

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
CURSO DE GEOLOGIA

LUIZ GILBERTO KIRSCH ANDREIS

**RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR) COMO FERRAMENTA NA
PESQUISA PALEONTOLÓGICA**



CURITIBA

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
CURSO DE GEOLOGIA

LUIZ GILBERTO KIRSCH ANDREIS

**RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR) COMO FERRAMENTA NA PESQUISA
PALEONTOLÓGICA**

Monografia apresentada como requisito
à obtenção do título de Bacharel, Curso
de Bacharelado em Geologia, Setor de
Ciências da Terra, Universidade Federal
do Paraná.

Orientador:

Prof. Dr. Robson Tadeu Bolzon

Co-orientadores:

Msc. Geólogo Rafael Espindola Canata

Prof. Dr. Francisco José Fonseca
Ferreira

CURITIBA

2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que, de algum jeito estiveram envolvidos na execução deste trabalho, seja direta, ou indiretamente. Agradeço à estrutura fornecida pela UFPR, pelo Setor de Ciências da Terra, pelo Departamento de Geologia e principalmente pelo LPGA.

Pessoalmente, gostaria de agradecer à orientação do Professor Robson T. Bolzon, pelas amostras utilizadas no estudo e material de apoio, além da disponibilidade para tirar dúvidas ou debater ideias que ajudaram na produção de um trabalho melhor. Também agradeço à orientação do Mestre Rafael Espindola Canata quem me auxiliou imensamente na teoria e prática envolvidas nessa pesquisa, desde disponibilizar artigos até cavar buracos, sua paciência com minhas dúvidas e minha falta de experiência foi muito importante ao projeto. Ao Professor Francisco Ferreira agradeço pela disponibilidade do espaço e material utilizados no estudo, além de sua excelente visão para corrigir e aprimorar os detalhes importantes ao estudo.

A toda equipe de professores do curso com sua dedicação inexorável para lecionar, em especial à Anelize Bahniuk que foi quem primeiro sugeriu o método desse estudo em conversas descontraídas.

A todos os amigos do curso que fizeram com que o tempo na universidade fosse aproveitado ao máximo. Um agradecimento especial para os amigos de 2012 que sempre estiveram comigo nessa etapa, rindo de alegria ou de tristeza, mas sempre firmes, especialmente ao Thalles Mello, Gabriel Patitucci, Mateus Ligeski, James Schroeder e Giovanni Mandelli, sempre dispostos a ajudar no que fosse preciso, contribuindo até na construção desse projeto.

Finalmente, mas não menos importantes, à minha família, que me apoiou ao decidir este curso mesmo sem conhecimento algum sobre, que teve paciência ao descobrir que eu havia estendido minha estadia em mais um ano e que sempre supriram as demandas que necessitei para o curso. Por isso, sou eternamente, grato.

Muito obrigado.

RESUMO

Há vários sítios paleobotânicos no Brasil que possuem caules mineralizados, alguns em profundidades rasas, nesses casos é preciso cavar arbitrariamente para encontrá-los. O objetivo deste trabalho é averiguar a eficácia do método geofísico radar de penetração no solo na identificação de caules mineralizados a fim de propor um método auxiliar para a paleontologia. Esses caules costumam ser mineralizados em sílica, mesmo quando formados em meio a sedimentos argilosos ou siltosos, o que propicia boa resposta do GPR. O método vem sendo difundido amplamente em várias áreas, desde forense até construção civil, sempre como ferramenta para investigação rasa não invasiva, logo é uma opção para a paleontologia. Foi construído um sítio controlado de 40 m² no terreno da Universidade Federal do Paraná e foram enterrados, com solo argiloso e arenoso, 10 troncos fósseis de tamanhos e formatos diversos. Posteriormente foram realizados levantamentos geofísicos com três frequências diferentes, 250, 400 e 700 MHz, com o intuito de verificar a acurácia do método e testar qual frequência oferece melhor resolução. Esses levantamentos foram realizados com solo úmido e seco, averiguando diferenças de velocidade entre as duas situações. Após a aquisição foi realizado o processamento básico 2D e a confecção de dois *slices* de pseudo 3D, um para o *background* da área e outro para o levantamento, a fim de identificar os fósseis em subsuperfície e comparar com a resposta anterior do terreno, isto resultou na composição de radargramas. Os radargramas obtidos expressaram as respostas eletromagnéticas do meio e dos troncos mineralizados alvos do estudo em função da profundidade, frequência e teor de umidade.

Palavras-chave: Radar de penetração no solo, Troncos fossilizados, Sítio controlado.

ABSTRACT

There are several paleobotanical sites in Brazil that have mineralized tree trunks, some covered in shallow depths, in these cases it is necessary to dig arbitrarily to find them. The objective of this work is to ascertain the effectiveness of the geophysical ground penetrating radar method in the identification of mineralized tree trunks to propose an auxiliary paleontological investigative method. The tree trunks are usually mineralized in silica, even when formed in the middle of clay and silt sediments, which provides good GPR response. The method has already been widely applied in several areas, from forensics through civil construction, always as a tool for non-invasive shallow investigation, thus a good option for paleontology. A controlled site of 40m² was built on the campus of the University Paraná State where ten fossilized tree trunks with different sizes and shapes were buried in clay and sandy soil. Subsequently, geophysical surveys were carried out using three different frequencies, 250, 400 and 700 MHz, in order to verify the accuracy of the method and test which frequency offers better response resolution. These surveys were performed with wet and dry soil, investigating differences in wave speeds in both scenarios. After the data acquisition, basic 2D processing and other two slices of pseudo 3D were made, one to check the area for background and other to identify the subsurface fossils for comparison with the previous terrain's response, this resulted in radargrams composition. The obtained radargrams express the underground electromagnetic responses and the studied mineralized tree trunks as a function of depth, frequency and humidity.

Keywords: Ground penetrating radar, fossilized trunks, controlled site.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização do sítio controlado de geofísica forense e paleontologia (em vermelho).....	11
Figura 2 – Perfil típico de alteração da formação Guabirota com coluna de abrangência da área (Em vermelho).	14
Figura 3 – Fragmentos de tronco fóssil expostos <i>in situ</i>	16
Figura 4 – A) GPR IDS Detector Duo. B) GPR GSSI SIR3000.	19
Figura 5 – GPS Trimble GeoExplorer 2008 Series.	19
Figura 6 – Caules mineralizados utilizados: A) Gimnosperma retangular (~12 cm); B) Gimnosperma prismático (~10 cm); C) Gimnosperma ovoide tabular (~20 cm); D) Gimnosperma cilíndrico tabular (~10 cm); E) Angiosperma cilíndrico (~30 cm); F) Angiosperma cilíndrico (~30 cm). A, B, C e D possuem dois exemplares cada enterrados com solos diferentes.	20
Figura 7 – Croqui simplificado da área de estudo com medidas e posicionamento das escavações.....	21
Figura 8 – Seção colunar esquemática mostrando a pedologia da área.....	25
Figura 9 – Calhau de quartzo encontrado durante a escavação.	26
Figura 10 – O radargrama superior é referente aos dados brutos enquanto o radargrama inferior é referente aos dados tratados com o filtro <i>subtract-mean (dewow)</i>	27
Figura 11 – O radargrama superior é referente aos dados tratados com o filtro <i>static correction</i> enquanto o radargrama inferior é referente aos dados tratados com o filtro <i>time cut</i>	28
Figura 12 – O radargrama superior é referente aos dados tratados com o filtro <i>background removal</i> enquanto o radargrama inferior é referente aos dados tratados com ganho (<i>energy decay</i>).....	29
Figura 13 – O radargrama superior é referente aos dados tratados com o filtro <i>bandpassbutterworth</i> enquanto o radargrama inferior é referente aos dados tratados com o filtro <i>fk migration (stolt)</i>	30
Figura 14 – Gráfico de precipitação referente ao período de 10 dias anteriores ao levantamento do <i>background</i>	31

Figura 15 – Gráfico de precipitação referente ao período de 10 dias anteriores ao levantamento L-IDS-1.	31
Figura 16 – Gráfico de precipitação referente ao período de 10 dias anteriores ao levantamento L-IDS-2.	32
Figura 17 – Gráfico de precipitação referente ao período de 10 dias anteriores ao levantamento L-GSSI-1.	32
Figura 18 – Radargramas referentes ao levantamento L-IDS-1, antena de 250 MHz sobre fosséis enterrados com argila. A) Dados não migrados, B) Dados migrados. Círculos vermelhos indicam a posição dos fosséis.	34
Figura 19 – Radargramas referentes ao levantamento L-IDS-1, antena de 250 MHz sobre fosséis enterrados com areia. A) Dados não migrados, B) Dados migrados. Círculos vermelhos indicam a posição dos fosséis.....	35
Figura 20 – Radargramas referentes ao levantamento L-IDS-1, antena de 700 MHz sobre fosséis enterrados com argila. A) Dados não migrados, B) Dados migrados. Círculos vermelhos indicam a posição dos fosséis. Retângulo vermelho indica possível posição de um fóssil, porém há um deslocamento de aproximadamente 20 cm da profundidade de enterro.	36
Figura 21 – Radargramas referentes ao levantamento L-IDS-1, antena de 700 MHz sobre fosséis enterrados com areia. A) Dados não migrados, B) Dados migrados. Círculos vermelhos indicam a posição dos fosséis.....	37
Figura 22 – Radargramas referentes ao levantamento L-GSSI-1, antena de 400 MHz com número de amostras de 1024, sobre fosséis enterrados com argila. A) Dados não migrados, B) Dados migrados. Círculos vermelhos indicam a posição dos fosséis.	38
Figura 23 – Radargramas referentes ao levantamento L-GSSI-1, antena de 400 MHz com número de amostras de 512, sobre fosséis enterrados com argila. A) Dados não migrados, B) Dados migrados. Círculos vermelhos indicam a posição dos fosséis.	39
Figura 24 – Radargramas referentes ao levantamento L-GSSI-1, antena de 400 MHz com número de amostras de 1024, sobre fosséis enterrados com areia. A) Dados não migrados, B) Dados migrados. Círculos vermelhos indicam a posição dos fosséis.	40
Figura 25 – Radargramas referentes ao levantamento L-GSSI-1, antena de 400 MHz com número de amostras de 512, sobre fosséis enterrados com areia. A) Dados não migrados, B) Dados migrados. Círculos vermelhos indicam a posição dos fosséis.	41

Figura 26 – Radargramas referentes ao levantamento L-IDS-2, com antena de 250 MHz, sobre fósseis enterrados com argila. A) Dados não migrados, B) Dados migrados. Círculos vermelhos indicam a posição dos fósseis.....	42
Figura 27 – Radargramas referentes ao levantamento L-IDS-2, com antena de 250 MHz, sobre fósseis enterrados com areia. A) Dados não migrados, B) Dados migrados. Círculos vermelhos indicam a posição dos fósseis.....	43
Figura 28 – Radargramas referentes ao levantamento L-IDS-2, com antena de 700 MHz, sobre fósseis enterrados com argila. A) Dados não migrados, B) Dados migrados. Círculos vermelhos indicam a posição dos fósseis.....	44
Figura 29 – Radargramas referentes ao levantamento L-IDS-2, com antena de 700 MHz, sobre fósseis enterrados com areia. A) Dados não migrados, B) Dados migrados. Círculos vermelhos indicam a posição dos fósseis.....	45
Figura 30 – Radargramas indicando a velocidade com uso do ajuste hiperbólico, para levantamentos em período de chuva e seca. A) L-IDS-1 250 MHz (chuvoso), B) L-IDS-1 700 MHz (chuvoso), C) L-IDS-2 700 MHz (seco), D) L-GSSI-1 400 MHz (seco), E) L-IDS-2 250 MHz (seco).....	47
Figura 31 – Cortes do pseudo 3D à 41 cm de profundidade com a antena de 250 MHz. A) L-IDS-2 apresenta um círculo identificando o fóssil de 30 cm de comprimento, B) Background da área, não apresenta anomalias referentes aos fósseis.	48
Figura 32 – Cortes do pseudo 3D à 20 cm de profundidade com a antena de 700 MHz. A) L-IDS-2 apresenta um círculo identificando os fóssil de 10 e 15 cm de comprimento, B) Background da área, não apresenta anomalias referentes aos fósseis.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fórmulas de Maxwell.	23
Tabela 2: Equações das relações condutivas.	23
Tabela 3: Velocidade (v) e a atenuação (α)	23
Tabela 4: Constante dielétrica (ϵ_r), condutividade elétrica (σ), velocidade (v) típicas de alguns materiais.	24
Tabela 5: Parâmetros dos GPRs usados na aquisição.	26

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA.....	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1. GEOLOGIA LOCAL	12
2.2. CARACTERÍSTICAS DOS CAULES MINERALIZADOS	14
2.3. CARACTERÍSTICAS DO MÉTODO E CAMPOS DE TESTES.....	16
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
3.1. MATERIAIS.....	18
3.2. MÉTODOS	22
3.1.1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DO MÉTODO	22
3.2.2. TRABALHO DE CAMPO	24
3.1.3. PROCESSAMENTO	26
3.2.4. FATOR UMIDADE	31
4. RESULTADOS OBTIDOS	33
5. DISCUSSÃO	46
6. CONCLUSÕES	50
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

1.INTRODUÇÃO

O Radar de Penetração no Solo, ou *Ground Penetrating Radar* (GPR), é um método geofísico eletromagnético de investigação rasa, que trabalha com altas frequências (10-2500 MHz), a fim de produzir imagens de alta resolução da subsuperfície. Seu uso abrange várias áreas do conhecimento como geotecnia, estratigrafia, hidrogeologia, geologia ambiental, arqueologia e geologia forense (PEDROSA *et al.*, 2006; MELO, 2007; SANTOS, 2008; JOL, 2009; ARANHA, 2010; CATETE, 2010; ALVES, 2011; BRASIL, 2013). Tem sido utilizado em larga escala por sua versatilidade e agilidade, e para proporcionar um aprendizado eficaz do método foram construídos alguns campos de testes, também denominados sítios controlados (PORSANI *et al.*, 2006; BRASIL, 2013; BUSO *et al.*, 2016).

Sítios controlados para estudos com métodos geofísicos tiveram um crescimento acentuado na última década, visto que faz-se necessária à experimentação e aprimoramento dos métodos. Esses sítios têm como objetivo fundamental estudar a resposta de artefatos para auxiliar a interpretação de dados geofísicos de investigação rasa, principalmente se referindo a métodos elétricos e eletromagnéticos. Alguns dos principais sítios instalados no Brasil são: Sítio Controlado de Geofísica Rasa (SCGR) do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da Universidade de São Paulo (USP), Campo de Testes Controlados para Geofísica Forense, Ambiental e de Resgate (FORAMB) da Faculdade de Geofísica (FAGEOF) do Instituto de Geociências (IG) da Universidade Federal do Pará (UFPA) e Sítio Controlado de Criminalística (SITICRIM) do Instituto Nacional de Criminalística (INC) em Brasília-DF (PORSANI *et al.*, 2006; BRASIL, 2013; BUSO *et al.*, 2016). Desde o final de 2016, o Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada (LPGA) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), em parceria com o Setor Técnico Científico da Polícia Federal do Paraná, está construindo um Sítio Controlado de Geofísica Forense Rasa (SCGFR) para o desenvolvimento de pesquisas acadêmicas.

O presente projeto contou com a ampliação do SCGFR (LPGA/UFPR) em aproximadamente 40 m², com quatro vértices, com as seguintes coordenadas em projeção WGS 84 e zona UTM 22S: 677773,974 / 7184168,091; 677777,765 / 7184158,486; 677781,683 / 7184159,813; 677777,913 / 7184169,206, onde realizou-se a implantação do material fossilizado. O sítio é localizado na parte norte do campus Centro Politécnico da UFPR, próximo ao estacionamento e adjacente ao prédio do Setor de Ciências Biológicas, como indicado na Figura 1.

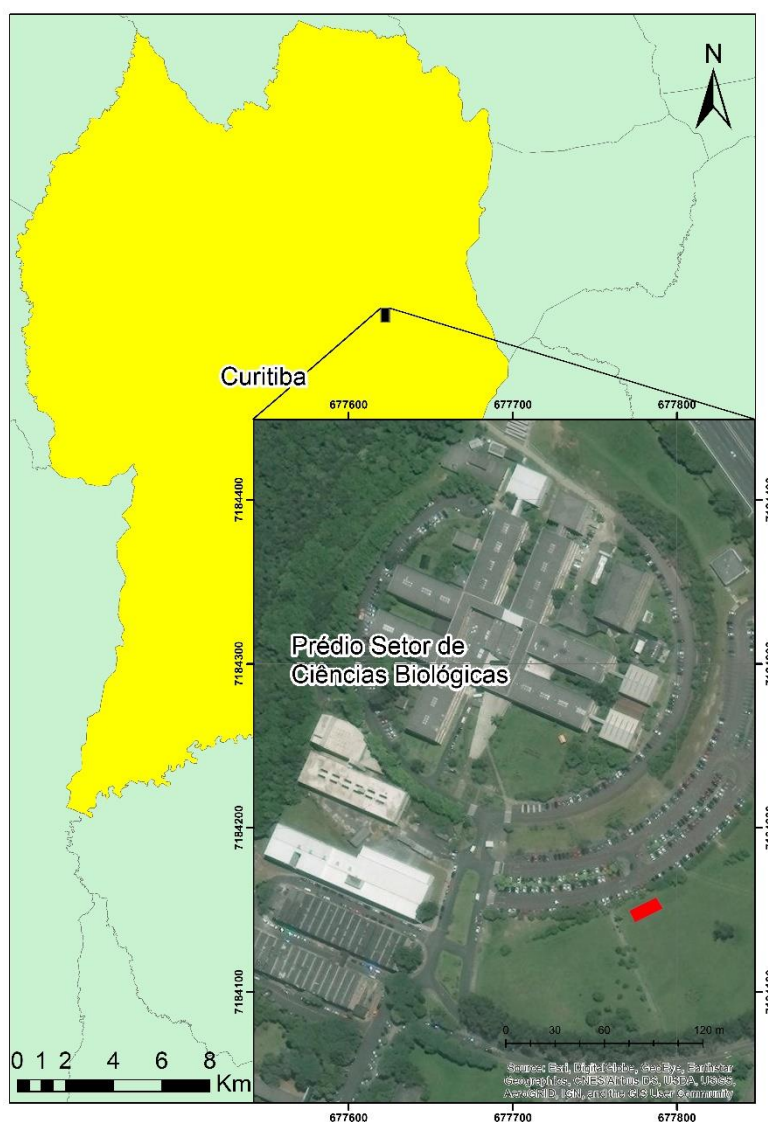


Figura 1: Mapa de localização do sítio controlado de geofísica forense (em vermelho).

O estudo consistiu em montar um campo de teste com realização de escavações, com diferentes profundidades para enterrar os caules

mineralizados de formatos diversos em dois tipos distintos de solos. Durante os levantamentos foram adquiridos dados com dois equipamentos de diferentes frequências, com o solo com diferentes condições de umidade. Assim, buscou-se simular as principais características existentes em sítios paleobotânicos. Os dados obtidos indicaram descontinuidades e hipérboles nos radargramas indicando as escavações e os fósseis respectivamente, permitindo fazer inferências com relação ao uso do GPR para estudos paleontológicos.

1.1. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

A literatura indica que o método GPR é pouco empregado como ferramenta auxiliar para a pesquisa em sítios paleontológicos que contém fósseis animais ou de plantas, não existindo registro sistemático do padrão de resposta dos fósseis. Assim, um estudo em campo controlado com caules mineralizados, possibilitaria reunir dados e parâmetros para validar a eficácia do método.

O projeto visa estudar a viabilidade e eficiência do uso do GPR na pesquisa paleontológica, introduzindo um método auxiliar as pesquisas do ramo, e como objetivos secundários refinar o processamento dos dados de GPR referentes a caules mineralizados em meios argilosos e arenosos, com diferentes teores de umidade, no intento de aprimorar estudos pré-existentes de GPR no Sítio Controlado de Geofísica Forense Rasa da UFPR.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. GEOLOGIA LOCAL

A área de estudo está situada geologicamente na Formação Guabirota, pertencente à Bacia de Curitiba. Riccomini (1989) sugeriu, para a bacia, uma origem associada ao Sistema de Riftes Cenozoicos do Sudeste do Brasil (SRCSB), onde houve reativação de falhas há 120 Ma, principalmente de direção NE-SW, que condicionou diversas bacias brasileiras no sul e sudeste do Brasil. Outros autores como Salamuni *et al.* (1999), Riccomini *et al.* (2004), Lima *et al.* (2013) e Cunha (2016), atestaram com evidências geológicas, litológicas e paleontológicas o que sugeriu Riccomini (1989). Essa bacia possui as seguintes subdivisões segundo Salamuni *et al.* (1999): Embasamento cristalino migmatítico relacionado ao Complexo Atuba; Rochas metassedimentares associadas ao Grupo Açungui; Granitóides relacionados aos maciços graníticos da Serra do Mar; Diques de diabásio correlatos à Formação Serra Geral; Depósitos argilosos e argilo-siltosos com presença de camadas arenosas, conglomeráticas e carbonáticas de idades entre o Mioceno e o Plioceno nomeadas como Formação Guabirota; Depósitos de colúvios argilosos, cascalheiras e lentes de areias arcóssias do Pleistoceno-Holoceno denominados de Formação Tinguis; Aluviões e depósitos coluvionares secundários recentes.

A Formação Guabirota, por sua vez, é formada por argilitos, arenitos, conglomerados e depósitos carbonáticos. Lima *et al.* (2013), subdividiu a formação com base em sua diversidade textural, estrutural e de formas das camadas. Felipe (2011) apresenta um trabalho geológico-geotécnico de formação da bacia, onde exhibe um perfil típico de alteração da Formação Guabirota. Este perfil, apresentado na figura 2, é compatível em parte com a coluna estratigráfica encontrada durante as escavações e, portanto, será adotada sua nomenclatura. Na construção do sítio, foram encontrados apenas solos de cor marrom escura com possível alteração orgânica, classificados por Felipe (2011) como solo transportado, argilitos cinza avermelhados a acastanhados com seixos e calhaus de quartzo em estágio de intemperismo avançado, classificados como solo residual maduro e argilitos cinza claro com areia intercalada, classificado como solo residual jovem.

PERFIL TÍPICO DE ALTERAÇÃO DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA

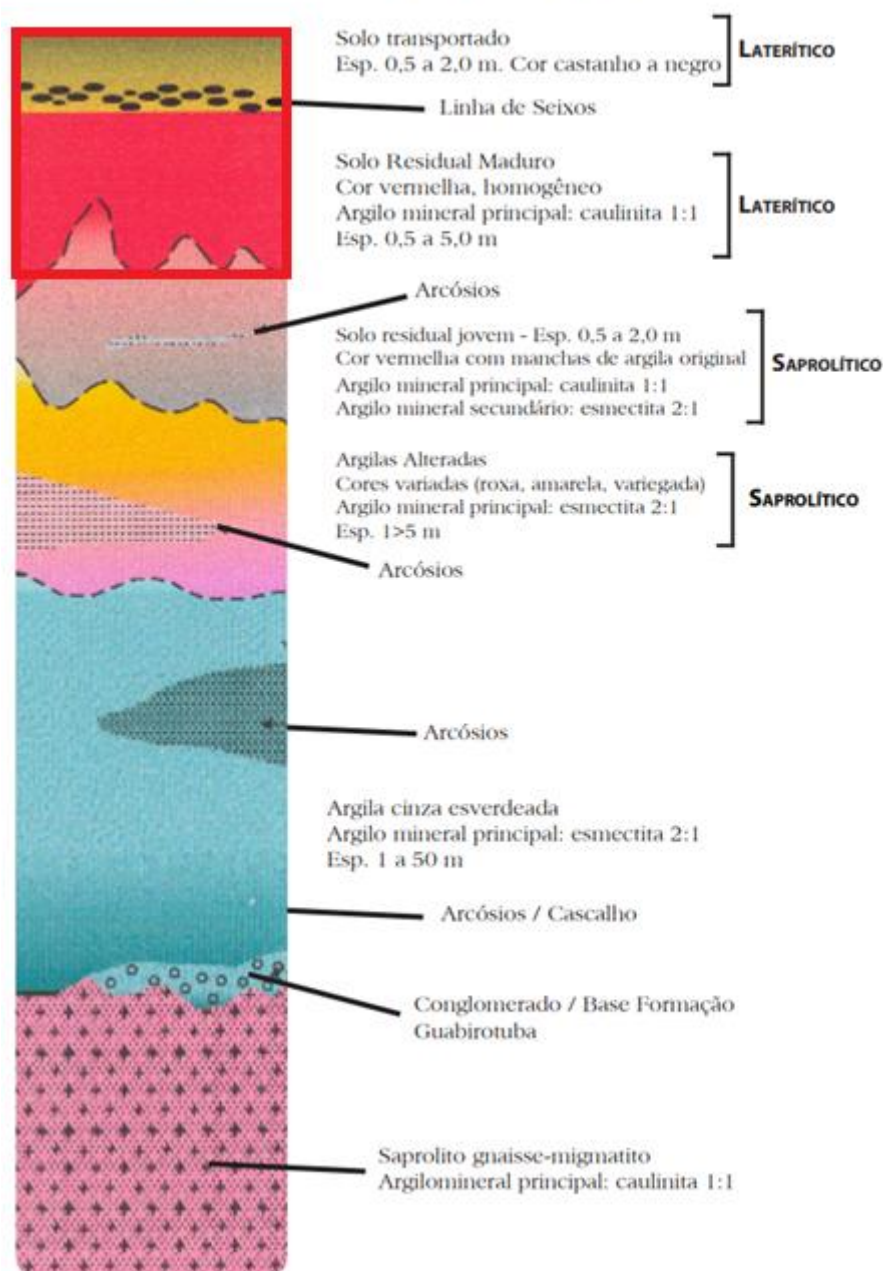


Figura 2: Perfil típico de alteração da formação Guabirota com coluna de abrangência da área (Em vermelho). Adaptado de Felipe (2011).

2.2. CARACTERÍSTICAS DOS CAULES MINERALIZADOS

Segundo Bolzon (1993), os caules mineralizados frequentemente são preenchidos por sílica, possivelmente devido a abundância natural da mesma, adquirindo texturas semelhantes àquelas que ocorrem em rochas sedimentares, e acontecem em diferentes tipos de litologias e paleoambientes. Bolzon *et al.* (2004) cita quatro fases de fossilização de caules do Mesozóico do Rio Grande do Sul. Primeiramente deve ocorrer a destruição do tecido lenhoso por erosão

microbial e compactação sedimentar. Em seguida ocorre a precipitação de minerais, principalmente sílica em estados menos estáveis como opala que gradam para estados mais estáveis como o quartzo com a evolução da fossilização, assim havendo o preenchimento das células vegetais partindo da parede celular, com isso ocorre à preservação das estruturas celulares. Na sequência ocorrem alterações na parede celular com a degradação de elementos orgânicos residuais devido a mudanças no ambiente diagenético. Por fim, ocorre o preenchimento dos espaços gerados na etapa anterior que corresponde a uma recristalização.

Alguns exemplos pesquisados de sítios paleontológicos que possuem caules silicificados apresentam litologias diferentes.

Conforme Guerra-Sommer e Scherer (2002), os sítios paleobotânicos dos municípios de Mata e São Pedro do Sul (RS) contêm importantes registros de caules fósseis silicificados que ocorrem inclusos no Arenito Mata ou rolados sobre sedimentos de diferentes idades. O Arenito Mata é constituído por arenitos finos a conglomeráticos, quartzosos, apresentando estratificações cruzadas de pequeno a médio porte, superpostas na forma de ciclos granodecrescentes sucessivos que sugerem um sistema fluvial entrelaçado.

Segundo Kauffmann (2014) o rico sítio paleobotânico depositado na Bacia Sedimentar do Parnaíba, nas Formações Pedra de Fogo e Motuca é representado por áreas que apresentam grande quantidade de caules fósseis, os quais são encontrados em posição de crescimento, de deposição ou simplesmente espalhados aleatoriamente pelo solo.

Caules silicificados também ocorrem nos arenitos de granulometria média da Formação Missão Velha, Cretáceo da Bacia do Araripe (Pires & Guerra Sommer, 2011).

Uma característica em comum das sequências com caules silicificados é que a mineralização ocorreu principalmente nos tecidos lenhosos e não nos sedimentos associados, favorecendo o intemperismo diferenciado, podendo os fósseis, por exemplo, no Sítio Paleobotânico de Mata, serem encontrados no solo (Figura 3).



Figura 3: Fragmentos de tronco fóssil expostos *in situ*. Fonte: Sommer e Scherer (2002)

A presença de caules mineralizados com sílica, principalmente em ambientes mais argilosos, revela um forte contraste das constantes dielétricas dos meios proporcionando uma resposta adequada dos métodos de investigação geofísica rasa como o GPR.

2. 3. CARACTERÍSTICAS DO MÉTODO E CAMPOS DE TESTES

O método Ground Penetrating Radar (GPR), ou radar de penetração no solo, é utilizado na aquisição de dados bidimensionais e tridimensionais de subsuperfície através da análise da reflexão de ondas eletromagnéticas de altas frequências (10 a 2500 MHz) em meios sólidos (JOL, 2009). Uma explicação mais teórica do funcionamento do GPR e seus componentes será abordada no capítulo de métodos.

As primeiras pesquisas de cunho geológico utilizando GPR foram difundidas por Davis & Annan (1989), que propuseram a sua utilização para o mapeamento estratigráfico de alta resolução de solos e rochas. Por ser um método não invasivo, ou seja, não há alteração da estratificação original devido a escavações e/ou perfurações, o GPR tem mostrado um excelente resultado na área de investigação forense e arqueológica, onde há necessidade de encontrar artefatos enterrados sem destruição de evidências, além de ser aliado importante na localização de plumas de contaminação de origens diversas em subsuperfície, ou mesmo a aplicação em investigação estratigráfica para a delimitação do empilhamento litológico no subsolo

(PEDROSA *et al.*, 2006; MELO, 2007; SANTOS, 2008; JOL, 2009; ARANHA, 2010; CATETE, 2010; ALVES, 2011; BRASIL, 2013).

Sítios controlados de geofísica são atualmente as formas mais eficazes de reproduzir e avaliar o desempenho do método GPR, considerando que o controle das variáveis pode reduzir suas incertezas. Por isso, desde 2003 foram construídos vários sítios no Brasil. O primeiro campo de teste construído no Brasil foi o SCGR do IAG/USP, sua existência se deve a necessidade de diminuir a ambiguidade dos levantamentos de GPR com relação à artefatos dispostos em subsuperfície relevantes a geotecnia, planejamento urbano, estudos de contaminação do ambiente e pesquisas arqueológicas (PORSANI *et al.*, 2006). Os mesmos autores afirmam que tal experimentação é necessária para extrapolar condições conhecidas para áreas com carência de informação litológica e/ou pedológica, produzindo respostas-padrão típicas. No SCGR a disposição dos artefatos dá-se ao longo de sete linhas de 30 m de comprimento e 0,5 a 2 m de profundidade, onde foram agrupados os objetos pelo tipo de material e aplicação, arqueológica, ambiental, geotécnica e civil.

Outros sítios implantados no Brasil abordam um cunho forense, alguns exemplos são: FORAMB da FAGEOF/UFPA e SITICRIM do INC em Brasília-DF. Estes sítios objetivam mesclar a investigação por geofísica ao trabalho de perícia com o intento de localizar objetos relevantes às investigações criminais. O primeiro sítio forense implantado no país no ano de 2007 foi o FORAMB, em Belém do Pará, no cemitério de Tapanã, o que possibilitou a investigação com cadáveres humanos (BRASIL, 2013). Segundo Buso *et al.* (2016), o SITICRIM foi implantado em 2012 pelo Instituto Nacional de Criminalística, com 625 m² e dispondo de seis trincheiras onde foram alocados diversos objetos de interesse, desde projéteis e armas até ossadas de animais para simular cadáveres humanos.

Ainda são escassos os trabalhos envolvendo métodos geofísicos aplicados às pesquisas paleontológicas, porém há autores que atrelam o uso de GPR à localização de conjuntos fósseis, tanto de origem animal quanto de origem vegetal como os que serão usados nesse estudo (SANTOS, 2001;

BARDOLA, 2011; TOMASSI, 2011). Bardola (2011) usa o GPR para averiguar a existência de lenhos fossilizados na região de São Pedro do Sul (RS).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAIS

Para o desenvolvimento da pesquisa foram usados dois equipamentos de GPR para aquisição dos dados geofísicos, disponibilizados pelo LPGA e que foram emprestados ao laboratório pela Polícia Federal e pela Universidade do Estado de Santa Catarina respectivamente, são eles:

- GPR Detector Duo (Italiano), fabricado por *Ingegneria dei Sistemi*, com antenas de 250 e 700 MHz. (Figura 4a), da Polícia Federal;

- GPR SIR3000, fabricado pela empresa *Geophysical Survey Systems – GSSI*, com conjunto de antenas blindadas de 400 MHz (Figura 4b), da UDESC.

Foi utilizado o GPS diferencial *Tribble GeoExplorer 2008 Series* (Figura 5), da Polícia Federal.

Os dados geofísicos adquiridos foram processados no *Software ReflexW* ® versão 7.0 (SANDMEIER, 2006).

Os alvos de estudo são caules fósseis mineralizados da Coleção de Paleobotânica do Laboratório de Paleontologia da UFPR (LabPaleo), constituindo um total de dez amostras, com diferentes formas (triangular, retangular e cilíndrico), tamanhos que variam entre 10 e 30 cm de comprimento/diâmetro e porosidade. As idades dos fósseis variam do Permiano ao Cenozoico. Esses fósseis são apresentados na figura 6.

Foi ampliado o sítio de geofísica forense do LPGA em 40 m² para atender os objetivos do projeto. Porém para o enterro dos fósseis foram usados

apenas 24 m² onde realizaram-se dez escavações de diferentes tamanhos conforme mostra o mapa da figura 7.

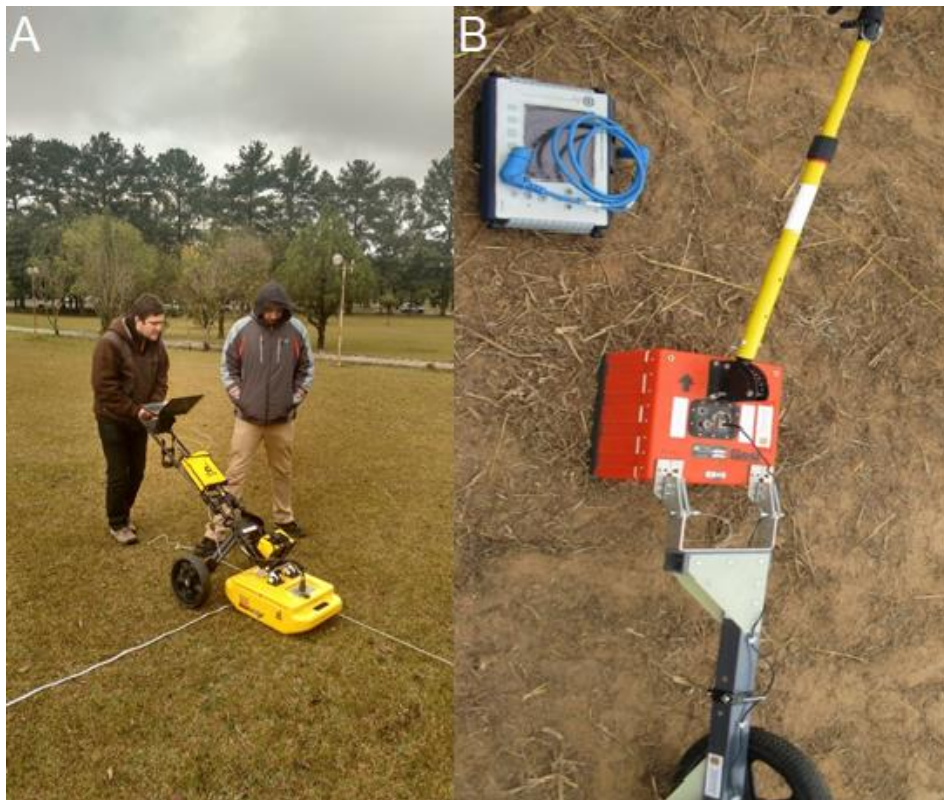


Figura 4: A) GPR IDS Detector Duo. B) GPR GSSI SIR3000.



Figura 5: GPS Trimble GeoExplorer 2008 Series.



Figura 6: Caules mineralizados utilizados: A) *Gimnosperma* retangular (~12 cm); B) *Gimnosperma* prismática (~10 cm); C) *Gimnosperma* ovoide tabular (~20 cm); D) *Gimnosperma* cilíndrica tabular (~10 cm); E) *Angiosperma* cilíndrica (~30 cm); F) *Angiosperma* cilíndrica (~30 cm). A, B, C e D possuem dois exemplares cada, enterrados com solos diferentes.

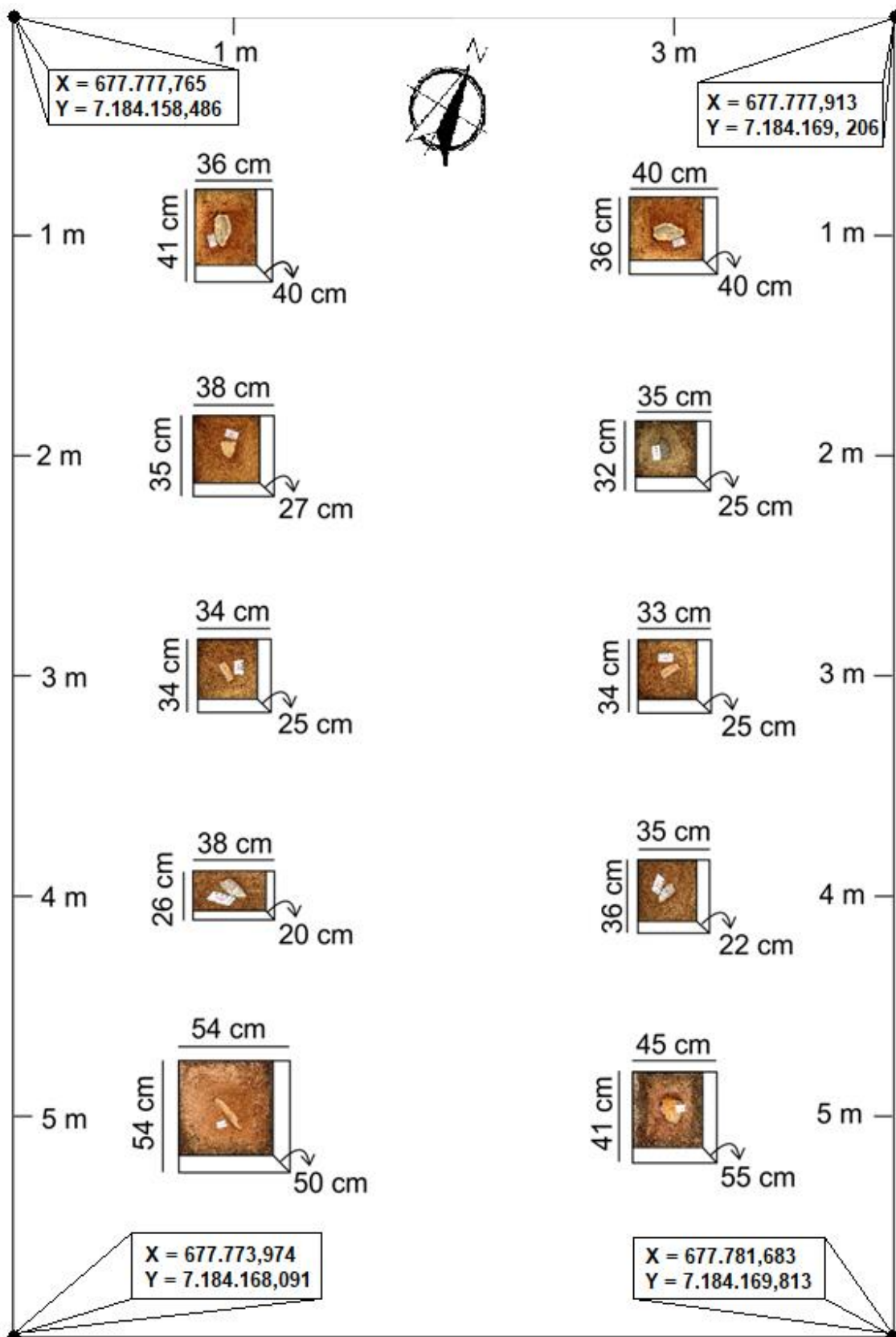


Figura 7: Mapa simplificado da área de estudo com medidas e posicionamento das escavações.

3.2. MÉTODOS

O estudo consistiu em montar um campo de teste onde foram realizadas 10 escavações, com diferentes profundidades, sendo enterrados caules fósseis de formatos diversos com dois tipos de solos. Durante os levantamentos foram adquiridos dados com solo úmido e seco para verificar a resposta em ambas as situações. Essas condições simulam com certa fidelidade a configuração de sítios paleobotânicos existentes.

3.2.1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DO MÉTODO

O método utilizado é o Radar de Penetração no Solo - *Ground Penetrating Radar* (GPR) – que utiliza ondas eletromagnéticas de alta frequência para fazer o imageamento raso de subsuperfície com alta resolução, localizando feições geológicas ou artefatos em meio ao acamamento.

A frequência das ondas gira em torno de 10 MHz a 2500 MHz, dependendo da antena. A diferença de frequência e de materiais se reflete nas distintas aplicações e profundidades de investigação, podendo aumentar ou diminuir a resolução do imageamento.

Os equipamentos de GPR possuem basicamente quatro elementos principais: a antena transmissora que emite pulsos eletromagnéticos de variadas frequências no solo, a antena receptora capta a resposta da reflexão das ondas no meio, a unidade de controle que comanda o aparelho na transmissão, recepção e cálculo dos dados geofísicos no âmbito do tempo (ns) e a unidade de visualização, onde é possível observar a resposta geofísica em forma de perfis que são chamados radargramas.

Davis & Annan (1989), Daniels (2000), Jol (2009), Aranha (2010) discorrem sobre a fundamentação teórica do método, a qual é pautada nas equações de Maxwell. Jol (2009) enfatiza que tais equações descrevem a física de campos eletromagnéticos. Essas equações (Tabela 1) são à base do eletromagnetismo na física clássica e, quando associadas às relações

constitutivas que quantificam as propriedades eletromagnéticas do meio, formam as bases do método.

Tabela 1: Fórmulas de Maxwell adaptado de Jol (2009).

$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$	\vec{D} = Deslocamento elétrico (C/m ²) ρ = Densidade da carga elétrica (C/m ³)
$\nabla \cdot \vec{B} = 0$	\vec{B} = Indução magnética (T)
$\nabla \cdot \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	\vec{H} = Campo magnético (A/m) \vec{j} = Densidade da corrente elétrica (A/m ²) \vec{D} = Deslocamento elétrico (C/m ²) t = Tempo (s)
$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{-\partial \vec{B}}{\partial t}$	\vec{E} = Campo elétrico (V/m) \vec{B} = Indução magnética (T) t = Tempo (s)

As relações constitutivas, citadas anteriormente, são as descrições macroscópicas das respostas atômicas em relação a um campo eletromagnético, segundo Jol (2009). São três as relações (Tabela 2): (i) condutividade elétrica (σ), que caracteriza a movimentação de carga livre, ou seja, afere a corrente elétrica criada; (ii) permissividade dielétrica (ϵ) que caracteriza o deslocamento da carga limitada na estrutura de um material; (iii) permeabilidade magnética (μ) que descreve como os momentos magnéticos atômicos respondem a um campo magnético.

Tabela 2: Equações das relações condutivas adaptado de Jol (2009).

$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}$	\vec{j} = Densidade da corrente elétrica (A/m ²) \vec{E} = Campo elétrico (V/m)
$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E}$	\vec{D} = Deslocamento elétrico (C/m ²) \vec{E} = Campo elétrico (V/m)
$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$	\vec{B} = Indução magnética (T) \vec{H} = Campo magnético (A/m)

Segundo Brasil (2013), os fatores mais importantes que governam a propagação da onda eletromagnética, num determinado meio são: a velocidade (v) e a atenuação (α), cujas fórmulas são apresentadas na tabela 3.

Tabela 3: Velocidade (v) e a atenuação (α).

$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon r}}$	c = Velocidade da onda eletromagnética no vácuo (0,3 m/ns) ϵr = Constante dielétrica
-----------------------------------	---

$\alpha = 1,636 \frac{\sigma_0}{\sqrt{\epsilon r}}$	σ_0 = Condutividade elétrica em corrente contínua (mS/m) ϵr = Campo magnético (A/m)
---	---

Brasil (2013) apresenta uma tabela com alguns materiais, indicando suas condutividades elétricas e permissividades dielétricas e suas velocidades normais.

Tabela 34: Constante dielétrica (ϵr), condutividade elétrica (σ), velocidade (v) típicas de alguns materiais. Fonte: Brasil (2013).

MATERIAL	ϵr	σ (mS/m)	v (m/ns)	MATERIAL	ϵr	σ (mS/m)	v (m/ns)
Ar	1	0	0,3	Água destilada	81	0,01	0,03
Areia seca e cascalho	2-6	0,01	0,1-0,2	Água fresca	81	0,5	0,03
Argila seca	5	2	0,1	Água do mar	81	3000	0,03
Folhelho e siltito seco	5	1	0,1	Areia saturada	20-30	0,1-1	0,05-0,07
Calcário seco	4	0,5	0,15	Silte saturado	10	1-10	0,09
Solo arenoso seco	2,6	0,14	0,18	Argila saturada	40	1000	0,04
Solo argiloso seco	2,4	0,27	0,19	Solo arenoso saturado	25	6,9	0,06
Sal seco	5-6	0,01-1	0,1-0,12	Solo argiloso saturado	15	50	0,04
Granito seco	5	0,01	0,1	Arenito saturado	20-30	40	0,05-0,07
Basalto seco	6	1	0,1	Siltito saturado	30	100	0,05
Diabásio seco	7	10	0,1	Folhelho saturado	7	100	0,1
Ferro	1	109	0,3	Calcário saturado	8	2	0,1
Aço	1	∞	0,3	Granito saturado	7	1	0,1
PVC	8	0	0,1-0,17	Basalto saturado	8	10	0,1
Asfalto	3-5	0	0,1-0,12	Diabásio saturado	8	100	0,1
Concreto seco	5,5	0	0,13	Concreto saturado	12,5	0	0,08

3.2.2. TRABALHO DE CAMPO

Este estudo foi realizado em três etapas: preliminar, de construção e de aquisição.

Na etapa preliminar foi delimitada a área de estudo e realizado um levantamento prévio para obtenção do *background* com espaçamento entre linhas de 20 cm. O *background* consiste na aquisição da resposta geofísica padrão da área anterior às escavações.

Na etapa de construção foram realizadas dez escavações, variando de 20 a 55 cm de profundidade, igualmente separadas por um metro entre seus

pontos médios, e posteriormente foram enterrados os caules fósseis com o solo local (argiloso), areia ou intercalando os dois materiais assim como apresentado na figura 7. Os topos dos fósseis foram georreferenciados com auxílio do GPS de precisão na posição que foram enterrados. Nessa etapa foi construída uma seção colunar esquemática do solo, apresentada na figura 8, que é condizente com o topo do perfil estratigráfico apresentado por Felipe (2011), além de ter sido observado calhaus de quartzo com até 10 cm de comprimento (Figura 9).

Na etapa de aquisição foram realizados os levantamentos geofísicos com os dois equipamentos de GPR. Uma campanha contemplou integralmente a área com espaçamento de 10 cm entre as linhas de aquisição, a fim de realizar um pseudo 3D, outras duas aquisições foram realizadas somente sobre os alvos.

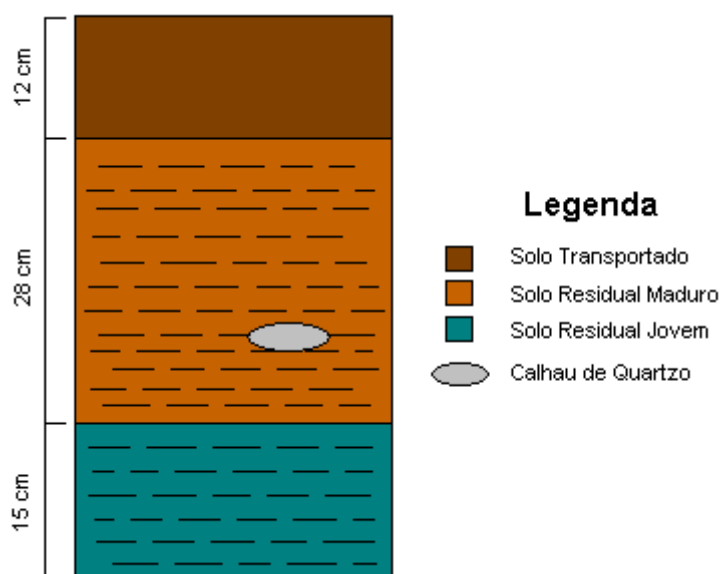


Figura 8: Seção colunar esquemática mostrando a pedologia da área.



Figura 9: Calhau de quartzo encontrado durante a escavação.

Portanto ao todo foram realizados quatro levantamentos, um prévio para aquisição do *background* (04/07/2017), dois com o GPR Detector Duo (IDS) com antenas de 250 e 700 MHz, sendo um apenas nos alvos (22/08/2017) denominado L-IDS-1 e outro na área inteira com espaçamento de 10 cm entre as linhas (28/08/2017) denominado L-IDS-2, e o último com o GPR SIR 3000 (GSSI) com antena de 400 MHz denominado L-GSSI-1, apenas nos alvos (21/11/2017). Os parâmetros de aquisição dos GPRs são apresentados na tabela 4.

Tabela 5: Parâmetros dos GPRs usados na aquisição.

Parâmetros do GPR	Dector Duo (IDS)	SIR 3000 (GSSI)
Número de Amostra	512	512 e 1024
Espaçamento entre os traços (m)	0,027	0,02
Janela temporal (η s)	120	50
Frequência (MHz)	700 e 250	400

Posteriormente ao trabalho de campo foi necessária a realização do processamento e análise dos dados. Esse tratamento foi realizado com auxílio do software ReflexW 7.0.

3.2.3. PROCESSAMENTO

O processamento básico dos dados dos GPRs seguiu o seguinte fluxo de trabalho: Filtragem do ruído instrumental de baixa frequência (*subtract-mean* (*dewow*)), ajuste do tempo zero (*static correction*), redução da janela temporal (*time cut*), filtragem do ruído coerente (*background removal*), aplicação de ganhos para recuperação da energia dissipada e/ou absorvida (*energy decay*),

filtragem de ruído incoerente (*bandpassbutterworth*), migração no domínio do tempo (*fk migration (stolt)*) dos dados usando velocidade medida pelo ajuste hiperbólico. Essa sequência é apresentada a seguir com exemplos de radargramas referentes à linha 31 de 700 MHz. Os filtros descritos abaixo são explicados com base em Sandmeier (2017).

Primeiramente, após importar os dados brutos dos GPRs foi realizada a filtragem do ruído instrumental de baixa frequência (DEWOW), essa filtragem atua reduzindo o ruído de baixa frequência quando a janela temporal é ajustada para um período (Figura 10).

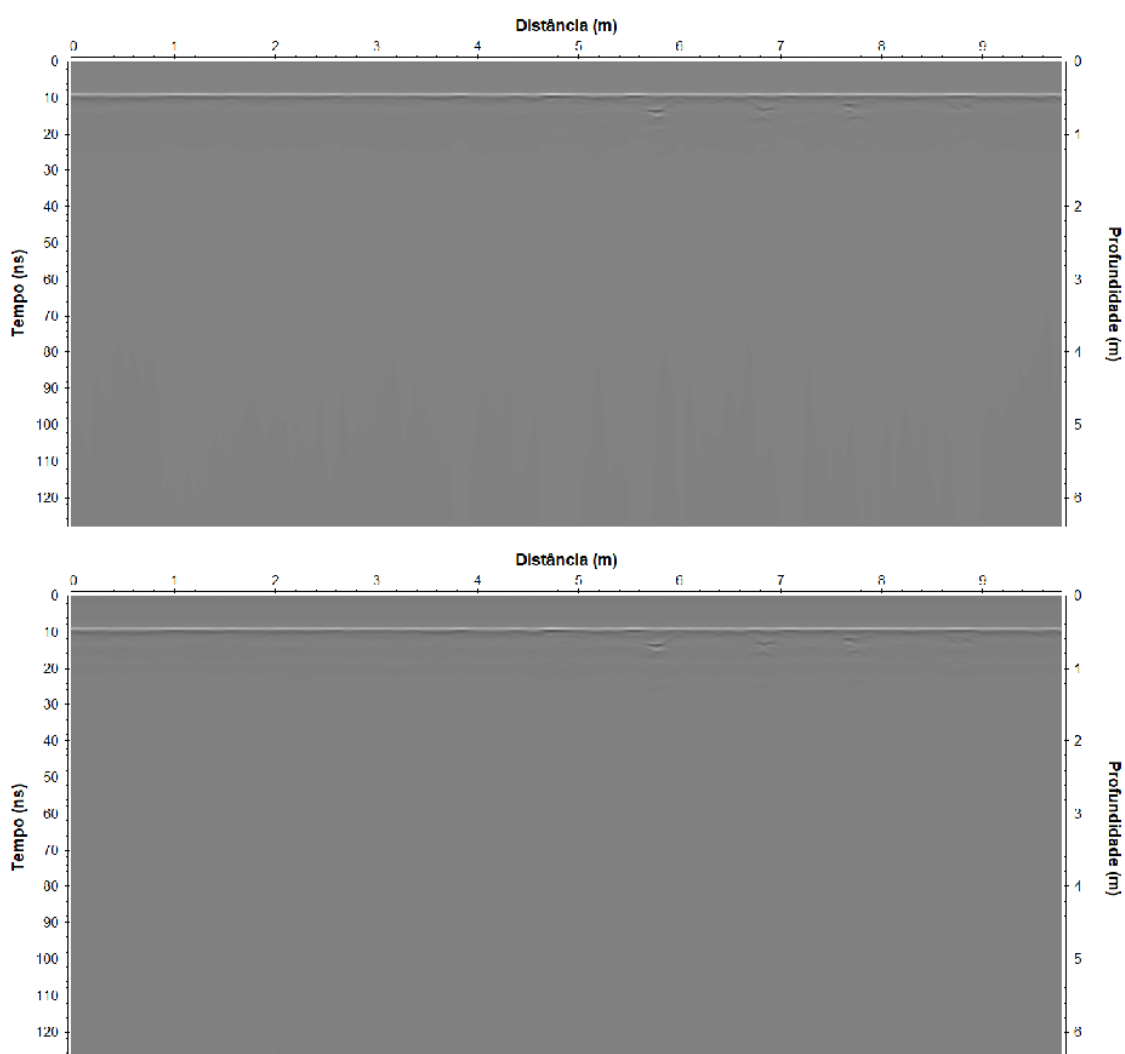


Figura 10: O radargrama superior é referente aos dados brutos enquanto o radargrama inferior é referente aos dados tratados com o filtro *subtract-mean (dewow)*.

Em seguida executou-se o ajuste do tempo zero (*static correction*), que consiste na correção do atraso de chegada da onda, assim é realizado a filtragem onde atribui-se o ajuste do primeiro registro do sinal do GPR ao tempo

zero no solo. Após o ajuste de tempo zero foi reduzida a janela temporal utilizando o filtro *time cut*, este serve para limitar cada traço a um tempo de registro pré-definido, assim reduzindo a janela temporal a fim de focar na profundidade onde a antena alcança e eliminando altas profundidades onde não há resposta. No presente estudo todos os radargramas foram filtrados pelo *time cut* para 30 ns (Figura 11).

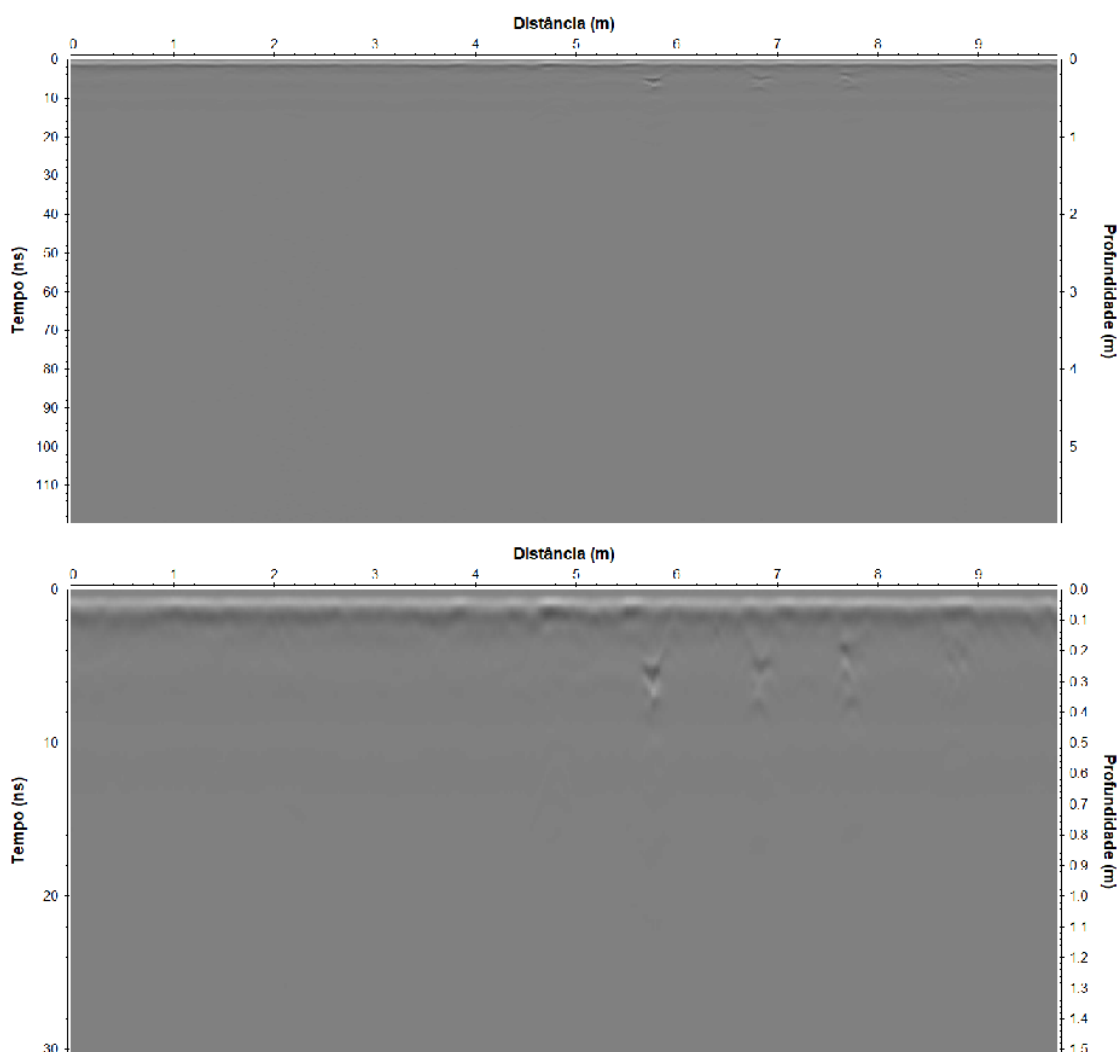


Figura 11: O radargrama superior é referente aos dados tratados com o filtro *static correction* enquanto o radargrama inferior é referente aos dados tratados com o filtro *time cut*.

Posteriormente foi realizada a filtragem do *background* (*background removal*), onde o ruído de todo o levantamento é retirado/suavizado tornando visíveis sinais que estavam encobertos pelo ruído. Além disso, pode suprimir a energia horizontalmente coerente. Nesse ponto é necessário o realce das bandas do radargrama, logo foi realizado um ganho de energia para recuperar

a energia dissipada (*energy decay*), este melhora a visualização das anomalias no radargrama (Figura 12).

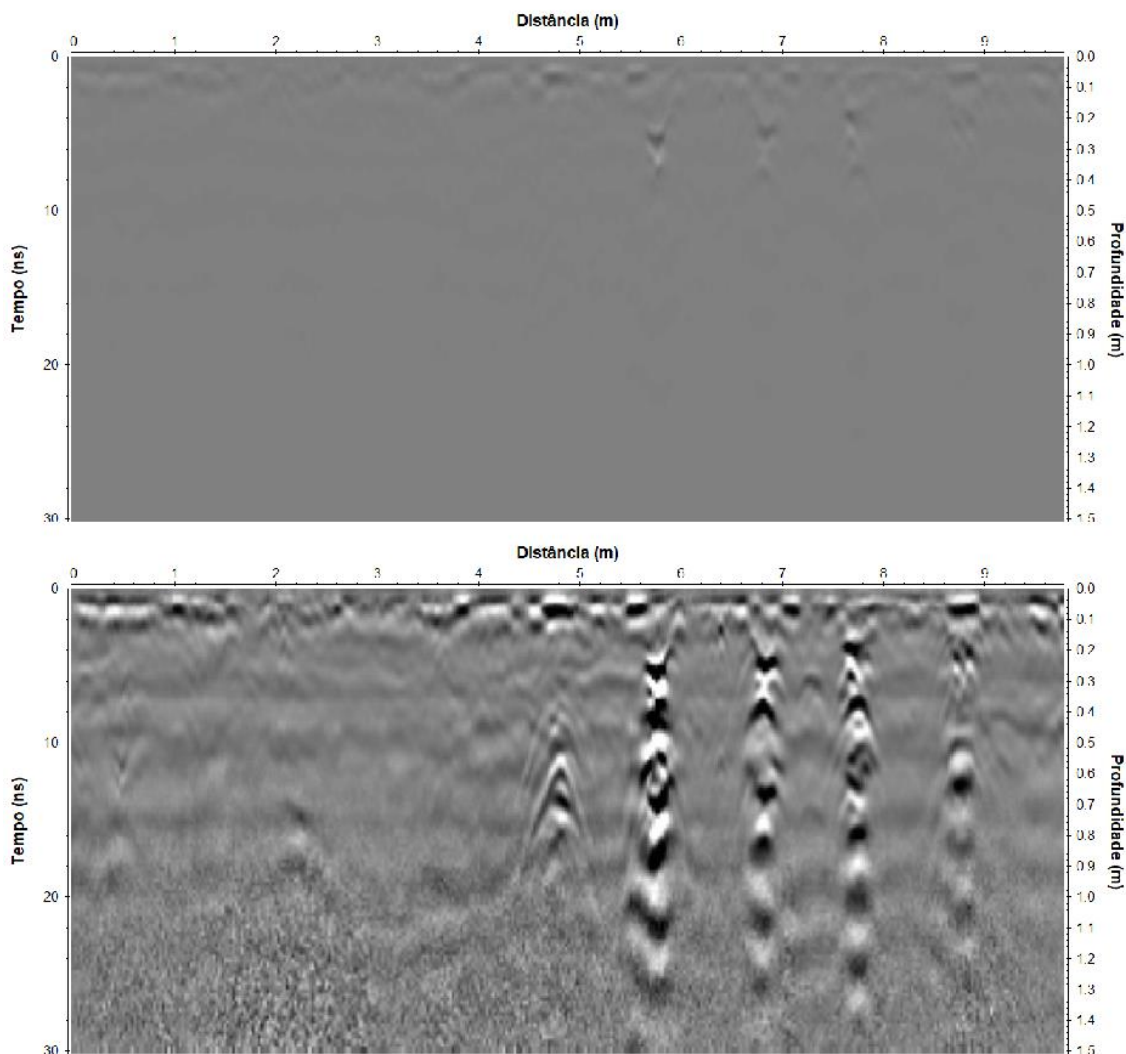


Figura 12: O radargrama superior é referente aos dados tratados com o filtro *background removal* enquanto o radargrama inferior é referente aos dados tratados com ganho (*energy decay*).

Em seguida foi aplicado o filtro de ruído incoerente (*bandpassbutterworth*), esse filtro permite que as frequências sejam atenuadas acima e abaixo de valores estipulados através da observação no espectro original, assim proporciona a redução do ruído da aquisição. Por fim foi verificada a velocidade da onda nos levantamentos utilizando o ajuste hiperbólico, esta velocidade pode mudar dependendo das características elétricas do meio, e a partir dos resultados obtidos de velocidade foi realizada a

migração dos dados (*fk migration (stolt)*), ou seja, foi extrapolada para todo o levantamento a mesma velocidade da onda (Figura 13).

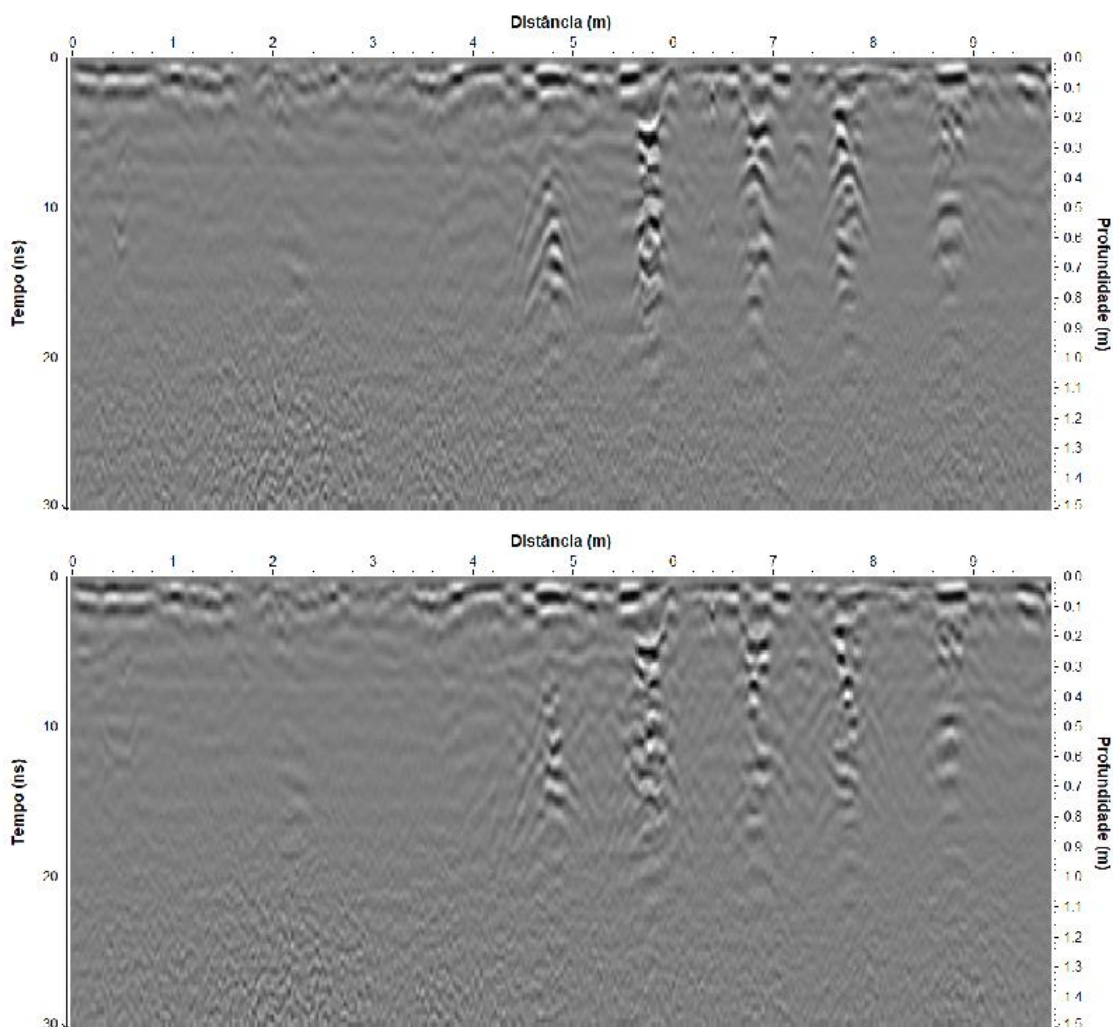


Figura 13: O radargrama superior é referente aos dados tratados com o filtro *bandpassbutterworth* enquanto o radargrama inferior é referente aos dados tratados com o filtro *fk migration (stolt)*.

3.2.4. FATOR UMIDADE

As diferenças de umidade no solo influenciam na passagem de corrente elétrica, assim alteram a velocidade da onda eletromagnética no meio. Para testar essa diferença foi realizado levantamentos entre julho e novembro pegando períodos chuvosos e secos. Contudo, a região de Curitiba, onde encontra-se a área de teste, não possui períodos sazonais de seca ou chuva como ocorre em outros locais do Brasil, dificultando uma análise fidedigna quanto a umidade do solo. Portanto períodos de chuva e seca serão considerados com base na quantidade de dias com precipitação durante os 10 dias anteriores aos levantamentos, onde chuvoso significa mais de quatro dias

com precipitação e seco quatro dias ou menos de precipitação, observado através dos gráficos de precipitação (Figuras 14, 15, 16 e 17) obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia. O levantamento L-IDS-1 foi o único atribuído a período chuvoso, o restante foi atribuído a período seco.

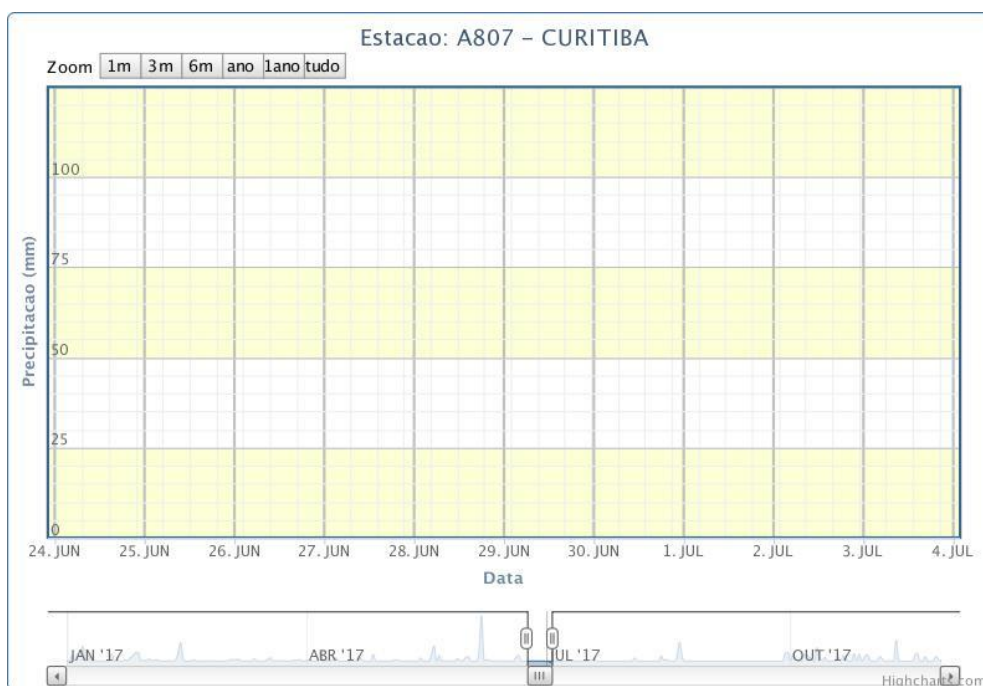


Figura 14: Gráfico de precipitação referente ao período de 10 dias anteriores ao levantamento do background. Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia



Figura 15: Gráfico de precipitação referente ao período de 10 dias anteriores ao levantamento L-IDS-1. Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia

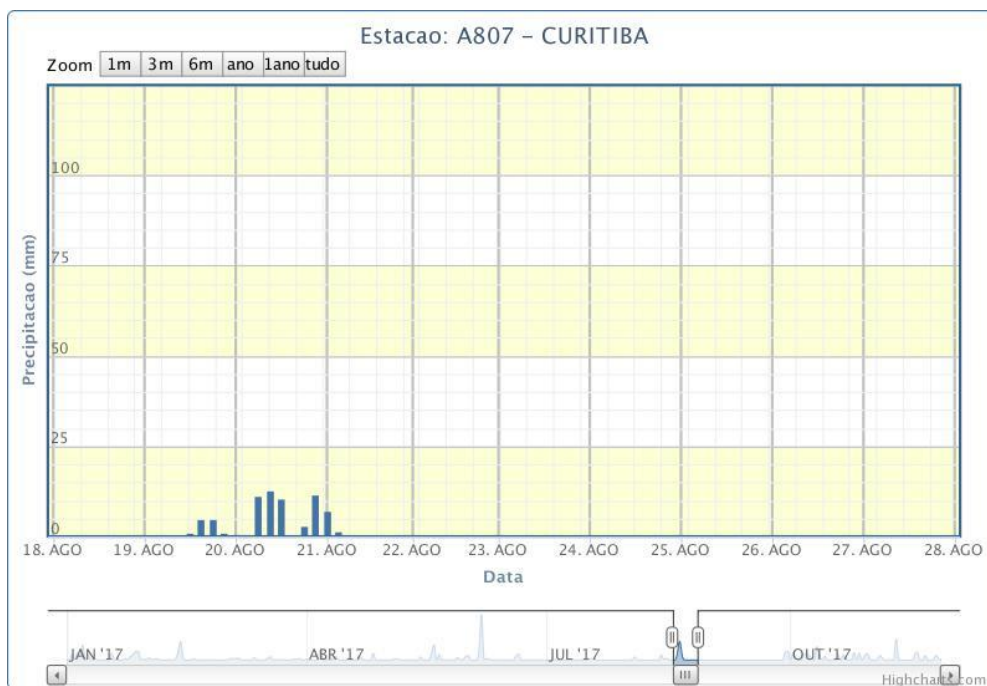


Figura 16: Gráfico de precipitação referente ao período de 10 dias anteriores ao levantamento L-IDS-2.
Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia



Figura 17: Gráfico de precipitação referente ao período de 10 dias anteriores ao levantamento L-GSSI-1.
Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia

4. RESULTADOS OBTIDOS

A seguir são apresentados os radargramas processados das linhas de fosséis com argila e com areia referente às antenas de 250, 400 e 700 MHz, para os períodos de chuva e seca. As figuras 18, 19, 20 e 21 são as respostas do período chuvoso, portanto referem-se ao L-IDS-1, já as figuras 22 a 29 são as respostas do período seco, onde da 22 a 25 referem-se ao L-GSSI-1 e 26 a 29 referem-se ao L-IDS-2. Círculos vermelhos indicam anomalias provocadas pelos fosséis e sua provável profundidade. Existem respostas em 2,2 m a 60 cm de profundidade em vários radargramas, este corpo não pertence ao estudo, podendo ser associado a cabos de fibra ótica enterrados anteriores à construção do campo de testes segundo informaram os trabalhadores da Universidade e o Prefeito do campus.

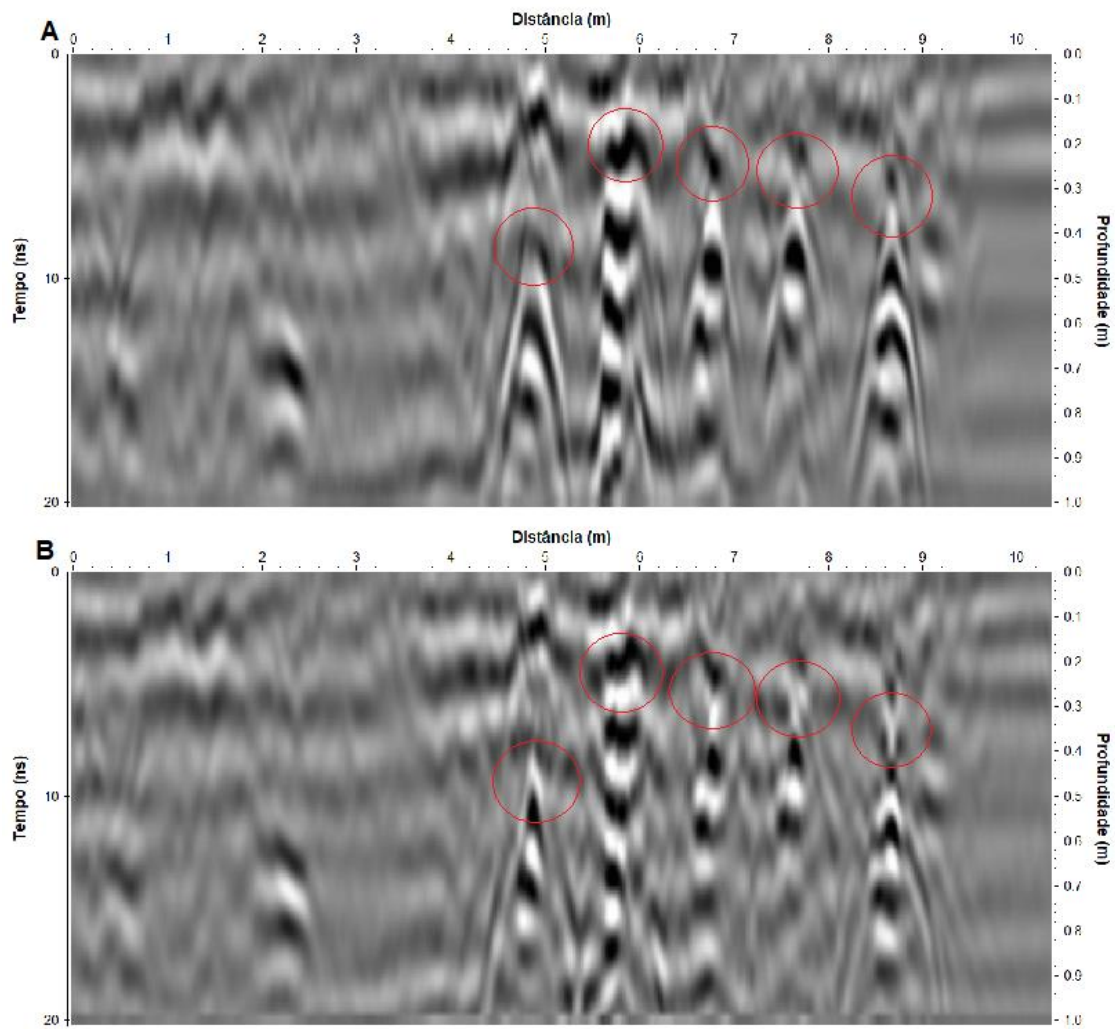


Figura 18: Radargramas referentes ao levantamento L-IDS-1, antena de 250 MHz sobre fósseis enterrados com argila. A) Dados não migrados, B) Dados migrados. Círculos vermelhos indicam a posição dos fósseis.

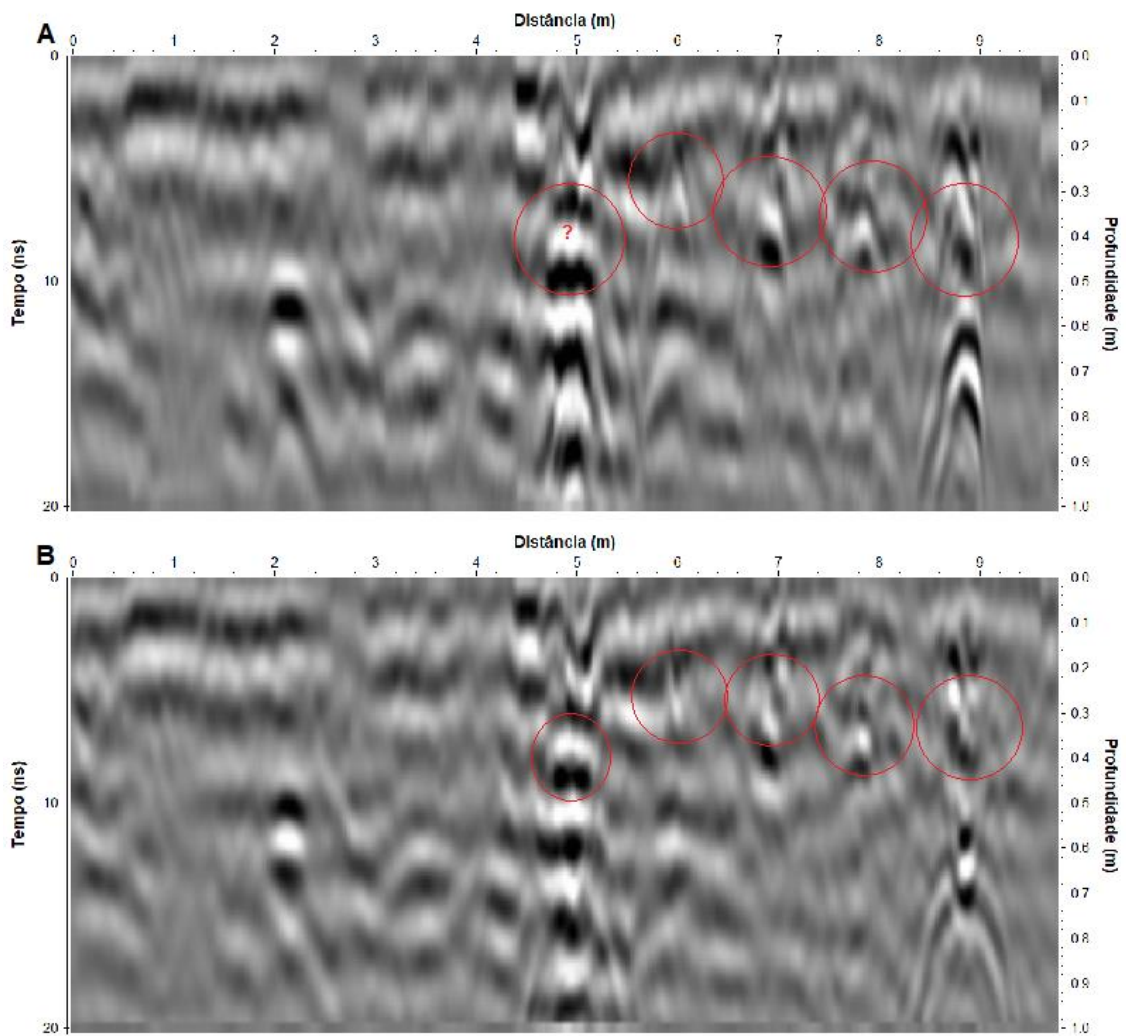


Figura 19: Radargramas referentes ao levantamento L-IDS-1, antena de 250 MHz sobre fosséis enterrados com areia. A) Dados não migrados, B) Dados migrados. Círculos vermelhos indicam a posição dos fosséis.

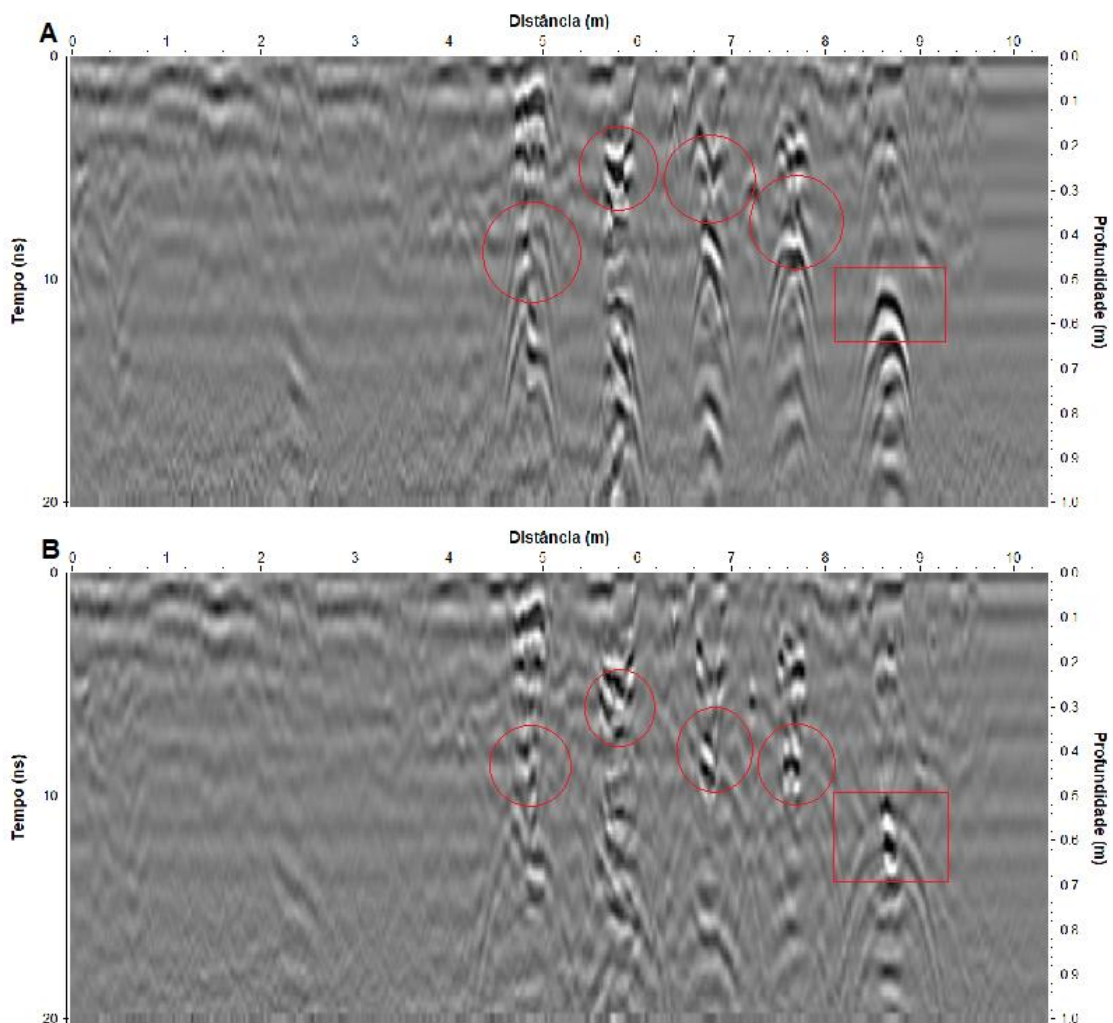


Figura 20: Radargramas referentes ao levantamento L-IDS-1, antena de 700 MHz sobre fósseis enterrados com argila. A) Dados não migrados, B) Dados migrados. Círculos vermelhos indicam a posição dos fósseis. Retângulo vermelho indica possível posição de um fóssil, porém há um deslocamento de aproximadamente 20 cm da profundidade de enterro.

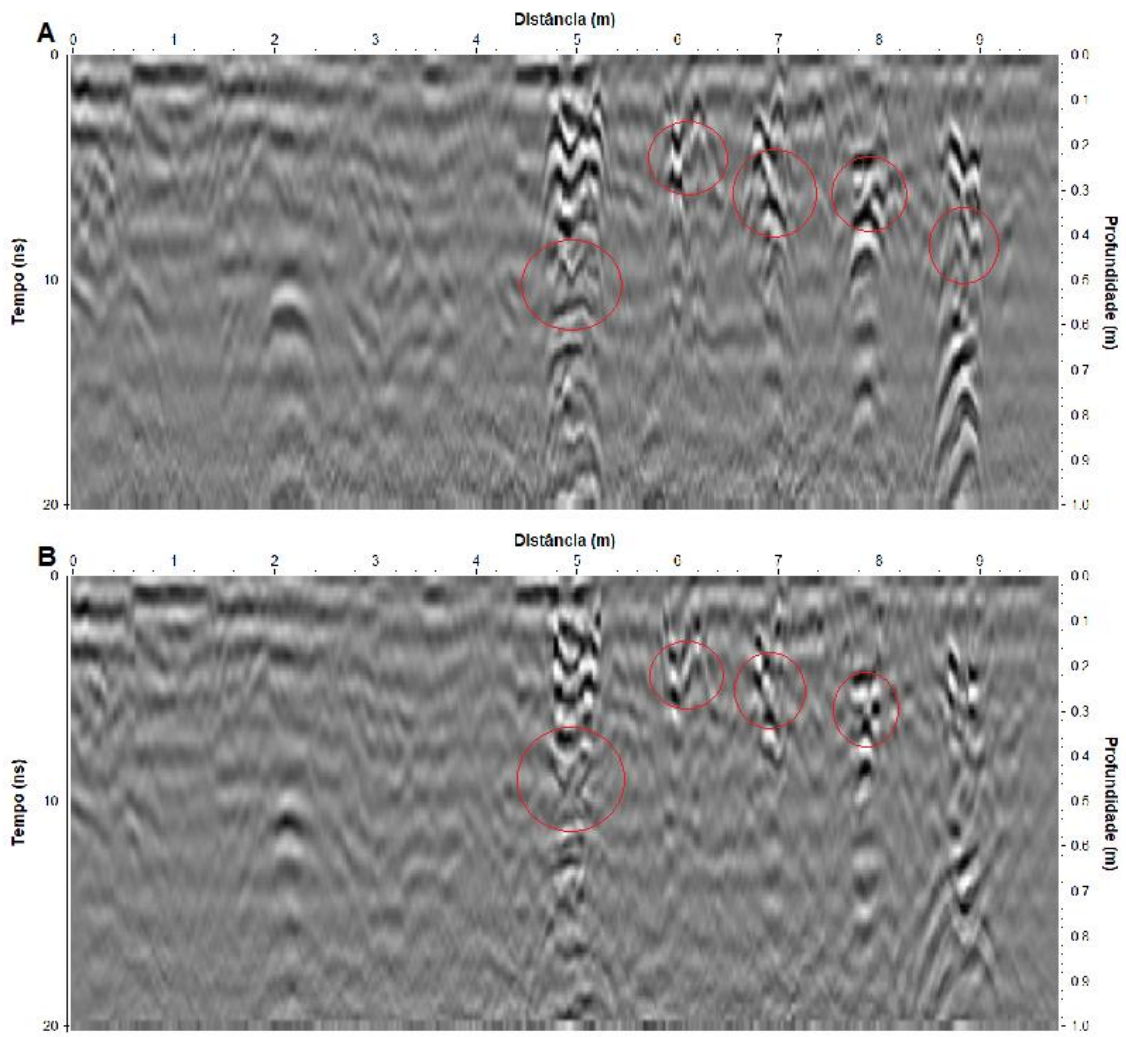


Figura 21: Radargramas referentes ao levantamento L-IDS-1, antena de 700 MHz sobre fosséis enterrados com areia. A) Dados não migrados, B) Dados migrados. Círculos vermelhos indicam a posição dos fosséis.

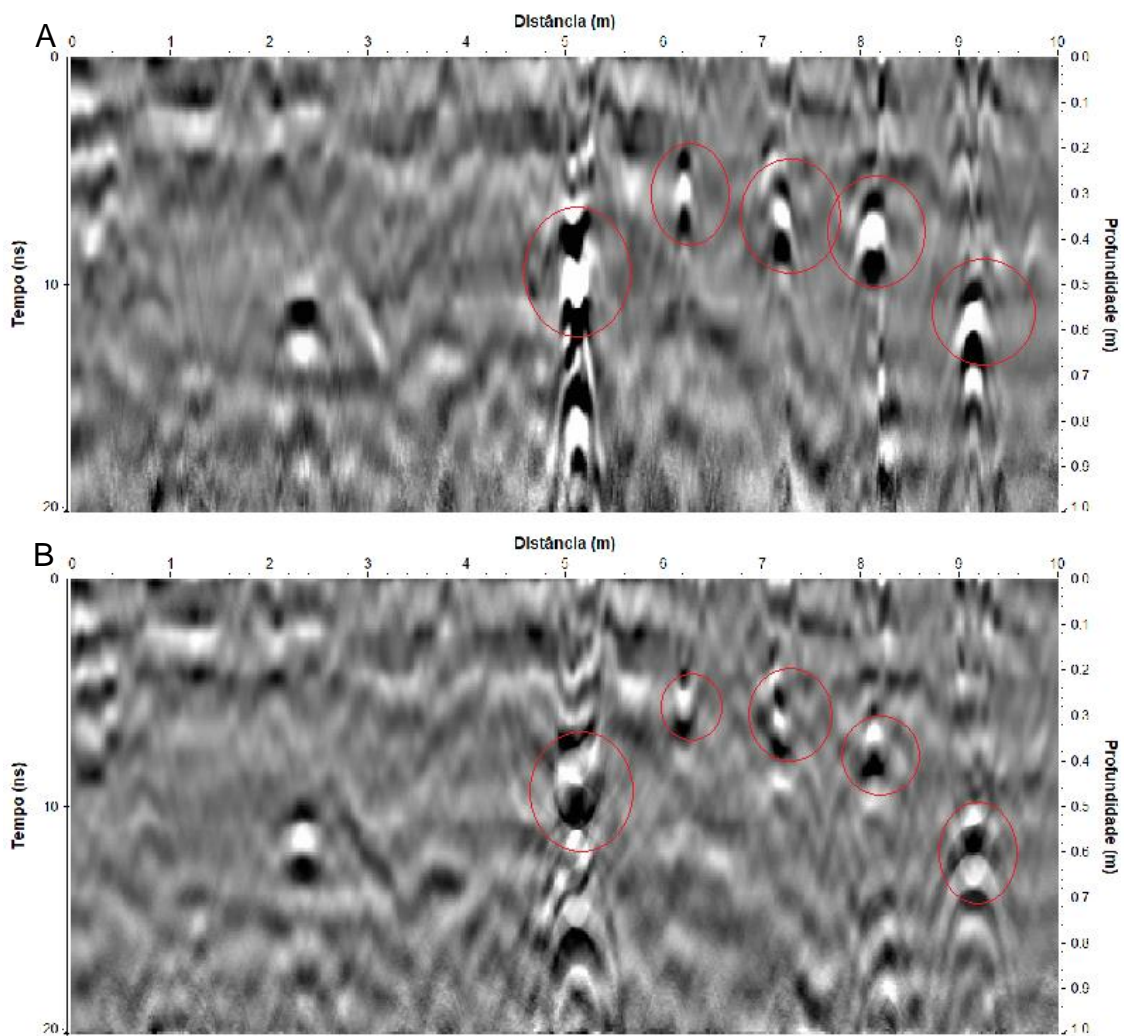


Figura 22: Radargramas referentes ao levantamento L-GSSI-1, antena de 400 MHz com número de amostras de 1024, sobre fósseis enterrados com argila. A) Dados não migrados, B) Dados migrados. Círculos vermelhos indicam a posição dos fósseis.

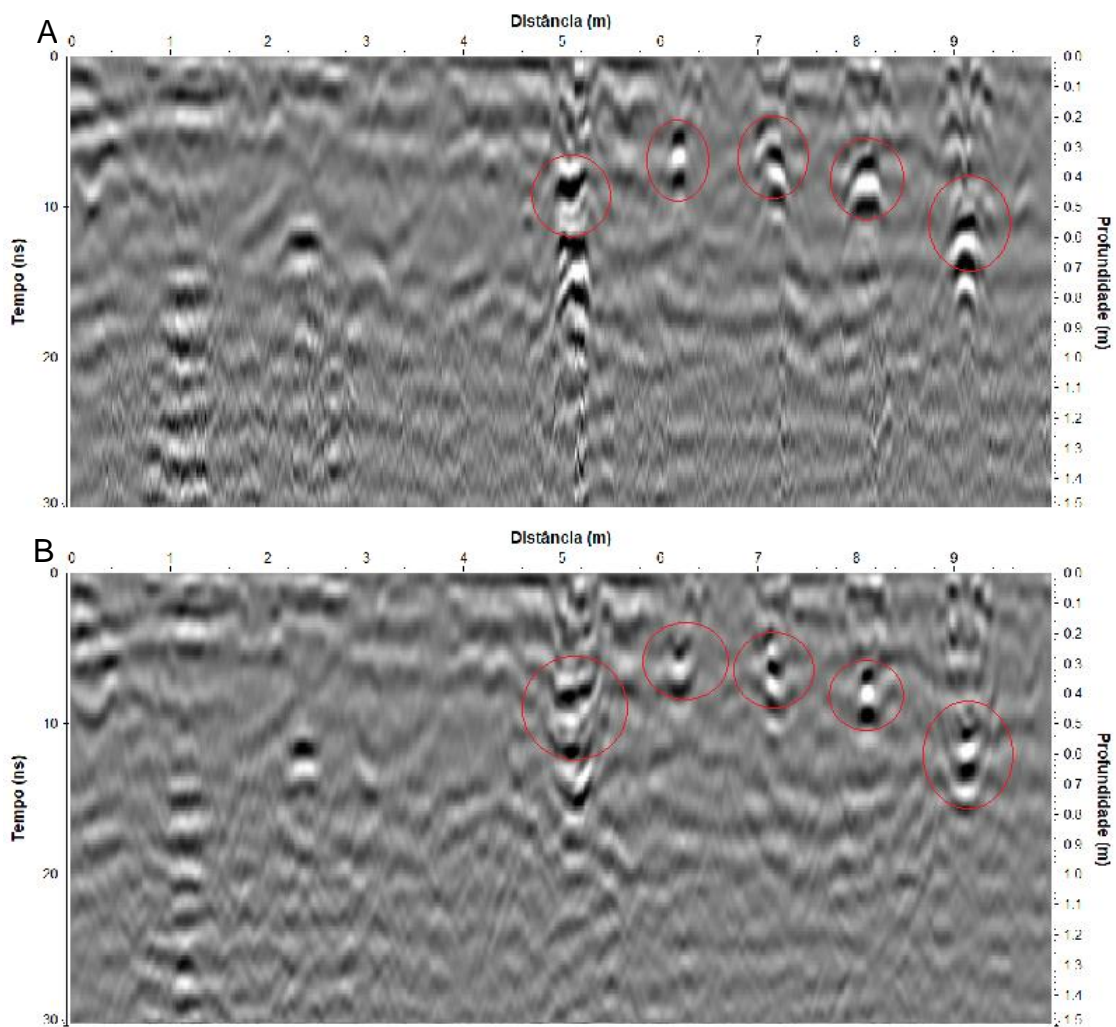


Figura 23: Radargramas referentes ao levantamento L-GSSI-1, antena de 400 MHz com número de amostras de 512, sobre fosséis enterrados com argila. A) Dados não migrados, B) Dados migrados. Círculos vermelhos indicam a posição dos fosséis.

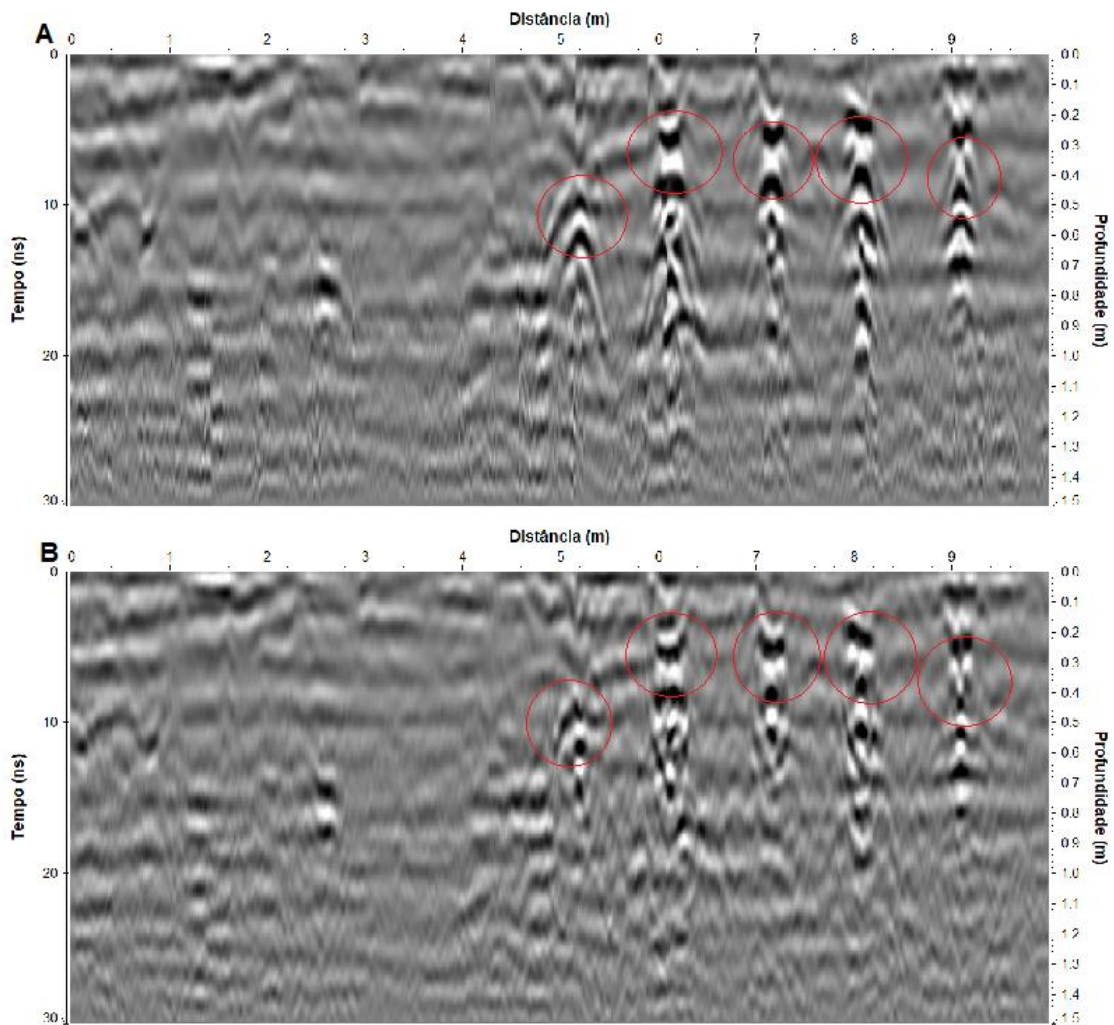


Figura 24: Radargramas referentes ao levantamento L-GSSI-1, antena de 400 MHz com número de amostras de 1024, sobre fosséis enterrados com areia. A) Dados não migrados, B) Dados migrados. Círculos vermelhos indicam a posição dos fosséis.

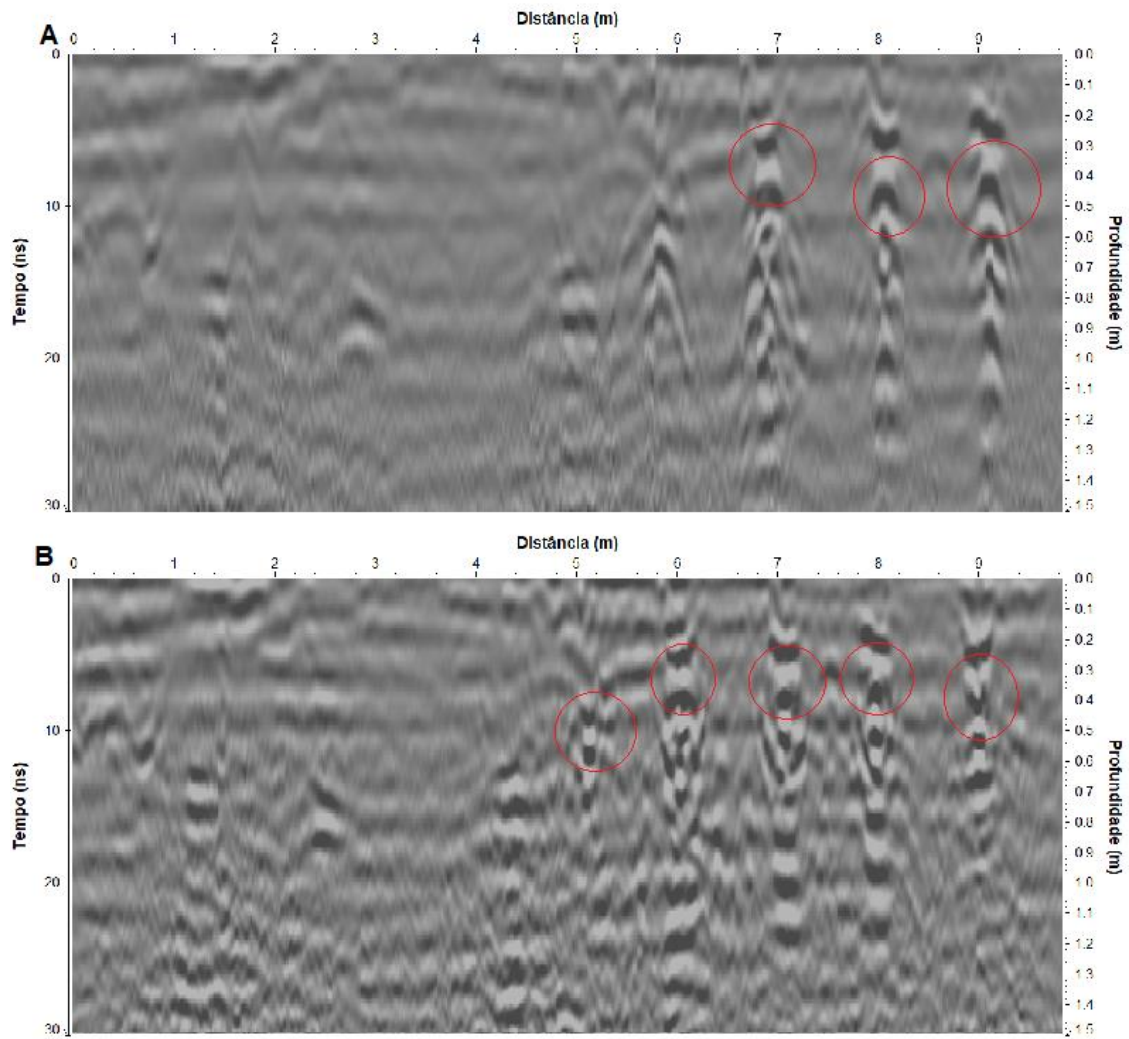


Figura 25: Radargramas referentes ao levantamento L-GSSI-1, antena de 400 MHz com número de amostras de 512, sobre fósseis enterrados com areia. A) Dados não migrados, B) Dados migrados. Círculos vermelhos indicam a posição dos fósseis.

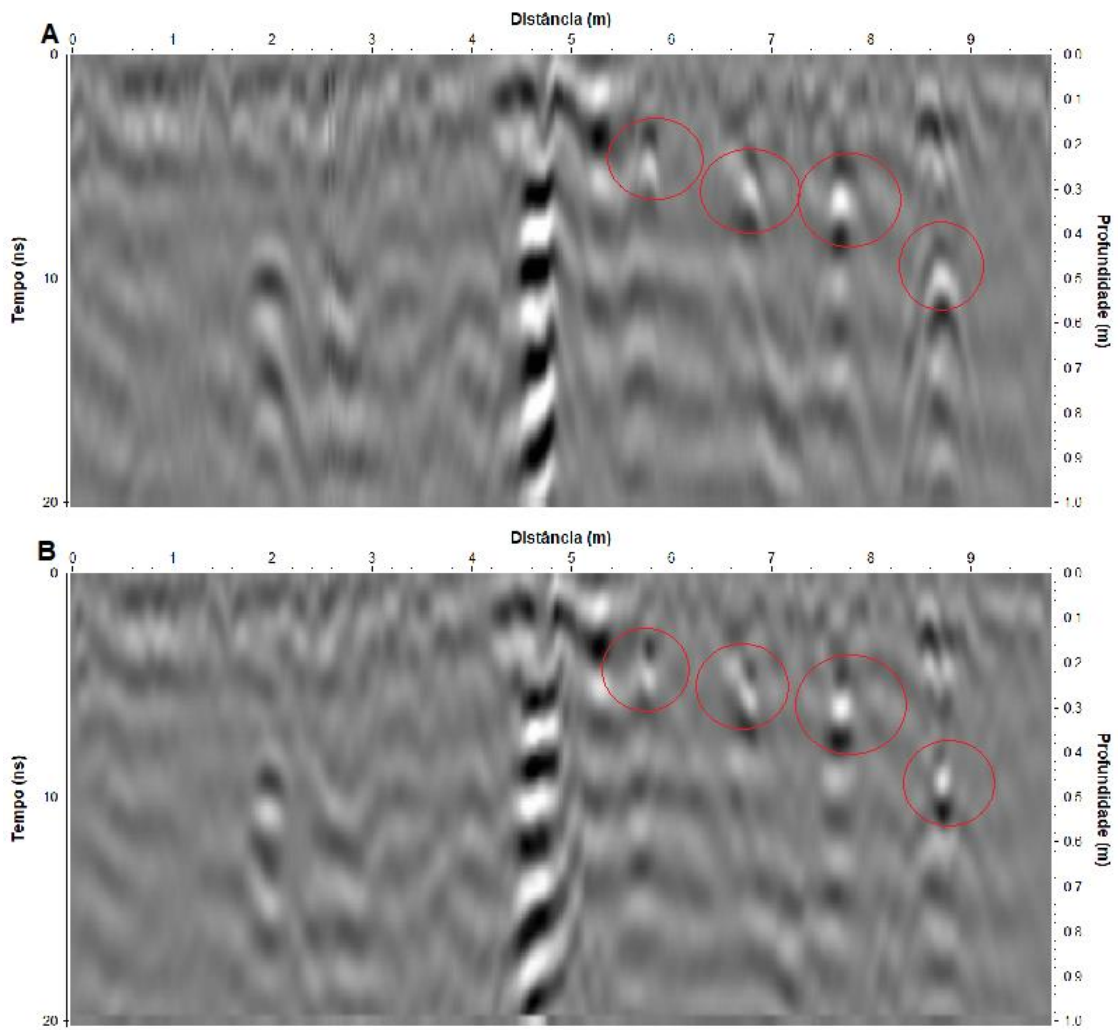


Figura 26: Radargramas referentes ao levantamento L-IDS-2, com antena de 250 MHz, sobre fósseis enterrados com argila. A) Dados não migrados, B) Dados migrados. Círculos vermelhos indicam a posição dos fósseis.

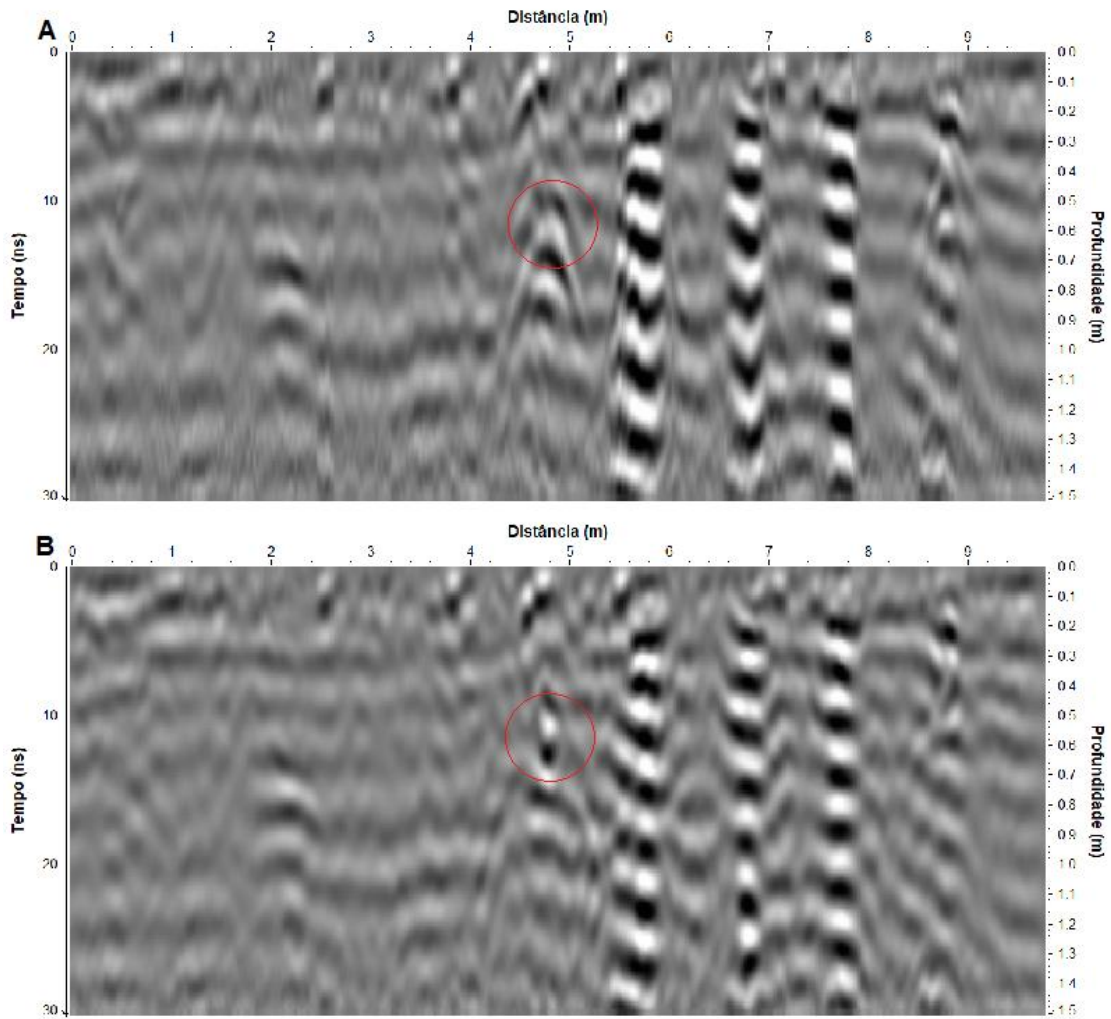


Figura 27: Radargramas referentes ao levantamento L-IDS-2, com antena de 250 MHz, sobre fosséis enterrados com areia. A) Dados não migrados, B) Dados migrados. Círculos vermelhos indicam a posição dos fosséis.

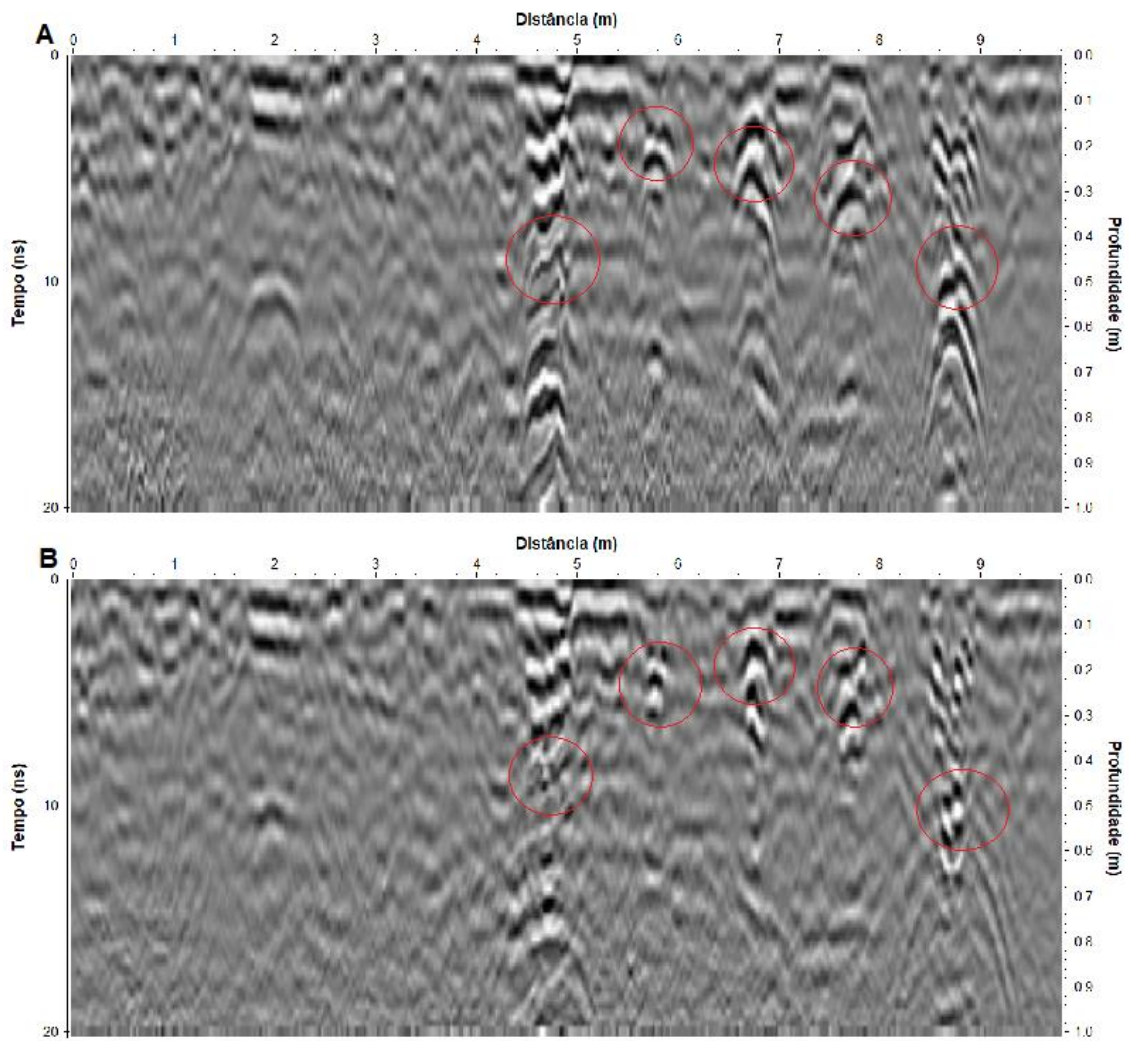


Figura 28: Radargramas referentes ao levantamento L-IDS-2, com antena de 700 MHz, sobre fosséis enterrados com argila. A) Dados não migrados, B) Dados migrados. Círculos vermelhos indicam a posição dos fosséis.

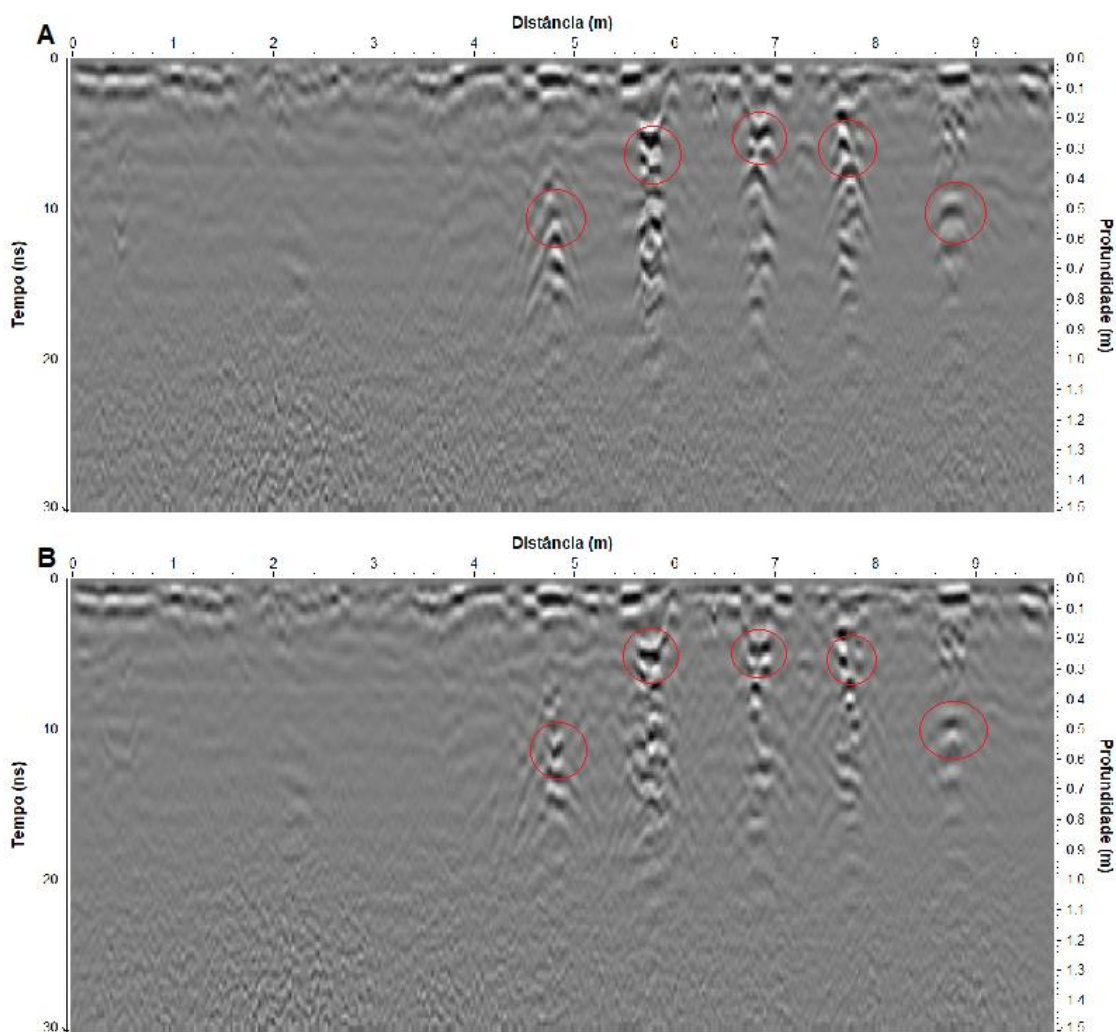


Figura 29: Radargramas referentes ao levantamento L-IDS-2, com antena de 700 MHz, sobre fosséis enterrados com areia. A) Dados não migrados, B) Dados migrados. Círculos vermelhos indicam a posição dos fosséis.

5. DISCUSSÃO

Observando as figuras do capítulo anterior é possível afirmar que as antenas de 250, 400 e 700 MHz, possuem respostas dentro das esperadas para a situação do experimento, apresentando hipérbolas bem acentuadas antes da migração, além de refletores bem marcados indicando as escavações, principalmente na linha de fosséis enterrados com areia. Na maioria das imagens os fosséis são reconhecidos, quando realizada a migração, por formas arredondadas dos refletores, inclusive os menores fosséis com 10 cm de comprimento.

Os dados obtidos com o GPR SIR3000 (GSSI) possuem melhor resolução, tanto com 512 como 1024 amostras, e após a migração acentuaram bem os artefatos colocando-os próximos às suas profundidades reais. Provavelmente a melhor resolução desse GPR se deve a razão entre o número de amostras e a janela temporal ser maior que o outro GPR, assim proporcionando um acréscimo na resolução.

Os dados do GPR Detector Duo são mais atenuados com a profundidade, embora ambas as antenas tenham apresentado respostas satisfatórias com relação à identificação dos artefatos. Alguns dos radargramas produzidos a partir dos dados obtidos pelo Detector Duo não puderam definir hipérbolas verdadeiramente associadas aos fósseis, contudo em campo, ao realizar o levantamento, foram recebidos sinais que indicavam o material fóssil em meio ao solo, portanto é possível sua utilização em sítios paleontológicos. Das antenas do Detector Duo, a antena de 700 MHz apresentou a melhor resposta para localizar os fósseis.

A velocidade foi medida com base no ajuste hiperbólico, assim como mostra a figura 24. Essa velocidade diferenciou-se devido à presença de maior teor de umidade nos levantamentos, pois a água por aumentar a condutividade do meio faz com que a velocidade da onda seja reduzida. No levantamento em período de chuva a velocidade variou entre 0,0516 e 0,0605 m/ns, já nos levantamentos em período de seca variou entre 0,0621 e 0,0714 m/ns.

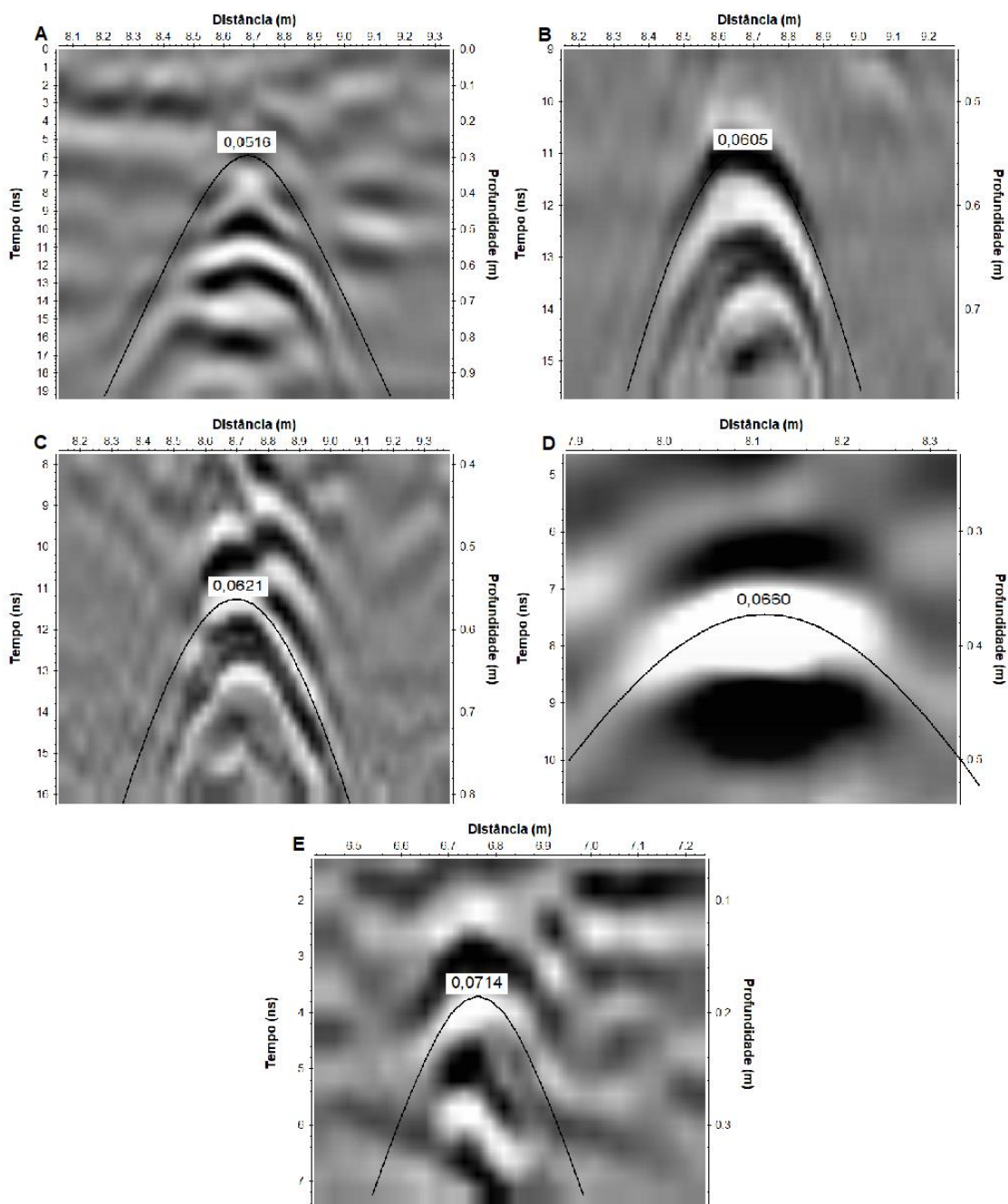


Figura 30: Radargramas indicando a velocidade com uso do ajuste hiperbólico, para levantamentos em período de chuva e seca. A) L-IDS-1 250 MHz (chuvoso), B) L-IDS-1 700 MHz (chuvoso), C) L-IDS-2 700 MHz (seco), D) L-GSSI-1 400 MHz (seco), E) L-IDS-2 250 MHz (seco).

Foi confeccionado slices de modelos pseudo 3D com o uso das malhas de dados 2D, espaçadas 0,1 e 0,2 m respectivamente, referentes ao *background* e ao levantamento do Detector Duo em período seco. Estes slices foram cortados perpendicularmente ao eixo z (profundidade), apresentados nas figuras 31 e 32. Tanto para a antena de 250 quanto para a de 700 MHz foi possível identificar as anomalias geradas pelos fósseis em cortes do modelo

pseudo 3D. Essas anomalias apresentaram formas retangulares e são observadas apenas nos slices realizados no levantamento pós-construção do campo. As formas retangulares são condizentes com os formatos dos fósseis, porém são de tamanhos diferentes dos mesmos, ou estão irregulares, portanto podem ser relacionadas aos fósseis mais não podem indicar um formato real dos corpos.

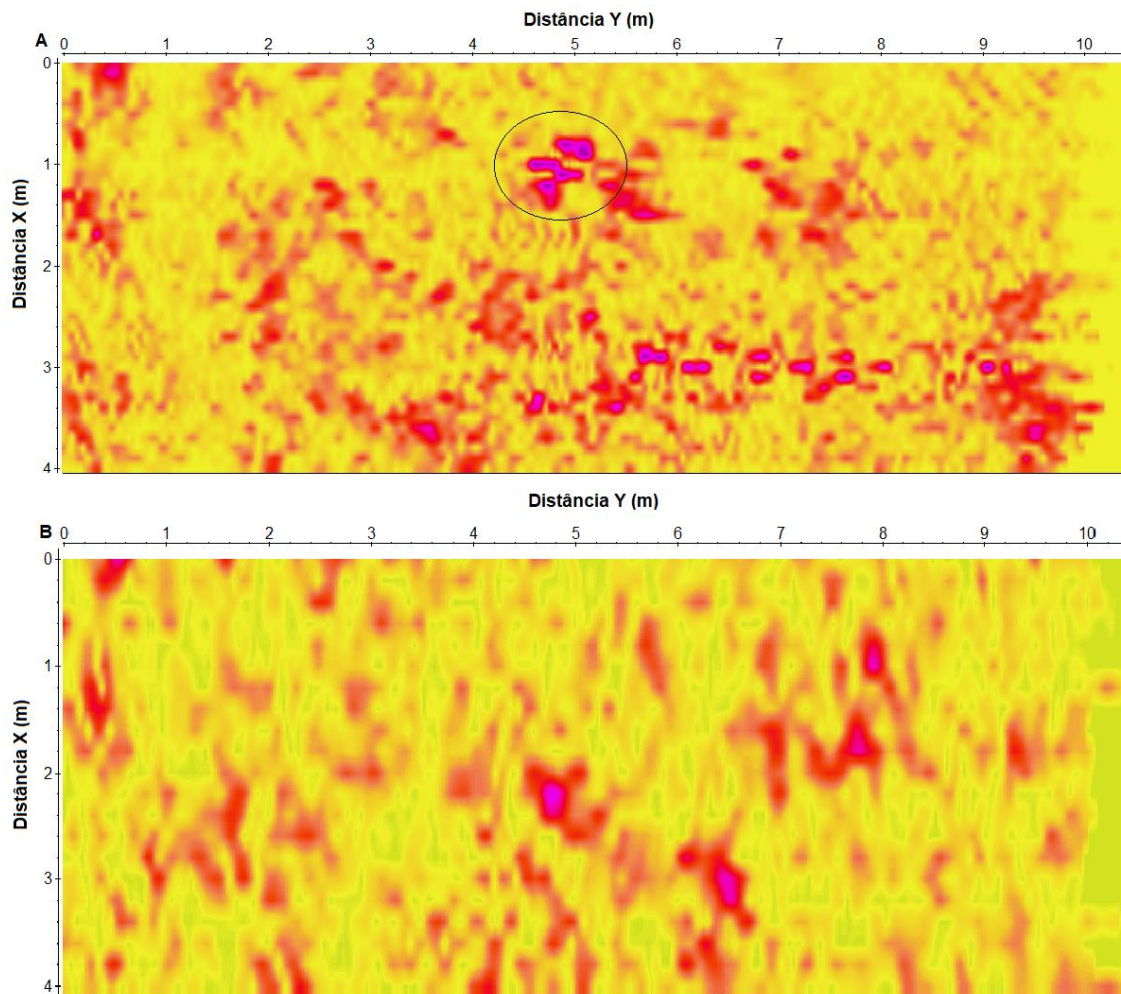


Figura 31: Cortes do pseudo 3D a 41 cm de profundidade com a antena de 250 MHz. A) L-IDS-2 apresenta um círculo identificando o fóssil de 30 cm de comprimento, B) *Background* da área, não apresenta anomalias referentes aos fósseis.

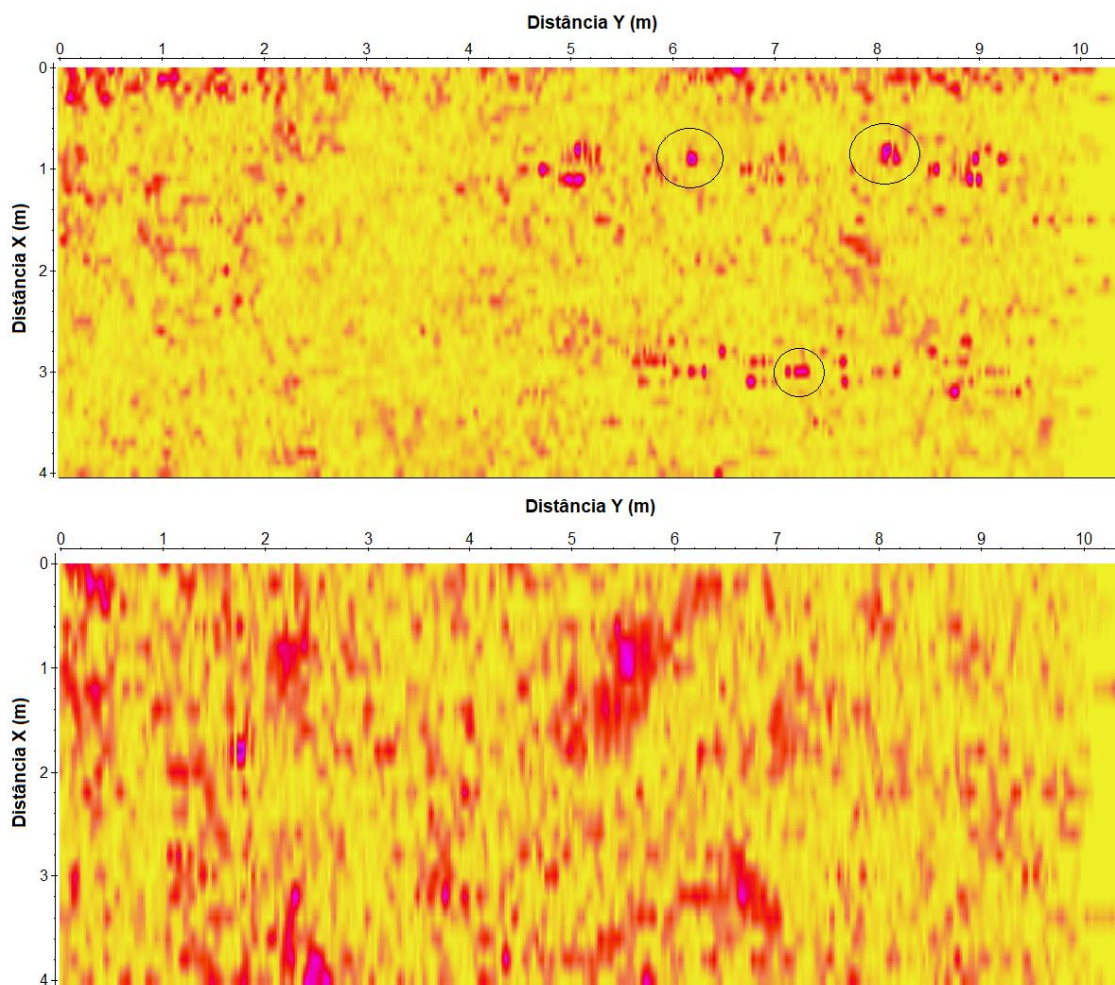


Figura 32: Cortes do pseudo 3D a 20 cm de profundidade com a antena de 700 MHz. A) L-IDS-2 apresenta um círculo identificando os fósseis de 10 e 15 cm de comprimento, B) *Background* da área, não apresenta anomalias referentes aos fósseis.

6. CONCLUSÕES

O presente projeto cumpriu com o objetivo de verificar a eficácia do método, visto que em campo e após o processamento dos dados foi possível identificar os refletores e hipérboles que indicavam o fóssil em subsuperfície. Além disso, foi possível verificar a mudança de velocidade por influência da umidade contida no solo, onde foi maior a velocidade em meio seco. Foi mais eficaz a identificação dos fósseis em meio argiloso do que em meio arenoso devido a grande diferença mineralógica. Os fósseis com 10 cm tiveram resposta mais fraca, mesmo assim apareceram em todas as antenas. Não foi possível atribuir com precisão as respostas dos slices dos modelos 3D aos

formatos reais dos corpos, mas é evidente a diferença entre o *background* e o levantamento visto que há anomalias referentes aos fósseis somente no levantamento. Não foi possível atribuir um padrão de resposta para os caules fossilizados, no entanto o método mostrou-se viável para a pesquisa paleontológica voltada a troncos fósseis, principalmente quanto à necessidade de identificação ágil para a prospecção em campo. O GPR é uma opção para a pesquisa de campo em sítios paleobotânicos já que detecta com bastante precisão caules fósseis mineralizados que tiverem dimensões suficientes para os padrões do aparelho.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves F. da S. 2011. *Uso do georradar para estudos de estratigrafia do subsolo*. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, pp. 187.
- Aranha P. R. A. 2010. *Apostila de Georadar*. Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, pp. 43.
- Bardola T. P. 2011. *Caracterização anatômica e relações estratigráficas entre a Ligniflora triássica da região de São Pedro do Sul, RS*. Monografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pp. 61.
- Biemann E. P. G. E. 2012. *Angiospermas Eocretáceas do Membro Crato (Formação Santana, Bacia do Araripe, NE do Brasil): Revisão Taxonômica de Welwitschiophyllum brasiliense Dilcher, Bernardes-de-Oliveira, Pons et Lott, 2005*. Dissertação de mestrado. Universidade Guarulhos, São Paulo, pp. 81.
- Bolzon R. T. 1993. *A Ligniflora Mesozoica do Rio Grande do Sul (Brasil): Métodos de Estudo e Considerações Sobre Tafonomia, Paleoecologia e Paleoclimatologia*. Dissertação de mestrado. Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pp. 142.
- Bolzon R. T., Silva S. da, Machado L. G. 2004. *Fossildiagênese de lenhos do mesozoico do estado do Rio Grande do Sul, Brasil*. Revista Brasileira de Paleontologia, Porto Alegre, 7(2): 103-110.
- Brasil D. L. 2013. *Investigação geofísica forense e antropológica com o método GPR no cemitério do Tapanã e no cemitério perdido de Mosqueiro (Belém, Pará)*. Dissertação de mestrado. Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, pp. 90.
- Buso D. S. de O., Blum M. de L. B., Borges W. R. 2016. *Imageamento GPR 3D de Alvos Forenses na Área do Sítio Controlado de Criminalística (SITICRIM)*. In: VII Simpósio Brasileiro de Geofísica, 2016, Ouro Preto.

- Catete C. P. 2010. *Investigação ambiental e forense com os métodos geofísicos radar de penetração no solo, polarização induzida e eletrorresistividade no cemitério de Tapanã, Belém/Pará*. Dissertação de mestrado. Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, pp. 89.
- Cunha R. F. da. 2016. *Contexto paleoambiental e tafonomia da assembleia fóssil da formação Guabirota, Bacia de Curitiba, Paraná*. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, pp. 120.
- Daniels J. J. 2000. *Ground penetrating radar fundamentals*. Department of Geological Sciences, The Ohio State University, pp. 21.
- Davis J. L., Annan A. P. 1989. *Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy*. *Geophysical Prospecting*, v. 37, p. 531-551.
- Felipe R. S. 2011. *Características Geológico-Geotécnicas na Formação Guabirota, Erosão – Movimentos Gravitacionais de Massa*. Mineropar, Curitiba, 1ª ed., pp. 48.
- Gandolfo O. C. B. 2007. *Um estudo do imageamento geoeletrico na investigação rasa*. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, pp. 215.
- Guerra-Sommer M., Scherer C. M. S. 2002. Sítios Paleobotânicos do Arenito Mata (Mata e São Pedro do Sul), RS – Uma das mais importantes “florestas petrificadas” do planeta. *In: Schobbenhaus C., Campos D. A., Queiroz E. T., Winge M., Berbert-Born M. L. C. (Edits.) Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP)*, 2002, v. 1, p. 03-10.
- Jol H. M. 2009. *Ground Penetrating Radar: Theory and applications*. Elsevier, University of Wisconsin-Eau Claire, USA.
- Kauffmann M. 2014. *Mapeamento Geológico e Levantamento Paleontológico do Monumento Natural das Árvores Fossilizadas, Bacia do Parnaíba, Estado do Tocantins*. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, pp. 124.
- Lima F. M. de, Fernandes L. A., Melo M. S. de, Góes A. M., Machado D. A. M. 2013. *Faciologia e contexto deposicional da formação Guabirota, Bacia de Curitiba (PR)*. *Brazilian Journal of Geology*, 43(1): 168-184.
- Melo M. da S. e. 2007. *Geofísica aplicada à arqueologia: Investigação no sítio histórico Engenho Murutucu, em Belém, Pará*. Dissertação de mestrado. Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, pp. 99.
- Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instituto Nacional de Meteorologia. *Estações Automáticas – Gráficos*. Curitiba, 2017 em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf>. Acesso: 26 de novembro de 2017.

- Pedrosa T. R. M. A. M., Castro D. L. de, Branco R. M. G. C. 2006. *Caracterização de plumas contaminantes de hidrocarbonetos em postos de abastecimento em Fortaleza, usando o método radar de penetração no solo (GPR)*. Revista de Geologia, Fortaleza, v. 19, n. 1, p. 73-86.
- Pires E. F., Guerra-Sommer M. 2011. *Growth ring analysis of fóssil coniferous woods from early cretaceous of Araripe Basin (Brasil)*. Anais da Academia Brasileira de Ciências, online, v. 83, n. 2, p. 409-423. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0001-37652011005000005>. Acesso em 24 de novembro de 2017.
- Porsani J. L., Borges W. R., Rodrigues S. I., Hiedo F. Y. 2006. *O Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG/USP: Instalação e Resultados GPR 2D-3D*. Revista Brasileira de Geofísica, 24(1): 49-61.
- Riccomini C. 1989. *O Rift Continental do Sudeste do Brasil*. Tese de doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, pp. 256.
- Riccomini C., Sant'Anna L. G., Ferrari A. L. 2004. *Evolução Geológica do Rift Continental do Sudeste do Brasil*. In: Neto V. M, Bartorelli A., Carneiro C. D. R., Neves B. B. B. (eds.). *Geologia do Continente Sul Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Beca Editora, p. 383-405.
- Rodrigues S. I. 2009. *Contribuições dos métodos GPR e Eletromagnético Indutivo em estudos de sítios arqueológicos de sambaquis costeiros no Estado de Santa Catarina*. Tese de Doutorado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, pp. 235.
- Sandmeier K. J. 2006. REFLEXW Version 4.2, Windows 9x/2000/NT. *Program for the processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction and transmission data*. Manual do Software, Karlsruhe, Germany. 209p.
- Sandmeier K. J. 2017. REFLEXW Version 8.5, Windows XP/7/8/10 - *Program for the processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction and transmission data*. Manual do Software, Karlsruhe, Germany. 652p.
- Salamuni E., Salamuni R., Ebert H. D. 1999. *Contribuição à Geologia da bacia sedimentar de Curitiba (PR)*. Boletim Paranaense de Geociências, v. 47, p. 123-142.
- Santos M. de F. C. F. dos. 2001. *Geologia e Paleontologia de Depósitos Fossilíferos Pleistocênicos do Rio Grande do Norte*. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, pp. 70.
- Santos A. R. 2008. *Detecção de plumas de contaminação por hidrocarbonetos no subsolo através do método radar de penetração no solo (GPR)*. Monografia. Universidade Federal do Rio Grande, 57 pp.
- Tomassi H. Z., Ferreira B. C., Leite F. P. R., Gama-Júnior J. M., Silva M. A. da, Correa P. M. 2011. *Análise espacial aplicada à pesquisa paleontológica de afloramento, apoiada por métodos geofísicos*. In: Congresso Brasileiro de Paleontologia, 22, SBG, Natal.