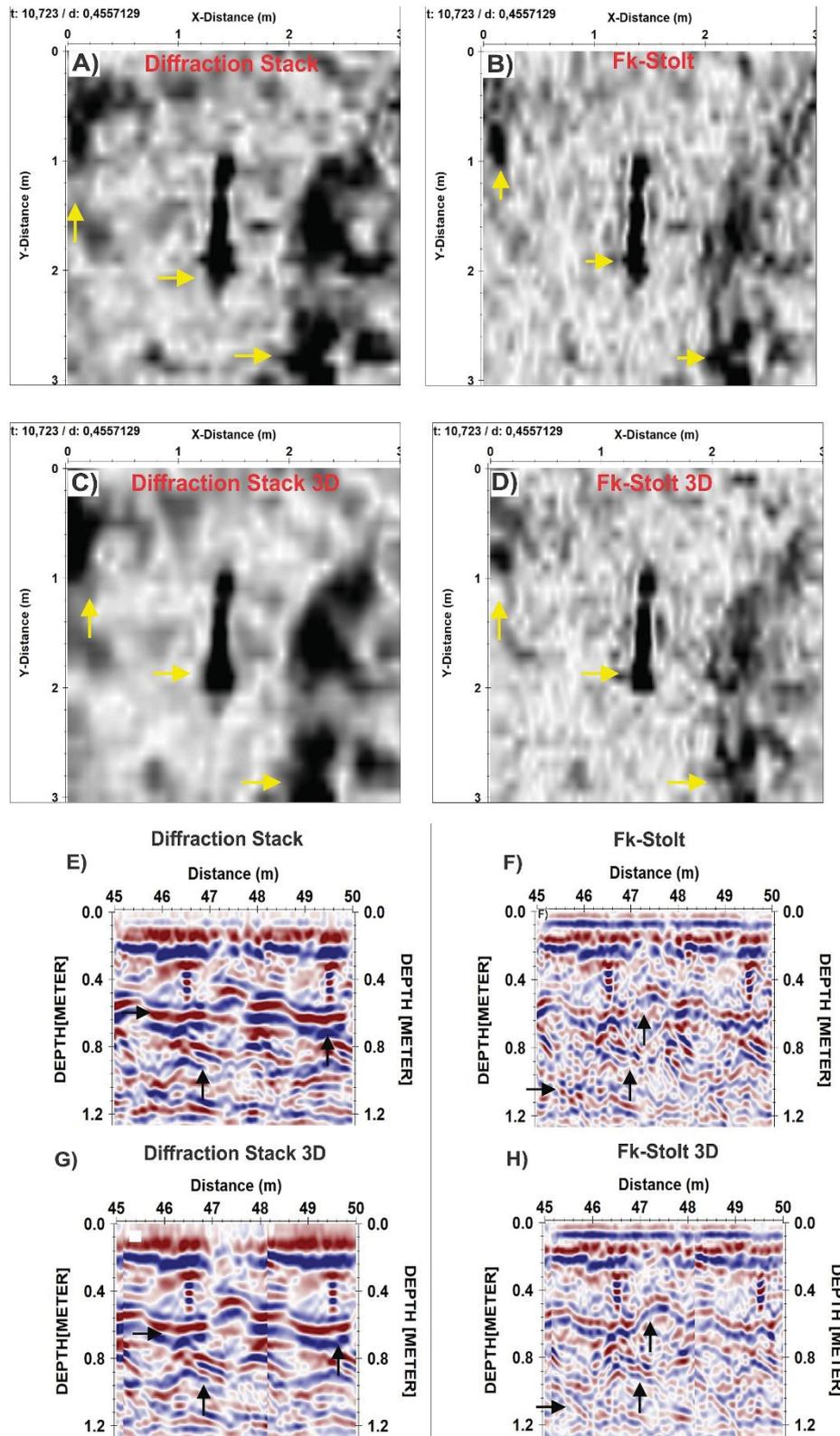
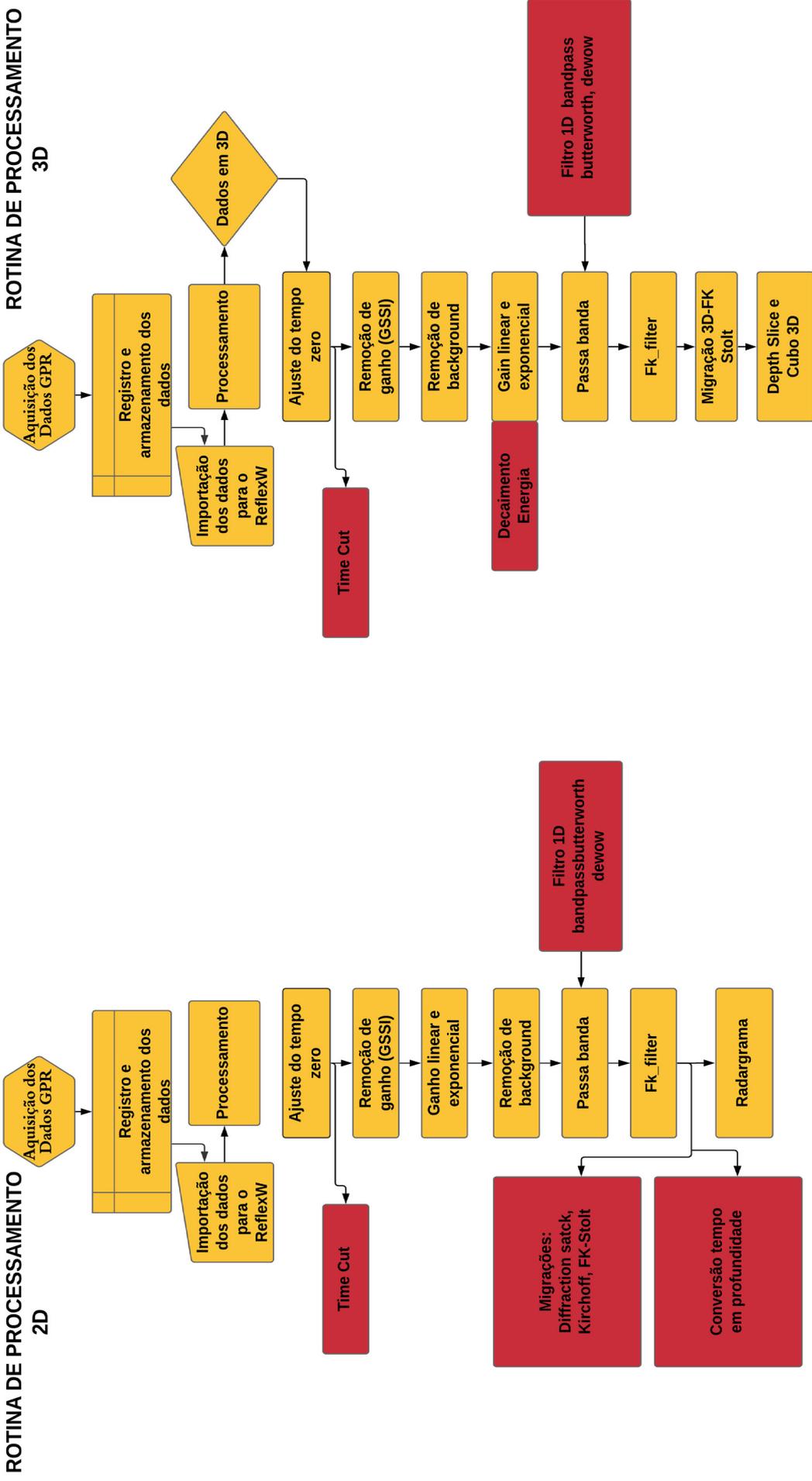


FIGURA 76: Sugestão de uma rotina de processamento para otimizar dados forenses 2D e 3D.



5.7 APLICAÇÃO DA ROTINA DE PROCESSAMENTO

Para verificar a eficiência da rotina de processamento elaborada na pesquisa replicou-a sobre os dados adquiridos em três áreas distintas: A área Abóbora 2 (esqueleto), São Sebastião2 (rocha, raiz) e Bacaba IV. As quais foram selecionadas para comparar os resultados obtidos através do processamento realizado pela equipe do GTA/GTT e pela sugestão de rotinas de processamentos 2D e 3D elaborada na pesquisa. A seleção dessas áreas ocorreu em decorrência dos materiais identificados que se assemelham aos aplicados na modelagem numérica.

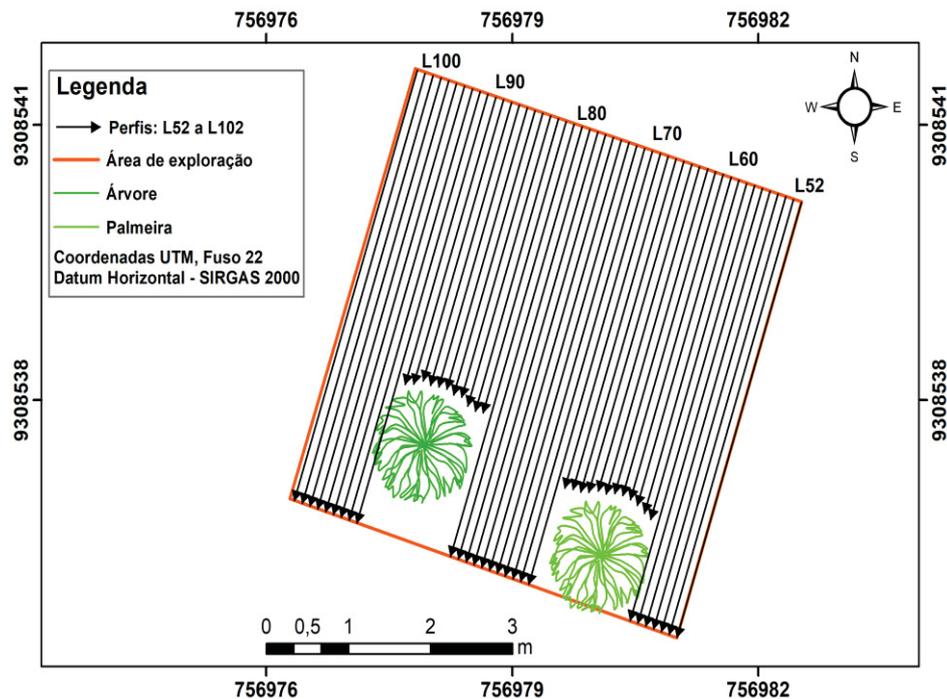
O grupo GTT como forma de padronizar a rotina de processamento aplicou as seguintes etapas: conversão de formato do arquivo, ajuste do tempo zero, filtros temporais (*dewow* e passa-banda), ganho (decaimento de energia), migração no domínio do tempo (*fk migration – Stolt*) e conversão de tempo em profundidade (GTT/GTA, 2009).

Os resultados de GPR foram analisados através de seções 2D individuais, bem como através de cortes em profundidade (*depth slices*) efetuados no conjunto 3D dos dados, produzindo diversos mapas de amplitude do sinal (GTT,2009).

5.7.1 Área Abóbora 2

Na Abóbora 2 foram observados restos de cruces de madeira e indícios na superfície (depressão) que são vestígios interpretados como indicadores da existência de sepulturas no local (ANDRADE et al., 2012). A área investigada possui uma extensão de 5 m x 5 m e neste local foram adquiridos perfis 2D com direção NE-SW equiespaçados em 0,10 m, que totalizaram 50 seções 2D (FIGURA 77). Os parâmetros de campo utilizados foram: espaçamento entre os traços de 0,02 metro, 1024 amostras por traço, janela temporal de 90 ns e a frequência de amostragem de 2400 MHz.

FIGURA 77: Mapa de localização das seções de GPR adquiridas na área Abóbora 2

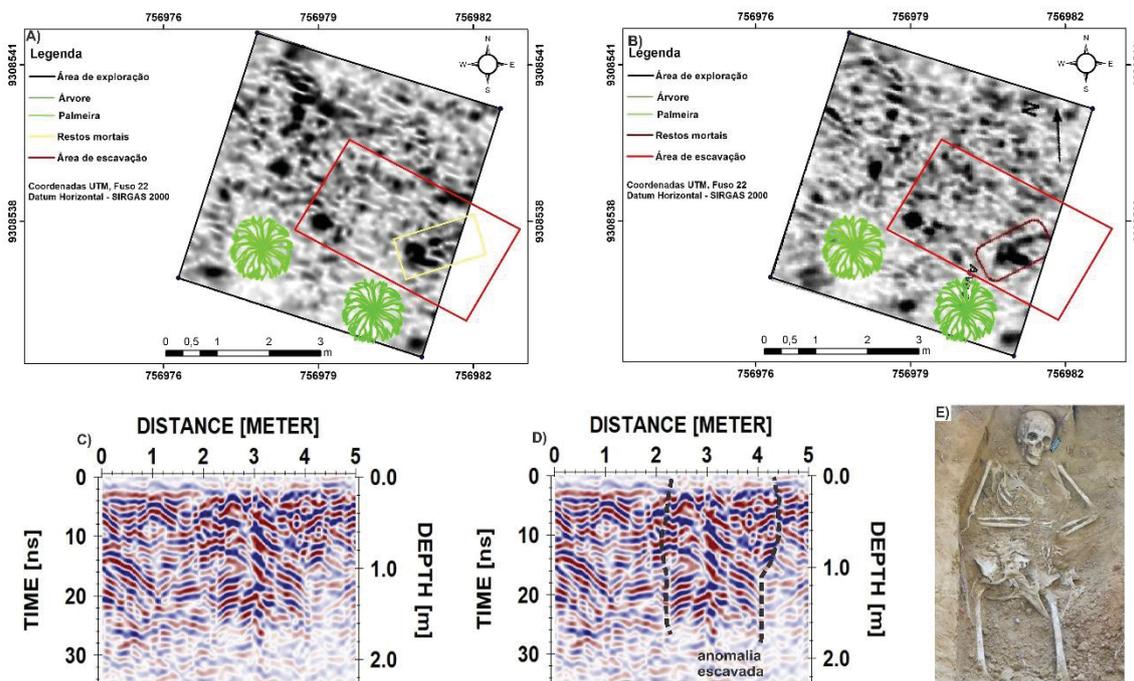


FONTE: modificado GTT (2009).

Os resultados obtidos pela rotina de processamento são ilustrados através da anomalia 2D e do *depth slice*. A figura 78a e 78b evidenciam o corte na profundidade de 1,10 m obtidos pela rotina de processamento sugerida na pesquisa e através da rotina aplicada pelo GTT, respectivamente.

A rotina de processamento aplicada propiciou um aprimoramento na zona anômala de alta amplitude tornando mais retilíneas as bordas internas da feição, considerando que nesse caso não se utilizou de interpolação dos dados ao contrário do resultado da zona anômala vista na FIGURA 78b. A anomalia caracterizada por refletores descontínuos e áreas cheias de difratores é alusiva a perturbação no solo que evidencia uma possível inumação (FIGURAS 78c e 78d), e durante a escavação foi encontrada uma cavitação logo acima da ossada que foi identificada pelos resultados diretos e indiretos, FIGURA 78e.

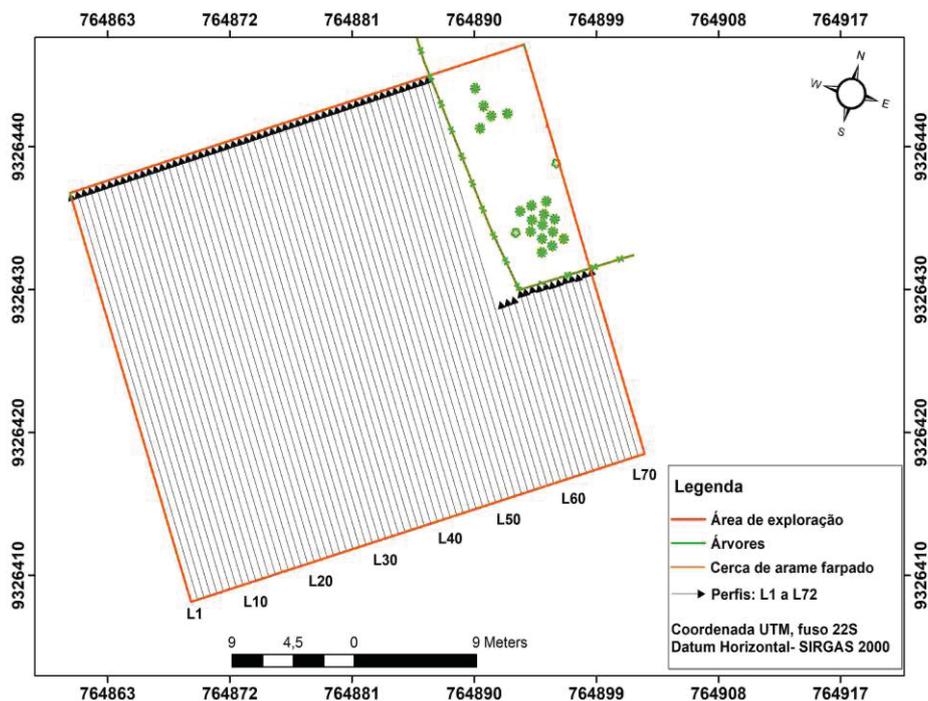
FIGURA 78: Comparação entre os resultados da rotina de processamentos: Depth Slice final elaborado pela rotina de processamento (A); Depth Slice final elaborado pela rotina de processamento do GTA/GGTT (B); Anomalia relacionada a escavação (C-D); Alvo encontrado na escavação (E).



5.7.2 Área São Sebastião

Na Fazenda São Sebastião, no município de São Domingos do Araguaia, no local a área explorada possui uma extensão de 30 m x 35 m, na qual foram adquiridos perfis 2D com direção SE-NW equipaçados em 0,50 m, totalizando 70 seções 2D (FIGURA 79). Os parâmetros de campo utilizados foram: espaçamento entre os traços de 0,02 metro, 1024 amostras por traço, janela temporal de 55 ns e a frequência de amostragem de 2400 MHz.

FIGURA 79: Mapa de localização das seções de GPR adquiridas na área da Fazenda São Sebastião 2.



FONTE: modificado GTT, 2009.

Na análise local dos dados resultados 2D e 3D a equipe do GTT evidenciou quatro zonas anômalas que aparentam corresponder a possíveis inumações. Preferiu escolher duas anomalias designadas de anomalia 2.2 (rocha) e anomalia 2.3 (mourão), que caracterizam as respostas geofísicas esperadas na investigação: um refletor hiperbólico de difração com forte sinal de amplitude e, além disso, a interrupção de refletores contínuos que indicam alterações na estrutura dos solos alusivos às escavações.

A aplicação da rotina de processamento propiciou que as zonas anômalas pontuais existentes no *depth slice* evidenciou uma otimização na geometria do alvo e sua visualização entre a anomalia de alta amplitude com o meio investigado de média a baixa amplitude, verificar as FIGURAS 80a e 80b (anomalia 2.2) e FIGURAS 81a e 81b (anomalia 2.3). Nos resultados 2D a hipérbole de difração tornou-se mais delineada se que as hipérboles de difração se tornaram mais delineadas e a discriminou com o meio investigado, além de evidenciar com mais precisão os refletores iniciais, conforme figuras 80c e 80d (anomalia 2.2) e FIGURAS 81c e 81d (anomalia 2.3).

FIGURA 80: Comparação entre os resultados da rotina de processamentos: Depth Slice final elaborado pela rotina de processamento (A); Depth Slice final elaborado pela rotina de processamento do GTA/GGTT (B); Anomalia relacionada a escavação (C-D); Alvo encontrado na escavação (E).

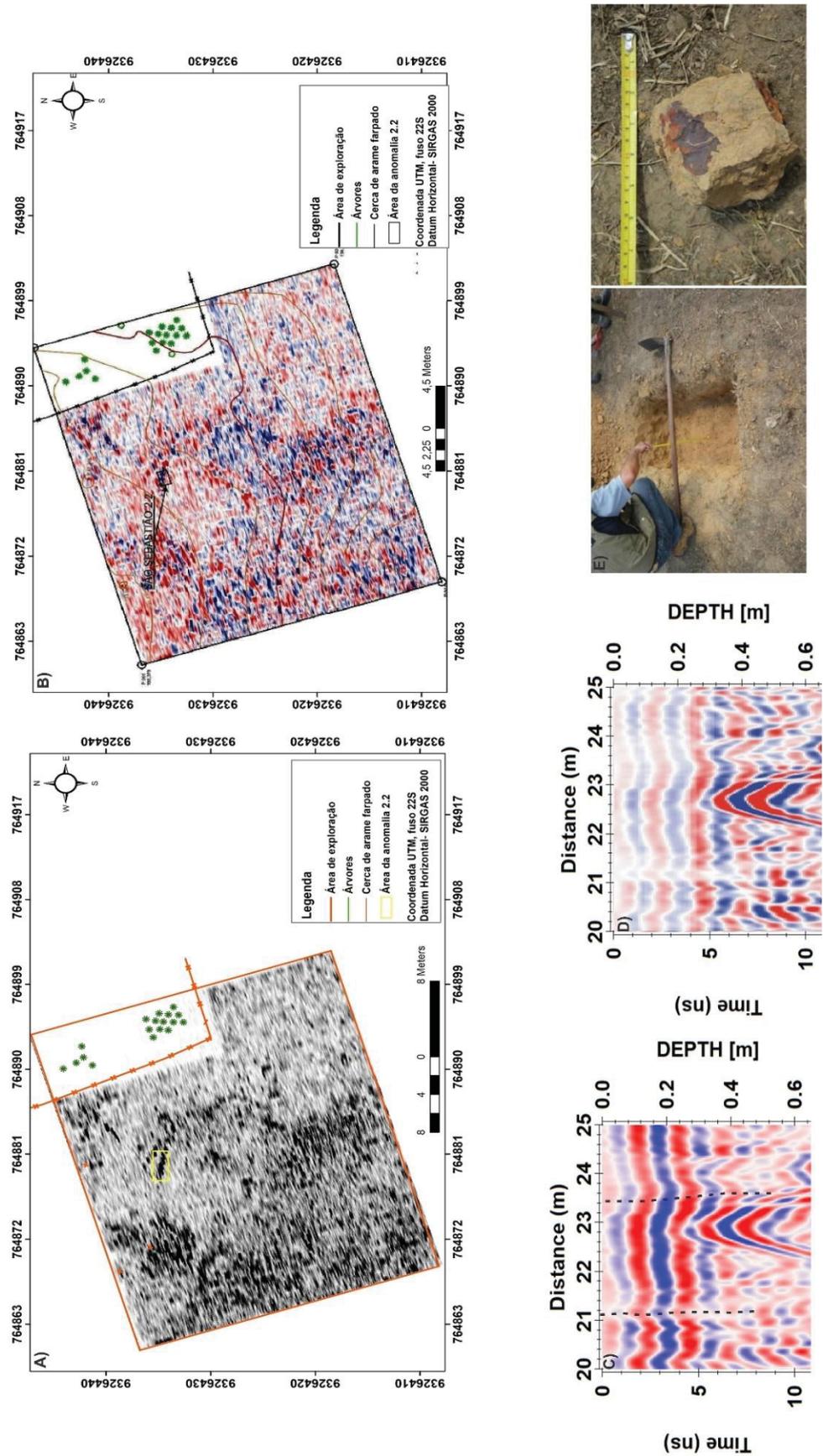
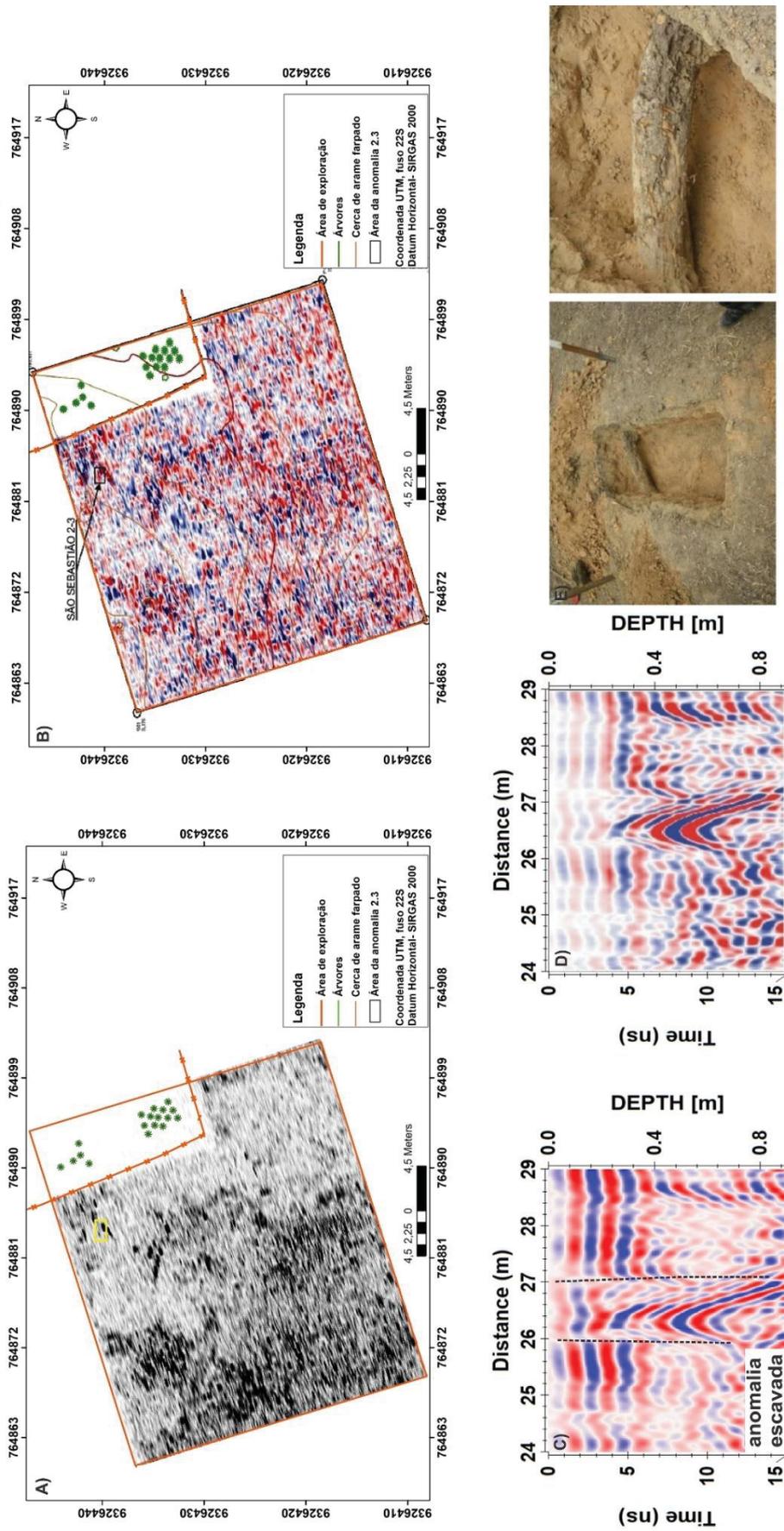


FIGURA 81: Comparação entre os resultados da rotina de processamentos: *Depth Slice* final elaborado pela rotina de processamento (A); *Depth Slice* final elaborado pela rotina de processamento do GTA/GGTT (B); Anomalia relacionada a escavação (C-D); Alvo encontrado na escavação (E).

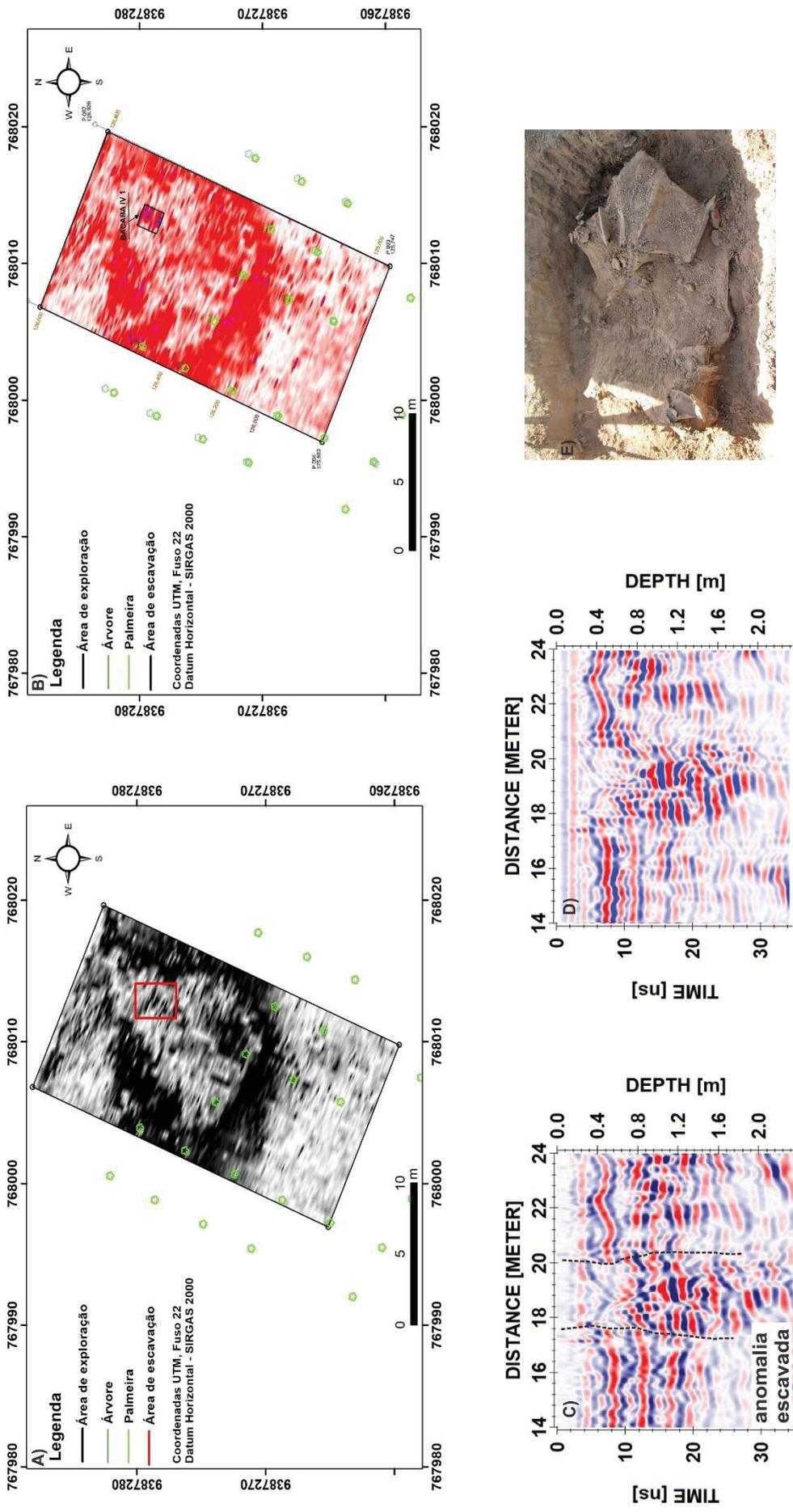


5.7.3 Área Bacaba IV

Na Fazenda Bacaba, área Bacaba IV, investigação realizada em uma antiga base do Exército Brasileiro. No local foram adquiridas 29 seções de GPR na direção Sudoeste para Nordeste, com perfis equiespaçados em 0,50 m (Figura 82). Os parâmetros de campo utilizados foram: espaçamento entre os traços de 0,02 metro, 1024 amostras por traço, janela temporal de 100 ns e a frequência de amostragem de 2400 MHz (GTT, 2010).

A rotina de processamento aplicada propiciou pequenas melhoras na imagem *depth slice* principalmente relacionada a zona anômala (alta amplitude), figuras 82a e 82b. A anomalia visualizada na seção 2D otimizou pequenos refletores de difração na área anômala, além dos refletores contínuos interrompidos que são indicativos de perturbações no solo (Figuras 82c e 82d). A figura 82e ilustra a foto referente a carcaça de camionete encontrada na escavação.

FIGURA 82: Comparação entre os resultados da rotina de processamentos: Depth Slice final elaborado pela rotina de processamento (A); Depth Slice final elaborado pela rotina de processamento do GTA/GTGT (B); Anomalia relacionada a escavação (C-D); Alvo encontrado na escavação (E).



5.8 CONCLUSÃO

A escolha de uma rotina de processamentos 2D e 3D mais adequada permite distinguir de forma satisfatória os refletores associados a anomalia forense e as perturbações no solo, e uma análise da amplitude de sinal dos traços auxilia a diferenciar os objetos em subsuperfície.

Conforme observado nas diferentes etapas de processamentos 2D aplicadas a escolha do ganho torna-se fundamental para distinção entre o refletor correspondente a anomalia com o meio investigado, e a associação do ganho linear e exponencial possibilitou a otimização da resposta. Na rotina 2D migração tornou-se opcional devido a possibilidade de aplicar a análise da amplitude de sinal condicionando a uma diferenciação mais adequada dos alvos em subsuperfície. Na rotina de processamento 3D, a escolha do início do arquivo a ser processado 2D ou 3D resulta em respostas distintas, o conjunto 3D torna-se mais eficiente as respostas e ocorre uma maior extração de ruídos aleatórios.

A etapa de migração para as respostas 3D é fundamental para interpretar os resultados *in loco*, pois a visualização neste modo faz com que o interprete possa diferenciar a geometria dos alvos existente em subsuperfície. A migração FK-Stolt mostrou-se maior eficiência devido a alguns fatores como: a um maior foco de energia relacionado ao colapso da hipérbole de difração, não ocorre uma junção entre os refletores adjacentes ao ponto migrado e não se tornam retilíneos. Além disso, as migrações devem ser realizadas no modo 3D que resultam em uma melhora geométrica e no posicionamento dos alvos, consequência do foco da energia, estiramento e delineamento dos refletores.

Através da análise das amplitudes de sinais realizadas na pesquisa pode-se observar que a pequena variação da amplitude entre determinados alvos em um mesmo tipo de solo, se torna uma condicionante para erros dos locais a serem investigado diretamente. Portanto, o conjunto de rotinas adequadas e uma análise de distinção da amplitude do sinal devem ser aplicadas, quando possível, para obter uma maior assertiva nas investigações forenses.

5.8.1 Refêrencias

- ANNAN, A. P. 2001. Ground penetrating radar workshop notes. Sensors; Software, Inc. Internal Report, p.130.
- ALMEIDA, E. R. 2016. Análise da tomografia de micro-ondas em dados GPR sob condições controladas: aplicações em arqueologia e estudos forenses. 189 f. Tese (Doutorado em Geofísica) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- BEVAN, B. W. 1990. The search for graves. *Geophysics*, 56, n. 9, 1310-1319.
- BARONE, PM; FERRARA, C; PETTINELLI, E; FAZZARI, A. 2016. Forensic Geophysics: How the GPR Technique Can Help with Forensic Investigations. *Soil Forensics*, 213–227. [doi:10.1007/978-3-319-33115-7_14](https://doi.org/10.1007/978-3-319-33115-7_14).
- CASSIDY, NJ. 2009. Ground Penetrating Radar Data Processing, Modelling and Analysis. *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*, 141–176. [doi:10.1016/b978-0-444-53348-7.00005-3](https://doi.org/10.1016/b978-0-444-53348-7.00005-3).
- CASSIDY, J. N. 2009. Ground penetrating radar data processing, modelling and analysis. In: JOL, M. H. *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Elsevier Science, Oxford.
- CATAPANO, I; GENNARELLI, G; LUDENO, G; SOLDOVIERI, F; PERSICO, R. 2019. Ground-Penetrating Radar: Operation Principle and Data Processing. *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, 1–23. [doi:10.1002/047134608x.w8383](https://doi.org/10.1002/047134608x.w8383).
- CHEN, C.-S; JENG, Y. 2011. Nonlinear data processing method for the signal enhancement of GPR data. *Journal of Applied Geophysics*, 75(1), 113–123. [doi:10.1016/j.jappgeo.2011.06.017](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.06.017).
- CORRÊA, C. H. S. 2013. Em algum lugar das selvas amazônicas: as memórias dos guerrilheiros do Araguaia (1966-1974). 619 f. Tese (Doutorado em História) – Instituto de Ciências Humanas da Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
- CONYERS, L. B. 2006. Innovative ground-penetrating radar methods for Archaeological mapping. *Archaeological Prospection*. 13, 139-141.
- DANIELS, D. J. 2004. *Ground Penetrating Radar*. The Institution of Electrical Engineers, London, UK, p. 761.

- ECONOMOU, N; VAFIDIS, A. 2010. Spectral balancing GPR data using time-variant bandwidth in the t-f domain. *GEOPHYSICS*, 75(3), J19–J27. [doi:10.1190/1.3374464](https://doi.org/10.1190/1.3374464).
- EDMOND, G; TOWLER, A; GROWNS, B; RIBEIRO, G; FOUND, B; WHITE, D; MARTIRE, K. 2017. Thinking forensics: Cognitive science for forensic practitioners. *Science & Justice*, 57(2), 144–154. [doi:10.1016/j.scijus.2016.11.005](https://doi.org/10.1016/j.scijus.2016.11.005).
- LUO, T.XH.; LAI, W.L.W.; CHANG, R.K.W; GOODMAN, D. 2019. GPR imaging criteria. *Journal of Applied Geophysics*. 165: 37-48.
- GIANNAKIS, I.; GIANNOPOULOS, A.; WARREN, C. 2016 A realistic FDTD numerical modeling framework of ground penetrating radar for landmine detection. *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9 (1).
- GÓMEZ-ORTIZ, D; MARTÍN-CRESPO, T; MARTÍN-VELÁZQUEZ, S; MARTÍNEZ-PAGÁN, P; HIGUERAS, H; MANZANO, M. 2010. Application of ground penetrating radar (GPR) to delineate clay layers in wetlands. A case study in the Soto Grande and Soto Chico watercourses, Doñana (SW Spain). *Journal of Applied Geophysics*, 72(2): 107–113. [doi:10.1016/j.jappgeo.2010.07.007](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2010.07.007).
- GRANDJEAN, G; DURAND, H. 1999. Radar Unix: a complete package for GPR data processing. *Computers & Geosciences*, 25(2), 141–149. [doi:10.1016/s0098-3004\(98\)00113-7](https://doi.org/10.1016/s0098-3004(98)00113-7).
- GRUPO DE TRABALHO TOCANTINS. Relatório da 1º Expedição – Trabalho de Campo (3ª FASE), Área São Sebastião. 2009. Relatório técnico.
- GRUPO DE TRABALHO TOCANTINS. Relatório da 1º Expedição – Trabalho de Campo (3ª FASE), Área Abobora 2. 2010. Relatório técnico.
- GRUPO DE TRABALHO TOCANTINS. Relatório da 1º Expedição – Trabalho de Campo (3ª FASE), Área Bacaba. 2010. Relatório técnico.
- JACOB, R.W; HERMANCE, J.F. 2005. Random and Non-Random Uncertainties in Precision GPR Measurements: Identifying and Compensating for Instrument Drift. *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, 6(1), 59–71. [doi:10.1007/s11220-005-4226-z](https://doi.org/10.1007/s11220-005-4226-z).
- KING, J.A; BEVAN, B.W.; HURRY, R.J. 1993. The reliability of Geophysical Surveys at Historic-Period Cemeteries: An example from the Plains Cemetery, Mechanicsville, Maryland. *Historical Archaeology*, 27 (3): 4-16.

- KIM, J.-H.; CHO, S.-J.; YI, M.-J. 2007. Removal of ringing noise in GPR data by signal processing. *Geosciences Journal*, 11(1), 75–81. [doi:10.1007/bf02910382](https://doi.org/10.1007/bf02910382).
- KOPPENJAN, S. K.; SCHULTZ, J. J.; FALSETTI, A. B.; COLLINS, E. M.; ONO, S.; LEE H. 2003. The Application of GPR in Florida for Detecting Forensic Burials. *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, 635-649.
- LAPAZARAN, J.J.; OTERO, J.; MARTÍN-ESPAÑOL, A.; NAVARRO, F.J. 2016. On the errors involved in ice-thickness estimates I: ground penetrating radar measurement errors, *Journal of Glaciology*, 62: 1008–1020, doi.org/10.1017/jog.2016.93.
- LOPERA, O; MILISAVLJEVIĆ, N; LAMBOT, S. 2006. Clutter reduction in GPR measurements for detecting shallow buried landmines: a Colombian case study. *Near Surface Geophysics*, 5(1), 57–64. [doi:10.3997/1873-0604.2006018](https://doi.org/10.3997/1873-0604.2006018).
- MALAGODI, S.; ORLANDO, L.; PIRO, S.; ROSSO, F. 1996. Location of archaeological structures using GPR method: three-dimensional data acquisition and radar signal processing. *Archaeological Prospection*, 3: 13-23.
- MELO, M. S. 2007. Geofísica aplicada à arqueologia: Investigação no sítio histórico Engenho Murutucu, em Belém, Pará. 100 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, Belém.
- NOBES D.C. 1999. Geophysical surveys of burial sites: A case study of the Oaro urupa. *Geophysics*, 64(2): 357-367.
- NEGRI, S.; LEUCCI, G. MAZZONE, F. 2008. High resolution 3D ERT to help GPR interpretation for researching archaeological items in a geologically complex subsurface. *Journal of Applied Geophysics*.65:111-120.
- ODEN, CP; POWERS, MH; WRIGHT, DL; OLHOEFT, GR. 2007. Improving GPR image resolution in lossy ground using dispersive migration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(8): 2492–2500.
- PEREIRA, M; RIAL, FI; LORENZO, H; ARIAS, P. 2005. Analysis and calibration of GPR shielded antennas. *Proceedings of the 3rd International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, 2005. IWAGPR 2005*. [doi:10.1109/agpr.2005.1487878](https://doi.org/10.1109/agpr.2005.1487878).
- PIPAN, M.; BARADELLO, L.; FORTE, E.; PRIZZON, A.; FINETTI, I. 2-D nad 3-D processing and interpretation of multi-fold ground penetrating radar data: a case

history from an archaeological site. **Journal of Applied Geophysics**, 41: 271-292.

RIBAUX, O; TALBOT WRIGHT, B. 2014. Expanding forensic science through forensic intelligence. *Science & Justice*, 54(6), 494–501. [doi:10.1016/j.scijus.2014.05.001](https://doi.org/10.1016/j.scijus.2014.05.001).

ROBINSON, M; BRISTOW, C; MCKINLEY, J; RUFFELL, A. 2013. Ground Penetrating Radar. *Geomorphological Techniques*, Part 1, Sec. 5.5, 26p.

RUFFEL, A. 2005. Searching for the IRA “Disappeared”: Ground-penetrating Radar Investigation of a Churchyard Burial Site, Northern Ireland. *Journal of Forensic Sciences*, 50 (6), 1-6.

RUFFELL, A; MCKINLEY, J. 2008. *Geoforensics*. John Wiley & Sons, 332p, 332. ISBN 978-0-470-05735-3.

SANDMEIER, K. J. REFLEXW Version 7.4, Windows 9x/2000/NT. Program for the processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction and transmission data. *Manual do Software*, Karlsruhe, Germany, 209p. 2006.

SCHULTZ, J. J.; COLLINS, E. M; FALSETTI, A. B. 2006. Sequential monitoring of burials containing large pig cadavers using ground-penetrating radar. *Journal of Forensic Sciences*, 51 (3), 607-616.

SOLLA, M.; RIVEIRO, B.; ALVARÉS, X. M.; ARIAS, P. 2012. Experimental forensic scenes for the characterization of ground-penetrating radar wave response. *Forensic Science International*, 220: 50-58.

STOLT, R. H. 1978. Migration by Fourier transform. *Geophysics*, 43 (1): 23-48.

TAFLOV, A. 1998. *Advances in Computational electromagnetics: The Finite – Difference Time-Domain method*. Artech House, Norwood, Ma.

TAFLOV, A.; HAGNESS, S., 2005. *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time- Domain Method*, 3rd edition, Artech House Antennas and Propagation Library, Artech House, London, UK

THABIT, J. M.; AL-BANNA, A. S.; & AL-RAHIM, A. M. 2018. Mapping subsurface archaeological features using ground penetrating radar in the ancient city of Ur, Iraq. *Archaeological Research in Asia*. 17:149-160.

WEAVER, W. 2006. Ground-penetrating radar mapping in clay: success from South Carolina, USA. *Archaeological Prospection*, 13(2), 147–150. [doi:10.1002/arp.281](https://doi.org/10.1002/arp.281).

WHITING, B. M.; McFARLAND, D. P.; HACKENBERGER, S. 2001. Three-dimensional GPR study of a prehistoric site in Barbados, West Indies. *Journal of Applied Geophysics*, 47, 217-226.

WISNIEWSKI, K. D.; COOPER, N.; HEATON, V.; HOPE, C. PIRRIE, D. MITTEN, A. J. PRINGLE, K. J. 2019. The search for "FRED": An Unusual Vertical Burial Case. *Journal Forensic Sciences*. doi.org/10.1111/1556-4029.14035

YEE, K. S. 1966. Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equation in isotropic media. *Transactions on Antennas and Propagation*, 14 (3):302-307.

YILMAZ, S.; BALKAYA, Ç.; ÇAKMAK, O.; OKSUM, E. 2019. GPR and ERT explorations at the archaeological site of kiliç village (Isparta, SW Turkey). *Journal Applied Geophysics*. doi.org/10.1016/j.jappegeo.2019.103859.

ZHAO, Y; WU, J; XIE, X; CHEN, J; GE, S. 2010. Multiple suppression in GPR image for testing back-filled grouting within shield tunnel. *Proceedings of the XIII International Conference on Ground Penetrating Radar*. [doi:10.1109/icgpr.2010.5550123](https://doi.org/10.1109/icgpr.2010.5550123).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Na presente tese dados oriundos de investigações forenses realizadas na Guerilha do Araguaia possibilitaram elaborar uma rotina de processamento para otimizar os resultados GPR2D e 3D para área de forense. O método GPR mostrou-se ser uma ferramenta eficiente para imagear objetos implantados no SCGF-UFPR e na indicação de locais para salvamento dos artefatos arqueológicos presente na aldeia Tekoha Jevy, no auxílio a investigação forense.

Os resultados adquiridos com a aplicação do método GPR utilizando distintas frequências 250 MHz, 400 MHz e 700 MHz foram satisfatórios para detecção dos alvos instalados em um solo argiloso de condutividade alta no SCGF da UFPR. Dentre as frequências aplicadas os resultados que evidenciaram as melhores respostas estão associados as antenas intermediárias e alta devido a resolução vertical. Para uma aquisição quase 3D adequada sugere-se um espaçamento mínimo de 0,05 m e espaçamento dos traços de 0,02 m possibilitando uma amostragem dos pontos de difração, resultando em um imageamento com maior nitidez permitindo delinear geometricamente e espacialmente os alvos.

Como forma de corrigir o posicionamento dos traços, que prejudicam na reconstrução da forma geométrica em 3D, mostrou-se eficiente a metodologia do cabo de aço implementada na superfície como cano guia possibilitando uma otimização dos resultados 3D.

As respostas obtidas após um período de precipitação prejudicaram a detecção de materiais têxtil/sintéticos instalados no SCGF devido ao aumento da umidade que ocasiona a dispersão da onda eletromagnética sobre os alvos. A implantação do primeiro Sítio Controlado no Paraná voltado para área da Geociências Forense mostrou-se uma ferramenta importante para divulgar a ciência na academia, além de auxiliar nas aulas práticas ou cursos que implicam a utilização de métodos geofísicos.

Além disso, as modelagens numéricas são altamente recomendadas para auxiliar as interpretações de dados de GPR, as respostas propiciaram modelos hiperbólicos de difração esperados para distintos tipos de solos e diferentes amplitudes de sinais. As interpretações indicaram que em solos resistivos os alvos apresentam tamanhos hiperbólicos e sinais de amplitudes maiores, com exceção dos alvos seixo e plástico. Essa condicionante está associada aos valores de permissividade dielétrica aplicados para a modelagem que se aproximam ao do solo resistivo. Assim, uma análise quantitativa da amplitude de sinal pode ser uma ferramenta importante para diferenciar alvos que possuam respostas visuais semelhantes.

Conforme observado pelas etapas de processamento uma aplicação de ganho exponencial e linear propiciaram os melhores resultados para diferenciar a anomalia 2D com o meio investigado. Aplicação da migração em dados 2D tornou-se opcional para que se possa diferenciar as anomalias ilustradas através da amplitude sinal, possibilitando uma diminuição de erros nas investigações de cunho forense. Pode-se observar que um processamento inicial de um conjunto de dados 3D resulta em respostas mais otimizadas e os filtros atuam de forma mais satisfatórias na eliminação dos ruídos.

A etapa de migração para as respostas 3D é fundamental para interpretar os resultados *in loco*, pois a visualização neste modo faz com que o interprete possa diferenciar a geometria dos alvos existente em subsuperfície. As migrações *diffraction stack* e a *FK-Stolt* ao serem aplicadas resultam em diferença na resolução espacial e geométrica dos dados. A migração *FK-Stolt* mostrou-se maior eficiência devido a alguns fatores como: a um maior foco de energia relacionado ao colapso da hipérbole de difração, não ocorre uma junção entre os refletores adjacentes ao ponto migrado e não se tornam retilíneos. Além disso, as migrações devem ser realizadas no modo 3D que resultam em uma melhora geométrica e no posicionamento dos alvos, consequência do foco da energia, estiramento e delineamento dos refletores.

Em investigações forenses e arqueológicas, quando houver a possibilidade, deve-se realizar aquisições em conjunto 2D e 3D para facilitar a interpretação do objetivo traçado e diminuir os erros ao indicar locais para obtenção de dados diretos.

Como propostas de continuidade ao desenvolvimento de pesquisas relacionadas a geofísica forense, deve-se intensificar a parceria entre as Instituições de Segurança Pública e as Educacionais para o desenvolvimento da ciência forense no país e a implantação de novos sítios controlados de forense em distintos tipos de solo possibilita o aprimoramento das técnicas de aquisição, processamento e interpretação dos dados.

E por fim, recomenda-se no SCGF realizar aquisições com outros métodos geofísicos e um monitoramento com o GPR para prever e compreender melhor as mudanças nas respostas de amplitude de sinal ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

AKINSUNMADE, A; KARCZEWSKI, J; MAZURKIEWICZ, E; TOMECKA-SUCHOŃ, S. Finite-difference time domain (FDTD) modeling of ground penetrating radar pulse energy for locating burial sites. **Acta Geophysics**, v. 67, p. 1945–1953, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00352-9>.

ALLEN, J.S., PORSANI, L.J. & POLUHA, B. Geofísica arqueológica no ambiente da arqueologia urbana: proposta metodológica para projetos públicos. **Revista de Arqueologia**, v. 30 (1), p. 235-254, 2017.

ALMEIDA, E. R. Análise da tomografia de micro-ondas em dados GPR sob condições controladas: aplicações em arqueologia e estudos forenses. 189 f. Tese (Doutorado em Geofísica) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

ALVES, A. J. J. **Métodos geofísicos aplicados à arqueologia no Estado do Pará**. 64 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 1979.

ALVES, L. K.; BORGES, W. R.; BLUM, M. L. B. Mapeamento de alvos forenses com GPR 3D. In: International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 13., 2013, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, 2013, 1 Cd-rom.

ALVES, L. K.; BORGES, W. R.; BLUM, M. L. B. Análise forense de dados de gpr 3D usados para identificar ossada de animais e recipientes de vidro. In: International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 14., 2015, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, 2015, 1 Cd-rom.

ANDRADE, L. B.; SEIMENTZ, E. X.; OLIVEIRA, G. F.; BLUM, M. L. B.; CAVALCANTI, M. M.; MACEDO, P. B.; BORGES, W. R. Aplicação forense do GPR na

localização inumações na área da Guerrilha do Araguaia. In: V Simpósio Brasileiro de Geofísica, 2012, Salvador. **Anais...** Salvador, 2012, 1 Cd-rom.

ANNAN, A. P.; COSWAY, S. W. Ground penetrating radar survey design. Sensors & Software, Inc., p. 23, 1992.

ANNAN, A. P. Transmission dispersion and GPR. **Journal of Environmental and Engineering Geophysics**, v. 0 (2), p. 125 – 136, 1996.

ANNAN, A. P. Ground penetrating radar workshop notes. Sensors; Software, Inc. Internal Report, p.130, 2001.

ANNAN, A. P. GPR-History, Trends, and Future Developments. **Subsurface Seseing Technologies and Applications**, v. 3 (4), p. 18, 2002.

ANNAN, AP. Applications of ground penetrating radar in archaeological and forensic contexts. **First Break**, v. 22, p. 41 – 44, 2004.

ARAGÃO, R. C.; GOUVÊA J. L.; LOPES, P. R. C. Metodologia geofísica aplicada ao estudo arqueológico do sítio Bittencourt e Jambuaçu, Estado do Pará. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 28, n. 2, p. 249-263, 2010.

BARONE, P. M.; DI MAGGIO, R. M.; FERRARA C. NOT NECESSARILY BURIED BODIES: Forensic GPR investigations from criminal to civil justice. In: International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, 8th, 2015, Florence. Doi: [10.1109/IWAGPR.2015.7292681](https://doi.org/10.1109/IWAGPR.2015.7292681)

BARONE, P. M.; SWANGER, K. J.; STANLEY-PRICE, N.; THURSFIELD, A. Finding graves in a cemetery: Preliminary forensic GPR investigations in the Non-Catholic Cemetery in Rome (Italy). **Measurement**, v. 80, p. 53-57, 2016.

BARONE, P. M.; DI MAGGIO, R. M. Forensic geophysics: ground penetrating radar (GPR) techniques and missing persons investigations. **Forensic Sciences Research**, v.4, p. 337-340, 2019. <https://doi.org/10.1080/20961790.2019.1675353>

BONIGER, U.; TRONICKE, J. Improving the interpretability of 3D GPR data using target-specific attributes: application to tomb detection. **Journal of Archaeological Science**, v. 37, p. 360-367, 2010.

BOOTH, A. D.; PRINGLE, J. K. Semblance analysis to access GPR data from a five-year forensic study of simulated clandestine graves. **Journal of Applied Geophysics**, v. 125, p. 37-44, 2016.

BEVAN, B. W. The search for graves. **Geophysics**, v. 56, n. 9, p. 1310-1319, set. 1990.

BIGARELLA, J. J.; SALAMUNI, R.; AB`SABER, A.N. Origem e ambiente de deposição da Bacia de Curitiba. **Boletim Paranaense de Geografia, UFPR**, Curitiba, n.4/5, p.71-81, 1961.

BLUM, M. L. B.; RUSSO, D. Investigações no cemitério de Vila Formosa, São-Paulo-SP: Descoberta de ossário com o Emprego de GPR. In: International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 12., 2011, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2011, 1 Cd-rom.

BLUM, M. L. B.; RUSSO, D. SITICRIM – Brazilian Test Site for Forensic Geophysical Research. In: European Academy of Forensic Science Conference, 2012, The Hague: EAFS, pôster.

BLUM, M. L. B.; RUSSO, D.; JURASZEK, I. C. GPR Foreense: Investigação em Sítio Arqueológico Indígena, Porto Esperidião – MT. In: IV Simpósio Brasileiro de Geofísica, 2010, Belém. **Anais...** Belém, 2010, 1 Cd-rom.

BONIGER, U; TRONICKE, T. Improving the interpretability of 3D GPR data using target – specific attributes application to tomb detection. **Journal of Archaeological Science**, v. 37, p. 360-367, 2010.

BORGES, W. R. **Caracterização Geofísica de Alvos Rasos com Aplicações no Planejamento Urbano e Meio Ambiente**: Estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP. 260 f. Tese (Doutorado em Geofísica) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

BORGES, W. R.; BLUM, M. L. B.; BRANCO, R. M. G. C.; SILVA, L. M. C.; PORSANI, M. J.; BRICHTA, A.; AMORIM, A. N.; PEDROSA JUNIOR, N.; SANTOS, V. R. N; BRAGA, L. R. C; ALBUQUERQUE SOBRINHO, J; PÉRICLES DE MACEDO, P. B.; SANTOS, E. C.; SOUZA, J. C. F.; BRASIL, D. L.; MACHADO, M. A.; MARTINS, J. A.; MELLO, G. A. Aplicação de geofísica forense na busca de vestígios de pessoas desaparecidas na Guerrilha do Araguaia. In: IV Simpósio Brasileiro de Geofísica, 2010, Belém. **Anais...** Belém, 2010, 1 Cd-rom.

BORGES, W. R.; BLUM, M. L. B.; SALVADOR, F.; CAVALCANTI, M.; SILVA, L. M. C.; ANDRADE, L. B.; BRANCO, M. L. B. Geofísica Forense no Brasil. **Boletim SBGF**, Rio de Janeiro, v. 94, p.16-18, 2015.

BOOTH, A. D.; PRINGLE, J. Semblance analysis to asses GPR data from a five-year forensic study of simulated clandestine graves. **Journal of Applied Geophysics**, v. 125, p. 37-44, feb, 2016.

BOWDERS, J. J.; Jr, L. E. A.; KORNER, M. R. Buried container detection using ground-probing radar. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v.7, p.1-17, abril, 1982.

BRASIL, D. L. **Investigação Geofísica forense e antropológica com método GPR no cemitério do Tapanã e no cemitério perdido de Mosqueiro** (Belém, Pará). 94 f. Dissertação (mestrado em Geofísica) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

BUCO, AC. Sítios arqueológicos brasileiros/ Brazilian archaeology sites. UNESCO and Editora Brasileira de Arte e Cultura, p. 199, 2014.

BUSO, A. S. O.; BLUM, M. L. B.; BORGES, W. R. Imageamento GPR 3D de alvos forenses na área sítio controlado de criminalística (SITICRIM). In: VII Simpósio Brasileiro de Geofísica, 2016, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto, 2016, Cd-rom.

BURDS, LT; BECK, JD; MATAITIS, RJ.; JOL, HM; FREUND, RA; McCLYMONT, AF; BAUMAN, P. Holocaust Archaeology: Using Ground Penetrating Radar to Locate a Jewish Mass Grave in Kaunas, Lithuania. In: 17th International Conference on Ground Penetrating Radar, 2018, Rapperswil, Switzerland.

CANATA, R.; SALVADOR, F. A. S.; BORGES, W. R.; FERREIRA, F. J. F.; SEIMETZ, E. X.; PINTO, I.; BARROS, E. O. The forensic application of ground-penetrating radar, Tekoha Jev indigenous village, Paraná, Brazil. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 492, 2019. <https://doi.org/10.1144/SP492-2017-329>

CARLING, P. A.; BRISTOW, S. C.; LITVINOV, A. S. Ground-penetrating radar stratigraphy and dynamics of megaflood gravel dunes. **Journal of the Geological Society**, v. 173 (3), p. 550-559. 2016.

CASTELO BRANCO, R. M. G.; PEDROSA JUNIOR, N; BORGES, W. R; BLUM, M. L. B; RUSSO, D. Investigações geofísicas GPR no cemitério de Xambioá (Tocantins): palco de inumações na época da Guerrilha do Araguaia, estados do Pará e Tocantins. In: IV Simpósio Brasileiro de Geofísica, 2010, Belém. **Anais...** Belém, 2010, 1 Cd-rom.

CASSIDY, J. N. Ground penetrating radar data processing, modelling and analysis. In: JOL, M. H. **Ground Penetrating Radar: Theory and Applications**. Elsevier Science, Oxford, 2009.

CAVALCANTI, M. **Estudos da resposta geofísica em diferentes cenários de sepultamentos**. 197 f. Tese (Doutorado de Geofísica) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

CAVALCANTI, MM, ROCHA, MP; BLUM, MLB; BORGES, WR. The Forensic Geophysical Controlled Research Site of the University of Brasilia, Brazil: Results from Methods GPR and Electrical Resistivity Tomography. **Forensic Science International**, 2018. <https://doi:10.1016/j.forsciint.2018.09.033>.

CATAPANO, I; GENNARELLI, G; LUDENO, G; SOLDVIERI, F; PERSICO, R. Ground-Penetrating Radar: Operation Principle and Data Processing. **Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering**, p.1–23. 2019. [doi:10.1002/047134608x.w8383](https://doi.org/10.1002/047134608x.w8383).

CATETE, C.P. **Investigações ambiental e forense com os métodos geofísicos radar de penetração do solo, polarização induzida e eletrorresistividade no cemitério do Tapanã, Belém/Pará**. 90 f. Dissertação (Mestrado em

Geofísica) - Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

CEZAR, G.; ROCHA, P.; BUARQUE, A; DA COSTA, A. Two Brazilian archaeological sites investigated by GPR Serrano and Morro Grande. **Journal of Applied Geophysics**, v. 47, p. 227–240, 2001.

CHEN, C.-S; JENG, Y. Nonlinear data processing method for the signal enhancement of GPR data. **Journal of Applied Geophysics**, v. 75(1), p. 113–123, 2011. [doi:10.1016/j.jappgeo.2011.06.017](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.06.017).

CONYERS, L. B.; LUCIUS, J. E. Velocity analysis in archaeological ground-penetrating radar studies. **Archaeological Prospection**, v.3, p. 25-38, 1996.

CONYERS L. B. **Ground-penetrating Radar for Archaeology**. Alta Mira Press: Walnut Creek, CA, 2004.

CONYERS, L. B. Innovative ground-penetrating radar methods for Archaeological mapping. **Archaeological Prospection**. v. 13, p. 139-141. 2006.

CONYERS, L. B.; LECKEBUSCH, J. Geophysical archaeology research agendas for the future: Some ground-penetrating radar examples. **Archaeological Prospection**, v. 17, p. 117-123, 2010.

CONYERS, L. B. Advances in Ground- Penetrating Radar Exploration in Southern Arizona. **Journal of Arizona Archaeology**, v. 2 (1), p. 80-91, 2012.

CONYERS, L. B. Ground-penetrating radar studies at the hammer test bed facility, Richland, Washington. **Journal of Northwest Anthropology**, v. 47(2), p.153–166, 2013.

CORRÊA, C. H. S. **Em algum lugar das selvas amazônicas: as memórias dos guerrilheiros do Araguaia (1966-1974)**. 619 f. Tese (Doutorado em História) – Instituto de Ciências Humanas da Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

DANIELS, JJ. 1989. Fundamentals of Ground Penetrating Radar. In: Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. 1989. [https://doi:10.4133/1.2921864](https://doi.org/10.4133/1.2921864).

DANIELS, J. 3D GPR Interpretation: Step-by-Step. p.16, 200. Disponível em: http://www.geology.ohio-state.edu/~jeff/Library/3d_example.pdf

DANIELS, D. J. **Ground Penetrating Radar**. The Institution of Electrical Engineers, London, UK, p. 761. 2004.

DANIELS, J. J.; EHSANI, M. R.; ALLRED, B. J. Ground-Penetrating Radar Methods (GPR). In:_____. **Handbook of Agricultural Geophysics**. London: Taylor & Francis Group, 2008. p. 129-147.

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.

DICK, H.C.; PRINGLE, J. K.; WISNIEWSKI, K. D.; GOODWIN, J.; VAN DER PUTTEN, R.; EVANS, G.T.; CASSELLA, J. P.; HANSEN, J. D. Determining geophysical responses from burials in graveyards and cemeteries. **Geophysics**, v. 82, p. 1-51, nov./dec. 2017.

DUARTE, O.O. Dicionário enciclopédico inglês-português de geofísica e geologia. 1. ed. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, 1997. p. 304.

EVERETT, M.E. **Near- Surface Applied Geophysics**. Cambridge: Cambridge University Press, UK, p. 441. 2013.

ECONOMOU, N; VAFIDIS, A. Spectral balancing GPR data using time-variant bandwidth in the t-f domain. **GEOPHYSICS**, v. 75(3), p. 19–27, 2010. [doi:10.1190/1.3374464](https://doi.org/10.1190/1.3374464).

EDMOND, G; TOWLER, A; GROWNS, B; RIBEIRO, G; FOUND, B; WHITE, D; MARTIRE, K. Thinking forensics: Cognitive science for forensic practitioners. **Science & Justice**, v. 57(2), p. 144–154, 2017 [doi:10.1016/j.scijus.2016.11.005](https://doi.org/10.1016/j.scijus.2016.11.005).

FELIPE, R. S. **Características Geológico-Geotécnicas na Formação Guabirota Erosão- movimentos Gravitacionais de Massa**. Curitiba: MINERO-PAR-Serviço Geológico do Paraná, 2011.

FENNING, P. J.; DONNELLY, L. J. **Geophysical techniques for forensic investigations**. In: Pye, K.; Croft, D.J. (Eds.), *Forensic Geoscience: Principles, Techniques and Applications: Special Publication of the Geological Society of London*, 232, 11–20p, 2008.

FIEDLER, S.; ILLICH, B.; BERGER, J.; GRAW, M. The effectiveness of ground-penetrating radar surveys in the location of unmarked burial sites in modern cemeteries. **Journal of Applied Geophysics**, v. 68, p. 380-385. 2009.

FISHER, S.; STEWART, R.R.; JOL, H.M. Processing ground penetrating radar (GPR) data. **Crewes Research Report**, v. 4, p. 11-1 – 11-22, 1992.

FORBES, S. L.; HULSMAN, S.; DOLDERMAN, M. Locating buried canine remains using ground penetrating radar. **Canadian Society of Forensic Science Journal**, v.46 (1), p. 51-58, 2013.

FURLAN, M. **Avaliação da utilização de ensaios geoeletricos 2D para estudos arqueológicos em locais controlados**. 140 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, São Paulo, 2008.

FURTADO, C. P. Q. **O método GPR aplicado à arqueologia no sítio PA-42: Porto de Santarém, Pará**. 78 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

GIANNAKIS, I.; GIANNOPOULOS, A.; WARREN, C. A realistic FDTD numerical modeling framework of ground penetrating radar for landmine detection. **Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 9 (1), 2016.

GOMES, M.J.S. **Utilização de métodos geofísicos em sambaquis fluviais, região do Vale do Ribeira de Iguape- SP/PR**. 135 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, São Paulo, 2004.

GÓMEZ-ORTIZ, D; MARTÍN-CRESPO, T; MARTÍN-VELÁZQUEZ, S; MARTÍNEZ-PAGÁN, P; HIGUERAS, H; MANZANO, M. Application of ground penetrating radar (GPR) to delineate clay layers in wetlands. A case study in the Soto Grande and Soto Chico watercourses, Doñana (SW Spain). **Journal of Applied Geophysics**, v. 72(2), p. 107–113, 2010. [doi:10.1016/j.jappgeo.2010.07.007](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2010.07.007).

GOODMAN, D.; NISHIMURA, Y.; ROGERS, J.D. GPR time-slices in archaeological prospection. **Archaeological Prospection**, v. 2, p. 85-89, 1995. <https://www.researchgate.net/publication/230930249>

GOUVÊA, J. L.; GOMES, D. M. C.; MORAES, C. P.; PY-DANIEL, A. R. GPR applied to archaeology on the campus of UFOPA, Santarém, Pará. In: International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 13., 2013, Rio de Janeiro. <https://www.researchgate.net/publication/269250639>

GRANDJEAN, G; DURAND, H. Radar Unix: a complete package for GPR data processing. **Computers & Geosciences**, v. 25(2), p. 141–149, 1999. [doi:10.1016/s0098-3004\(98\)00113-7](https://doi.org/10.1016/s0098-3004(98)00113-7).

GRASMUECK, M.; WEGER, R.; HORSTMAYER, H. Full-resolution 3D GPR imaging. **Geophysics**, v. 70 (1), p. K12-K19, 2005.

GROENEBOOM, JK; ZEEMAN, JH. 3D GPR data acquisition and the influence of positioning errors on image quality. In: 63rd Conference and Technical Exhibition, Amsterdam, 2001.

GRUPO DE TRABALHO TOCANTINS. Relatório da 1º Expedição – Trabalho de Campo (3ª FASE), Área São Sebastião. 2009. Relatório técnico.

HAMMON III, W. S.; MCMECHAN, G. A.; ZENG, X. Forensic GPR: Finite-Difference Simulations of Responses from Buried Human Remains. **Journal of Applied Geophysics**, v. 45, p. 171-186. april/july. 2000.

HAHN, S.L. Hilbert Transforms in Signal Processing. Artech House Signal Processing Library, p. 460, 1996.

HANSEN, J.D.; PRINGLE, J.K. Comparison of magnetic, electrical and ground penetrating radar surveys to detect buried forensic objects in semi-urban and domestic patio environments. **Geological Society, London, Special Publication**, 384, p. 229-251, 2014.

HILDEBRAND, J. A.; WIGGINS; S. M., HENKART, P. C.; CONYERS, L. B. Comparison of Seismic Reflection and Ground – Penetrating Radar Imaging at Controlled Archeological Test Site, Champaign, Illinois. **Archaeological Prospection**, v. 9, p. 9-21, fev. 2002.

INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL. 2015. Informação Técnica Conjunta: Vistoria em área de sítio arqueológico localizado na aldeia Tekoha Jev, município de Guaíra/PR. *Informação técnica nº13*, 1-25.

ISAACSON, J.; HOLLINGER, E. R.; GRUNDUM, D.; BAIRD, J. A controlled archaeological test site facility in Olinois: Training and Research in Archaeogeophysics. **Journals of field Archaeological**, Boston, v.26, n.2, p. 227-236, 1999.

JACOB, R.W; HERMANCE, J.F. Random and Non-Random Uncertainties in Precision GPR Measurements: Identifying and Compensating for Instrument Drift. *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, v. 6(1), p. 59–71, 2005. [doi:10.1007/s11220-005-4226-z](https://doi.org/10.1007/s11220-005-4226-z).

JANASI, V.A.; FREITAS, V.A.; HEAMAN, L.H. The onset of flood basalt volcanism Northern Paraná Basin, Brazil: a precise U/PB baddeleyite/zircon age for a Chapecó- type dacite. **Earth and Planet Science Letter**, v. 302, p. 147-153,2011.<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X10007570>

JOL, M. H. **Ground Penetrating Radar: Theory and Applications**. Elsevier Science, Oxford, 2009.

KING, J.A; BEVAN, B.W.; HURRY, R.J. The reliability of Geophysical Surveys at Historic-Period Cemeteries: An example from the Plains Cemetery, Mechanicsville, Maryland. **Historical Archaeology**, v. 27 (3), p. 4-16, 1993.

KIM, J.H; CHO, S.J; YI, M.J. Removal of ringing noise in GPR data by signal processing. **Geosciences Journal**, v. 11(1), p. 75–81. 2007. [doi:10.1007/bf02910382](https://doi.org/10.1007/bf02910382).

KORMANN, A. C. M. **Comportamento geomecânico da Formação Guabiro-tuba: estudos de campo e laboratório**. 429 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

KOPPENJAN, S. K.; SCHULTZ, J. J.; FALSETTI, A. B.; COLLINS, E. M.; ONO, S.; LEE H. The Application of GPR in Florida for Detecting Forensic Burials. **Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems**, p. 635-649. 2003.

LAPAZARAN, J. J.; OTERO, J.; MARTÍN-ESPAÑOL, A.; NAVARRO, F. J. On the errors involved in ice-thickness estimates I: ground penetrating radar measurement errors. **Journal of Glaciology**, v. 62: p. 1008–1020, 2016. doi.org/10.1017/jog.2016.93.

LECKEBUSCH, J. 2006. <http://www.gpr-parameters.ch/about.html> acessado em 21/07/2017.

Licht, O.A.B. A revised chemo-chromo-stratigraphic 4-D model for the extrusive rocks of the Paraná Igneous Province. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 23, 2016.

LOPERA, O.; MILISAVLJEVIĆ, N.; LAMBOT, S. Clutter reduction in GPR measurements for detecting shallow buried landmines: a Colombian case study. **Near Surface Geophysics**, v. 5(1), p. 57–64. 2006. [doi:10.3997/1873-0604.2006018](https://doi.org/10.3997/1873-0604.2006018).

LOURENÇO, V. L. **Utilização do Radar da penetração nos solos (GPR) na detecção de estruturas no âmbito da Ciências Forenses**. 44 f. Trabalho de conclusão de curso (Centro de Geofísica) – Universidade de Évora, Portugal, 2009.

LUALDI, M.; ZAUZI, L.; BINDA, L. Aquisition and Processing requirements for high quality 3D reconstructions from GPR investigations. In: International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering. Disponível em: <http://www.ndt.net/article/ndtce03/papers/v073/v073.htm> acessado em 25/08/2017.

LUO, T. X. H.; LAI, W. L. W.; CHANG, R. K. W.; GOODMAN, D. GPR imaging criteria. **Journal of Applied Geophysics**, v. 165, p. 37-48, 2019.

MALAGODI, S.; ORLANDO, L.; PIRO, S.; ROSSO, F. Location of archaeological structures using GPR method: three-dimensional data acquisition and radar signal processing. *Archaeological Prospection*, v. 3 p. 13-23. 1996.

MELO, M. S. **Geofísica aplicada à arqueologia**: Investigação no sítio histórico Engenho Murutucu, em Belém, Pará. 100 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

METTERS, L.; PERSICO, R.; MATERA, L.; LAMBOT, S. Automated detection of reflection hyperbolas in complex GPR images with no a priori knowledge on the médium. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 54, p. 580-596, 2016.

MILLER, P.S. Disturbances in the soil: finding buried bodies and other evidence using ground penetrating radar. **Journal Forensic Sciences**, v.41 (4), p. 648-652, 1996.

MOLINA, C. M.; PRINGLE, J. K.; SAUMETT, M.; HERNÁNDEZ, O. Preliminary results of sequential monitoring of simulated clandestine graves in Colombia,

South America, using ground penetrating radar and botany. **Forensic Science International**, v. 248, p. 61-70, march. 2015.

NASCIMENTO, W. G. **Investigação geofísica ambiental e forense nos cemitérios do Bengui e do Tapanã (Belém, Pa)**. 153 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2009.

NEAL, A. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. **Earth-Science Reviews**, v. 66, p. 261-330. 2004.

NEGRI, S.; LEUCCI, G. MAZZONE, F. High resolution 3D ERT to help GPR interpretation for researching archaeological items in a geologically complex subsurface. **Journal of Applied Geophysics**. v. 65, p. 111-120. 2008.

NOBES D.C. Geophysical surveys of burial sites: A case study of the Oaro urupa. **Geophysics**, v. 64(2), p. 357-367, 1999.

NOVO, A.; GASMUEK, M.; VIGGIANO, A. D; LORENZO, H. 3D GPR in Archaeology: What can be gained from dense Data Acquisition and Processing? In: *12th International Conference on Ground Penetrating Radar*, June 16-19, Birmingham, UK. 2008. <https://www.researchgate.net/publication/228986985>

NOVO, A; LORENZO, H; RIAL, FI; SOLLA, M. Three-dimensional ground-penetrating radar strategies over an indoor archaeological site: Convent of Santo Domingo (Lugo, Spain). **Archaeological Prospection**, v. 17(4), p. 213–222, 2010. <https://doi:10.1002/arp.386>.

NOVO, A.; LORENZO, H.; RIAL, F. I.; SOLLA, M. 3D GPR in forensics: Finding a clandestine grave in a mountainous environment. *Forensic Science International*, v. 201, p. 134-138, June, 2011.

ODEN, C. P; POWERS, M. H; WRIGHT, D. L; OLHOEFT, G. R. Improving GPR image resolution in lossy ground using dispersive migration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 45(8), p. 2492–2500, 2007.

OLHOEFT, G. R. Electrical, magnetic, and geometric properties that determine ground penetrating radar performance. In: *Proc. International Conference on Ground Penetrating Radar*, 7th, 1998.

OWSLEY, D. W. Techniques for locating burials, with emphasis of the probe. **Journal of Forensics Sciences**, v. 40, p. 735-740. 1995.

PEDROSA JUNIOR, N; RUSSO, D.; BLUM, M. L. B; BORGES, W. R; BRANCO, R. M. G. C. Descoberta geofísica com o uso de GPR em antiga base militar da época da Guerrilha do Araguaia - PA – Brasil. In: *IV Simpósio Brasileiro de Geofísica*, 2010, Belém. Curitiba/PR, Cd-rom.

POLUHA, B. **Mapeamento de GPR 2D-3D de interferências enterradas no SCGR-II do IAG: Aplicações no planejamento urbano.** 84 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

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

PORSANI, J. L.; BORGES, W. R.; ELIS, V. R.; DIOGO, L. A.; HODO, F. Y.; MARRANO, A.; BIRELLI, C. A. Investigações Geofísicas de Superfície e de Poço no Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG-USP. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 22 (3), p. 245-258. 2004b.

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

PORSANI, J. L.; SAUCK, W. A. Ground-penetrating radar profiles over multiple steel tanks: Artifact removal through effective data processing. **Geophysics**, v. 72, p. J77- J83, 2007.

PORSANI, J. L.; JANGELME, G. M.; KIPNIS, R. GPR survey at Lapa do Santo archaeological site, Lagoa Santa karstic region, Minas Gerais state, Brazil. **Journal of Archaeological Science**, v. 37, n.12, p. 1141-1148, dec. 2010.

PIPAN, M.; BARADELLO, L.; FORTE, E.; PRIZZON, A.; FINETTI, I. 2-D nad 3-D processing and interpretation of multi-fold ground penetrating radar data: a case history from an archaeological site. **Journal of Applied Geophysics**, v. 41, p. 271-292. 1999.

PRINGLE, J. K.; JERVIS, J. R. Electrical resistivity survey to search for a recent clandestine burial of a homicide victim, UK. **Forensic Science International**, v. 202, p. e1-e7, may. 2010.

PRIGLE, J.K.; JERVIS, J.R.; HANSEN, J.D.; JONES, G.M.; CASSIDY, N.J.; CASSELLA, J.P. Geophysical Monitoring of Simulated Clandestine Graves Using Electrical and Ground-Penetrating Radar Methods: 0-3 Years After Burial. **Journal of Forensic Science**, v. 57, n.6, p. 1467-1486, nov. 2012.

PRINGLE, J. K.; GIUBERTONI, M.; CASSIDY, N. J.; WISNIEWSKI, K. D.; HANSEN, J. D.; LINFORD, N. T.; DANIELS, R. M. The use of magnetic susceptibility as a forensic search tool. **Forensic Science International**, v. 246, p. 31-42, oct. 2014.

PYE, K.; CROFT, D. J. Forensic Geoscience: Principles, Techniques and Applications. **Geological Society of London Special Publication**, London, v. 232, p. 308, 2008.

REYNOLDS, J. M. **An introduction to applied and environmental geophysics**. Ed. John Wiley and Sons, p. 796 p. 1997.

RIBAUX, O; TALBOT WRIGHT, B. Expanding forensic science through forensic intelligence. *Science & Justice*, v.54(6), p.494- 501, 2014. [doi:10.1016/j.scijus.2014.05.001](https://doi.org/10.1016/j.scijus.2014.05.001).

ROBINSON, M; BRISTOW, C; MCKINLEY, J; RUFFELL, A. Ground Penetrating Radar. *Geomorphological Techniques, Part 1, Sec. 5.5*, p. 26, 2013.

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

RODRIGUES, S. I.; PORSANI, J. L. Utilização do GPR para caracterizar tambores plásticos enterrados no sítio controlado de geofísica rasa do IAG/USP. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24(2), p.157-168, abr. 2006.

ROCHA, H. O.; SILVA, M. W. C.; MARQUES, F. L. T.; FILHO, D. C. L. Gradiometria magnética e radar de penetração de solo aplicados em Esterias de Pernalva (MA). **Revista do Instituto de Geociências da USP**, v. 15 (1), p. 3-14, 2014.

RODRIGUES, S. **Contribuição dos métodos GPR e Eletromagnético Indutivo em estudos de sítios arqueológicos de sambaquis costeiros no Estado de Santa Catarina**. 246 f. Tese (Doutorado em Geofísica) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosférica, São Paulo, 2009.

ROOSEVELT, A. *Moundbuilders of the Amazon: Geophysical Archaeology on Marajo Island, Brazil*. San Diego, Academic Press, p. 480, 1991.

RUFFELL, A; MCKINLEY, J. Forensic geoscience: applications of geology, geomorphology and geophysics to criminal investigations, **Earth-Sci. Rev.** v 69, p. 235–247, 2005. [https://doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.08.002](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.08.002).

RUFFEL, A. Searching for the IRA “Disappeared”: Ground-penetrating Radar Investigation of a Churchyard Burial Site, Northern Ireland. **Journal of Forensic Sciences**, v. 50, n. 6, p. 1-6, nov. 2005.

RUFFEL, A.; MCKINLEY, J. **Geoforensics**. John Wiley and Sons, Chichester, UK. 340p, 2008.

RUFFELL, A; WACH, G. D. Location of the Brecourt (Normandy, France) WW2 Howitzer battery using a geoforensic search strategy. **Journal of Conflict Archaeology**, v.13(3), p.154–166, 2018. [https://doi:10.1080/15740773.2018.1583480](https://doi.org/10.1080/15740773.2018.1583480).

SALSAROLA, D.; POPPA, P.; AMADASI, A.; MAZZARELLI, D.; GIBELI, D.; ZANOTTI, E.; PORTA, D.; CATTANEO, C. The utility of ground-penetrating radar and its time-dependence in the discovery of clandestine burials. **Forensic Science International**, v. 253, p. 119-124, june. 2015.

SANDMEIER, K. J. REFLEXW Version 7.4, Windows 9x/2000/NT. Program for the processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction and transmission data. Manual do Software, Karlsruhe, Germany, 209p. 2006.

SAUCK, W. **Controlled Site for Shallow Geophysics. Institute for Water Sciences**, Department of Geosciences, Western Michigan University. 1996.

SCHULTZ, J. J.; COLLINS, E. M.; FALSETTI, A. B. Sequential monitoring of burials containing large pig cadavers using ground-penetrating radar. **Journal of Forensic Sciences**, v.51, n.3, p. 607-616, may. 2006.

SCHULTZ, J. J.; MARTIN, M. M. Controlled GPR grave research: Comparison of reflection profiles between 500 and 250 MHz antennae. **Forensic Science International**, v. 209, p. 64-69. 2011.

SCHULTZ, J. J.; MARTIN, M. M. Monitoring controlled graves representing common burial scenarios with ground penetrating radar. **Journal of Applied Geophysics**, v. 83, p. 74-89, may. 2012.

SCHULTZ, J. J.; WALTER, B. S.; HEALY, C. Long-term sequential monitoring of controlled graves representing common burial scenarios with ground penetrating radar: Years 2 and 3. **Journal of Applied Geophysics**, v. 132, p. 60-74, sep. 2016.

SLOB, E. C; GROENENBOOM, J; FOKKEMA, J. T. **Subsurface Sensing Technologies and Applications**, v. 4(1), p. 5-18, 2003.
<https://doi.org/10.1023/a:1023007313060>.

SOLLA, M.; RIVEIRO, B.; ALVARÉS, X. M.; ARIAS, P. Experimental forensic scenes for the characterization of ground-penetrating radar wave response. **Forensic Science International**, v. 220, p. 50-58, jan. 2012.

SOUZA, D. M. **GPR aplicado à arqueologia nas áreas do porto da Cargill (Santarém/PA) e no palacete Faciola (Belém/PA)**. 61 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.

SILVA, L. M. C.; NASCIMENTO, W. G.; LUIZ, J. G.; COSTA, A. A. S.; CATETE, C. P. FORAMB: campo de testes controlados para Geofísica Forense, Ambiental e de Resgate, Belém/PA. In: III Simpósio Brasileiro de Geofísica, 2008, Belém.

SYAMBAS, R.N. An approach for predicting the shape and size of a buried basic object on surface ground penetrating radar system. **International Journal of Antennas and Propagation**, v. 2012, p. 1-13. 2012.

- STRONGMAN, K. B. Forensic Applications of Ground Penetrating Radar. In: Ground Penetrating Radar. ed. J. Pilon, Geological Survey of Canada, Paper 90–4, p. 203–911.
- STRATTON, J. A. **Electromagnetic Theory**. McGraw Hill Book Company, New York, p. 651. 1941.
- STOLT, R. H. Migration by Fourier transform. **Geophysics**, v. 43 (1), p. 23-48. 1978.
- TAFLOVE, A. **Advances in Computational electromagnetics: The Finite – Difference Time-Domain method**. Artech House, Norwood, Ma. 1998.
- THABIT, J. M.; AL-BANNA, A. S.; AL-RAHIM, A. M. Mapping subsurface archaeological features using ground penetrating radar in the ancient city of Ur, Iraq. **Archaeological Research in Asia**, v. 17, p.149-160, 2018.
- TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics**. Cambridge University Press, p. 770. 1990.
- UTSI, C. E. **Ground penetrating radar Theory and Practice**. Elsevier, Cambridge. UK, 209p, 2017.
- VAN DAM, L. R. **Causes of ground-penetrating radar reflections in sediment**. 120f. Thesis – Neatherlands Institute of Applied Geoscience. 2001.
- WHITING, B. M.; McFARLAND, D. P.; HACKENBERGER, S. Three-dimensional GPR study of a prehistoric site in Barbados, West Indies. **Journal of Applied Geophysics**, v. 47, p. 217-226. 2001.
- WARD, O. S. H. 1990. **Resistivity and Induced Polarization Methods. Geotechnical and Environmental Geophysics**, Volume 1: Review and Tutorial. Society of Exploration Geophysics, Tulsa, p. 147-189.
- WIDODO, I. F. A.; KHALID, S.; MUTHI'A, J. M.; HIDAYAT, M. Detecting buried human bodies using ground-penetrating radar. **Canadian Center of Science and Education**, v. 5 (2), p. 59-68. 2016.
- YEE, K. S. Numerical solution of initial boundry value problems involving maxwell's equation in isotropic media. **Transactions on Antennas and Propagation**, v. 14 (3), p. 302-307, 1966.
- YILMAZ, O. **Seismic Data Processing**. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, p. 524.1987.
- YILMAZ, S.; BALKAYA, Ç.; ÇAKMAK, O.; OKSUM, E. GPR and ERT explorations at the archaeological site of kiliç village (Isparta, SW Turkey). **Journal Applied Geophysics**, 2019.doi.org/10.1016/j.jappegeo.2019.103859.
- YUAN, D.; FAN, D. Salient Map of hyperboles in GPR images. **EURASIP Journal on Image and Video Processing**, v.65, p. 1-8. 2018.

ZHAO, Y; WU, J; XIE, X; CHEN, J; GE, S. Multiple suppression in GPR image for testing back-filled grouting within shield tunnel. Proceedings of the XIII International Conference on Ground Penetrating Radar. 2010. [doi:10.1109/icgpr.2010.5550123](https://doi.org/10.1109/icgpr.2010.5550123).

ZHAO, W.; FORTE, E.; PIPAN, M.; TIAN, G. Ground Penetrating Radar (GPR) attribute analysis for archaeological prospection. **Journal of Applied Geophysics**, 2013, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.04.010>.

ZENG, X.; McMECHAN, G. A. GPR characterization of buried tanks and pipes. **Geophysics**, v. 62 (3), p. 797-806. 1997.

APÊNDICE 1- ARTIGO PUBLICADO

The forensic application of ground-penetrating radar, Tekoha Jevy indigenous village, Paraná, Brazil



RAFAEL E. CANATA^{1*}, FÁBIO A. S. SALVADOR², WELITOM R. BORGES³, FRANCISCO J. F. FERREIRA¹, EDUARDO X. SEIMETZ³, IVAN PINTO² & EDUARDO O. BARROS²

¹Laboratory for Research in Applied Geophysics, Federal University of Paraná, Cel. Francisco H. dos Santos Avenue, 81531-980 Curitiba, PR, Brazil

²Technical–Scientific Sector, Federal Police Department, Curitiba, PR, Brazil

³Geoscience Institute, University of Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, CEP 70910-900 Brasília, DF, Brazil

 EXS, 0000-0001-5726-5884

*Correspondence: rafaelcanata@gmail.com

Abstract: Any archaeological site, according to the Brazilian Federal Constitution, is a patrimony of the Union; consequently, when crimes against this cultural patrimony occur, it becomes the responsibility of the Federal Police of Brazil. In 2013, there was a complaint to the Brazilian Federal Public Prosecutor's Office about the depredation of an archaeological site and forced withdrawal of the indigenous people because of the construction of a multimodal port in the city of Guaíra, in the state of Paraná, in southern Brazil. Thus, the Technical–Scientific Sector of the Federal Police Department, in partnership with Brazilian universities, used standard geophysical methods such as ground-penetrating radar (GPR) to investigate and locate buried archaeological targets. This paper discusses the results of 2D and 3D investigations in the Tekoha Jevy indigenous village, located in Guaíra County. In the field, 32 parallel sections of GPR data were acquired using 250 and 700 MHz shielded antennas. The results showed several anomalies, two of which were subjected to field checks using excavations, which revealed several artefacts such as ceramic fragments associated with ancient indigenous occupations on the banks of the Paraná River.

According to Article 2 of the Brazilian Law number 3.924, dated 1961, archaeological heritage is protected, which is consistent with several other countries. These protected items include archaeological monuments and prehistoric deposits (these are locally known as sambaquis, deposits, steels and earthen jar), sites, and human remains that represent the culture of the Palaeo-Amerindians of Brazil.

Archaeological sites found throughout Brazil are of different origins. For instance, they may be related to the following (Bucu 2014):

- rock art found in the Serra da Capivara National Park, in the state of Piauí;
- sites in the central and south region inhabited by ancient indigenous people, as indicated by ceramic fragments on the ground surface;
- man-made hills that acted as barriers to protect indigenous villages and cemeteries associated from flooding caused by fluctuations in the levels of the Amazon River (known as tesos), located on the islands of Marajó in the state of Pará;

- accumulations of organic material, limestone, fish bones, shells and other food remains (known as sambaquis) found in coastal locations and associated with ancient communities.

In the state of Paraná, archaeological sites related to indigenous tribes are located to the east of the Paraná River. In the western region of Paraná, between the cities of Terra Roxa and Guaíra, 13 indigenous vilages of the Avá-Guarani ethnic group were identified. This included the village Tekoha Jevy, which is believed by archaeologists to be related to the Tupi-Guarani tradition characterized by ceramic fragments (IPHAN 2015).

Associated with the construction of a port at Guaíra in 2012, in the year 2013 the Brazilian Federal Public Prosecutor's Office (MPF) reported a breach of an archaeological site. The MPF subsequently commissioned the Technical–Scientific Sector of the Federal Police Department, in the state of Paraná, to conduct an investigation into the alleged destruction of archaeological artefacts at the site. A multidisciplinary team was formed that included

From: FITZPATRICK, R.W. & DONNELLY, L.J. (eds) *Forensic Soil Science and Geology*.

Geological Society, London, Special Publications, **492**,

<https://doi.org/10.1144/SP492-2017-329>

© 2019 The Author(s). Published by The Geological Society of London. All rights reserved.

For permissions: <http://www.geolsoc.org.uk/permissions>. Publishing disclaimer: www.geolsoc.org.uk/pub_ethics

Federal Police experts, geologists from the Federal University of Paraná, and archaeologists and anthropologists from the National Institute of Historic and Artistic Heritage. In the period from 7 to 16 October 2014 this team visited the site to identify the presence of any archaeological artefacts, including a ceramic vase.

The objectives of the investigation team were as follows:

- to verify archaeological evidence on the ground surface;
- to identify the boundaries of the archaeological site;
- to identify the most appropriate geophysical methods to investigate the site;
- to deploy a geophysical survey, including the analysis and interpretation of geophysical data, for the identification of any geophysical anomalies that may be consistent with archaeological remains;
- invasive verification of geophysical anomalies, and the identification and recording of the targets.

Overview of archaeological geophysics in Brazil

Further information on the suitability of geophysical methods to map archaeological sites are found in Conyers & Lucius (1996), Conyers & Goodman (1997), Conyers (2004, 2006, 2012), Conyers & Leckebusch (2010), Zhao *et al.* (2013) and Allen *et al.* (2017), whereas the applications of 2D and 3D ground-penetrating radar (GPR) for archaeological sites has been discussed by Goodman *et al.* (1995), Malagodi *et al.* (1996), Groenenboom *et al.* (2001) and Novo *et al.* (2008). These include the influence of data-acquisition parameters for generating 3D time slices, such as the spacing between profiles, spatial and temporal sampling intervals, and sampling frequency.

In Brazil, Alves (1979) was the first to apply geophysical techniques to the investigation of archaeological sites, which included magnetic and electromagnetic methods. Later, Roosevelt (1991) used electrical resistivity, magnetic, electromagnetic and GPR methods to map in detail the *tesos* of the Marajó Island, in the state of Pará, in northern Brazil. Gomes (2004) integrated geophysical, electromagnetic and radiometric data with archaeological data at three sites of fluvial sambaquis located in the state of São Paulo, resulting in the identification of archaeological features in the subsurface.

Rodrigues *et al.* (2009) developed geophysical surveys using GPR with a frequency of 200 MHz and inductive electromagnetic methods under three sambaquis archaeological sites located in a coastal region in the state of Santa Catarina. The integration of these complementary methods was found to be

effective in guiding archaeological surveys, discovering new artefacts and mapping the strata of the sambaquis.

Aragão *et al.* (2010) carried out geophysical surveys using magnetic, gamma-ray spectrometric and GPR methods to guide archaeological excavations at two sites, Bittencourt and Jambuaçu, which are located west of Belém, in the state of Pará. The magnetic responses and GPR profiles indicated the presence of several ceramic fragments. The gamma-ray spectrometry enabled the differentiation of alternating clay and sand soil layers, which corresponded to past human occupation. Other authors have also successfully used geophysics to assist in the investigation of archaeological sites and to guide investigations (Cezar *et al.* 2001; Porsani *et al.* 2010; Souza 2012; Gouvêa *et al.* 2013; Rocha *et al.* 2014).

Geology

The study area is located in the Paraná–Etendeka Igneous Province (PEIP), which represents a major magmatic event during the Lower Cretaceous (Janasi *et al.* 2011) and precedes the fragmentation of southern Gondwana and the opening of the South Atlantic Ocean (Licht 2016). The province covers approximately 1.2×10^6 km² largely within the South America continent, and there are equivalent terrains in parts of Africa. The bedrock predominantly comprises lava formed mainly of basalts and basaltic andesites with minor quantities of acidic rocks. Figure 1 shows the location of the city of Guaíra, in the state of Paraná, near the Paraná River, and the position of the Tekoha Jevy village.

GPR survey

Method

GPR is a geophysical method that uses electromagnetic waves (radar pulses) to image the ground. The frequencies vary between 10 MHz and 3 GHz, and are generated by a transmitting antenna. Variations in the electrical properties of the ground (and any associated anthropogenic features) that occur at the interfaces cause part of the transmitted signal to be reflected, which is then captured and recorded by another antenna, called a receiver. In this way, the captured signal is amplified, digitized and stored in a control unit to be viewed and processed (e.g. Davis & Annan 1989).

Theory

Rocks, soils and man-made objects buried in the ground have specific physical properties, such as

GPR APPLIED TO FORENSIC EXPERTISE IN ARCHAEOLOGY

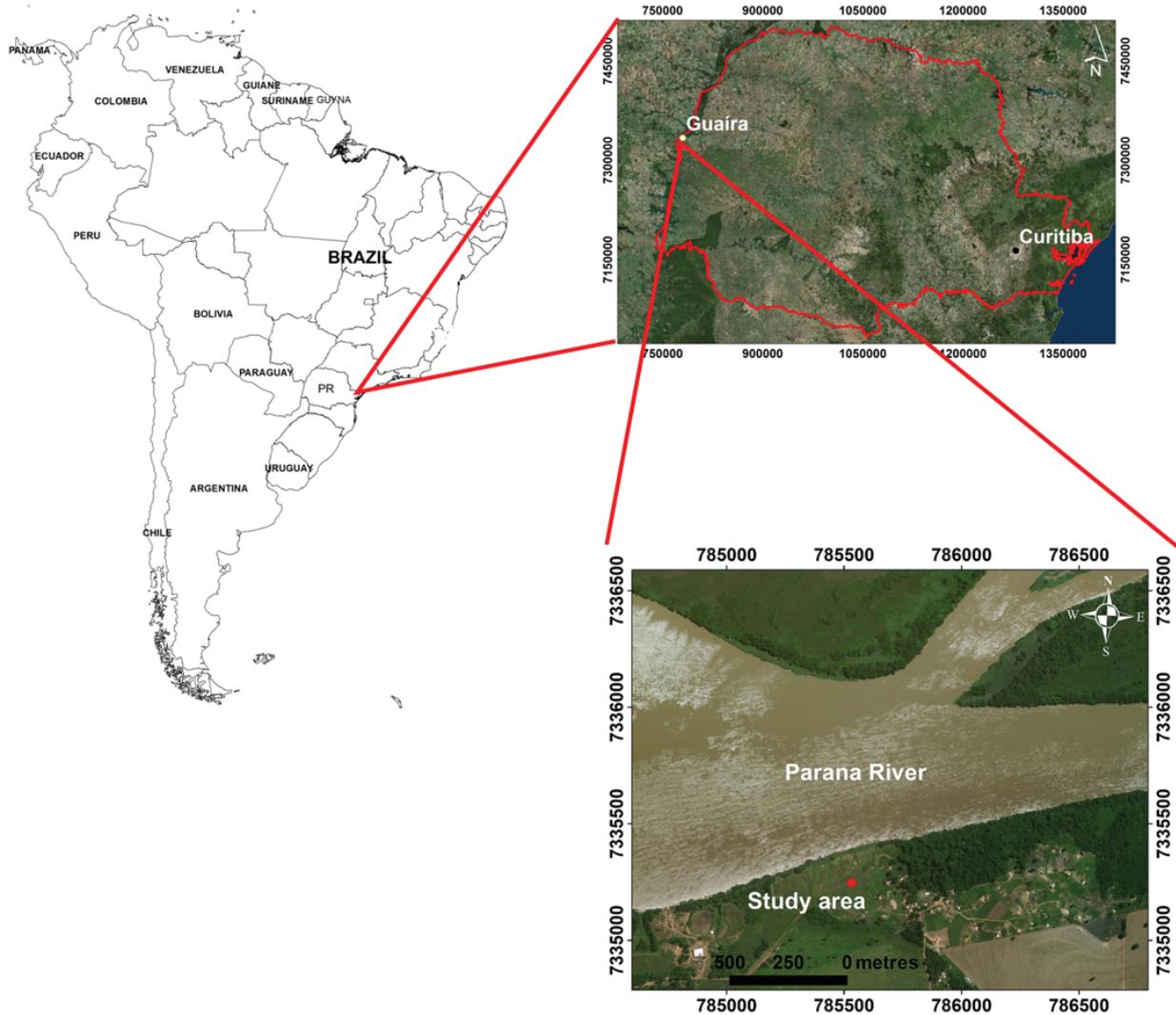


Fig. 1. Location map of the study area (Google Earth Pro, SIRGAS 2000/UTM zone 21S).

dielectric permittivity (ϵ), electrical conductivity (σ) and magnetic permeability (μ). However, the same material can present variations in its physical properties due, for example, to the amount of water, porosity, clay content and mineralogy. For GPR applications, dielectric permittivity is the most important parameter (Jol 2009), and is often expressed as follows:

$$k = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (1)$$

where k is the dielectric constant, ϵ is the dielectric permittivity of the medium and ϵ_0 is the dielectric permittivity of the vacuum.

The dielectric permittivity directly influences the velocity of propagation (v) of the electromagnetic wave in the ground, while the electrical conductivity (σ) is reflected in the attenuation of the electromagnetic signal (α) (Davis & Annan 1989; Conyers 2004; Daniels 2004). The relationships between the

variables are indicated in the expressions below:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\sigma}} = \frac{c}{\sqrt{k}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{k}} \quad (2)$$

$$\alpha = 1.636 \frac{\sigma_0}{\sqrt{\epsilon_0}} \quad (3)$$

where c is the velocity of the electromagnetic wave in a vacuum ($3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$).

In the GPR method, to generate significant expressive reflections a significant contrast in dielectric permittivity is required between the interfaces: that is, between the host (ϵ_1) and the target (ϵ_2) (Annan & Cosway 1992). Therefore, the reflection coefficient (r_{gpr}) can be expressed by equation (4) as:

$$r_{\text{gpr}} = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (4)$$

R. E. CANATA *ET AL.*

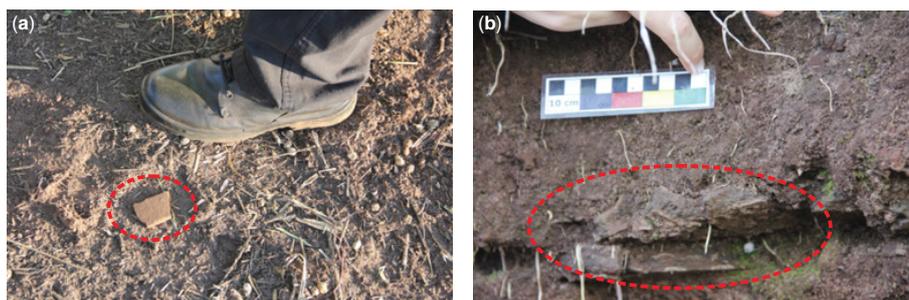


Fig. 2. (a) Ceramic fragments on the surface. (b) Archaeological material in the soil profile (see L8 in Fig. 4c).

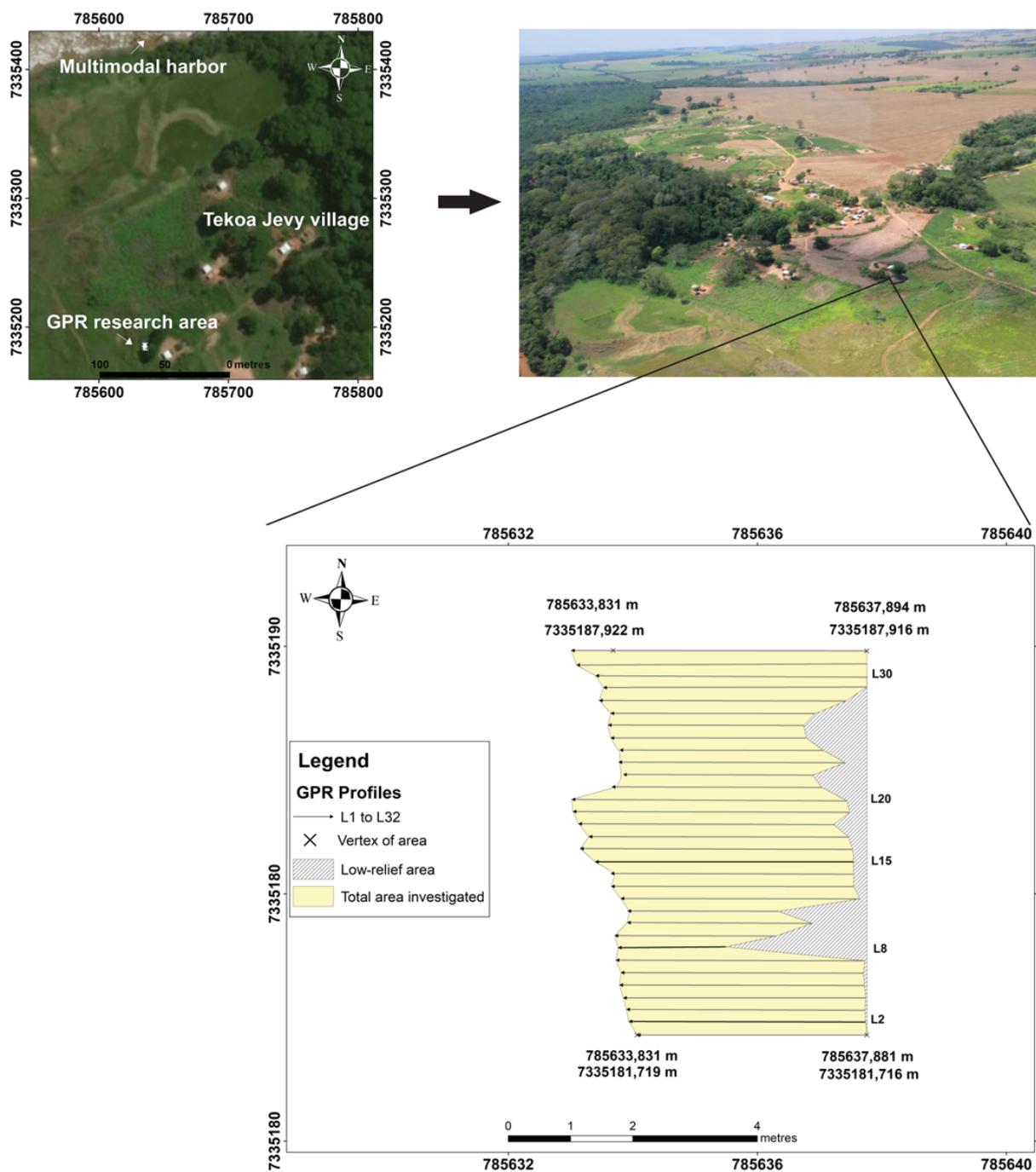


Fig. 3. Map of the Tekoha Jevy indigenous village study area indicating the position of the GPR profiles.

GPR APPLIED TO FORENSIC EXPERTISE IN ARCHAEOLOGY

Data acquisition and processing

Following the site inspection of the indigenous village at Tekoha Jevy, a site was selected for the deployment of the GPR survey. This was primarily based on the following:

- an indication of the most preserved area of the site as determined by the IPHAN archaeology team; this was based on the recovery of archaeological materials that could be identified and their original depositional context;
- the presence of the surface artefacts (Fig. 2a);
- the verification of ceramic fragments preserved in the soil profile (Fig. 2b).

For the implementation of the geophysical surveys, the vegetation was cleared. In addition, pebbles, rock fragments and other materials that could also

potentially compromise the deployment of the instruments or data quality were also cleared.

The geophysical data were acquired using the Duo Detector (Ingeneria Dei Sistemi (IDS)), composed of three interconnected modules. The first module comprised a set of shielded antennas with frequencies in the range of 250–700 MHz. The second corresponded to the control unit and the third included a data storage unit or netbook. Data were recorded continuously, with the following acquisition parameters: (a) a trace spacing of 0.02 m, (b) 512 samples per trace and (c) a temporal window of 120 ns.

The geophysical survey resulted in 32 profiles orientated in an east–west direction. These were spaced 0.02 m apart and the length of each traverse varied between 1.72 and 4.68 m, due to irregularities in the terrain (Fig. 3). The results of the survey were

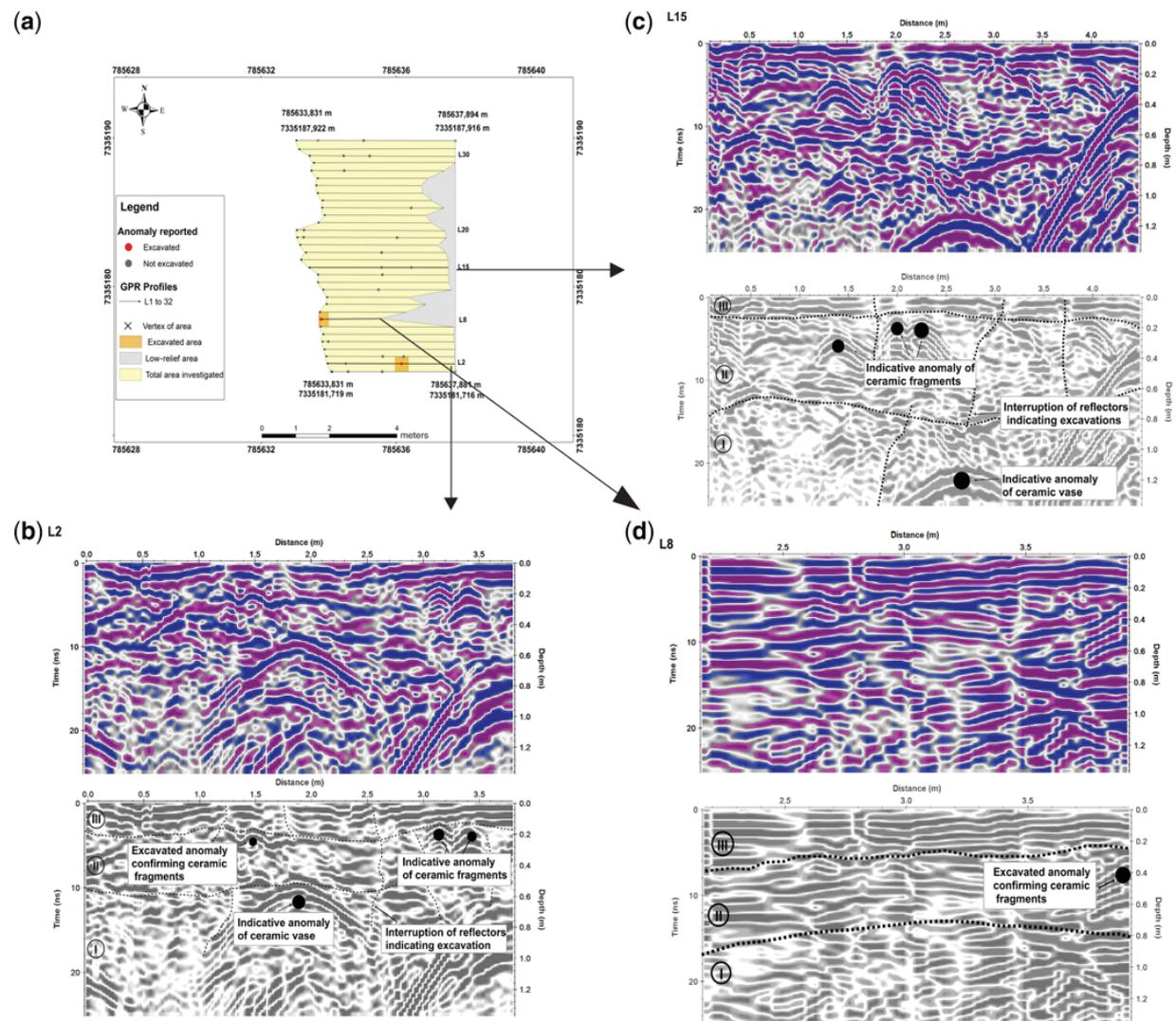


Fig. 4. Results of 2D GPR cross-sections. (a) Location of the GPR profiles indicating the anomalies excavated and not excavated. (b) L2 radargram and its interpretation (c). (d) L15 radargram and its interpretation (e). (f) L8 radargram and its interpretation (g).



Fig. 5. (a) Excavation made to investigate the GPR anomaly recorded at the 1.50 m position, along the traverse L1–L3 profiles. (b) Evidence of the fragments discovered at a depth of 0.18 m and recovered from the excavation.

analysed in real time, through the visualization of the respective sections. Any anomalies detected by the GPR were identified by means of flags that were inserted into the ground to denote the subsurface position of each anomaly as shown on the radargram.

The data were processed in ReflexW software, version 7.0. The processing routine for 2D and 3D sections is described below:

- subtract-mean dewow (removes low-frequency electronic noise);
- station correction (sets the first record of the GPR signal to zero time in the ground);
- time cut (limits GPR time logging by maximizing the processing time to 25 ns);
- energy decay (raises the signal amplitude because of the wave attenuation during its wave propagation);
- removes background (eliminates coherent events such as horizontal reflectors);
- filter 1D (removes incoherent noises);
- migration and time–depth conversion (converts the reflection events in a real position in terms of depth below ground level).

To obtain the electromagnetic velocity of the ground (soils), a control test was performed whereby the metal part of a hoe was buried in a cavity at a depth with 0.25 m below ground level. The velocity obtained was approximately 0.109 m ns^{-1} , which was subsequently used on the data (conversion time-to-depth).

During the production of the depth slice sections, the instantaneous amplitude, trace envelope, was applied to better define the archaeological artefacts. This parameter is a measure of the reflectivity force, which is proportional to the square root of the complete energy of the signal at an instant in time and allows an evaluation of the distribution of the reflected energy along the trace (Hahn 1996).

Results and discussion

GPR has been deployed and applied to archaeological investigations whereby high-frequency antennas were used due to their greater depth of penetration and for providing results with higher lateral

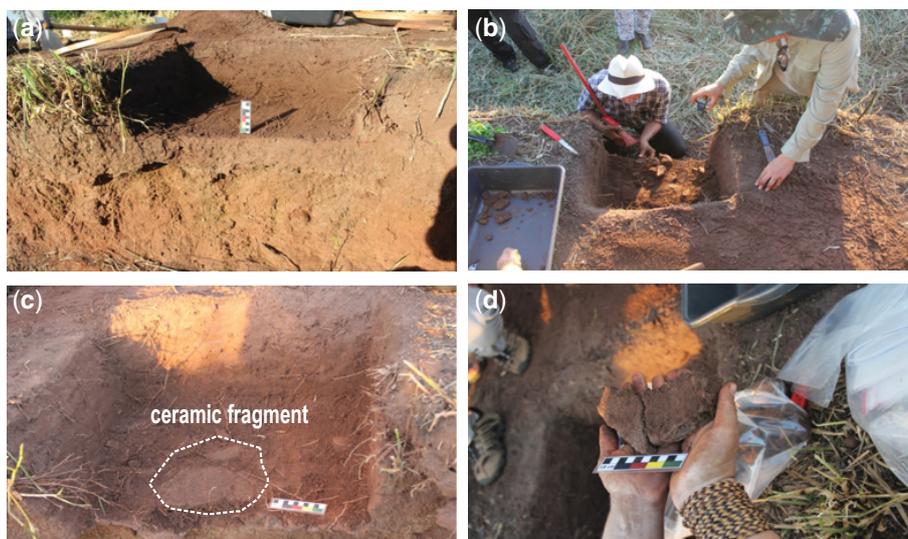


Fig. 6. (a) & (b) Second excavation to recover the ceramic fragments. (c) The removal of the ceramic fragments. (d) Photograph to show the relative size of the archaeological artefact.

GPR APPLIED TO FORENSIC EXPERTISE IN ARCHAEOLOGY

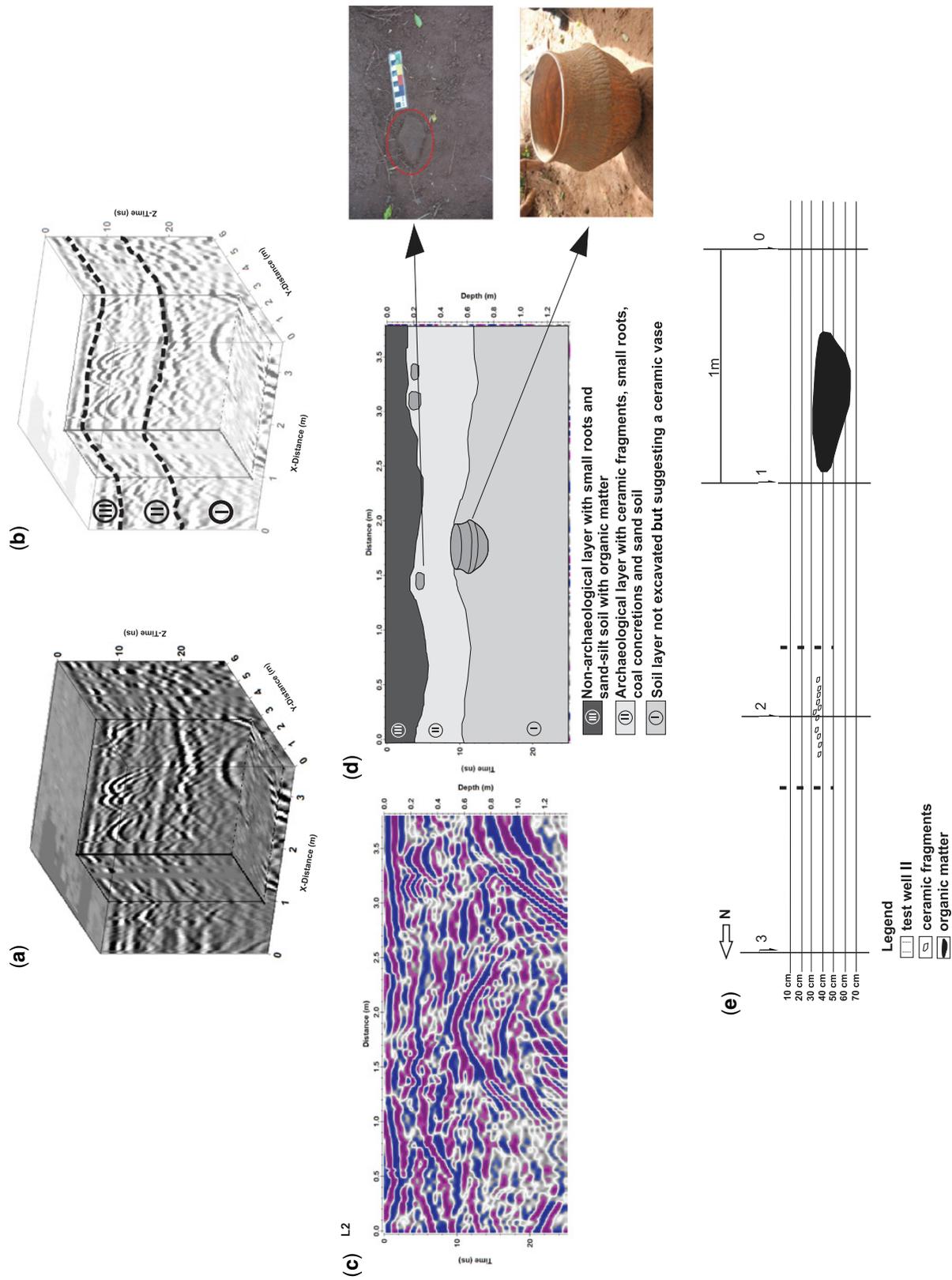


Fig. 7. (a) Stratigraphic 3D block model derived from the GPR data and its interpretation (b). (c) L2 radargram and stratigraphic profile of the archaeological site obtained through indirect and direct methods (d). (e) Stratigraphic representation of part of the exposed profile indicated in Figure 2b (modified from IPHAN 2015).

resolution. For these reasons, the results of the 2D and 3D surveys are presented using the 700 MHz antenna. The location of the GPR profiles indicating the excavated and unexcavated anomalies are shown in Figure 4a.

The radargrams for the 2D data (Fig. 4b, d, f) show reflectors up to 25 ns, which correspond to a depth of 1.25 m. Anomalies with dimensions of between 0.10 and 0.35 m are shown to exist at a depth between 0.12 and 0.37 m. These were later proven to correspond to fragments of indigenous ceramics. At depths between 0.50 and 1.20 m, other anomalies between 0.60 and 0.80 m wide were observed. These anomalies are interpreted as representing a ceramic vase, based on the dimensions of a vase observed in the

village and also on the interruptions of the subsurface reflectors observed in the radargrams (Fig. 4c, e, g).

To verify the results of the GPR, as shown on the radargrams, two excavations were made. The first excavation was located approximately 1.50 m along profiles L1–L3, as shown in Figure 4a, and were 0.60 × 0.60 m wide and 0.18 m deep (see Fig. 4b, c). This excavation revealed archaeological artefacts which included ceramic fragments, varying from 0.05 to 0.25 m in size. Soil samples were taken to a depth of 0.35 m, which is below the zone where the ceramics occurred as indicated on the radargram. The first excavation and recovery of the ceramic fragments can be seen in Figure 5a and b.

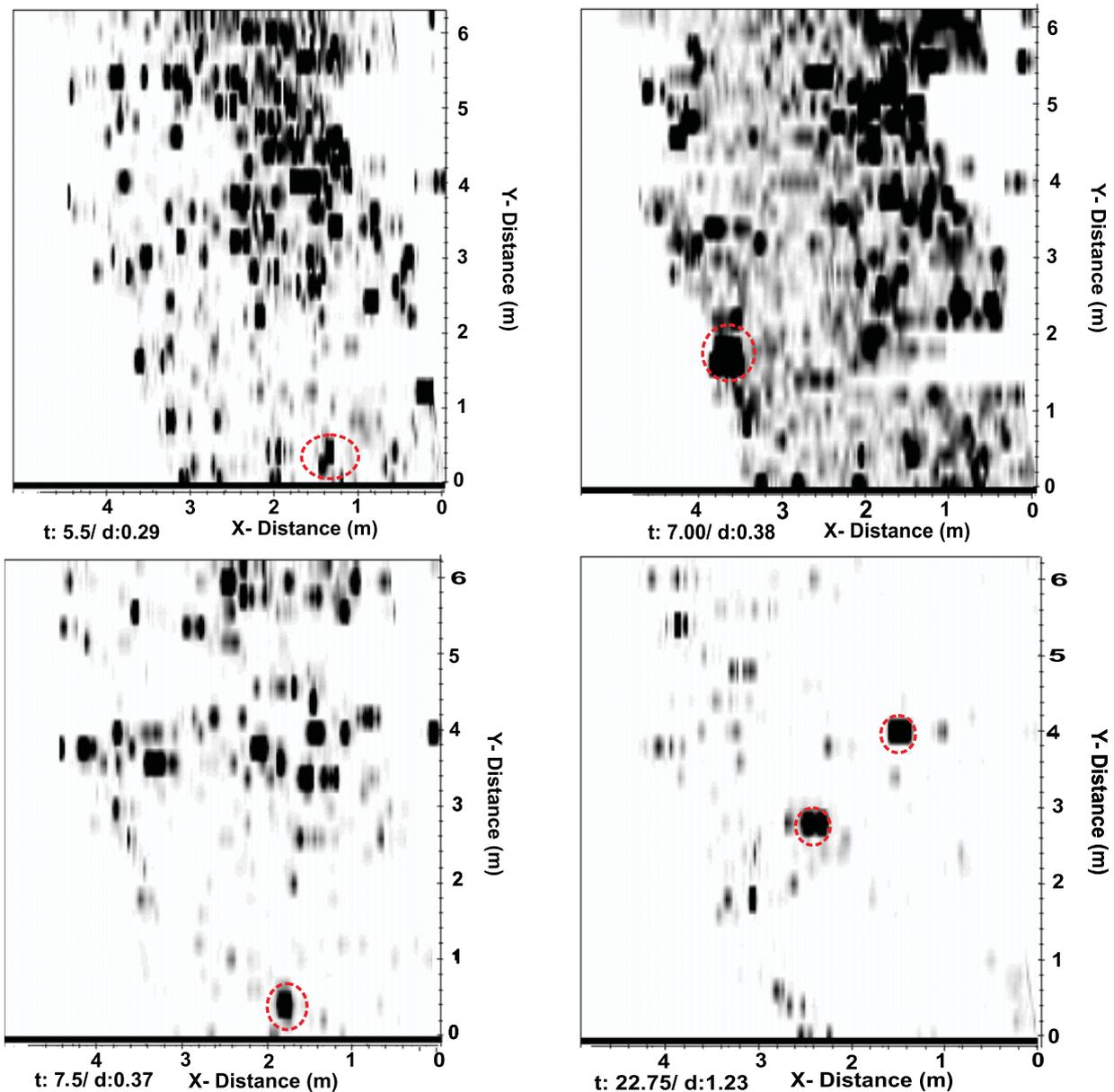


Fig. 8. Depth-slice profiles through the GPR data and the respective high-amplitude geophysical signatures of sites showing the potential location of archaeological artefacts. d, depth in m; t, time in ns.

GPR APPLIED TO FORENSIC EXPERTISE IN ARCHAEOLOGY

The second excavation was located approximately 3.7 m along the profiles L7–L9 (see Fig. 4a) and was performed on the semi-hyperbolic anomaly representing the ceramic fragment preserved in the soil profile (see Fig. 2b). As interpreted in the radargram (see Fig. 4g), the ceramic artefact is at a depth of approximately 0.37 m, and through this excavation several ceramic fragments with dimensions ranging from 0.10 to 0.30 m could be recovered (Fig. 6a, b). No rock boulders or bedrock were found in the excavations that related to the GPR radargrams anomalies.

Based on the results and interpretations of the 2D and 3D GPR and the ground-truthing excavations, a stratigraphic profile of the soil and the archaeological artefacts was produced (Fig. 7a–d). This showed three distinct layers, as follows:

- Upper layer III: a non-archaeological layer with small roots and sand–silt soil with organic matter (thickness of 0.18 m).
- Middle layer II: an archaeological layer with ceramic fragments, small roots, coal concretions and sand soil that measured 0.18–0.50 m.
- Lower layer I: a soil layer that was not excavated but the anomalies on the GPR radargrams suggested that it included a ceramic vase at a depth of between approximately 0.50 and 1.30 m.

The profile derived from the geophysical interpretation showed similarities to the interpretation prepared by the team of IPHAN archaeologists. According to the IPHAN (2015), in the archaeological layer (see Fig. 7e), located in the area of GPR acquisition, it was possible to identify a dark soil, anthropogenic soil and several quantities of ceramic fragments. The archaeological site had a depth of 0.70 m. However, some GPR results indicate hyperbolic anomalies at depths greater than 0.80 m, suggesting the presence of other artefacts (ceramic vases).

Conyers (2004) described high-amplitudes areas, shown in depth-slice cross-sections, to indicate sites with marked contrasts in physical properties. Where these are detected they may be associated with potential archaeological artefacts. As such, from the interpolation of the 2D profiles, and the depth-slice cross-sections obtained during this investigation, the deployment of the GPR successfully located the archaeological artefacts.

Figure 8 illustrates a depth-slice cross-section at 5.50–22.75 ns; this corresponds to 0.29–1.23 m. The anomalies denoted in the form of dotted circles were indicated as reflected waves with high amplitudes and were associated with material that had a marked contrast in physical properties. Similarly, the interval range of 5.5–7.0 ns corresponds to small hyperboles interpreted in 2D sections as ceramics fragments and verified by two excavations. From 11.50 and 22.75 ns the reflections correspond

to larger anomalies, which are suggested to represent the ceramic vase interpreted in layer I (see Fig. 7c, d). The interpretation of the anomalies indicated in Figure 8 occurred through the associations of the results in 2D and 3D.

Vegetation roots, which are usually interpreted as continuous and branched reflectors along several directions, were not identified. This is thought to be due probably to the spatial high resolution of the survey: that is, the traverses were spaced at 0.20 m.

Conclusions

The acquisition of GPR data, using a 700 MHz antenna, resulted in positive responses to help locate archaeological artefacts. Several 2D profiles were produced that indicated anomalies, shown on radargrams, had different dimensions. These were proven using two excavations to correspond to indigenous ceramic fragments, found in a soil layers at depths of between 0.18 and 0.50 m. The largest hyperboles on the radargrams corresponded to depths of between 0.50 and 1.30 m and represented a ceramic vase.

Depth-slice cross-sections of the radargrams, at spacings of 0.20 m, revealed the relative position and dimensions of these buried archaeological targets as verified by the of ground-truthing excavations. The integration of the 2D GPR data with the depth-slice cross-sections was an important step in the investigation, as this reduced any excavation error and enabled the archaeologists and recovery teams to precisely locate ceramics fragments.

The GPR has therefore proved to be an effective method in assisting the Brazilian Federal Police to investigate and recover archaeological artefacts at Tekoha Jevy indigenous village, attesting to the area investigated being an archaeological site. In this way, those responsible for damage to the cultural heritage may suffer criminal penalties established by law. Finally, the partnership between public security institutions and universities is of fundamental importance for the growth of forensic science in Brazil.

Acknowledgements The authors would like to thank the forensic criminologist unit of the Federal Police in Brazil, specifically in the technical and scientific sector, Paraná, the Laboratory of Mineral and Rock Analysis of the Federal University of Paraná and the National Institute of Historic and Artistic Heritage for their collaboration in research.

Funding F.J.F. Ferreira was supported in this research by a fellowship from the National Council for Scientific and Technological Development, CNPq (ID: 303826/2018-5) and R.E. Canata was supported in this research by a fellowship from the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel, CAPES (ID: 03741868981), Ministry of Education, Brazil.

Author contributions REC: Conceptualization (Equal), Data curation (Lead), Formal analysis (Lead), Funding acquisition (Supporting), Investigation (Lead), Methodology (Lead), Project administration (Supporting), Resources (Lead), Supervision (Equal), Validation (Equal), Visualization (Lead), Writing - Original Draft (Lead), Writing - Review & Editing (Lead); FASS: Conceptualization (Lead), Formal analysis (Equal), Investigation (Lead), Methodology (Lead), Project administration (Lead), Supervision (Lead), Validation (Equal), Visualization (Equal), Writing - Original Draft (Supporting), Writing - Review & Editing (Supporting); WRB: Conceptualization (Lead), Formal analysis (Lead), Investigation (Supporting), Methodology (Supporting), Software (Lead), Supervision (Lead), Validation (Lead), Visualization (Equal), Writing - Original Draft (Supporting), Writing - Review & Editing (Supporting); FJFF: Conceptualization (Lead), Project administration (Supporting), Resources (Supporting), Supervision (Lead), Visualization (Supporting), Writing - Original Draft (Supporting), Writing - Review & Editing (Supporting); EXS: Writing - Review & Editing (Supporting); IP: Conceptualization (Supporting), Investigation (Lead), Methodology (Lead), Project administration (Lead), Visualization (Supporting); EOB: Investigation (Supporting), Methodology (Supporting), Project administration (Supporting), Resources (Supporting).

References

- ALLEN, J.S., PORSANI, L.J. & POLUHA, B. 2017. Geofísica arqueológica no ambiente da arqueologia urbana (Archaeological geophysics in the urban archeology environment). *Revista de Arqueologia*, **30**, 235–254, <https://doi.org/10.24885/sab.v30i1.510>
- ALVES, A.J.J. 1979. *Métodos geofísicos aplicados à arqueologia no Estado do Pará*. Master's thesis, Federal University of Pará, Belém, Brazil.
- ANNAN, A.P. & COSWAY, S.W. 1992. *Ground Penetrating Radar Survey Design*. Sensors & Software Inc., Mississauga, Ontario, Canada.
- ARAGÃO, R.C., LUIZ, J.G. & LOPES, P.R.C. 2010. Metodologia Geofísica Aplicada ao Estudo Arqueológico dos Sítios Bittencourt e Jambuaçu, Estado do Pará (Geophysical methodology applied to the archaeological study of the Bittencourt and Jambuaçu sites, State of Pará). *Revista Brasileira de Geofísica*, **28**, 249–263, <http://www.scielo.br/pdf/rbg/v28n2/v28n2a09.pdf>; <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2010000200009>
- BUCO, A.C. 2014. *Sítios arqueológicos brasileiros/Brazilian Archaeology Sites*. UNESCO/Editora Brasileira de Arte e Cultura, Paris/Brasília.
- CEZAR, G., ROCHA, P., BUARQUE, A. & DA COSTA, A. 2001. Two Brazilian archaeological sites investigated by GPR Serrano and Morro Grande. *Journal of Applied Geophysics*, **47**, 227–240, [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(01\)00067-2](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(01)00067-2)
- CONYERS, L.B. 2004. *Ground Penetrating Radar for Archaeology*. Altamira Press, Walnut Creek, CA.
- CONYERS, L.B. 2006. Innovative ground-penetrating radar methods for archaeological mapping. *Archaeological Prospection*, **13**, 139–141, <https://doi.org/10.1002/arp.282>
- CONYERS, L.B. 2012. Advances in ground-penetrating radar exploration in southern Arizona. *Journal of Arizona Archaeology*, **2**, 80–91.
- CONYERS, L.B. & GOODMAN, D. 1997. *Ground-Penetrating Radar: An Introduction for Archaeologists*. Altamira Press, Walnut Creek, CA.
- CONYERS, L.B. & LECKEBUSCH, J. 2010. Geophysical archaeology research agendas for the future: some ground penetrating radar examples. *Archaeological Prospection*, **17**, 117–123, <https://doi.org/10.1002/arp.379>
- CONYERS, L.B. & LUCIUS, J.E. 1996. Velocity analysis in archaeological ground-penetrating radar studies. *Archaeological Prospection*, **3**, 25–38, [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0763\(199603\)3:1<25::AID-ARP39>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0763(199603)3:1<25::AID-ARP39>3.0.CO;2-U)
- DANIELS, J.D. (ed.). 2004. *Ground Penetrating Radar*. The Institution of Electrical Engineers, London.
- DAVIS, J.L. & ANNAN, A.P. 1989. Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, **37**, 531–551, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1989.tb02221.x>
- GOMES, M.J.S. 2004. *Utilização de métodos geofísicos em sambaquis fluviais, região do Vale do Ribeira de Iguape-SP/PR* (Use of geophysical methods in fluvial sambaquis, Ribeira de Iguape region, SP/PR). Master's thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil.
- GOODMAN, D., NISHIMURA, Y. & ROGERS, J.D. 1995. GPR time slices in archaeological prospection. *Archaeological Prospection*, **2**, 85–89, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/1099-0763%28199506%292%3A2%3C85%3A%3AAID-AR6140020204%3E3.0.CO%3B2-%23>
- GOUVÊA, J.L., GOMES, D.M.C., MORAES, C.P. & PY-DANIEL, A.R. 2013. GPR applied to archaeology on the campus of UFOPA, Santarém, Pará. Presented at the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 26–29 August 2013, Rio de Janeiro, Brazil, <https://www.researchgate.net/publication/269250639>
- GROENENBOOM, J., VAN DER KRUNK, J. & ZEEMAN, A.J. 2001. 3D GPR data acquisition and the influence of positioning errors on image quality. Presented at the 63rd EAGE Conference and Technical Exhibition, 11–15 June 2001, Amsterdam, The Netherlands.
- HAHN, S.L. 1996. *Hilbert Transforms in Signal Processing*. Artech House Signal Processing Library. Artech House, London.
- IPHAN 2015. *Informação Técnica Conjunta: Vistoria em área de sítio arqueológico localizado na aldeia Tekoha Jev, município de Guaira/PR*. Institute of National Historical and Artistic Heritage, Informação Técnica 13. Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN), Brasília.
- JANASI, V.A., FREITAS, V.A. & HEAMAN, L.H. 2011. The onset of flood basalt volcanism Northern Paraná Basin, Brazil: a precise U–PB baddeleyite/zircon age for a Chapecó-type dacite. *Earth and Planetary Science Letters*, **302**, 147–153, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.12.005>
- JOL, M.H. (ed.). 2009. *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Elsevier, Oxford.
- LICHT, O.A.B. 2016. A revised chemo-chromo-stratigraphic 4-D model for the extrusive rocks of the Paraná Igneous Province. *Journal of Volcanology and Geothermal*

GPR APPLIED TO FORENSIC EXPERTISE IN ARCHAEOLOGY

- Research*, **355**, 32–54, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.12.003>
- MALAGODI, S., ORLANDO, L., PIRO, S. & ROSSO, F. 1996. Location of archaeological structures using GPR method: three-dimensional data acquisition and radar signal processing. *Archaeological Prospection*, **3**, 13–23, [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0763\(199603\)3:1<13::AID-ARP37>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0763(199603)3:1<13::AID-ARP37>3.0.CO;2-4)
- NOVO, A., GASMUEK, M., VIGGIANO, A.D. & LORENZO, H. 2008. 3D GPR in Archaeology: what can be gained from dense data acquisition and processing? Presented at the 12th International Conference on Ground Penetrating Radar, 16–19 June 2008, Birmingham, UK, <https://www.researchgate.net/publication/228986985>
- PORSANI, J.L., JANGELME, G.M. & KIPNIS, R. 2010. GPR survey at Lapa do Santo archaeological site, Lagoa Santa karstic region, Minas Gerais state, Brazil. *Journal of Archaeological Science*, **37**, 1141–1148, <https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.12.028>
- ROCHA, H.O., SILVA, M.W.C., MARQUES, F.L.T. & FILHO, D.C.L. 2014. Gradiometria magnética e radar de penetração de solo aplicados em Esterias de Penalva (MA) (Magnetic gradiometry and ground penetration radar applied in Estearias de Penalva (MA)). *Revista do Instituto de Geociências da USP*, **15**, 3–14.
- RODRIGUES, S.I., PORSANI, J.L., SANTOS, V.R.N., DEBLASIS, P.A.D. & GIANNINI, P.C.F. 2009. GPR and inductive electromagnetic surveys applied in three coastal sambaqui (shell mounds) archaeological sites in Santa Catarina State, South Brazil. *Journal of Archaeological Science*, **36**, 2081–2088, <https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.05.013>
- ROOSEVELT, A. 1991. *Moundbuilders of the Amazon: Geophysical Archaeology on Marajo Island, Brazil*. Academic Press, San Diego, CA.
- SOUZA, D.M. 2012. *GPR aplicado à arqueologia nas áreas do porto da Cargill (Santarém/PA) e no palacete Faciola (Belém/PA)* (GPR applied to archaeology in the areas of Cargill port (Santarém, PA) and in the Faciola Palacete (Belém, PA)). Master's thesis, Federal University of Pará, Belém, Brazil.
- ZHAO, W., FORTE, E., PIPAN, M. & TIAN, G. 2013. Ground penetrating radar (GPR) attribute analysis for archaeological prospection. *Journal of Applied Geophysics*, **97**, 107–117, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.04.010>