



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Instituto de Geociências

Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica

**GEOTECNOLOGIA APLICADA À ARQUEOLOGIA:
CARACTERIZAÇÃO GPR DO SÍTIO ARQUEOLÓGICO
GO-JA-02, SERRANÓPOLIS-GO**

Isabela Resende Almeida

Dissertação de número 230 apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Geociências Aplicadas

Orientador

Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges

Brasília-DF
2024



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Instituto de Geociências

Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica

**GEOTECNOLOGIA APLICADA À ARQUEOLOGIA:
CARACTERIZAÇÃO GPR DO SÍTIO ARQUEOLÓGICO
GO-JA-02, SERRANÓPOLIS-GO**

Isabela Resende Almeida

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges (IG-UnB) - Orientador/Presidente

Prof. Dr. Elder Yokoyama (IG-UnB) - Titular interno

Prof. Dr. Julio Cezar Rubin De Rubin (PUC-GO) - Titular externo

Prof. Dr. Rogerio Elias Soares Uagoda (IG-UnB) - Suplente

Brasília-DF

2024

“Eis que eu estou convosco todos os dias”

Matheus 28:20

Ficha catalográfica elaborada automaticamente, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

RA447g Resende Almeida, Isabela
GEOTECNOLOGIA APLICADA Á ARQUEOLOGIA: CARACTERIZAÇÃO GPR DO SÍTIO ARQUEOLÓGICOS GO-JA-02, SERRRANÓPOLIS-GO / Isabela Resende Almeida; orientador Welitom Rodrigues Borges. -- Brasília, 2024.
87 p.

Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) -- Universidade de Brasília, 2024.

1. GPR 3D. 2. Prospeção Arqueológica. 3. Pesquisa Não-Invasiva. 4. Serranópolis. I. Rodrigues Borges, Welitom, orient. II. Título.

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de expressar minha profunda gratidão a Deus, fonte de força ao longo desta jornada acadêmica: foi por meio da fé que alcancei esta realização.

Agradeço ao meu orientador, Welitom Borges, por sua paciência, compressão e contribuições. Suas ajudas e orientações foram essenciais para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Meu reconhecimento se estende à equipe do Projeto Serranópolis, em especial aos arqueólogos da PUC Goiás, pela colaboração e por me permitirem contribuir com a minha pesquisa neste importante projeto arqueológico. Destaco a parceria e solicitude do Professor Júlio Rubin e a professora Rosiclér Theodoro, cujas vastas experiências e fascinação pela arqueologia despertaram em mim um profundo interesse pela área. Às arqueólogas Jordana Barbosa e Joanne Freitas, minha gratidão pelo auxílio e conhecimento compartilhado.

Agradeço ao Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, pelo apoio acadêmico e financeiro que viabilizou a realização desta pesquisa. Agradeço também ao técnico Péricles, cuja assistência logística e suporte foram indispensáveis para a realização das atividades de campo.

Por fim, expresso minha especial e profunda gratidão à minha mãe, Maria Conceição Resende; a minha amiga, Karine Taveira; e ao meu namorado, Guilherme Sasse: as orações, o incentivo e o amor de vocês foram essenciais ao longo desta desafiadora, porém gratificante jornada acadêmica.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

ALMEIDA, I. R. 2024. Geotecnologia Aplicada à Arqueologia: Caracterização GPR do Sítio Arqueológico GO-Ja-02, Serranópolis-GO. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica (Dissertação de Mestrado), Instituto de Geociências, UnB, 87 p.

Resumo

Esta dissertação apresenta um estudo geofísico não-invasivo do sítio arqueológico GO-Ja-02, localizado em Serranópolis, Goiás, utilizando o método *Ground Penetrating Radar* (GPR). O estudo visou caracterizar o arqueoambiente do sítio, previamente às etapas de escavação, através da análise dos diferentes padrões de reflexão e das respostas anômalas obtidos na aquisição de dados GPR 2D e pseudo-3D, respectivamente. A pesquisa envolveu a geração de modelos pseudo-3D da subsuperfície, a partir da coleta de inúmeros perfis GPR 2D paralelos e com espaçamento constante, em duas áreas abrangentes do sítio (Área A1 e B1), utilizando uma antena com frequência central de 400 MHz. Os resultados revelaram padrões de reflexão distintos associados a elementos como blocos de rocha, raízes e o topo da rocha em subsuperfície. Um achado significativo foi a correlação de uma resposta anômala com presença de uma camada sedimentar carbonática, indicada pelos arqueólogos como potencialmente relacionada a atividades humanas antigas. O estudo também mapeou a distribuição dos elementos identificados, em vários cortes em profundidade dos blocos pseudo-3D. A partir desse mapeamento e com base no contexto arqueológico da área, uma metodologia de ranqueamento de áreas com potencial para serem escavadas foi desenvolvida. Esta pesquisa não apenas contribuiu para o avanço do conhecimento sobre o sítio GO-Ja-02, mas também demonstrou a eficácia do GPR como ferramenta não invasiva na prospecção arqueológica. Além disso, estabeleceu uma base metodológica objetiva, baseada em critérios quantificáveis e ajustável, podendo ser utilizada em futuras investigações conforme as particularidades do sítio a ser estudado.

Palavras-chave: GPR 3D, Prospecção Arqueológica, Pesquisa Não-Invasiva, Serranópolis.

ALMEIDA, I. R. 2024. *Geotechnology Applied to Archaeology: GPR Characterization of the Archaeological Site GO-Ja-02, Serranópolis-GO*. Postgraduate Program in Applied Geosciences and Geodynamics (Master's Thesis), Institute of Geosciences, UnB, 87 p.

Abstract

This dissertation presents a non-invasive geophysical study of the archaeological site GO-Ja-02, located in Serranópolis, Goiás, using the Ground Penetrating Radar (GPR) method. The study aimed to characterize the archaeo-environment of the site, prior to excavation stages, through the analysis of different reflection patterns and anomalous responses obtained from 2D and pseudo-3D GPR data acquisition, respectively. The research involved generating pseudo-3D subsurface models from the collection of numerous parallel 2D GPR profiles with constant spacing, in two comprehensive areas of the site (Area A1 and B1), using an antenna with a central frequency of 400 MHz. The results revealed distinct reflection patterns associated with elements such as rock blocks, roots, and the top of the subsurface rock. A significant finding was the correlation of an anomalous response with the presence of a carbonate sedimentary layer, indicated by archaeologists as potentially related to ancient human activities. The study also mapped the distribution of identified elements in various depth slices of the pseudo-3D blocks. Based on this mapping and the archaeological context of the area, a methodology for ranking areas with potential for excavation was developed. This research not only contributed to advancing knowledge about the GO-Ja-02 site but also demonstrated the effectiveness of GPR as a non-invasive tool in archaeological prospection. Furthermore, it established an objective methodological basis, founded on quantifiable criteria and adjustable, which can be used in future investigations according to the particularities of the site to be studied.

Keywords: 3D GPR, Archaeological Prospection, Non-Invasive Survey, Serranópolis.

Sumário

1. Introdução	1
1.1 Objetivo	3
2. Complexo Arqueológico de Serranópolis, Goiás	5
2.1 Características Físicas da Área	8
2.1.1 Estratigrafia do Sítio GO-Ja-02.....	12
2.2 Origem e Evolução das Pesquisas Arqueológicas em Serranópolis: Uma Revisão Histórica	16
2.2.1 Sepultamentos	20
3. O GPR	24
3.1 Fundamentação Teórica	26
3.1.1 Equações de Maxwell	26
3.1.2 Equações Constitutivas	27
3.1.3 Propriedades dos materiais.....	28
3.1.4 Transmissão e Reflexão do Sinal	30
3.1.5 Relação entre frequência, atenuação e resolução	33
3.2 Avaliação da aplicabilidade do GPR	34
3.3 Aplicação do GPR em contextos arqueológicos	38
4. Desenvolvimento	42
4.1 Área de Estudo - Sítio GO-Ja-02	42
4.2 Aquisição de dados GPR	44
4.3 Processamento de dados	51
4.3.1 Geração dos perfis GPR pseudo-3D	53
4.4 Resultados e Interpretações	54
4.4.1 Padrões de Reflexão.....	55
4.4.2 Caracterização do Arqueoambiente	61
4.4.3 Mapeamento do sedimento carbonático.....	71
4.4.4 Sugestão de locais para escavação	74
5. Conclusões	79
Referências Bibliográficas	81

Lista de Figuras

- Figura 1 - Mapa geográfico da região de Serranópolis, estado de Goiás. O mapa destaca a localização dos sítios por núcleos arqueológicos identificados como Núcleo A, B, C, D, E e F; além de um sítio do Sítio Macaco; marcados por diferentes cores.6
- Figura 2 - Fotografias mostrando atividades agrícolas nas proximidades dos Sítio GO-Ja-01, destacando o impacto sobre a preservação do patrimônio cultural.8
- Figura 3 - Mapa geológico ilustrando: Cidade de Serranópolis, com a indicação dos sítios arqueológicos e seus respectivos núcleos, e as formações geológicas da região de Serranópolis, Goiás, sendo, ENch: Formação Cachoeirinha; K1bt: Formação Botucatu; K2vp: Formação Vale do Rio do Peixe; Q2a: Depósitos Aluvionares. K1sg: Grupo Serra Geral; Qdi: Unidades Coberturas detríticas indiferenciadas..... 10
- Figura 4 – Perfil estratigráfico (corte I), do sítio GO-Ja-02: Informações das camadas, níveis e fases. 14
- Figura 5 - Registro dos estratos do perfil norte da escavação, camadas e estruturas identificadas. Profundidade de 150 cm. Sítio GO-Ja-02. Fonte: Acervo do Projeto Serranópolis..... 16
- Figura 6 - Escavação no sítio GO-Ja-02 com destaque para a estrutura funerária com dez crânios humanos descobertos, com dimensões horizontais médias de 60,0 cm x 45,0 cm e vertical de 20,0 cm; encontrada a 63,0 cm de profundidade. 18
- Figura 7 – Ilustração do sistema GPR e seu princípio básico de funcionamento: Unidade de Controle, controla as operações do radar; Antena, transmite ondas de radar para o solo e recebe as ondas refletidas; Odômetro, mede a distância percorrida pelo equipamento; Onda transmitida, indica a onda de radar enviada para o subsolo; Onda refletida, mostra a onda de radar que retorna após encontrar meio reflexivo; Alvo, no exemplo, são crânios humanos enterrados; Perfil 2D, radargrama representando a interpretação visual dos coletados, com destaque para reflexão hiperbólica relacionada ao alvo detectado. Ilustração modificada de fonte desconhecida.....25
- Figura 8 – Atenuação intrínseca de dois solos diferentes para teores volumétricos de água variados entre 0% e 15%. Adaptado de Loewer (2018)..... 29
- Figura 9 - Ilustração da transmissão e refração de uma onda eletromagnética ao encontrar uma interface e um alvo, e a respectiva formação da imagem no GPR. Adaptado de Xavier (2006). 32
- Figura 10 – Fluxograma do alcance do radar (RRE, do inglês "Radar Range Equation"). Essa equação visa determinar a distribuição de energia e fornecer um meio de estimar a profundidade de exploração..... 36
- Figura 11 – Mapa ilustrando a localização do Sítio Arqueológico GO-Ja-02, objeto de estudo da presente pesquisa; mapa com imagem aérea do com maior detalhe sobre a localização do Sítio, pertencente ao Núcleo A; fotografia do abrigo tirada por drone.43

Figura 12 – Croqui do Sítio Arqueológico GO-Ja-02 e fotografias da área. Croqui modificado de Schmitz et al. (1989).....	44
Figura 13 - Fotografias ilustrando os equipamentos utilizados para aquisição dos perfis de GPR 2D, sendo: antenas de 200, 400 e 900 MHz, odômetro para o acionamento do trigger, unidade de controle com sistema SIR 3000 (GSSI) e cabo conector da antena	45
Figura 14 - Fotografias das aquisições de campo da primeira campanha, sendo: a) Aquisição de dados GPR com antena de 400 MHz da Área A1, compartimento A; b) Aquisição de dados GPR com antena de 400 MHz da Área B1, compartimento B; c) Esquema ilustrando o referenciamento da aquisição da Área A.....	47
Figura 15 - Croqui com as projeções das linhas de aquisição GPR e fotografias dos respectivos compartimentos B e A. Croqui modificado de Schmitz et al. (1989).....	48
Figura 16 - Fotografia da aquisição de dados GPR, utilizando o equipamento Detector DUO, fabricado pela empresa IDS Georadar.....	49
Figura 17 – Esquema ilustrando: croqui do sítio arqueológico com a indicação das áreas de interesse A2, A3 e A4; "Fotografia" representa as áreas e a direção de onde as fotografias foram tiradas; "Perfis GPR" indica as direções de aquisição dos perfis 2D paralelos, coletados com espaçamento de 10cm. "Área úmida" destaca regiões com presença de umidade decorrente da percolação de água da parede do abrigo. Croqui modificado de Schmitz et al. (1989).	50
Figura 18 - Fotografias da aquisição de dados GPR da quarta campanha, utilizando o equipamento SIR 3000 com antenas de 900 e 200MHz respectivamente.	51
Figura 19 - Fluxograma do processamento de dados de GPR.	52
Figura 20 – Radargrama destacando o valor de 0,15 m/ns da velocidade do meio para uma hipérbole identificada em um dos perfis.....	53
Figura 21- Perfis GPR pseudo-3D gerados para as áreas A1 e B1, onde sem o ajuste da reflexão do cabo de aço e à direita após a correção.	54
Figura 22 - a) Corte em profundidade (50 cm) do bloco pseudo-3D da área A1; b) Zoom de detalhe do corte em profundidade do bloco pseudo-3D com as anomalias de um bloco e rocha e uma raiz; c) Perfil 2D (posição 19,9 m) com a respectiva reflexão de um bloco de rocha (PR-1a) e de uma raiz (PR-2a). O símbolo x (vermelho) representa a anomalia do cabo de aço utilizado no georreferenciamento das seções.	57
Figura 23 - a) Corte em profundidade (40 cm) do bloco pseudo-3D da área A1; b) Zoom de detalhe do corte em profundidade do bloco pseudo-3D com as anomalias de um conjunto de blocos de rochas; c) Perfil 2D (posição 6,80 m) com a respectiva reflexão do conjunto de blocos de rochas (PR-1b). O símbolo x (vermelho) representa a anomalia do cabo de aço utilizado no georreferenciamento das seções.	58

- Figura 24 - a) Corte em profundidade (50 cm) do bloco pseudo-3D da área A1; b) Zoom de detalhe do corte em profundidade do bloco pseudo-3D com as anomalias de um conjunto de raízes; c) Perfil 2D (posição 26,2 m) com a respectiva reflexão de um conjunto de raízes (PR-2b). O símbolo x (vermelho) representa a anomalia do cabo de aço utilizado no georreferenciamento das seções.....58
- Figura 25 - a) Corte em profundidade (1 m) do bloco pseudo-3D da área B1. b) Zoom de detalhe do corte em profundidade do bloco pseudo-3D com a anomalia de um conjunto de blocos de rocha. c) Perfil 2D em y=11,0 m com a respectiva reflexão de um conjunto de blocos de rocha (PR-1b). O símbolo x (vermelho) representa a anomalia do cabo de aço utilizado no georreferenciamento das seções.....59
- Figura 26 - a) Corte em profundidade (1,40 m) do bloco pseudo-3D da área B1; b) Zoom de detalhe do corte em profundidade da anomalia do topo da rocha; c) Perfil 2D em y=15,1 m com a respectiva reflexão do topo da rocha em subsuperfície (PR-3). O símbolo x (vermelho) representa a anomalia do cabo de aço utilizado no georreferenciamento das seções.59
- Figura 27 - a) Corte em profundidade (30 cm) do bloco pseudo-3D da área A1; b) Zoom de detalhe do corte em profundidade evidenciando as áreas anômalas relativas à presença do material carbonático c) Perfil 2D em y=17,0 m com a reflexão possivelmente relacionada a com a ocorrência do material carbonático (PR-4) em uma área delimitada por tracejado vermelho. O símbolo x (vermelho) representa a anomalia do cabo de aço utilizado no georreferenciamento das seções..... 60
- Figura 28 - Croqui ilustrando o estado atual da escavação com base nas informações disponíveis até abril de 2024. 61
- Figura 29 - Cortes em profundidades (20 cm, 50 cm e 80 cm) 3D mostrando o mapeamento das anomalias relacionadas a blocos de rochas (linha amarela) e raízes (linha preta) na área B1 em diferentes profundidades: 20 cm, 50 cm e 80 cm. Essas figuras exemplificam a metodologia de demarcação e identificação das anomalias. 64
- Figura 30 - Cortes em profundidades (20 cm, 50 cm e 80 cm) mostrando o mapeamento das anomalias relacionadas a blocos de rochas (linha amarela) e raízes (linha preta) na área B1 em diferentes profundidades: 20 cm, 50 cm e 80 cm. Essas figuras exemplificam a metodologia de demarcação e identificação das anomalias. 65
- Figura 31 - Série de cortes em profundidade para área A1, com aumento da profundidade em intervalos de 16 ou 17 cm. A linha tracejada em preto mapeia as áreas com maiores concentrações de anomalias de raízes e principalmente de blocos de rocha e/ou do topo rochoso..... 69
- Figura 32 - Série de cortes em profundidade para área B1, com aumento da profundidade em intervalos de 10 cm. A linha tracejada em preto mapeia as áreas com maiores concentrações de anomalias de raízes e principalmente de blocos de rocha e/ou do topo rochoso..... 70
- Figura 33 - Fotografias de campo que evidenciam dois diferentes contextos da camada carbonática: a) Perfil na área de escavação, com aproximadamente 60 cm de profundidade, com destaque o pacote de sedimento carbonático com a presença de uma lente da camada carbonática, a 20 cm

de profundidade. b) Escavação em área onde foi encontrada a “feição compacta” a 20 cm de profundidade, gerado a partir do contato entre a camada carbonática e as cinzas da fogueira. .72

Figura 34 - Cortes em profundidades (20 cm, 50 cm e 80 cm) do bloco pseudo-3D mostrando o possível mapeamento das anomalias relacionadas a ocorrência do sedimento carbonático (tracejado preto) na área A1. Essas figuras exemplificam a metodologia de demarcação e identificação das anomalias. 73

Figura 35 - Croqui da área de escavação A1, destacando 12 áreas prioritárias (P1-P10) identificadas através do cálculo de fatores e escores para cada quadrícula. 76

Figura 36 - Croqui da área de escavação B1, destacando 6 áreas prioritárias (P1-P6) identificadas através do cálculo de fatores e escores para cada quadrícula. 77

Figura 37 - Croqui da área de escavação A1, destacando 6 áreas prioritárias (P1-P6) que foram agrupadas para formar zonas de interesse mais amplas, identificadas através da análise anterior a partir de áreas contíguas ou proximamente relacionadas em seus valores de score. 77

Figura 38 - Croqui da área de escavação B1, destacando 4 áreas prioritárias (P1-P4) que foram agrupadas para formar zonas de interesse mais amplas, identificadas através da análise anterior a partir de áreas contíguas ou proximamente relacionadas em seus valores de score. 78

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Listagem dos núcleos arqueológicos no município de Serranópolis, Goiás, categorizados de A à F, cada qual contendo os sítios arqueológicos correlatos, identificados por siglas e números padronizados.	7
Tabela 2 – Propriedades elétricas de alguns materiais, com os valores aproximados da permissividade elétrica relativa e condutividade elétrica. Fonte: Davis e Annan (1989); Hammon et al. (2000); Daniels (2004); Rodrigues et al. (2005).	30
Tabela 3 - Frequência central da antena e profundidade máxima de penetração do GPR. Fonte: Modificado de Annan (2001).....	34

CAPÍTULO 1

1. Introdução

O município de Serranópolis, no estado de Goiás, é reconhecido por abrigar um dos maiores e mais importantes patrimônios arqueológicos do continente americano, o Complexo Arqueológico de Serranópolis. De acordo com o Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN), este complexo é uma fonte crucial de conhecimento sobre a ocupação do Planalto Central Brasileiro, com datações que remontam a mais de 12 mil anos (Ramos, 2016). A região possui mais de 40 sítios cadastrados em abrigos rochosos e a céu aberto, evidenciando a presença de populações caçadoras-coletoras e agricultores-ceramistas (Rubin *et al.*, 2017).

As pesquisas arqueológicas na área começaram na década de 1970, com o Programa Arqueológico de Goiás (PAG), coordenado pelos pesquisadores Pedro Ignácio Schmitz e Altair Sales Barbosa. Diversos estudos realizados desde então por Schmitz e seus colaboradores (1989; 2004) indicaram a viabilidade de avançar nas escavações. Novos projetos estão em andamento, e as recentes descobertas demonstram que as oportunidades de pesquisa nesta região estão longe de se esgotar.

Atualmente, as pesquisas estão concentradas no sítio arqueológico GO-Ja-02. O início das atividades neste local, em 2017, marcou a retomada dos estudos arqueológicos na região. Naquele ano, foi iniciado o projeto “Escavação do sítio arqueológico GO-JA-02, em Serranópolis, Goiás”, conduzido pelo Instituto Goiano de Pré-História e Antropologia (IGPA) da Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás), em parceria com outras instituições. Essas ações representam a continuidade das pesquisas arqueológicas, dando seguimento ao legado das investigações iniciadas décadas atrás.

No Brasil, a preocupação e os esforços para conservar, reconstruir e registrar estruturas e sítios arqueológicos têm sido crescentes nos últimos anos. Segundo dados do IPHAN, o país possui mais de 26 mil sítios arqueológicos cadastrados, evidenciando a riqueza do patrimônio arqueológico

nacional (IPHAN, 2024). Estudos recentes têm destacado a importância da preservação desses sítios, não apenas para a compreensão da história e cultura brasileira, mas também para o desenvolvimento sustentável e o turismo cultural (Santiago, 2015). A implementação de políticas públicas para a proteção de sítios arqueológicos tem sido um tema de crescente interesse acadêmico, como demonstrado por Soares e Klamt (2023), que analisaram o processo histórico de institucionalização dessas políticas no Brasil. O ano de 2022 marcou um recorde histórico no cadastro de sítios arqueológicos pelo IPHAN, com 3.988 novos sítios registrados até novembro daquele ano, demonstrando um avanço significativo nos esforços de identificação e preservação do patrimônio arqueológico brasileiro (IPHAN, 2022).

Apesar desses avanços significativos na identificação e registro de sítios arqueológicos em todo o país, desafios consideráveis persistem, como exemplificado pelo Complexo Arqueológico de Serranópolis. Este importante sítio, assim como muitos outros no Brasil, enfrenta ameaças crescentes devido a atividades antrópicas e fenômenos naturais (Rubin et al., 2022). A situação em Serranópolis ilustra um problema mais amplo enfrentado pelos arqueólogos em todo o país, que além da complexidade e morosidade dos processos de identificação e mapeamento, as atividades de prospecção arqueológica sublinham a necessidade contínua de alocação de recursos, juntamente com a utilização de técnicas avançadas de pesquisa. Esta dificuldade é exacerbada pela grande quantidade de sítios na região, suas extensas dimensões e a complexidade estratigráfica, como evidenciado nos estudos pioneiros de Schmitz et al. (1989, 2004).

Para ajudar a enfrentar os desafios técnicos de prospecção, o desenvolvimento metodológico trouxe alternativas, proporcionando maior agilidade e eficiência na identificação de áreas-alvo, minimizando os riscos de realizar escavações “às escuras”. A geoarqueologia, uma disciplina interdisciplinar que combina métodos e técnicas da geologia com a arqueologia, permite uma compreensão mais aprofundada dos contextos arqueológicos (Ghilardi & Desruelles, 2009). A aplicação de métodos geofísicos na arqueologia é uma das principais contribuições da geoarqueologia, possibilitando a prospecção e análise de sítios arqueológicos de maneira não invasiva e precisa.

A geofísica tem se consolidado como uma ferramenta fundamental para a investigação de sítios arqueológicos, pois possibilita a coleta de dados não invasivos da subsuperfície na etapa de pré-escavação (Gaffney, 2008; Martorana *et al.*, 2023). No contexto do Sítio GO-Ja-02, um estudo recente discutiu a aplicabilidade do método geofísico *Ground Penetrating Radar* (GPR) para auxiliar nas futuras pesquisas, concluindo que essa ferramenta possui grande potencial nas escavações do sítio (Ribeiro, 2021).

O GPR destaca-se pela sua capacidade de coletar imagens de alta resolução dos sinais eletromagnéticos, favorecendo a caracterização de alvos rasos no subsolo com base nas mudanças das propriedades elétricas dos materiais (Davis & Annan, 1989; Conyers, 2015). O principal objetivo dos levantamentos GPR em arqueologia é identificar e definir as características dos vestígios culturais enterrados, como tamanho, forma, profundidade e localização, juntamente com a estratigrafia relacionada (Conyers, 2012). O método é particularmente útil em áreas onde as escavações tradicionais enfrentam desafios significativos devido à complexidade e densidade das camadas sedimentares (Zhao *et al.*, 2015).

Uma abordagem direta para alcançar esse objetivo é identificar e correlacionar reflexões significativas em perfis 2D, em profundidades que variam de algumas dezenas de centímetros a 5 metros (Davis & Annan, 1989; Fisher *et al.*, 1992). Além disso, uma melhor compreensão da extensão espacial dos alvos é obtida por meio de uma grade de dados GPR, em vez de apenas um perfil 2D (Goodman *et al.*, 1995; Neubauer *et al.*, 2002; Gaffney *et al.*, 2004). A partir de uma série de perfis 2D em uma mesma área, é possível organizar um volume 3D do meio, representando uma melhoria real na visualização e interpretação dos dados de GPR, tornando mais precisa a identificação de artefatos arqueológicos e a estimativa da geometria dos alvos presentes no subsolo.

A aplicação do GPR no Complexo Arqueológico de Serranópolis alinha-se com as tendências globais em arqueologia, onde métodos não invasivos estão ganhando cada vez mais relevância. Este estudo não apenas contribui para a inovação metodológica na arqueologia brasileira, mas também estabelece um precedente importante para a integração de tecnologias avançadas em pesquisas arqueológicas no país.

Em suma, a aplicação do GPR no sítio GO-Ja-02 representa não apenas um avanço significativo nas pesquisas arqueológicas em Serranópolis, mas também um passo importante para a modernização e aprimoramento das práticas arqueológicas no Brasil como um todo. A utilização bem-sucedida do GPR em Serranópolis pode incentivar a adoção mais ampla desta tecnologia em outros sítios arqueológicos importantes do país, potencialmente revolucionando a maneira como as escavações são planejadas e executadas.

1.1 Objetivo

Este estudo tem como objetivo caracterizar o arqueambiente do sítio GO-Ja-02, previamente às etapas de escavação, realizando um estudo não-invasivo por meio do método GPR. Utilizando uma antena GPR com frequência central de 400 MHz para a aquisição de dados, pretende-se analisar de

forma integrada os diferentes padrões de reflexão e respostas anômalas na aquisição de dados GPR 2D e pseudo-3D, respectivamente.

A análise integrada dos padrões de reflexão e das anomalias, visa formar o conhecimento acerca da natureza das principais respostas anômalas e, assim, proceder a interpretação quanto ao mapeamento das anomalias presentes no bloco pseudo-3D. Em seguida, pretende-se desenvolver e aplicar uma metodologia de ranqueamento, com o intuito elencar áreas prioritárias para futuras escavações arqueológicas guiadas.

A caracterização do arqueambiente e a metodologia de ranqueamento proposta neste estudo têm como intuito final otimizar o processo de escavação arqueológica, maximizando a probabilidade de os arqueólogos encontrarem artefatos arqueológicos, bem como complementar os estudos estratigráficos.

Por fim, busca-se avaliar a eficácia do método GPR, especificamente com a antena de 400 MHz, na caracterização do ambiente arqueológico do sítio GO-Ja-02, discutindo suas limitações e potencialidades no contexto de sítios arqueológicos semelhantes.

CAPÍTULO 2

2. Complexo Arqueológico de Serranópolis, Goiás

Localizado no sudoeste de Goiás, a aproximadamente 377 km de Goiânia, o Complexo Arqueológico de Serranópolis é reconhecido como um dos mais significativos conjuntos de sítios arqueológicos do Brasil. Este complexo é notável pela sua diversidade e riqueza de seus sítios arqueológicos, incluindo abrigos sob rocha com pinturas e gravuras rupestres além de uma cronologia mais recuada correspondente a 10.580 +/- 115 anos AP (Schmitz *et al*, 2004), recalibrada por Ramos (2016) em 12.550 cal AP.

As representações rupestres variam desde figuras humanas e animais até símbolos abstratos, revelando um vasto espectro temático (Rubin *et al.*, 2022). A análise das obras de artísticas e dos artefatos encontrados permite aos pesquisadores reconstruir aspectos da vida cotidiana, das estratégias de subsistência e das interações desses povos com o ambiente natural. Além disso, o local abriga evidências materiais, como ferramentas líticas, estruturas funerárias e vestígios ósseos, que oferecem pistas valiosas sobre as comunidades pré-históricas que ocuparam essa área.

Schmitz e colaboradores (1984) pontuam que o espaço arqueológico de Serranópolis possui algumas singularidades, entre elas, o fato de que este ambiente foi ocupado sistematicamente, abrigando pelo menos 550 gerações humanas, sendo inicialmente cerca de 450 gerações de caçadores e depois de agricultores, vindos do norte, leste e sul, formando ali suas aldeias. Ainda segundo os autores, a escolha da região de Serranópolis por esses ocupantes, se deve por ser um lugar privilegiado pela convergência de uma grande extensão de espaços abrigado, pela proximidade de ambientes diferenciados e pela abundância de matéria-prima útil para produção de artefactos e utensílios.

No mapeamento realizado por Schmitz *et al.* (1989), 43 sítios arqueológicos foram identificados na região sudeste de Goiás, dos quais 27 foram estudados. Com base na proximidade de sua

distribuição espacial, esses sítios foram organizados em seis núcleos, inicialmente denominados como tais e posteriormente referidos como grupos em publicações subsequentes de Schmitz *et al.* (2004). Contudo, o termo "núcleos" permanece predominante na literatura.

O presente estudo adota a estruturação dos sítios arqueológicos proposta por Rubin *et al.* (2012), que documenta a existência de 30 sítios em Serranópolis, organizados nos seis núcleos de A até F. Adicionalmente, um estudo recente de Rubin *et al.* (2023) inclui o recém-descoberto Sítio Macaco no núcleo F (Figura 1).

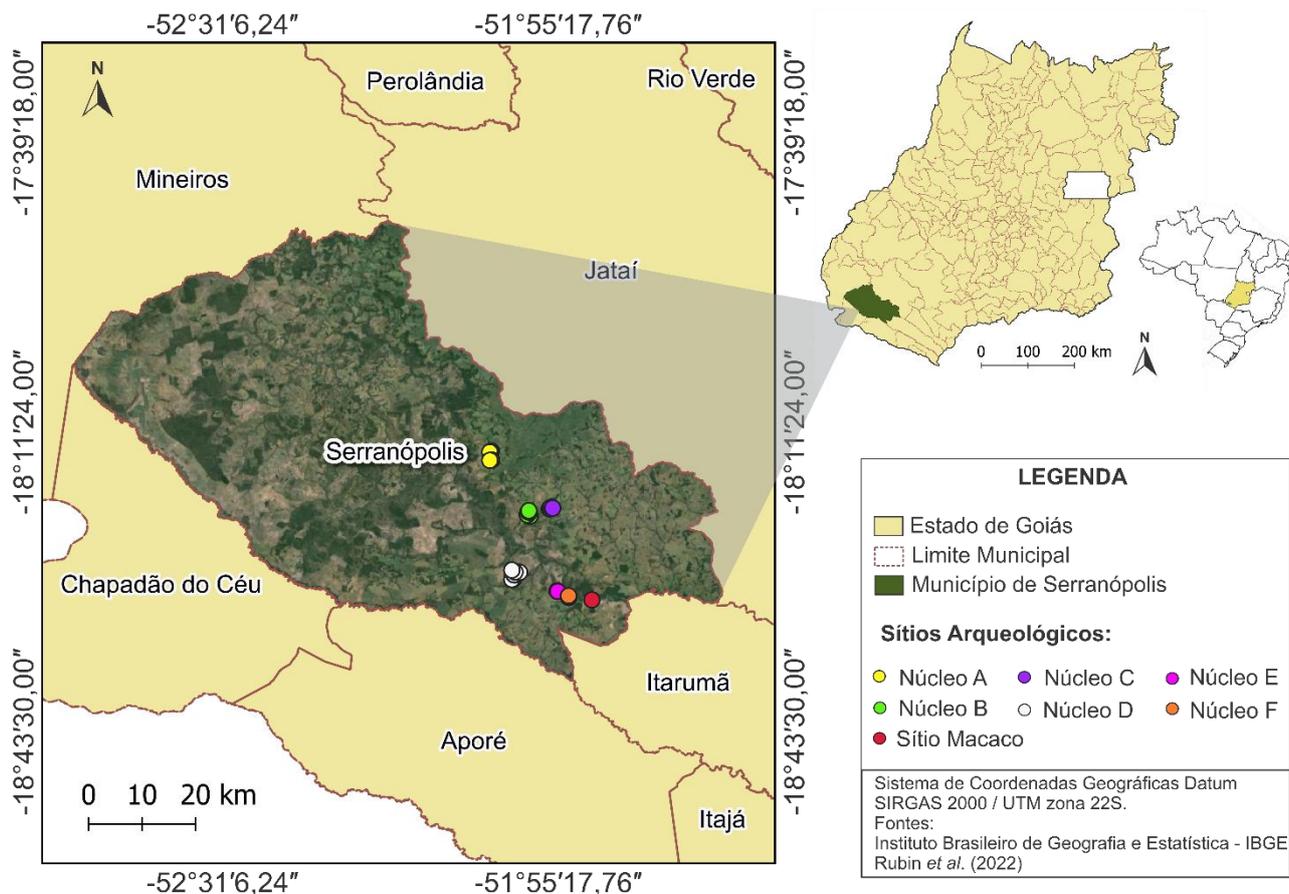


Figura 1 - Mapa geográfico da região de Serranópolis, estado de Goiás. O mapa destaca a localização dos sítios por núcleos arqueológicos identificados como Núcleo A, B, C, D, E e F; além de um sítio do Sítio Macaco; marcados por diferentes cores.

Os sítios arqueológicos de Serranópolis seguem a nomenclatura estabelecida pela Carta Arqueológica para o Estado de Goiás, elaborada em 1972 e revisada em 2009 pela arqueóloga Dra. Dilamar Martins (Nogueira *et al.*, 2014). Conforme essa convenção, os sítios são identificados por siglas alfanuméricas, começando com "GO" (Estado de Goiás), seguidos pela letra "J" (referência ao município de Jataí, pré-divisão territorial), e numerados sequencialmente. Letras minúsculas adicionais indicam sítios com o mesmo contexto arqueológico.

A tabela a seguir apresenta a listagem dos núcleos arqueológicos no município de Serranópolis, Goiás, categorizados de A à F, contendo os sítios arqueológicos correlatos, identificados por siglas e números padronizados, conforme as diretrizes da Carta Arqueológica para o Estado de Goiás:

Tabela 1 - Listagem dos núcleos arqueológicos no município de Serranópolis, Goiás, categorizados de A à F, cada qual contendo os sítios arqueológicos correlatos, identificados por siglas e números padronizados.

Núcleos	Sítios Arqueológicos
A	GO-Ja-01, GO-Ja-02, GO-Ja-08 e GO-Ja-08a
B	GO-Ja-20, GO-Ja-21, GO-Ja-21a e GO-Ja-22 e GO-Ja-24
C	GO-Ja-05, GO-Ja-11a, GO-Ja-11b e GO-Ja-11c
D	GO-Ja-3, GO-Ja-3a, GO-Ja-04, GO-Ja-23, GO-Ja-25, GO-Ja-26, GO-Ja-27, GO-Ja-28 e GO-Ja-29
E	GO-Ja-13 e GO-Ja-13c
F	GO-Ja-10, GO-Ja-12, GO-Ja-14, GO-Ja-15, GO-Ja-15a e Sítio Macaco

Os sítios de Serranópolis enfrentam ameaças tanto de fatores naturais quanto antrópicos, que comprometem sua preservação. A erosão, o crescimento de micro-organismos e as variações climáticas contribuem para a degradação das pinturas rupestres e das estruturas líticas (Guidon *et al.*, 2019). Além disso, a expansão agrícola, a urbanização e o turismo não regulamentados impõem riscos adicionais, muitas vezes acelerando a degradação desses locais (Rubin *et al.*, 2022).

A expansão agrícola, particularmente próximo aos sítios arqueológicos, é uma ameaça significativa (Figura 2). A preservação desses sítios não é apenas uma questão de salvaguardar o patrimônio cultural, mas também de manter a conexão com o passado pré-histórico, oferecendo um valioso repositório de conhecimento sobre as primeiras sociedades que habitaram a região. Estudos recentes enfatizam a necessidade urgente de implementar medidas de proteção eficazes para garantir a continuidade desse patrimônio cultural inestimável (Rubin *et al.*, 2017).



Figura 2 - Fotografias mostrando atividades agrícolas nas proximidades dos Sítio GO-Ja-01, destacando o impacto sobre a preservação do patrimônio cultural.

2.1 Características Físicas da Área

O sudoeste goiano está inserido na Bacia do Paraná, uma extensa depressão intracratônica marcada por atividades de sedimentação que remontam ao período paleo-mesozóico. Sua formação teve início no Neordoviciano, com a deposição inicial de sedimentos que ocorreu desde o Siluriano até o Triássico. A sequência sedimentar foi posteriormente complementada por uma camada vulcanossedimentar do período Juro-Cretáceo. Este evento está associado à reativação do Sul-Atlântico, um processo intrinsecamente ligado à divisão do supercontinente Gondwana. Este entendimento da formação e evolução da Bacia do Paraná é suportado por estudos fundamentais na área de geologia, como evidenciado pelos trabalhos de Milani e colaboradores (1994, 2007).

A sedimentação na região em questão inicia-se com a reativação de estruturas antigas no embasamento, originadas durante os eventos geotectônicos do ciclo Brasileiro. Este processo é marcado por uma alternância entre ambientes deposicionais continentais e marinhos, culminando em uma sedimentação predominantemente continental. A formação geológica da área é delimitada por seis principais sequências tectono-sedimentares, delimitadas por discordâncias significativas que abrangem períodos do Ordoviciano-Siluriano ao Neocretáceo (Milani *et al.*, 1994).

No extremo sudoeste de Goiás, a presença destes sedimentos cobre uma extensão de 92.500 m², caracterizando-se por uma sucessão sedimentar majoritariamente terrígena, com camadas vulcânicas

intercaladas (Lacerda Filho *et al.*, 2000). Segundo Milani *et al.* (1994), a base desta sucessão é formada pelos grupos Rio Ivaí e Paraná (Siluriano-Devoniano), que indicam a deposição em um contexto de rift, seguida por uma fase de margem passiva. Uma discordância relacionada à Orogenia Caledoniana precede a deposição dos sedimentos flúvio-glaciais do Grupo Aquidauana (Permocarbonífero), que são sucedidos pelos carbonatos e siltitos do Grupo Passa Dois (Permiano ao Triássico).

A separação geológica entre a América do Sul e a África teve início no Cretáceo Inferior, precedida pela deposição dos arenitos eólicos da Formação Botucatu no Jurássico. A Formação Serra Geral, composta por derrames basálticos, marca a abertura do rift que dividiu ambos os continentes. Durante o Cretáceo, os arenitos do Grupo Bauru foram depositados sobre estes basaltos, acompanhados pela intrusão de corpos ultramáficos alcalinos no sul de Goiás e Alto Paranaíba. Finalmente, as formações terciárias Cachoeirinha e Araguaia representam as camadas mais recentes, cobrindo esta sequência sedimentar (Lacerda Filho *et al.*, 2000).

As partes mais elevadas desse planalto, onde depositaram sedimentos cenozoicos, apresentam uma drenagem com alto grau de maturidade, com vales muito abertos e extensos depósitos laterais de aluviões quarternários (Rosito *et al.*, 1972).

Especificamente em Serranópolis, afloram predominantemente arenitos da Formação Botucatu e basaltos da Formação Serra Geral (Rosa; Silva, 2020). O contato entre essas duas formações resultou na metamorfose parcial do arenito devido ao derramamento de basalto, o que levou à silicificação do arenito (Petri, 1983). Essa silicificação é considerada um dos fatores que favoreceram a formação dos abrigos rochosos, pela erosão dos níveis mais friáveis na base das sequências. Ao mesmo tempo, as camadas silicificadas mais resistentes e compactas forneceram material de excelente qualidade para a confecção de instrumentos líticos (Schmitz, 1987).

Além da Formação Botucatu e Serra Geral, a região abriga pelo menos outras quatro formações geológicas: Cachoeirinha, Vale do Rio do Peixe, Coberturas Detrito-Lateríticas Indiferenciadas e Depósitos Aluvionares (Figura 3).

Em termos morfológicos a região de Serranópolis se situa na Região dos Planaltos Areníticos-Basálticos Interiores, na unidade Planalto do Rio Verde. Esta região possui morfologia peculiar, marcada pela presença de chapadões, planaltos e áreas rebaixadas. Essas características são o resultado de múltiplas reativações e inclinações ocorridas durante o período Cenozóico, que, juntamente com os processos exógenos, promoveram intensa erosão superficial (Lacerda Filho *et al.*, 2000).

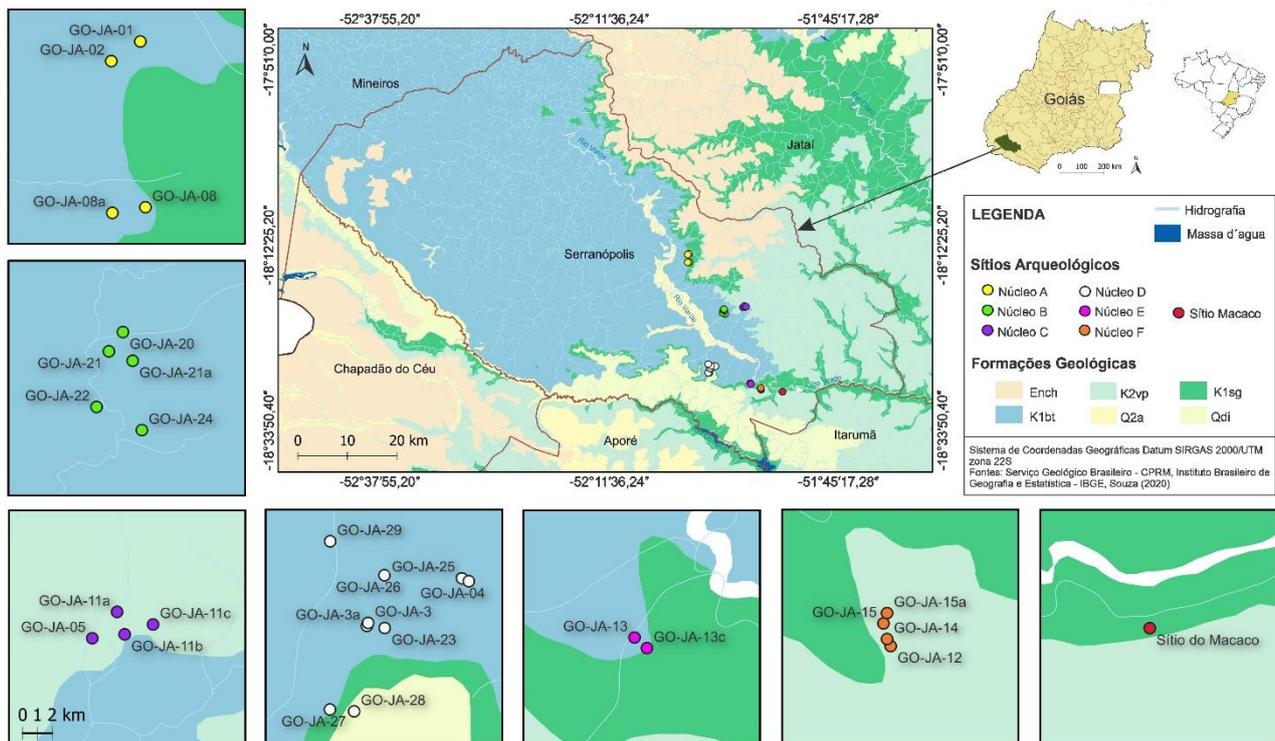


Figura 3 - Mapa geológico ilustrando: Cidade de Serranópolis, com a indicação dos sítios arqueológicos e seus respectivos núcleos, e as formações geológicas da região de Serranópolis, Goiás, sendo, ENch: Formação Cachoeirinha; K1bt: Formação Botucatu; K2vp: Formação Vale do Rio do Peixe; Q2a: Depósitos Aluvionares. K1sg: Grupo Serra Geral; Qdi: Unidades Coberturas detríticas indiferenciadas.

O relevo da região apresenta uma homogeneidade notável, com amplas formas que, mesmo nos terrenos mais dissecados, não exibem grande intensidade de erosão. Nota-se a presença de extensas superfícies de aplanamento, denominadas “Chapadas”, que atuam como dispersores de drenagem, exemplificadas pelo “Chapadão” do Rio Verde. Além dessas características gerais, a região abriga microformas geomorfológicas de relevos “murundus”, vinculadas à ocorrência de térmitas e típicas das paisagens lateríticas, enriquecendo a diversidade geomorfológica local, bem como os vales do tipo vereda também são elementos distintivos no bioma Cerrado da região. A face reversa do chapadão desdobra-se em uma rampa de suaves declives que se funde à Superfície Rebaixada do Planalto da Bacia do Paraná, uma área de inter denudação que exhibe uma paisagem uniforme, pontuada apenas por resíduos de topos planos com bordas abruptas, integrantes da unidade Patamares da Serra do Apore (Lacerda Filho *et al.*, 2000).

Os solos encontrados em Serranópolis são um reflexo dessas litologias. Assim, na área ocorrem neossolos quartzarênicos, pouco desenvolvidos, essencialmente quartzosos e com alta erodibilidade, originados a partir dos arenitos. Já os basaltos deram origem a Latossolos profundos e bem estruturados (Moreira *et al.*, 2008).

Schmitz *et al.* (1989), pontua que os vestígios arqueológicos ocorrem em depósitos eluviais e

coluviais inconsolidados no interior dos abrigos, as datações indicam ocupações do Holoceno Médio ao Holoceno Superior na região. As pesquisas realizadas até o momento revelam uma forte relação entre os contextos geológicos-geomorfológicos da Bacia do Paraná e a ocupação pré-colonial na região. A interação entre essas formações não apenas modelou a paisagem, mas também contribuiu para a criação de abrigos rochosos utilizados por grupos pré-coloniais, atraídos pela disponibilidade de abrigo e matéria-prima lítica, evidenciando a importância dessas formações para a arqueologia local.

Os processos de intemperismo, especialmente os físico-químicos, aliado as propriedades das rochas, a estratigrafia dos arenitos, a mineralogia do basalto e os planos de fraturamento de ambos; atuaram modelando este relevo de chapadas, fundos de vale e encostas escalonadas (Araújo, 2020). Tais processos foram responsáveis pela formação dos abrigos rochosos ocupados pelos grupos pré-coloniais que habitaram a região (Rosa & Silva, 2020).

Os abrigos rochosos, formados a partir do arenito Botucatu, são característica marcante dos sítios arqueológicos de Serranópolis. De acordo com Schmitz *et al.* (1987), estes abrigos têm grandes bocas, pouca profundidade e boa iluminação, com tetos inclinados devido à estratificação cruzada do arenito Botucatu. Os planos de fratura que condicionam o padrão de fraturamento do abrigo estão relacionados às estruturas geológicas do embasamento, podendo levar à erosão e destruição dos paredões rochosos (Baliero, 2019).

Abrigos de rocha fornecem proteção contra os elementos (vento, chuva, sol ou uma combinação destes), são locais importantes para sítios arqueológicos porque se formam de inúmeras maneiras e em uma variedade de tipos de rochas e paisagens. As mesmas propriedades dos abrigos rochosos que proporcionam proteção aos seus habitantes humanos e animais também contribuem para a proteção e preservação dos depósitos arqueológicos neles deixados (Mentzer, 2017).

Ribeiro e Walter (1998), ponderam que apesar de suas constantes transformações, Serranópolis atualmente possui cobertura vegetal formada por áreas de pastagens e de culturas como milho, soja, apresentando algumas áreas de encostas íngremes com nichos de Cerrado.

A vegetação original da área é do bioma Cerrado. O clima é o Tropical Úmido, marcado por invernos secos e verões chuvosos, que se inicia no mês de outubro, se estendendo até março, no qual se destacam os meses de novembro, dezembro e janeiro, com precipitação média anual estar na faixa de 1.500 mm, variando de 750 mm a 2.000 mm, a região é classificada como uma savana (Scopel *et al.*, 2005).

2.1.1 Estratigrafia do Sítio GO-Ja-02

Segundo Rubin, (2017) o estudo da estratigrafia de um sítio arqueológico permite caracterizar o processo de formação de registro arqueológico por meio dos estratos de origem antrópica e natural. Logo, o entendimento sobre a estratigrafia da região de Serranópolis, é crucial para entender a sequência cultural a partir das mudanças ambientais ao longo do tempo nesta área.

Os primeiros entendimentos sobre a estratigrafia dos sítios arqueológicos de Serranópolis, foram gerados a partir de estudos de decapagem realizados no sítio GO-Ja-01 por Schmitz *et al.* (1989), onde foi elaborado um plano de distribuição do material com base nos vestígios das prospecções e escavações. Os autores realizaram a caracterização estratigráfica utilizando os conceitos de Fase, Camada e Nível.

As Fases representam períodos ocupacionais distintos no sítio arqueológico, cada uma caracterizada por um conjunto específico de artefatos, restos faunísticos e outros indicadores culturais e ambientais. As fases nomeadas por Paranaíba, Serranópolis e Jataí, refletem diferentes momentos da ocupação humana na área, cada uma com suas próprias práticas culturais e adaptações ao ambiente. Essas mesmas fases podem ser identificadas na maior parte dos abrigos de Serranópolis, inclusive no Sítio GO-Ja-02 (Schmitz *et al.*, 2004; Lourdeau, 2010; Alves, 2022).

As Camadas, identificadas por números, são unidades estratigráficas identificáveis visualmente no registro arqueológico, diferenciadas por características como composição do sedimento, cor, consistência e conteúdo material. Elas são formadas por processos naturais e/ou atividades humanas ao longo do tempo. Em Schmitz *et al.* (1989), as camadas são descritas detalhadamente em termos de suas propriedades físicas e materiais líticos presentes.

Os Níveis dizem respeito aos níveis de decapagem, também são identificados por números. Essas subdivisões, ainda mais específicas dentro das camadas estratigráficas, são usadas para detalhar variações dentro de uma única camada ou para indicar pequenas diferenças temporais ou funcionais dentro do registro arqueológico, ajudando a refinar a compreensão das sequências ocupacionais e atividades no sítio.

O primeiro estudo estratigráfico realizado no sítio GO-Ja-02 foi conduzido por Schmitz e colaboradores nos anos de 1989. Os achados e análises desse período foram concentrados principalmente na uma área identificada por setor A (compartimento A, no presente estudo). Um corte estratigráfico (corte I) foi escavado em um local bem preservado e de pouca declividade (Figura 4).

Esta área revelou a presença de nove camadas estratigráficas que serão descritas e correlacionadas com as fases pertencentes a seguir:

- **Fase Jataí:** Terceiro momento ocupacional, compreende a camada 1 e níveis arbitrários de 1 a 5.
- **Fase Serranópolis:** Segundo momento ocupacional, compreende as camadas 2 a 7 e níveis de 6 a 20.
- **Fase Paranaíba:** Primeiro momento ocupacional, compreende as camadas 8 e 9 e os níveis de 21 a 29.

As camadas foram distinguidas principalmente pela sua deposição, sendo de cor cinza-escuro a castanho as camadas que tiveram deposição seca e sobre as quais as goteiras do teto não exerceram maior influência, molhando-as. As camadas depositadas nos períodos úmidos são de coloração rosada. Algumas partes de camadas depositadas em período mais seco também sofreram alterações de coloração em função da ação das goteiras. Uma breve descrição de cada camada é transcrita na sequência (Schmitz, 2004, pp.74-76):

- **Camada 1:** Pacote de areia com cinzas e carvão. Cor cinza mais ou menos escuro. Consistência frouxa.
- **Camada 2:** Sedimentos arenosos, com carvão e raízes. Cor avermelhada. Consistência frouxa.
- **Camada 3:** Sedimentos arenosos, com carvão e raízes. Cor cinza. Consistência frouxa.
- **Camada 4:** Sedimentos arenosos, com raizinhas. Cor avermelhada. Consistência frouxa.
- **Camada 5:** Sedimentos arenosos, com carvão e raizinhas. Cor cinza. Consistência frouxa.
- **Camada 6:** Sedimentos arenosos, com raizinhas. Cor avermelhada. Consistência frouxa.
- **Camada 7:** Sedimentos arenosos, com cinza, carvão e raízes. Cor cinza-escuro. Consistência frouxa. Data 9.195 ± 75 A.P. (SI-3107) no nível de 170-180 cm de profundidade.
- **Camada 8:** Pacote de areia com mais ou menos cinza e poucas raízes. Cor mais vermelha ou mais cinza, alternando. Consistência frouxa.
- **Camada 9:** Sedimentos arenosos, com carvão. Cor cinza. Consistência frouxa. Data de 10.120 ± 80 A.P. (3-3108) no nível de 250-260 cm de profundidade.

Os autores complementam dizendo que as camadas mais profundas estão um pouco inclinadas da parede para a periferia, mostrando como o talude cresceu a partir da fase Serranópolis. Além disso, a base do corte é fechada, quase toda, por blocos. Após a conclusão desses estudos realizados por Schmitz e sua equipe, a área escavada foi cuidadosamente preenchida, garantindo a preservação da integridade do sítio arqueológico.

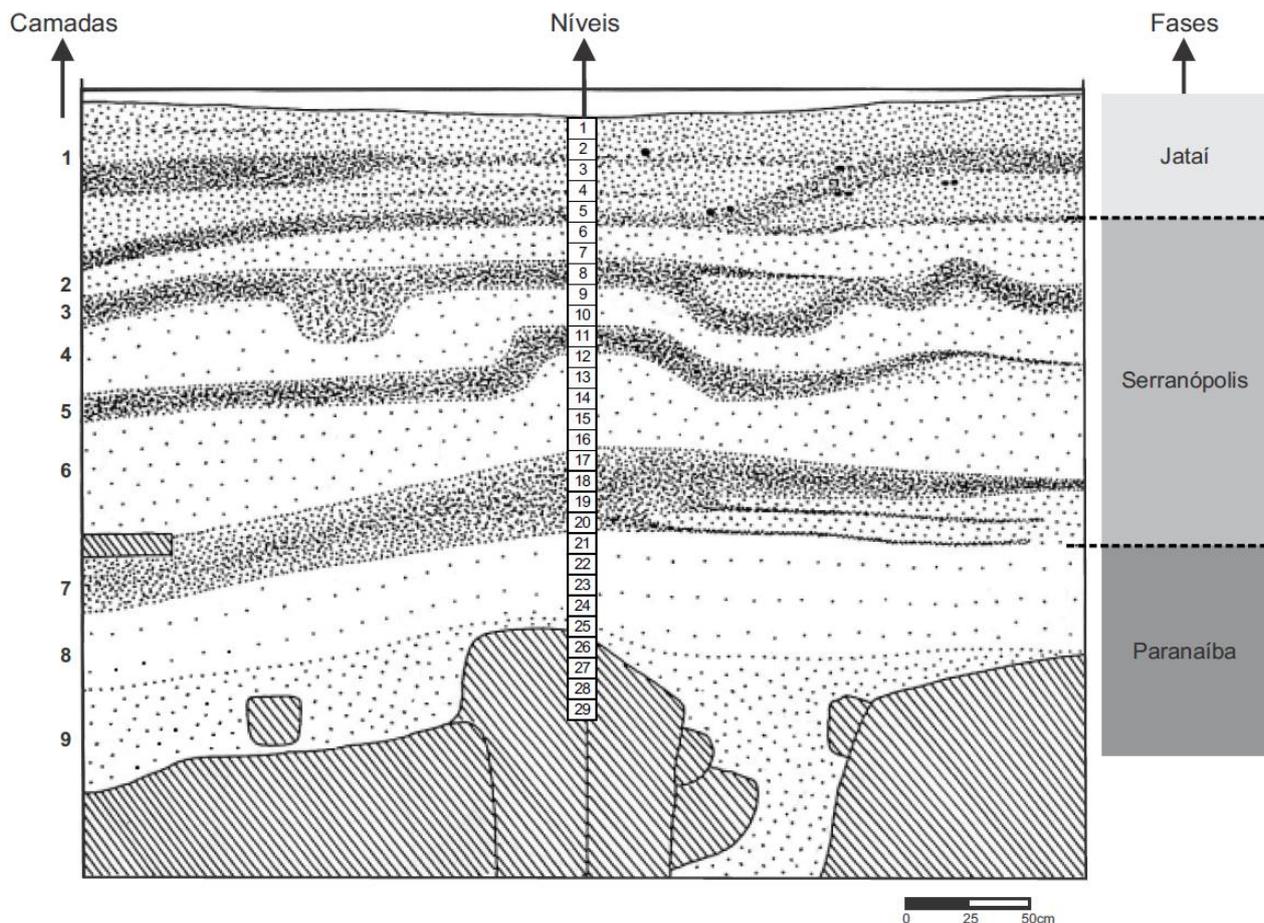


Figura 4 – Perfil estratigráfico (corte I), do sítio GO-Ja-02: Informações das camadas, níveis e fases. Adaptado de Schmitz *et al.* (1989).

No âmbito do projeto de pesquisa “Escavação do Sítio Arqueológico Go-Ja-02 Serranópolis, Goiás”, desenvolvido pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC-GO), os pesquisadores têm buscado atualizar os estudos relativos a caracterização do paleoambiente feito por Schmitz (1989), considerado desatualizado (Kipnis & Scheel-Ybert, 2005). Dentre as publicações está um relatório final de Iniciação Científica (Costa, 2023), publicado com as atualizações relativas à estratigrafia a partir da análise do perfil norte da escavação no sítio arqueológico GO-Ja-02 (Figura 5). Esse estudo revelou seis diferentes camadas identificadas até a profundidade de 1,50 m, com as seguintes características:

- **Camada 1:** Esta é a camada mais superficial, com cerca de 5 cm de espessura e uma coloração castanho-claro. É extremamente friável devido à bioturbação e à ação antrópica, incluindo o pisoteio por visitantes e trabalhadores arqueológicos, bem como marcas de erosão por escoamento pluvial. Vestígios arqueológicos incluem materiais líticos e cerâmicos, além de resíduos modernos como latas e plásticos.

- **Camada 2:** Com uma espessura média de 30 cm e coloração entre castanho e alaranjado, essa camada é formada principalmente por grãos de quartzo. Apresenta bioturbação e três estruturas distintas: duas lentes carbonáticas (uma com cerca de 160 cm de comprimento e 30 cm de espessura e outra com 5 cm de espessura) e uma estrutura de fogueira caracterizada pela coloração cinza-escuro.
 - A lente carbonática se destaca não apenas pela sua coloração, mas também pela sua composição química à base de carbonato de cálcio, que reage com efervescência ao ácido clorídrico. Outra característica significativa é a presença de conchas e gastrópodes terrestres.
 - Em proximidade com a lente carbonática, é possível observar uma estrutura de fogueira, distinta pela coloração cinza-escuro.
- **Camada 3:** Possui coloração vermelho-alaranjado com uma espessura média de 50 cm. A bioturbação é presente, mas menos intensa que nas camadas superiores. Os vestígios arqueológicos são majoritariamente líticos em arenito.
- **Camada 4:** Esta camada tem uma espessura média de 20 cm e coloração marrom, com contato gradacional com as camadas adjacentes. Fragmentos dispersos de carvão foram encontrados sem a presença de uma estrutura de fogueira definida.
- **Camada 5:** Com uma espessura média de 20 cm, esta camada apresenta tons alaranjados. Os vestígios arqueológicos são similares aos da camada 3, com dimensões predominantes entre 2 e 4 mm (grânulos).
- **Camada 6:** A camada mais profunda do perfil analisado, com 10 cm de espessura e coloração variada em tons alaranjados, marrom e cinza-escuro. A bioturbação e material lítico são evidentes nesta camada.

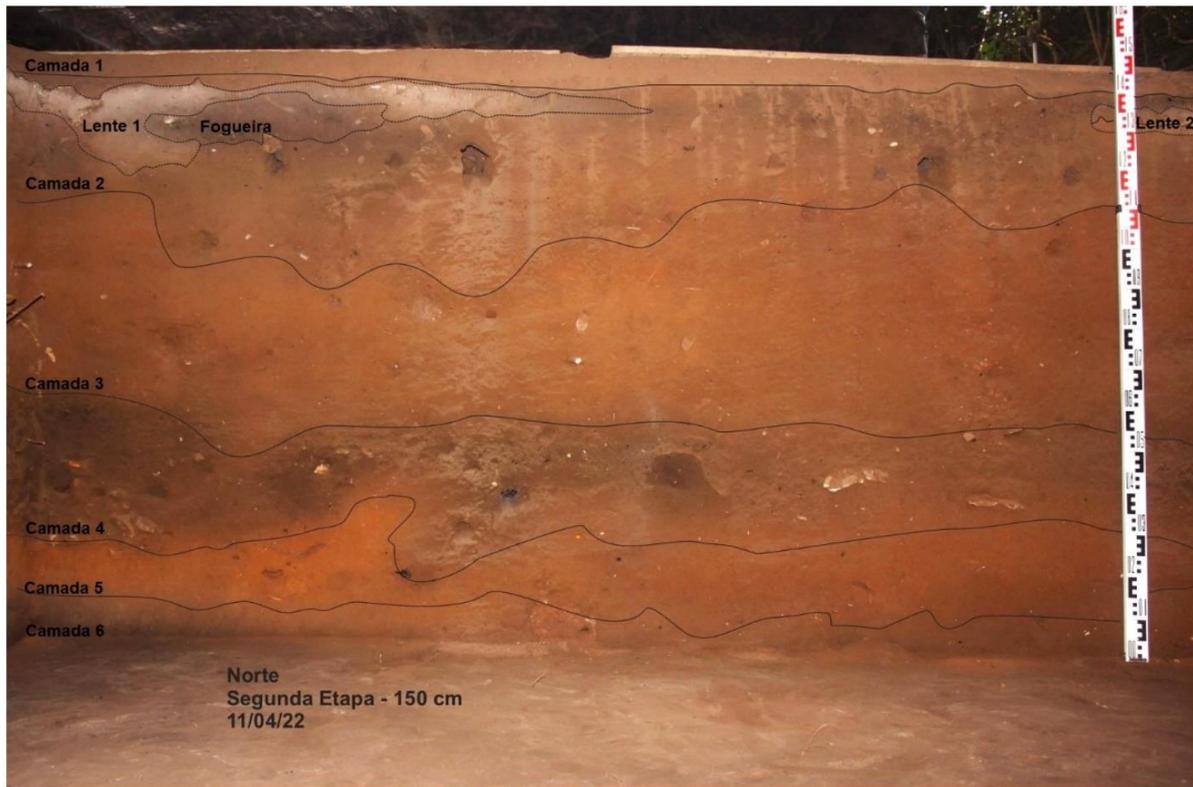


Figura 5 - Registro dos estratos do perfil norte da escavação, camadas e estruturas identificadas. Profundidade de 150 cm. Sítio GO-Ja-02. Fonte: Acervo do Projeto Serranópolis.

2.2 Origem e Evolução das Pesquisas Arqueológicas em Serranópolis: Uma Revisão Histórica

A origem e evolução das pesquisas arqueológicas em Serranópolis, reflete uma trajetória significativa dentro do estudo da pré-história brasileira. Este segmento da arqueologia brasileira tem sido marcado tanto por descobertas quanto por avanços metodológicos, que ampliam a construção do conhecimento sobre as civilizações antigas que habitaram a região do Brasil Central.

As pesquisas se iniciaram na década de 1970 pelo Programa Arqueológico de Goiás, Projeto Paranaíba, coordenado pelo Dr. Pedro Ignácio Schmitz da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo – RS; e pelo Dr. Altair Sales Barbosa da Universidade Católica de Goiás, hoje Pontifícia Universidade Católica Goiás (Schmitz *et al.*, 1989, 2004). A duração prevista do PAG era de sete anos, devendo se estender de 1973 até 1979. Entretanto, o Programa se estendeu por mais tempo que o previsto e se tornou referência para qualquer estudo de arqueologia, não só em Goiás, como para as áreas do Brasil Central (Ramos, 2016).

O Projeto Paranaíba buscou expandir o entendimento sobre as comunidades horticultoras e

ceramistas previamente identificadas na região (Schmitz *et al.*, 1982). A pesquisa selecionou áreas estratégicas ao longo dos rios Corumbá, dos Bois, Claro e Verdinho, explorando não apenas os aspectos cronológicos e distribucionais, mas também as dinâmicas ecológicas que influenciaram essas culturas (Schmitz *et al.*, 1986).

Durante os anos de 1975 a 1982, uma série de expedições revelaram importantes achados arqueológicos. Em 1975, a equipe de pesquisa, composta por Altair Sales Barbosa, Irmhild Wüst, Horieste Gomes e estagiários da Universidade Católica de Goiás, realizou levantamentos preliminares que culminaram na descoberta de 13 abrigos-sob-rocha em Serranópolis, além de cinco sítios abertos da tradição Tupiguarani. Esses esforços iniciais foram seguidos por expedições subsequentes em 1976 e 1977, que expandiram as descobertas para incluir novos abrigos e sítios de exploração de matéria-prima (Schmitz *et al.*, 1976-1977).

A primeira escavação ocorreu entre os anos de 1979 e 1980, no sítio GO-Ja-01, sendo escavado 40m². Os vestígios encontrados com essa escavação foram sustentáculo para definir os períodos culturais dos demais sítios (Schmitz *et al.*, 1982).

Em 1982, a equipe de pesquisa retornou à região de Serranópolis para uma revisão abrangente dos sítios arqueológicos previamente explorados e para investigar novos aspectos. Durante esta fase, identificaram 43 novos abrigos ao longo de um trecho de 25 km no Rio Verde. Os achados desta expedição, que incluíram ossadas humanas, sambaquis, artefatos líticos, restos de fogueiras antigas, estruturas de habitação primitivas, gravuras e pinturas rupestres; revelaram uma riqueza histórica e científica extraordinária, destacando a importância cultural e arqueológica do local. Além disso, realizaram uma documentação extensiva de pinturas e petroglifos, enriquecendo significativamente o acervo arqueológico da área (Schmitz *et al.*, 1982).

Em 1996, também no Sítio GO-Ja-01, o pesquisador Altair Sales Barbosa realizou escavações no local. Dentre as descobertas, destaca-se a ossada de um homem entre 25 e 30 anos, denominado por “Homem da Serra do Cafezal” ou “Zé Gabiroba”, encontrado no sítio arqueológico GO-Ja-01 (Gruta do Diogo 1) em 1996, pelo pesquisador Altair Sales Barbosa. O esqueleto estava localizado na camada estratigráfica que representa a ocupação inicial do abrigo, datado em 10.750 A.P., no limite situado entre os sedimentos do Holoceno e a camada Pleistocênica (Nogueira *et al.*, 2014).

Em 2017, iniciou-se o projeto "Escavação do sítio arqueológico GO-JA-02, em Serranópolis, Goiás" (2017/2 a 2029/2), conduzido pelo Instituto Goiano de Pré-História e Antropologia (IGPA) da Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás). Este projeto marcou a renovação das pesquisas arqueológicas na região de Serranópolis, com foco especial nas atividades de escavação. Seu principal objetivo era iniciar as escavações no sítio GO-JA-02, visando ampliar o entendimento

científico sobre a ocupação humana no Planalto Central Brasileiro desde o início do Holoceno, e potencialmente até o final do Pleistoceno. Tal possibilidade se baseia nas datações realizadas por Schmitz *et al.* (1989, 2004), que sugerem que as camadas mais profundas do abrigo ainda não foram plenamente exploradas.

As investigações evoluíram com o projeto “Sítio arqueológico GO-Ja-02, Serranópolis, Goiás – Novas Perspectivas” (2017/2 até 2023/2). Um dos marcos dessa investigação mais recentes se deu em junho de 2022: foi encontrada uma estrutura funerária com 10 crânios humanos com datação relativa de 1,6 mil anos, a 63,0 cm de profundidade (Figura 6). A estrutura funerária possuía dimensões horizontais médias de 60,0 cm x 45,0 cm e vertical de 20,0 cm. Tal descoberta enriqueceu significativamente os estudos, ampliando as discussões científicas sobre a ocupação no local.

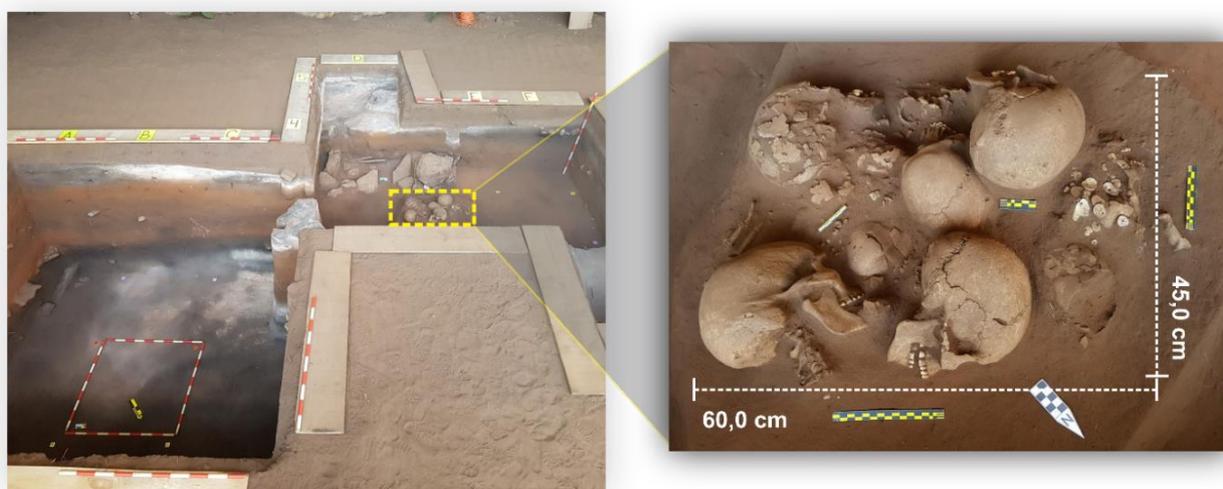


Figura 6 - Escavação no sítio GO-Ja-02 com destaque para a estrutura funerária com dez crânios humanos descobertos, com dimensões horizontais médias de 60,0 cm x 45,0 cm e vertical de 20,0 cm; encontrada a 63,0 cm de profundidade.

Além disso, foram realizadas diversas atividades: 28 decapagens, datações radiocarbônicas, caracterização da estratigrafia e o resgate de 42.511 vestígios líticos, 32 fragmentos de cerâmica e 12 amostras de carvão para datação. A construção de todo esse conhecimento está possibilitando aprofundar os estudos sobre a ocupação humana durante a transição Pleistoceno-Holoceno. A caracterização do registro arqueológico, com base nos resultados até agora, também permite abordar as discontinuidades e o hiato mencionados por Schmitz e colaboradores, além das novas variáveis e questões apontadas na pesquisa atual, incluindo a cronologia (Rubin, 2017).

Em um estudo conduzido pela equipe de geofísica da Universidade de Brasília (UnB), através da aplicação do GPR no sítio arqueológico GO-Ja-02, verificou-se a presença de aproximadamente 1,5 metros de sedimentos ainda não escavados. Diante dessa descoberta, as atividades de pesquisa prosseguem dentro do âmbito dos projetos: "A ocupação pré-colonial do Planalto Central brasileiro

sob a perspectiva do sítio arqueológico GO-Ja-02, Serranópolis, Goiás" (2023/2 até 2025/2) e o projeto "Sítio arqueológico GO-Ja-02, Serranópolis, Goiás: escavação e preservação da arte rupestre" (2023/1 até 2025/2).

As pesquisas arqueológicas em Serranópolis continuam a evoluir, desde as primeiras expedições arqueológicas na região, na década de 1970, houve um progresso notável nas técnicas de pesquisa e nos paradigmas interpretativos. Inicialmente, os esforços de pesquisa se concentraram na documentação e catalogação das manifestações artísticas e artefatos encontrados, utilizando técnicas tradicionais de arqueologia.

Com o passar do tempo e o avanço das tecnologias, métodos mais sofisticados, como análises de radiocarbono, estudos de DNA antigo e técnicas de imagem avançadas, começaram a ser aplicados para obter insights mais profundos sobre as cronologias, dietas, mobilidade e relações sociais das populações que habitaram o complexo (Nóbrega, 2021). Adicionalmente, a introdução das geotecnologias tem desempenhado um papel crucial ao oferecer uma compreensão mais detalhada dos contextos arqueológicos, visando enriquecer as pesquisas, especialmente no que diz respeito ao auxílio às escavações (Ribeiro, 2021; Pereira *et al.*, 2023).

Ribeiro (2021), realizou a discussão teórica sobre a viabilidade técnica do GPR no auxílio das escavações no sítio GO-Ja-02. O estudo comparou o uso do GPR descritos na bibliografia, buscando embasar sua utilização no sítio, com o intuito de direcionar as escavações dentro da área do abrigo no sítio, além de caracterizar o solo que está inserido em uma região de estratigrafia complexa.

Pereira *et al.* (2023), empregaram variáveis geomorfométricas e técnicas de aprendizado de máquina com o propósito de prever a localização de sítios arqueológicos na região de Serranópolis. A predição foi conduzida utilizando três algoritmos de classificação supervisionada baseados em árvores de decisão: Random Forest (RF), C5.0 e Extreme Gradient Boosting (XGBoost). Para avaliar a precisão dos resultados da classificação, foram adotadas métricas de desempenho como a Curva Característica de Operação do Receptor (ROC), a Área Sob a Curva (AUC), sensibilidade, especificidade e F-score. Por fim, foram criados mapas temáticos dos modelos preditivos desenvolvidos.

Além dos avanços metodológicos, as pesquisas no complexo arqueológico de Serranópolis contribuíram e vêm contribuindo para a reavaliação e complementação das teorias relacionadas à mobilidade, territorialidade e organização social das populações pré-históricas. As realizações desses estudos revelam uma complexidade social e uma adaptabilidade ambiental muito maiores do que as previamente assumidas para os grupos caçadores-coletores e horticultores primitivos da região (Lopes, 2020; Santos, 2021). Essas conclusões são apoiadas pela análise da arqueologia paisagística,

como, por exemplo, características da geologia, relevo, solos, hidrografia, fauna e flora; bem como os padrões de assentamento, práticas funerárias, interação dos grupos com o ecossistema e interpretação dos vestígios arqueológicos (Nogueira, 2015; Rubin *et al.*, 2020, 2023; Santos, 2021; Radel, 2022).

A necessidade de ações de preservação dos sítios também levou ao desenvolvimento de estudos dedicados a este tema. Grande parte desses estudos descrevem os impactos antrópicos e naturais nos sítios arqueológicos de Serranópolis (Balieiro, 2019; Rubin *et al.*, 2022; Souza, 2023), ressaltando a necessidade da adoção de medidas para a proteção e a conservação do patrimônio cultural da região, envolvendo a população, os órgãos governamentais e as instituições de pesquisa.

2.2.1 Sepultamentos

Os estudos realizados por Schmitz *et al.* (1982), fornecem uma visão detalhada sobre os sepultamentos encontrados nos sítios, destacando características que variam conforme as fases culturais, assim como aspectos físicos e rituais associados a esses sepultamentos. Alguns sepultamentos foram documentados e trabalhados, enquanto outros não foram totalmente explorados devido à sua localização nas paredes dos cortes ou má conservação, permanecendo intactos para futuras operações ou estavam tão mal conservados que pouco pôde ser documentado.

De forma resumida, a seguir estão os principais achados ósseos que foram documentados pelos autores:

Sítio GO-Ja-01:

- No sítio foram encontradas ossadas das pernas e dos pés de um indivíduo, a 150 cm de profundidade, inerentes a fase Serranópolis. O autor descreve sepultamento foi realizado na proximidade de um grande bloco caído em uma cova com 50 cm de largura, coberta por pequenas lajes de arenito a 128 cm de profundidade que se aprofunda até 170 cm. As continuidades dos ossos seguiam para dentro da parede da escavação e não foram explorados.
- Também junto a uma rocha e cercados por pedras e coberto por uma laje, foi encontrado um sepultamento infantil a 30-40 cm, pertencente ao grupo Jataí, sendo que a laje que o cobria já aparecia em 20-30 cm.
- Por volta de 110-120 cm de profundidade, fase Serranópolis, foi encontrado um sepultamento de um indivíduo adulto. Sobre o esqueleto também havia um número regular

de pequenos blocos de arenito silicificado ou não.

- Sepultamento de um esqueleto jovem completo a 140-150 cm de profundidade. O sepultamento estava em uma cova, feita nas proximidades de um bloco rochoso, não sendo possível estabelecer a partir qual camada a cova tinha sido aberto. O esqueleto estava parcialmente coberto por pedras.
- Cova com ossos de um pé, não sendo possível verificar a camada. As continuidades dos ossos seguiam para dentro da parede da escavação e não foram explorados.

Sítio GO-Ja-02:

- Neste sítio foram encontrados dois crânios humanos a uma profundidade de 70-80 cm, provavelmente originário da Fase Jataí, entre as camadas 2 e 3, datando de 9.195 e 10.120 A.P.; e com características de enterramento pois o nível de carvão imediatamente acima estava cortado pela cova.

Sítio GO-Ja-20:

- Conjunto de esqueletos (ossos longos, algumas costelas e partes de crânio), encontrados entre 120 e 140 cm de profundidade, estavam reunidos restos de quatro indivíduos infantis, os sepultamentos foram atribuídos à fase Serranópolis.
- Na mesma cova, entre 150 e 160 cm de profundidade, estava um indivíduo bastante jovem (mandíbula e vários dentes de leite). Ao lado dos ossos havia duas pedras. Provavelmente as continuidades dos ossos seguiam para dentro da parede da escavação e não foram explorados. Quanto a fase, a aferição foi de possivelmente ser da fase Serranópolis ou do final da fase Paranaíba.

Sítio GO-Ja-13:

- Dois sepultamentos, um do lado do outro, sendo um de um ser muito novo e outro infantil. O mais novo estava numa cova de 35x40 cm, a 35 de profundidade. O sepultamento infantil em uma cova ao lado, com profundidade também de 35 cm. Ambos foram sepultados junto a uma plataforma rochosa que deveria aflorar ao nível do chão. Entre um e outro havia uma pequena pedra, não se permitindo inferir se intencional não.

Sítio GO-Ja-13c:

- Sepultamento infantil na camada 4, dois pés sobressaindo da parede.
- Sepultamento de um indivíduo adulto na camada 2, dois pés sobressaindo da parede.

- Sepultamento de uns indivíduos adultos na camada 8, esqueleto adulto.

Sítio GO-Ja-14:

- Sepultamento adulto encontrado a 105 cm de profundidade em uma cova proveniente da camada 10, com aproximadamente 80 cm, aprofundando-se até 125 cm de profundidade; relativos a camada 10.
- Sepultamento provavelmente juvenil ou infantil, em uma cova com 75 cm de largura, que se inicia a 80 cm de profundidade e vai até 130 cm; relativos a camada 7 e 8. O esqueleto se encontrava parcialmente dentro da parede não removida.
- Esqueleto em uma cova rasa, medindo entre 17 e 20 cm de profundidade e 60 cm de largura; relativos a camada 6 aprofundando-se até a camada 9. O sepultamento pode corresponder a fase Jataí, ou fim da fase Serranópolis.

A partir das documentações realizadas por Schmitz *et al.* (1982, 1997) e Nóbrega (2012) é possível se extrair características importantes acerca dessas práticas funerárias, quanto a:

Fases e idades

- Os sepultamentos pertencem principalmente às fases Jataí e Serranópolis, com algumas possíveis ocorrências no final da fase Paranaíba. Não há sepultamentos claramente atribuídos à fase Paranaíba. As idades documentadas vão entre 9.000 e 10.000 A.P.

Sepultados:

- Todos os 18 sepultamentos, identificados são primários, ou seja, é o enterro inicial de um corpo no seu local de descanso final, sem que tenha sido movido ou alterado posteriormente.
- Dentre os indivíduos temos crianças, jovens e adultos. Os jovens e adultos eram enterrados em posição fletida, enquanto as crianças eram enterradas encolhidas, mas de forma menos rígida. Algumas posições sugerem que os corpos eram envoltos como fardos.
- A presença de sepultamentos individuais e agrupados (como o conjunto de quatro indivíduos infantis), revelam complexidade nas práticas funerárias.
- Além disso, a presença de sepultamentos onde apenas partes dos corpos são encontradas (crânios) sugere que práticas específicas foram realizadas
- A maior parte dos esqueletos não possuía nenhum tipo de acompanhamento funerário. Em alguns casos específicos, foram encontrados ossos cobertos por ocre vermelho ou por uma

grande quantidade de continhas produzidas a partir de sementes vegetais, sugerindo a presença de colares como parte do ritual de sepultamento.

- A variação nas posições dos corpos, desde fletidos até encolhidos, e a presença de sepultamentos individuais e agrupados (como o conjunto de quatro indivíduos infantis), revelam complexidade nas práticas funerárias.
- A presença de sepultamentos onde apenas partes dos corpos são encontradas (como pés ou ossos longos) sugere que alguns sepultamentos podem ter sido perturbados ou que práticas específicas (talvez rituais) foram realizadas.

Covas:

- As covas foram escavadas nos sedimentos arqueológicos e cobertas com o mesmo material, às vezes complementado com pequenos blocos rochosos ou lajes, formando uma espécie de cobertura.
- A maioria das sepulturas foi localizada próxima a blocos existentes no piso dos abrigos ou em espaços com teto baixo, formando nichos, evitando áreas de movimentação aberta nos abrigos maiores.
- A localização dos sepultamentos, muitas vezes próximos a grandes blocos ou em nichos formados por rochas, pode refletir uma preferência por locais, indicando uma preocupação em marcar ou proteger o local do sepultamento.
- As covas variam em profundidade, podendo chegar até aproximadamente um metro, mas não eram nem muito profundas nem superficiais.

A compreensão das práticas funerárias documentadas por Schmitz *et al.* (1982, 1997) e Nóbrega (2012), que abrange desde as fases e idades dos sepultamentos até as características específicas dos sepultados e das covas, fornece uma boa base para a interpretação de dados GPR.

Sabendo que a presença de sepultamentos está, em sua maior parte de ocorrência, relacionada com blocos rochosos ou lajes, uma metodologia de análise pode ser construída com base nesse contexto intrínseco aos sítios. Contudo, é fundamental ressaltar que a eficácia da detecção por GPR é influenciada por diversos fatores, como a composição do solo, seu teor de umidade, a profundidade do alvo e a frequência da antena utilizada, bem como a existência de contraste dielétrico entre a estrutura (alvo) e o solo circundante.

CAPÍTULO 3

3. O GPR

As terminologias Georadar, Radar de Penetração no Solo, comumente utilizados em português, e as terminologias em inglês *Ground Penetrating Radar (GPR)* e *Surface Penetrating Radar (SPR)*, referem-se a um conjunto de técnicas de prospecção geofísica não destrutiva, que utiliza ondas eletromagnéticas no intervalo de frequência de rádio, desenvolvidas essencialmente com o intuito de detetar objetos e interfaces localizadas no subsolo (Daniels, 2004). O termo mais utilizado pela comunidade acadêmica é GPR, sendo amplamente aceito e utilizado na maioria da literatura científica escrita em inglês, assim como em textos em outros idiomas.

A metodologia GPR passou por significativa evolução nas últimas décadas, com um avanço notável na diversidade de áreas de aplicação. Especialmente a partir da segunda metade dos anos 2000 com o avanço dos softwares e hardwares, resultando no surgimento de instrumentos mais tecnológicos, adaptados às necessidades dos utilizadores, quanto ao tipo de alvo de pesquisa, sua natureza e ao ambiente circundante (Gonçalves *et al.*, 2008).

O GPR permite obter imagens de alta resolução do subsolo através da emissão de ondas EM pela antena transmissora, enquanto as reflexões dos alvos subterrâneos são captadas pela antena receptora. De maneira similar a outros métodos geofísicos, são os contrastes nas propriedades físicas dos materiais que geram as reflexões das ondas EM detectadas pelo equipamento. Quando as ondas emitidas encontram um meio com propriedades físicas distintas e com contraste de impedância suficiente, as reflexões acontecem (Borges, 2017).

O equipamento GPR consiste em um conjunto de componentes fundamentais, incluindo uma unidade de controle, pelo menos uma antena transmissora, pelo menos uma antena receptora, e uma roda odômetrética (Figura 7). Esses elementos são os mais comuns na composição de um sistema

GPR, embora possam variar de acordo com o fabricante, o modelo ou a finalidade específica do equipamento.

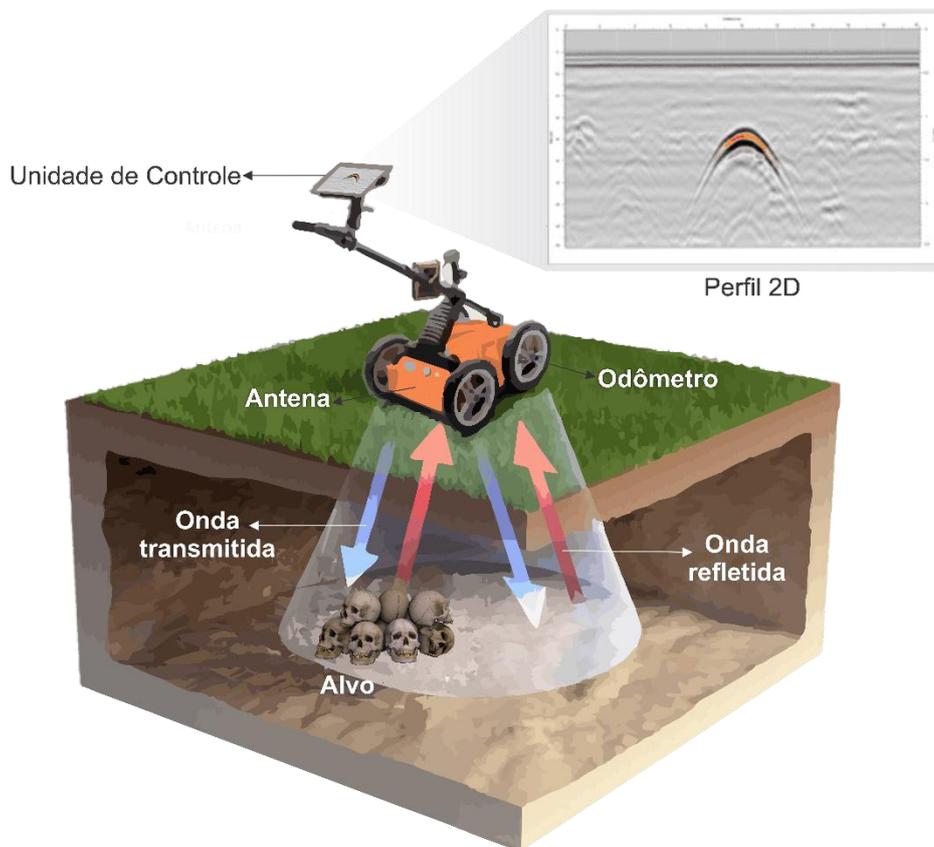


Figura 7 – Ilustração do sistema GPR e seu princípio básico de funcionamento: Unidade de Controle, controla as operações do radar; Antena, transmite ondas de radar para o solo e recebe as ondas refletidas; Odômetro, mede a distância percorrida pelo equipamento; Onda transmitida, indica a onda de radar enviada para o subsolo; Onda refletida, mostra a onda de radar que retorna após encontrar meio reflexivo; Alvo, no exemplo, são crânios humanos enterrados; Perfil 2D, radargrama representando a interpretação visual dos coletados, com destaque para reflexão hiperbólica relacionada ao alvo detectado. Ilustração modificada de fonte desconhecida.

Em determinados modelos, a unidade de controle desempenha funções, não apenas controle, armazenamento e configuração dos pulsos eletromagnéticos, mas também permitindo a visualização dos dados coletados em tempo real. Em outros casos, essa unidade pode ser integrada a um notebook para a visualização dos dados.

Quanto às antenas, estas podem ser configuradas de maneiras distintas. Em alguns sistemas, a antena transmissora e a receptora estão combinadas em uma única peça, conhecida como transdutor (Utsi, 2017). Outra variabilidade diz respeito ao uso da roda odômetro, alguns sistemas GPR utilizam GPS ou estação total em substituição à roda odômetro tradicional, já outros são compatíveis com ambos os métodos para determinar a posição e a distância percorrida. Essa flexibilidade permite adaptar o equipamento às necessidades específicas de cada projeto de pesquisa ou aplicação prática.

3.1 Fundamentação Teórica

A base teórica e o fundamento físico do método GPR estão ancorados na teoria eletromagnética e na reflexão das ondas eletromagnéticas (EM), respectivamente. As equações de Maxwell descrevem a física das ondas EM matematicamente, servindo como base para compreender a transmissão e reflexão das ondas EM em diferentes meios. As relações constitutivas, por sua vez, quantificam as propriedades físicas dos materiais. A interação desses elementos fornece os alicerces para a descrição quantitativa dos sinais captados pelo GPR (Jol, 2008).

3.1.1 Equações de Maxwell

Matematicamente, essas relações são expressas através das seguintes equações diferenciais:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3.2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = q \quad (3.3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.4)$$

onde \vec{E} é o vetor de intensidade do campo elétrico (V/m), q é a densidade de carga elétrica (C/m³), \vec{B} é o vetor de densidade de fluxo magnético (T), \vec{J} é o vetor de densidade de corrente elétrica (A/m²); \vec{D} é o vetor de deslocamento elétrico (C/m²), t é o tempo (s) e \vec{H} é a intensidade do campo magnético (A/m).

Na equação 3.1, conhecida como Lei de Ampère, o campo magnético (\vec{H}) é produzido por correntes elétricas. A equação 3.2, conhecida como Lei de Faraday, o campo elétrico (\vec{E}) é produzido pela variação do campo indução magnética (\vec{B}) em relação ao tempo.

Segundo Jol (2008), Maxwell compilou essas relações, que encapsulam os estudos de diversos pesquisadores, numa forma concisa, permitindo a derivação dos princípios clássicos EM (como indução, ondas de rádio, resistividade e teoria de circuitos). Porém, não são suficientes para descrever as interações dos campos eletromagnéticos com as propriedades físicas dos materiais (condutividade elétrica, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética). Para tal, foram formuladas as relações constitutivas que quantificam as propriedades eletromagnéticas dos materiais, as quais

juntamente fornecem a base para descrição quantitativa dos sinais de *GPR*.

3.1.2 Equações Constitutivas

A introdução das relações constitutivas do meio nas equações de Maxwell é essencial para a obtenção de informações sobre as propriedades elétricas dos materiais por onde atuam os campos elétricos e magnéticos. No contexto do GPR, compreender essas propriedades é fundamental. As seguintes equações constitutivas oferecem uma descrição macroscópica da reação de elétrons, átomos e moléculas à aplicação de um campo EM:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3.4)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (3.5)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.6)$$

Na equação 3.4, também conhecida como Lei de Ohm, a condutividade elétrica (σ) caracteriza o movimento de carga livre, criando corrente elétrica sob a influência de um campo elétrico. A condutividade elétrica do meio geológico é influenciada por diversos fatores, como o teor de água, a presença de minerais condutores, a porosidade, a salinidade e a concentração de argila (Keller, 1987). O aumento da condutividade elétrica do meio geológico resulta em uma maior atenuação do sinal da onda eletromagnética do GPR, levando a uma redução na profundidade de penetração dessa onda.

A equação 3.5, a relação constitutiva relaciona o vetor campo elétrico \vec{E} ao vetor deslocamento elétrico ou polarização \vec{D} , onde (ϵ) é a permissividade dielétrica do material, expresso em Farad/metro (F/m). A permissividade dielétrica descreve o deslocamento restrito de cargas em resposta a um campo elétrico, resultando no armazenamento de energia no material.

Normalmente, nos estudos de GPR se utiliza a permissividade dielétrica relativa:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (3.7)$$

onde ϵ_0 é a permissividade dielétrica no vácuo, 8.89×10^{-12} F/m e ϵ é a constante dielétrica no meio. Em alguns estudos a constante dielétrica pode vir como k .

A constante dielétrica expressa, em termos físicos, a quantidade de energia elétrica armazenada e perdida, através da criação de um campo elétrico interno (entre íons e/ou moléculas), devido a deslocamentos induzidos, quando moléculas e/ou íons são submetidos a um campo elétrico externo variável (Olhoeft, 1996; Powers, 1997)

A equação 3.6 relaciona o vetor campo magnético \vec{H} ao vetor densidade de fluxo magnético \vec{B} , por meio de um fator de proporcionalidade denominado permeabilidade magnética do meio μ e expresso em Henry/metro (H/m).

A permeabilidade magnética μ expressa como os momentos magnéticos atômicos e moleculares respondem a um campo magnético, possibilitando o armazenamento de energia no material através da distorção desses momentos magnéticos.

3.1.3 Propriedades dos materiais

A transmissão desse sinal depende das propriedades elétricas do meio (condutividade elétrica e permissividade dielétrica) sob condições de altas frequências (10 a 2500 MHz), que são principalmente controladas pelo conteúdo do fluido presente no solo.

Na maioria das aplicações GPR, as variações em ε e σ são mais importantes, enquanto as variações em μ raramente são motivo de preocupação (Jol, 2008). Porém, os efeitos de uma alta permeabilidade magnética não podem ser negligenciados no GPR (Annan, 1992), especialmente em presença de alvos metálicos, onde a permeabilidade magnética relativa pode atingir até 100 no Sistema Internacional (SI).

O GPR é particularmente eficaz em materiais com baixas perdas elétricas, ou seja, se $\sigma=0$, o GPR teria uma aplicabilidade extremamente ampla, permitindo uma penetração profunda dos sinais. No entanto, as existências dessas condições de baixa perda elétrica não são comuns. Ambientes argilosos ou áreas com águas subterrâneas salinas podem limitar significativamente a penetração dos sinais GPR.

Loewer *et al.* (2015), discutem sobre a decomposição espectral das perdas elétricas e dielétricas do solo e a previsão do desempenho in situ do radar de penetração no solo (GPR). Eles investigam como as propriedades eletromagnéticas do solo, especialmente a atenuação intrínseca, afetam a profundidade de penetração e a resolução das imagens obtidas pelo GPR. Utilizando a técnica de linha de transmissão coaxial, os autores mediram as permissividades dielétricas complexas de várias amostras de solo em uma faixa de frequência de 1 MHz a 10 GHz. A atenuação intrínseca aumenta com o teor volumétrico de água no solo, influenciando a profundidade de penetração e a resolução das imagens do GPR (Figura 8).

Solos de baixa perda são caracterizados por uma atenuação intrínseca relativamente baixa das ondas eletromagnéticas, o que permite uma maior profundidade de penetração e melhor resolução nas

imagens obtidas pelo GPR (Franceschetti, 2013). Um exemplo típico de solo de baixa perda é a areia bem classificada e sem argila, que apresenta baixa condutividade elétrica e menor conteúdo de água. Nestes solos, a atenuação intrínseca é quase independente da frequência, especialmente em baixos teores de umidade.

Por outro lado, solos de alta perda apresentam uma atenuação intrínseca significativamente maior, o que reduz a profundidade de penetração e a qualidade das imagens do GPR. Estes solos geralmente contêm maiores quantidades de argila e silte, que retêm mais água e apresentam maior condutividade elétrica.

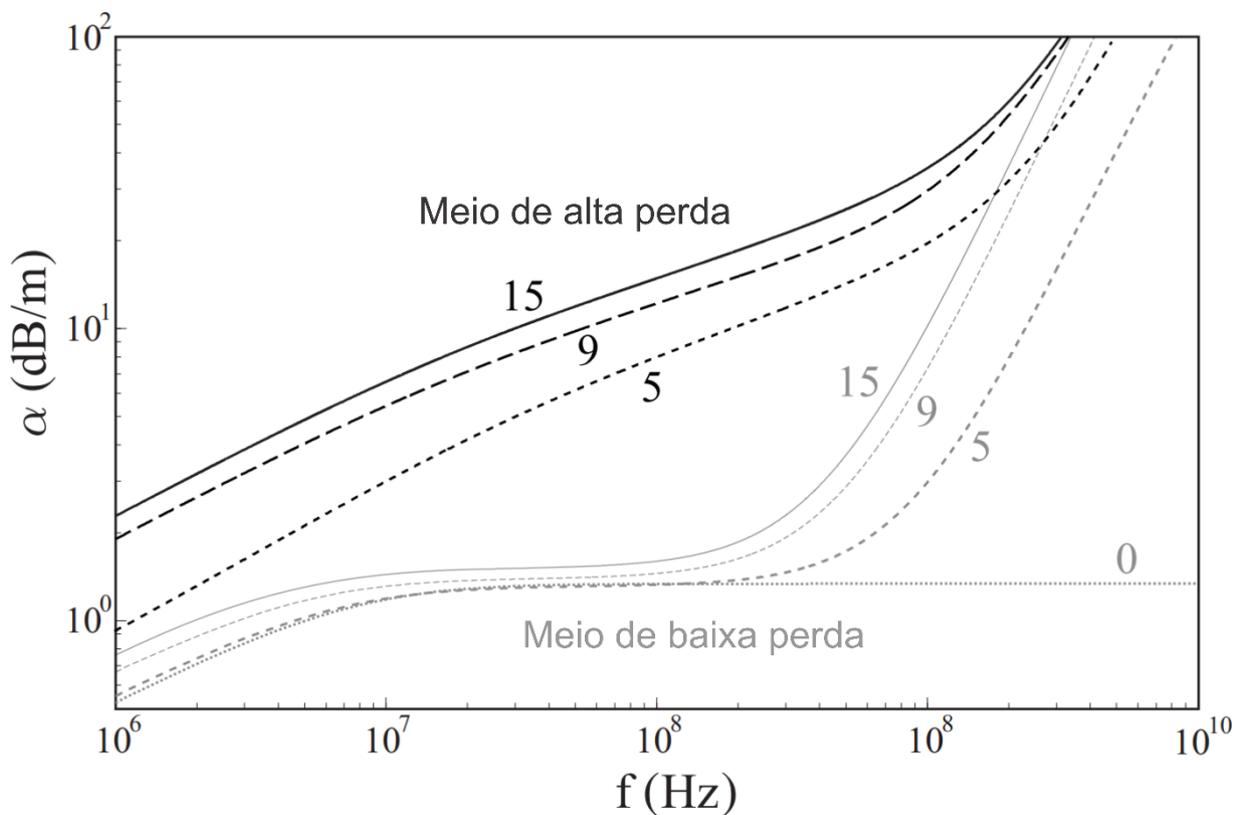


Figura 8 – Atenuação intrínseca de dois solos diferentes para teores volumétricos de água variados entre 0% e 15%. Adaptado de Loewer (2018).

A reflexão do radar ocorre em interfaces com contraste de impedância de onda suficiente, e a amplitude do sinal refletido depende da magnitude do contraste. As ondas de radar respondem a esses contrastes de acordo com a lei de Snell e as equações de Fresnel, que descrevem como as ondas EM são refratadas, refletidas e transmitidas. Assim, se uma porção da energia for refletida para a superfície, a parte restante da onda continua viajando através da subsuperfície e pode atingir outro refletor ou dissipar-se completamente.

Assim, na maioria dos ambientes subterrâneos, o contraste na permissividade dielétrica (ϵ) é o principal fator que controla o retorno do sinal GPR. Permissividade dielétrica é a capacidade de um material se polarizar sob a influência de um campo elétrico. Nas frequências empregadas pelo GPR, a permissividade dielétrica é fortemente sensível a variações no teor de água.

A Tabela 2, elenca as propriedades físicas da permissividade dielétrica relativa e condutividade de materiais comumente presentes em contextos arqueológicos.

Tabela 2 – Propriedades elétricas de alguns materiais, com os valores aproximados da permissividade elétrica relativa e condutividade elétrica. Fonte: Davis e Annan (1989); Hammon *et al.* (2000); Daniels (2004); Rodrigues *et al.* (2005).

Materiais	Permissividade Relativa (ϵ_r)	Condutividade Elétrica (σ) (mS/m)
Conchas e sedimentos carbonáticos	7	1
Material cerâmico	5	2
Material queimado (lareiras)	14	5
Material lítico	6	1
Ossos humanos	13	100
Solo com conchas	7-8	10
Urnas Funerárias	5	2
Sambaqui condutivo	8	100
Sambaqui resistivo	7	7
Sedimentos orgânicos	9	10
Sedimentos arenosos-argilosos saturados	12	10
Areia saturada	15	1
Areia seca	5	0,1
Areia média	6	0,1
Areia média úmida	25	7
Areia grossa saturada	50	40
Argila seca	5	2
Argila saturada	40	1000
Siltito saturado	30	100
Silte saturado	10	1-10
Arenito saturado	20-30	40
Arenito seco	4-7	0,01-0,1
Arenito saturado	15-25	1-10

3.1.4 Transmissão e Reflexão do Sinal

As ondas de radar respondem a esses contrastes de acordo com a lei de Snell e as equações de Fresnel, que descrevem como as ondas EM são refratadas, refletidas e transmitidas. Assim, se uma porção da energia for refletida para a superfície, a parte restante da onda continua viajando através da subsuperfície e pode atingir outro refletor ou dissipar-se completamente (Annan, 2009).

Outro conceito relevante é a impedância (z), que provoca a alteração da trajetória da onda ao transitar de um meio para outro. Pode ser descrita como a razão entre um campo elétrico e um campo magnético, ambos perpendiculares entre si. Em um meio dielétrico ideal, essa relação pode ser reduzida para:

$$z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (3.9)$$

Annan (1992) diz que é comum assumir no estudo do GPR, que as ondas eletromagnéticas se propagam com incidência normal às interfaces das camadas. Portanto, podemos calcular essas constantes utilizando as equações:

$$R = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \quad (3.10)$$

Em que z_1 e z_2 são, respectivamente, as impedâncias do meio em que a onda incide (meio 1) e em que refrata (meio 2). É importante salientar que R e T são adimensionais, sendo dadas em termos de porcentagem. Em ambientes considerados dielétricos e que ocorrem pouca atenuação da energia da onda eletromagnética, os efeitos da permeabilidade magnética podem ser desprezados, de tal modo que:

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (3.11)$$

Cada comprimento de onda se comportará de maneira distinta ao se propagar através de diferentes meios no solo. Geralmente, os comprimentos de onda mais longos se propagam mais profundamente, com menos reflexão em pequenos objetos. Por outro lado, os comprimentos de onda mais curtos penetram apenas em profundidades superficiais, mas refletem facilmente em discontinuidades enterradas menores. A menor profundidade de penetração dos comprimentos de onda mais curtos ocorre devido à sua maior suscetibilidade à atenuação nas condições do solo (Conyers 2012b:25; Leckebusch 2003; Leucci *et al.* 2012; Neal 2004).

O método GPR usa o tempo de viagem bidirecional (tempo duplo) e a velocidade (v) da onda para estimar as profundidades dos refletores abaixo da superfície terrestre. Através do espaço, as ondas de radar viajam à velocidade da luz (c), e sua velocidade diminui com a permissividade dielétrica (ϵ) tal que:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.12)$$

Na análise de GPR, é comum estimar uma velocidade média utilizando um refletor de referência em uma profundidade conhecida. Este pulso é refletido e difratado, tanto pelas estruturas geológicas, quanto por feições anômalas enterradas (dutos, objetos antrópicos, fundações, etc.). Uma série de

medidas são realizadas ao longo de uma linha, quando dispostas graficamente lado a lado formam uma imagem de alta resolução, tanto lateral quanto vertical da subsuperfície (Figura 9).

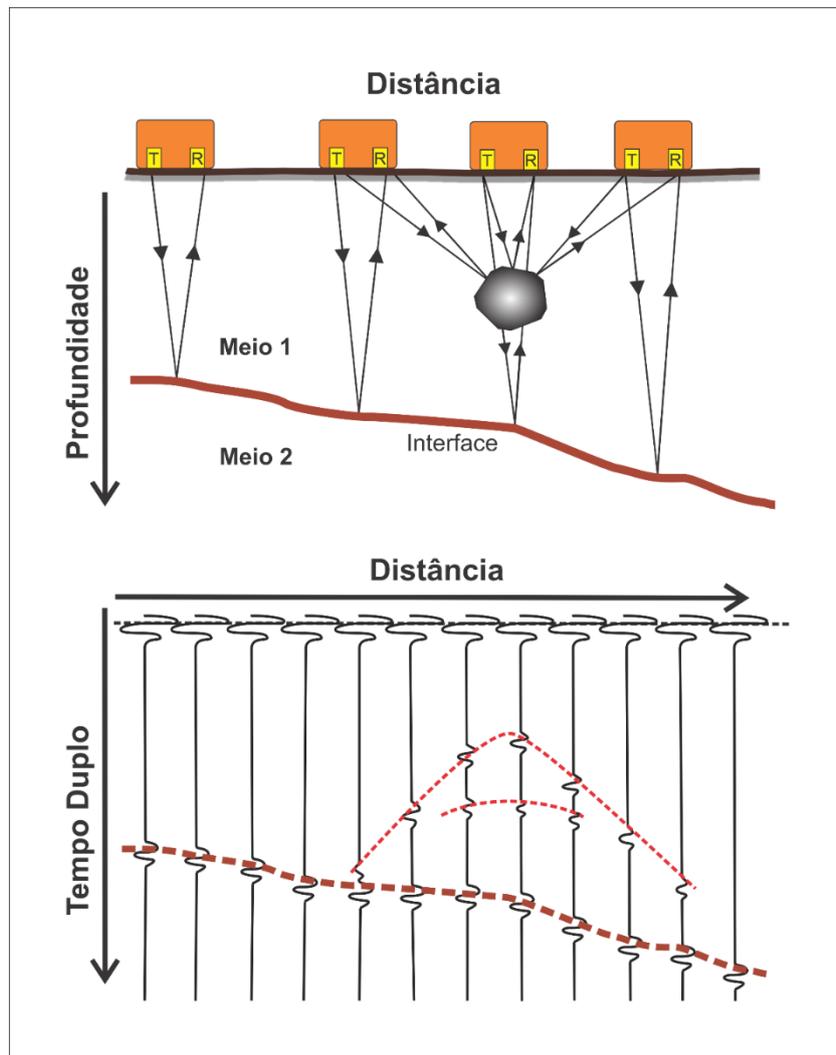


Figura 9 - Ilustração da transmissão e refração de uma onda eletromagnética ao encontrar uma interface e um alvo, e a respectiva formação da imagem no GPR. Adaptado de Xavier (2006).

Os objetos discretos ou refletores esféricos são mostrados como hipérbolas. O centro de um refletor produtor de hipérbole está localizado no ponto de inflexão e as caudas ocorrem devido à suposição vertical inválida. À medida que uma unidade GPR é movida para perto ou para longe de um refletor pontual, as ondas continuam a refletir nele a partir de diferentes ângulos de incidência. Com informações de velocidade adequadas, pode ser realizada uma etapa de processamento de migração que focalizará refletores discretos e corrigirá a inclinação dos refletores de imersão. Os refletores de superfície horizontal são representados de forma realista.

3.1.5 Relação entre frequência, atenuação e resolução

A teoria do GPR parte do princípio de que o sinal recebido é semelhante ao emitido pela antena, o que não considera a perda de energia ao longo da propagação. Segundo Neto (2003), essa perda ocorre principalmente devido à absorção, dispersão e espalhamento geométrico.

- **Absorção:** Conhecida como efeito Joule, ocorre devido à conversão da energia eletromagnética em calor, resultando na diminuição da amplitude do pulso.
- **Dispersão:** Acontece quando a energia eletromagnética incide em objetos com dimensões menores ou iguais ao comprimento de onda, resultando na dispersão aleatória da energia incidente.
- **Espalhamento Geométrico:** Refere-se à diminuição da densidade de energia durante a propagação da onda, dependendo da distribuição de velocidades no meio.

Vários fatores influenciam os resultados do GPR, como a composição mineralógica, granulometria, densidade, porosidade e fluido intersticial do meio. Na prática, a atenuação do sinal é controlada principalmente pela condutividade elétrica (σ), ou seja, o GPR é mais útil em materiais com baixas perdas elétricas (ou seja, menos condutivos).

As ondas de radar perdem amplitude à medida que viajam, refletem e interagem com materiais subterrâneos. A energia do radar é perdida através das próprias antenas, acoplamento ao solo, espalhamento geométrico do sinal, espalhamento e atenuação intrínseca. A atenuação intrínseca (α) é a perda de energia das ondas de radar no subsolo por meio de absorção e é normalmente o principal ditador da profundidade de investigação do GPR.

A atenuação dos dados GPR é mais evidente com antenas de alta frequência, resultando em perda de resolução com a profundidade. Isso ocorre porque a profundidade de penetração depende das propriedades elétricas do meio (Farias, 2010). Em frequências muito altas, a água pode sofrer variações intensas na polaridade, levando a perdas significativas de energia por atenuação devido ao fenômeno de relaxação (Davis e Annan, 1989).

A resolução vertical do GPR é um parâmetro crítico que influencia a capacidade do sistema de distinguir entre duas interfaces ou objetos próximos em profundidade. Este parâmetro é fortemente dependente da frequência da antena utilizada e das propriedades dielétricas do material investigado (Daniels, 2004). Por exemplo, antenas de alta frequência, como as de 900 MHz, oferecem uma resolução vertical superior, permitindo a detecção de detalhes finos, embora com menor capacidade de penetração no solo. Em contrapartida, antenas de baixa frequência, como as de 100 MHz,

conseguem penetrar mais, porém com uma resolução vertical reduzida. Além disso, a constante dielétrica do material afeta a velocidade de propagação do sinal, influenciando diretamente a resolução. A escolha apropriada da frequência da antena, juntamente com a consideração das propriedades dielétricas do material, é fundamental para otimizar tanto a resolução vertical quanto a profundidade de penetração do GPR.

Adicionalmente, a resolução horizontal é um parâmetro que determina a capacidade do sistema de distinguir entre objetos ou interfaces próximas lateralmente. Esse parâmetro é influenciado pela largura do feixe da antena e pela geometria do levantamento (Daniels, 2004). Antenas com feixes mais estreitos oferecem melhor resolução horizontal, permitindo a identificação de detalhes laterais mais finos. A resolução horizontal também é afetada pela distância entre as linhas de varredura durante o levantamento, com linhas mais próximas resultando em melhor resolução. A resolução horizontal é otimizada através da escolha adequada da antena e do planejamento cuidadoso do levantamento, considerando a geometria e a densidade das linhas de varredura. A resolução horizontal depende da frequência da antena e da velocidade de propagação do sinal no material investigado, sendo crucial para aplicações que requerem alta precisão lateral (Jol, 2020).

Tabela 3 - Frequência central da antena e profundidade máxima de penetração do GPR. Fonte: Modificado de Annan (2001).

Frequência Central da Antena (MHz)	Profundidade Máxima de Penetração (m)
1000	1
400	2
200	4
100	25
50	30
25	40
10	50

3.2 Avaliação da aplicabilidade do GPR

A eficácia de qualquer levantamento geofísico utilizando o GPR inicia com a definição clara do problema a ser investigado, uma etapa preliminar crucial que, conforme apontado por Annan *et al.* (1992), é muitas vezes negligenciada. Esta fase é essencial não apenas para o método GPR, mas

para todas as técnicas geofísicas, embora a pressa em coletar dados possa levar à sua subestimação.

Prever se o GPR será eficaz para um determinado problema não é uma tarefa simples. Geralmente, é mais fácil identificar situações nas quais o radar provavelmente não funcionará do que garantir a certeza do seu sucesso. Essa incerteza não é exclusiva do método GPR, sendo uma realidade comum a todos os métodos geofísicos. Martindale *et al.* (2023), destacam que os arqueólogos tendem a empregar métodos como o GPR quando funcionam como esperado e a descartá-los quando não funcionam, limitando as análises publicadas ao subconjunto de aplicações bem-sucedidas, que podem ser minoria.

Como sugestões para aumentar a eficácia das investigações GPR, Annan *et al.* (1992) sugerem que antes de iniciar um levantamento é necessário responder a cinco questões fundamentais: conhecimento prévio do alvo, geometria do alvo, propriedades elétricas do alvo e do meio. Essas questões ajudam a determinar a viabilidade do GPR, abordando desde a profundidade e características do alvo até as condições ambientais que podem afetar a pesquisa.

A determinação da profundidade do alvo constitui frequentemente o aspecto mais crítico da investigação. Caso o alvo esteja situado além da capacidade de detecção do GPR sob condições ótimas, a viabilidade do GPR como método de investigação pode ser rapidamente descartada. Existem algumas ferramentas básicas que auxiliam o GPR usuário no processo de tomada de decisão. Os dois mais importantes são a equação de alcance do radar (RRE, do inglês "radar range equation") e as técnicas de simulação numérica – ou modelagem numérica (Annan *et al.*, 1992).

A equação de alcance do radar realiza uma comparação inicial entre a potência disponível e os vários mecanismos de perda, com o objetivo de determinar se um alvo é capaz de refletir energia suficiente para ser detetável, resultando em uma resposta simplificada de sim ou não.

Annan *et al.* (1992) destacam que a ideia central de simplificar a complexidade inerente à determinação da profundidade do alvo implica que os resultados fornecidos pela RRE devem ser considerados como orientações gerais, e não como prognósticos precisos de sucesso ou fracasso. As fases fundamentais dessa equação são ilustradas e explicadas na Figura 10.

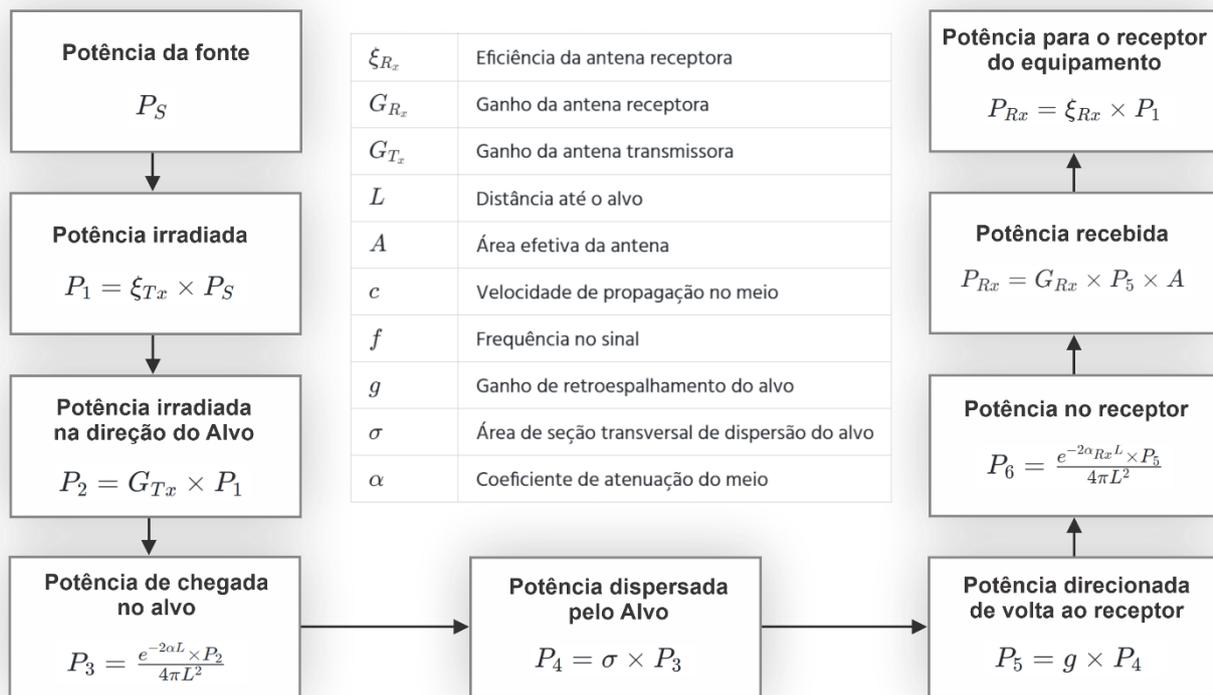


Figura 10 – Fluxograma do alcance do radar (RRE, do inglês "Radar Range Equation"). Essa equação visa determinar a distribuição de energia e fornecer um meio de estimar a profundidade de exploração.

Quanto às técnicas de simulação numérica, existem alguns softwares que realizam a modelagem de estruturas e que podem ser bastante úteis, estando disponíveis comercialmente. No entanto, programas mais complexos para modelagem bidimensional e tridimensional ainda são limitados (Utsi, 2017)

Outro quesito relacionado a profundidade do alvo é sobre a frequência operacional das antenas utilizadas. Uma consequência imediata do entendimento das limitações na quantidade de energia emitida por um radar é que investigações profundas exigirão comprimentos de onda maiores para atingir a profundidade de sondagem necessária. Como o comprimento de onda é inversamente proporcional à frequência, quanto maior o comprimento de onda, menor será a frequência da antena. Consequentemente, para investigações em maiores profundidades, são necessários sistemas de frequência mais baixa (Daniels, 1996; Conyers, 2013).

Já as antenas de alta frequência, com comprimentos de onda menores, são capazes de identificar pequenas características no subsolo, proporcionando assim um maior detalhamento no mapeamento. Em contrapartida, um curto comprimento de onda limitará a profundidade em que a sondagem pode ser realizada (Utsi, 2013).

Rodrigues (2009) pontua que a geofísica aplicada à arqueologia envolve a medição de propriedades físicas próximas a superfície da terra – em contextos arqueológicos refere-se de 1 a 2 m – a fim de detetar e caracterizar possíveis alvos arqueológicos, sendo alguns desses métodos mais sensíveis à morfologia de objetos, como é o caso do método GPR. Por outro lado, Conyers (2023), amplia essa profundidade para 2 a 5 metros da superfície.

Aliada a profundidade do alvo, temos a geometria do alvo. É indispensável tentar qualificar o alvo com a maior precisão possível, incluindo suas dimensões específicas, como altura, comprimento e largura. Para alvos não esféricos, a orientação do alvo, incluindo aspectos como direção e inclinação, são importantes de serem definidos.

A terceira questão aborda as propriedades elétricas do alvo, em que a determinação da permissividade dielétrica relativa (constante dielétrica) e da condutividade elétrica é crucial. Para a eficácia do GPR, o alvo deve exibir um contraste significativo em suas propriedades elétricas em relação ao meio envolvente, permitindo assim a modificação, reflexão ou dispersão do sinal eletromagnético.

A quarta questão se concentra no material hospedeiro. Annan *et al.* (1992) pontuam que as propriedades elétricas do meio hospedeiro devem ser identificadas, incluindo sua permissividade relativa e condutividade elétrica. Além disso, é necessário avaliar o grau e a escala espacial de heterogeneidade dentro das propriedades elétricas do hospedeiro. Caso o meio hospedeiro apresente variações em propriedades similares às do alvo, tanto em magnitude quanto em escala, o alvo poderá não ser distinguível devido ao extenso espalhamento volumétrico e agrupamento de respostas geradas pelo meio.

A última questão apontada por Annan *et al.* (1992), aborda sobre o ambiente de pesquisa. Embora o GPR seja aplicável em diversos ambientes, os instrumentos disponíveis podem não ser ideais para todas as condições específicas. O método GPR é sensível ao ambiente nos quais as medições são feitas. Fatores como a presença de estruturas metálicas extensas e fontes de eletromagnetismo ou transmissores, podem tornar o estudo inviável. Condições ou riscos únicos, incluindo extremos de temperatura, umidade, contaminação tóxica ou atmosferas com potencial explosivo, também devem ser avaliados. Outro aspecto relevante é sobre o local de pesquisa, avaliando a possibilidade do equipamento e o operador acessarem a área de interesse de maneira segura e econômica.

Portanto, a preparação e a compreensão das capacidades e limitações do GPR são fundamentais para o sucesso de sua aplicação em diferentes contextos, desde a arqueologia até outras áreas de investigação geofísica.

3.3 Aplicação do GPR em contextos arqueológicos

A utilização de metodologias geofísicas na arqueologia, revolucionaram a maneira como os arqueólogos abordam a investigação de artefatos arqueológicos soterrados. Essas técnicas possibilitam a descoberta e o mapeamento de características arqueológicas sem a necessidade de escavações invasivas, oferecendo uma visão detalhada das estruturas subterrâneas que de outra forma permaneceriam ocultas (Conyers, 2015).

Gaffney (2008) menciona que, embora seja comum afirmar que o surgimento da geofísica arqueológica ocorreu em Dorchester, às margens do rio Tâmsa, no período logo após a Segunda Guerra Mundial (Atkinson 1953), uma recente investigação histórica revelou camadas significativas e mais antigas, confirmando que estudos de resistividade elétrica realizados nos EUA datam de antes desse período. No entanto, o foco principal das primeiras publicações em Arqueometria estava na prospecção magnética e, naquela época, a estrutura arqueológica estava apenas superficialmente envolvida no esforço científico.

Ainda segundo Gaffney (2008), na década de 1970 a prospecção geofísica aplicada à arqueologia diminuiu consideravelmente, isso se deve ao fato de a atenção ter sido voltada para outros aspectos metodológicos dentro da ciência arqueológica. Porém, na década de 1980, com os avanços dos instrumentos e dos softwares, os estudos utilizando prospecção geofísica voltaram a crescer.

O GPR, em particular, é considerado um dos métodos geofísicos de maior destaque nos estudos arqueológicos, tornando-se o método favorito dos arqueólogos (Schmidt, 2013) por sua capacidade de gerar imagens tridimensionais do subsolo. Esta técnica tem se mostrado eficaz para estudos até uma profundidade de 2 a 5 metros, mas também tem sido aplicada com sucesso em investigações de depósitos mais profundos (Conyers & Leckebusch, 2010).

A evolução do uso do GPR em arqueologia pode ser traçada através de estudos significativos ao longo das décadas. Vickers *et al.* (1976) foram pioneiros na aplicação do GPR em arqueologia, utilizando a técnica para investigar estruturas pré-históricas no Novo México, EUA. Uma década depois, Vaughan (1986) demonstrou a eficácia do GPR na localização de sepulturas pré-históricas na Austrália, estabelecendo bases para futuras aplicações em contextos funerários. Estes estudos iniciais abriram caminho para investigações mais detalhadas e abrangentes.

Conyers (2015) complementa dizendo que uma pequena, mas crescente, comunidade de arqueólogos tem incorporado técnicas de mapeamento geofísico como um procedimento de campo de rotina há muitos anos. Ele destaca que os dados obtidos por GPR servem como informações primárias, as quais podem direcionar a escolha de locais para escavação ou mesmo desencorajar a

intervenção em certas áreas. Além disso, alguns geofísicos especialistas em arqueologia também começaram a usar esses métodos como forma de colocar sítios arqueológicos dentro de um contexto mais amplo, para estudar a interação humana e a adaptação a paisagens antigas, quando estes atributos culturais podem estar diretamente relacionados com a localização (Conyers 2010).

No início do século XXI, Leckebusch (2003) realizou um estudo inovador na Suíça, mapeando estruturas de um assentamento romano e correlacionando dados de GPR com escavações subsequentes. Este trabalho foi fundamental para demonstrar a precisão e confiabilidade do GPR em contextos arqueológicos complexos. Alguns anos depois, Trinks *et al.* (2010) conduziram um estudo abrangente em Carnuntum, Áustria, utilizando GPR de alta resolução para mapear detalhadamente estruturas urbanas romanas enterradas, revelando o potencial do GPR para fornecer informações detalhadas sobre o planejamento urbano e a arquitetura de cidades antigas.

Alguns métodos de levantamento geofísico são mais sensíveis à morfologia de objetos, como o GPR e a eletrorresistividade. Gaffney e Gater (2003) mencionam que, por meio de sensores e metodologias especialmente desenvolvidos para a construção e a indústria de engenharia, os geofísicos têm empregado essas técnicas para solucionar questões relacionadas à arquitetura de restauração e para obter imagens de objetos arqueológicos específicos

A utilização de métodos geofísicos em investigações de cemitérios pré-históricos pode oferecer uma contribuição significativa para compreender a organização do local e a localização das sepulturas, auxiliando assim na gestão do sítio (por exemplo, Conyers, 2006; Jones, 2008; Sarris e Papadopoulos, 2012; Barão, 2017). Os cemitérios pré-históricos representam fontes importantes e únicas de práticas funerárias e sociais desde os estágios iniciais da civilização. No entanto, investigar esses locais com métodos geofísicos é desafiador devido a sinais de sepulturas frequentemente pequenas e não uniformemente distribuídas, podendo ser afetados por complexas condições geológicas e antropogênicas locais. Além disso, as características físicas das sepulturas (como paredes, piso, teto e enchimento) podem nem sempre apresentar uma assinatura geofísica discernível, dependendo de suas dimensões, materiais de construção e material de enchimento (por exemplo, Whiting *et al.*, 2001; Gonçalves et Juerges *et al.*, 2010; Kemp *et al.*, 2014).

Mais recentemente, a aplicação do GPR em arqueologia continuou a evoluir, incorporando técnicas avançadas de processamento de dados. Zhao *et al.* (2015) aplicaram estas técnicas para investigar tumbas antigas na China, demonstrando a contínua evolução da metodologia. Um estudo particularmente notável foi realizado por Gustavsen *et al.* (2020), que utilizaram GPR de alta resolução e grande escala para mapear uma cidade viking inteira na Noruega. Este trabalho revolucionou a compreensão da urbanização viking, revelando estruturas nunca vistas e

demonstrando o potencial do GPR para transformar nossa compreensão de assentamentos antigos em larga escala.

O interesse em trazer conceitos da arqueologia para o Brasil se deu tardiamente, apenas no século XIX, e se deu pela necessidade de conhecimento territorial e histórico; pela curiosidade dos naturalistas europeus na exploração do território brasileiro; pelo desenvolvimento das teorias antropológicas e as estratégias de expansão do comércio europeu na América do Sul. Um dos pioneiros da arqueologia no Brasil foi Peter Wilhelm Lund, um naturalista dinamarquês que, no século XIX, realizou extensas pesquisas nas cavernas do estado de Minas Gerais. Lund descobriu fósseis de animais extintos e os vestígios de atividade humana pré-histórica (Holten *et al.*, 2017).

Já o emprego do GPR em investigações arqueológicas no Brasil teve início nas últimas décadas do século XX, também considerado tardio em comparação com sua utilização em contextos europeus e norte-americanos, onde o GPR já era empregado desde os anos 1970. Em um estudo pioneiro, Roosevelt (1991) empregou o GPR, juntamente com métodos elétricos e magnéticos, para identificar vestígios cerâmicos na Ilha do Marajó, revelando a ocupação histórica da região por povos indígenas.

Cezar *et al.* (2001) aplicaram o GPR em investigações nos sítios arqueológicos de Serrano e Morro Grande, localizados no estado do Rio de Janeiro. Os pesquisadores descobriram urnas funerárias enterradas em camadas de areia e argila. A correlação desses resultados com as escavações arqueológicas permitiu uma interpretação mais segura de novos perfis adquiridos em áreas com características geológicas similares.

Em um estudo subsequente, Schimmel *et al.* (2002) utilizaram o GPR e métodos magnéticos para caracterizar o sítio arqueológico de sambaqui fluvial de Capelinha, no município de Cajati, São Paulo. Através do GPR, foi possível mapear uma região com ausência de refletores, que coincidia com a presença de uma camada espessa de conchas de sambaqui, variando entre 1 e 1,5 metros de espessura, conforme verificado nas escavações arqueológicas. Os autores sugerem que a falta de reflexão do sinal do GPR pode ser atribuída à presença de matéria orgânica misturada às conchas e a alterações na estrutura do sambaqui, fatores que aumentam a condutividade do solo e, conseqüentemente, atenuam o sinal do radar.

Porsani *et al.* (2010) conduziram um estudo no sítio Lapa do Santo, em Minas Gerais, utilizando GPR para mapear a subsuperfície de um abrigo rochoso e identificar áreas de potencial arqueológico, demonstrando a versatilidade do método em diferentes contextos geológicos.

Em estudos realizados por Rodrigues *et al.* (2009), o método GPR foi empregado na análise de importantes sítios arqueológicos no litoral sul, os quais ainda são pouco explorados e conhecidos.

Esses sítios abrigam sambaquis, compostos por conchas carbonáticas, que indicam a presença humana na região durante o período pré-colonial, entre 7,5 e 1,3 mil anos atrás.

Aragão *et al.* (2010) aplicaram o GPR no sítio do Engenho Murutucu, em Belém, identificando estruturas arqueológicas enterradas e delimitando áreas para futuras escavações. Este trabalho foi particularmente relevante por demonstrar a aplicabilidade do GPR em contextos arqueológicos históricos no Brasil, contribuindo para a compreensão da ocupação colonial na Amazônia.

Estudos mais recentes continuam a expandir o uso do GPR na arqueologia brasileira. Buco *et al.* (2020) utilizaram GPR no Parque Nacional Serra da Capivara, no Piauí, para investigar estruturas arqueológicas subterrâneas, contribuindo para a compreensão da ocupação pré-histórica na região. Em uma aplicação ainda mais recente, Santos *et al.* (2023) empregaram técnicas avançadas de GPR no sítio arqueológico de São Miguel das Missões, no Rio Grande do Sul, mapeando estruturas jesuíticas enterradas. Este último estudo não apenas demonstra a contínua relevância do método no contexto arqueológico brasileiro, mas também ilustra como as técnicas de GPR continuam evoluindo e se adaptando às necessidades específicas de diferentes sítios arqueológicos no país.

Em resumo, o GPR e outras técnicas geofísicas representam um avanço significativo nos métodos de pesquisa arqueológica, permitindo uma análise detalhada e não destrutiva de grandes áreas. Este progresso não apenas facilita a descoberta de novos sítios, mas também enriquece nossa compreensão das civilizações antigas e de sua relação com o ambiente (Conyers, 2006a; 2013). Através da aplicação dessas técnicas, é possível alcançar uma visão mais abrangente dos sítios arqueológicos, contribuindo significativamente para o campo da arqueologia e para a preservação do patrimônio cultural.

CAPÍTULO 4

4. Desenvolvimento

Nesta seção, serão descritas todas as etapas do desenvolvimento deste trabalho, como: caracterização da área de estudo, equipamentos utilizados, descrição das campanhas de aquisição,, disposição espacial das linhas GPR adquiridas, processamento dos dados, resultados, bem como as metodologias utilizadas para as interpretações.

É importante ressaltar que, embora múltiplas campanhas tenham sido realizadas, esta dissertação abordará somente sobre o levantamento de dados da primeira campanha, em 2021, utilizando a antena de 400 MHz. As informações sobre as campanhas subsequentes serão apresentadas apenas para fins documentais e serão abordadas em futuros trabalhos.

4.1 Área de Estudo - Sítio GO-Ja-02

O Sítio Arqueológico GO-Ja-02, está inserido no Núcleo A, margem esquerda do Rio Verde, em um paredão de arenito da Formação Botucatu, intercalado com fluxos de basalto da Formação Serra Geral, que se desenvolve a partir de um bloco proeminente do paredão (Figura 11).

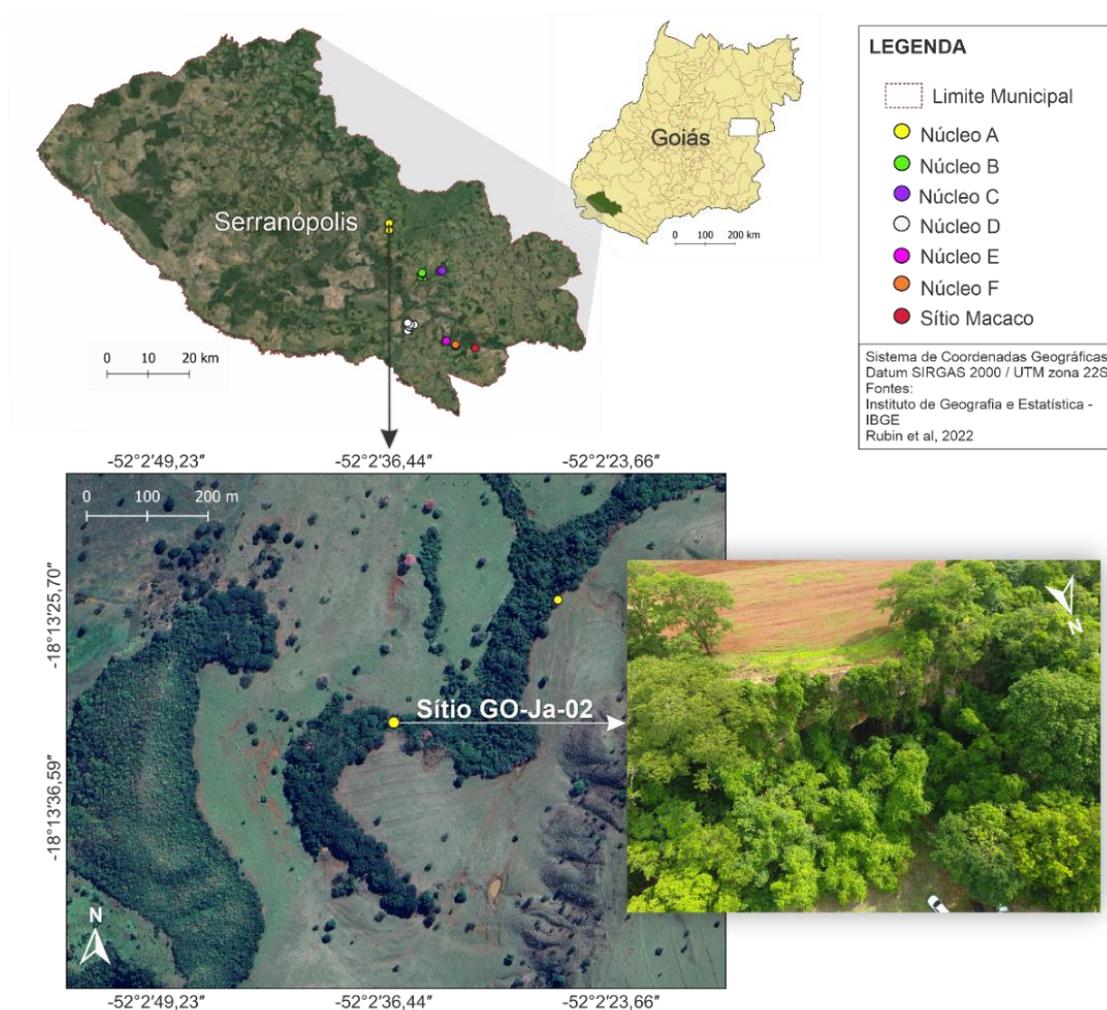


Figura 11 – Mapa ilustrando a localização do Sítio Arqueológico GO-Ja-02, objeto de estudo da presente pesquisa; mapa com imagem aérea do com maior detalhe sobre a localização do Sítio, pertencente ao Núcleo A; fotografia do abrigo tirada por drone.

Este espaço é organizado em diversas áreas, sendo duas principais. Schmitz *et al.* (1989) descreve uma dessas áreas como A (compartimento A), que se direciona para o norte e possui uma abertura de 43 metros e altura de 13 metros, com um teto suficientemente alto para permitir a entrada do sol até o seu interior mais profundo. A infiltração de água no local ocorre pela parede do fundo que escorre ou goteja água constantemente, e pela linha de goteira do teto. Ainda segundo Schmitz *et al.* (1989), esta área conecta-se a uma segunda área B (compartimento B) por um portal natural com 280 cm de largura. O compartimento B é marcado por uma profundidade de 29 metros, uma boca de 23 metros e um teto alto, onde o sol penetra pela manhã, mas não alcança o fundo (Figura 12).

Schmitz *et al.* (1989) indicam que o sítio foi ocupado de forma intensa devido ao espaço generoso e à presença contínua de gotejamento de água, o que resultou na formação de um pequeno lago permanente. No entanto, eles observam que o abrigo provavelmente não era adequado para mais do que uma ou duas famílias ao mesmo tempo. Além disso, sugerem que o compartimento A parece

ter sido mais utilizado para acampamento e permanência, enquanto o compartimento B possivelmente tinha um propósito ritualístico.

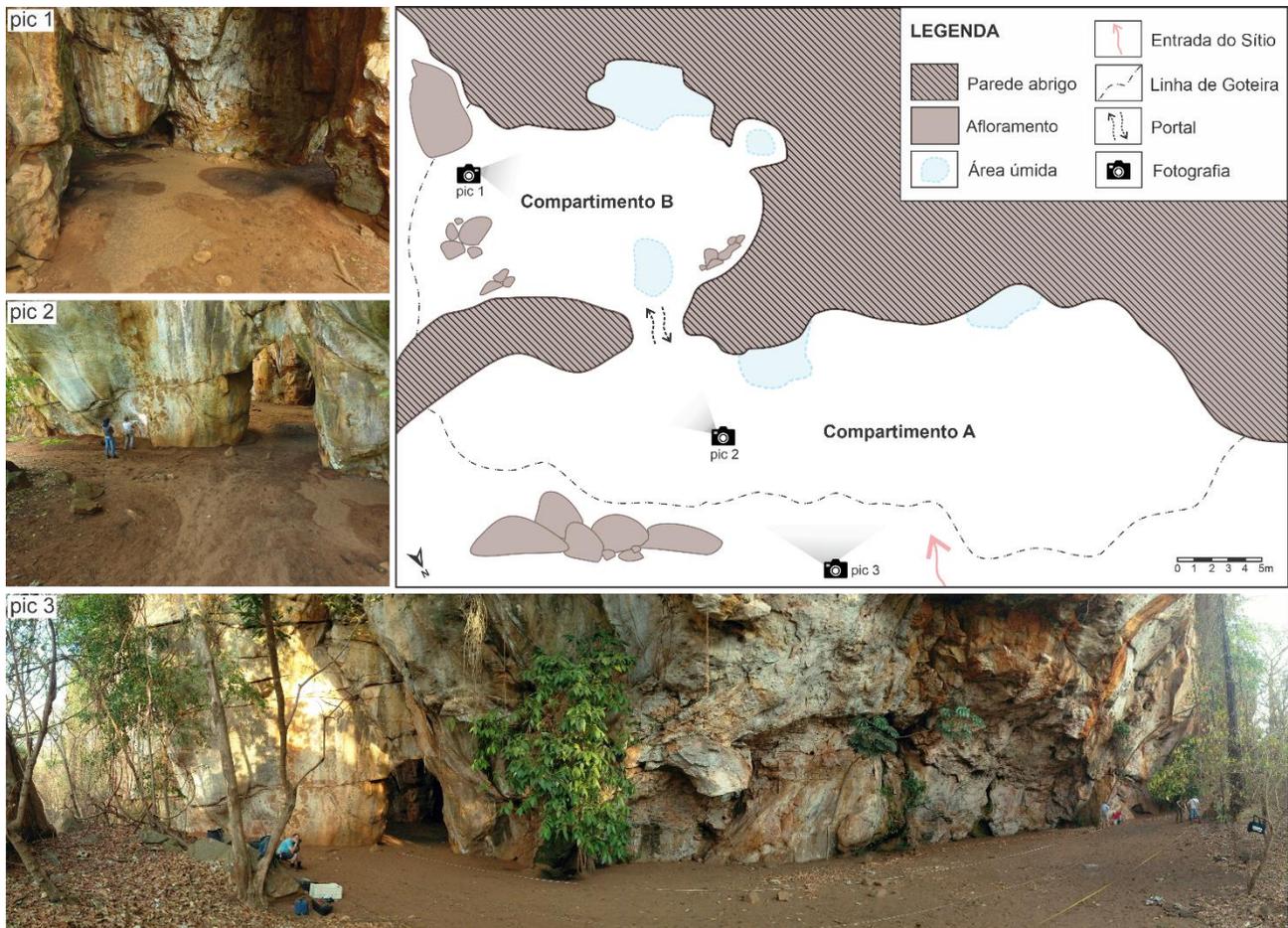


Figura 12 – Croqui do Sítio Arqueológico GO-Ja-02 e fotografias da área. Croqui modificado de Schmitz *et al.* (1989).

4.2 Aquisição de dados GPR

A aquisição de dados GPR ocorreu com o sistema SIR 3000 (*Geophysical Survey Systems, Inc.*), acoplado a antenas blindadas de frequência central de 200 MHz, 400 MHz e 900 MHz (Figura 13).

A aquisição de dados GPR foi conduzida em quatro campanhas distintas ao longo de três anos: uma no ano de 2021, duas em 2022 e outra em 2023. Estas etapas contaram com a colaboração de pesquisadores arqueólogos da PUC e geofísicos do Instituto de Geociências da UnB (IG/UnB).

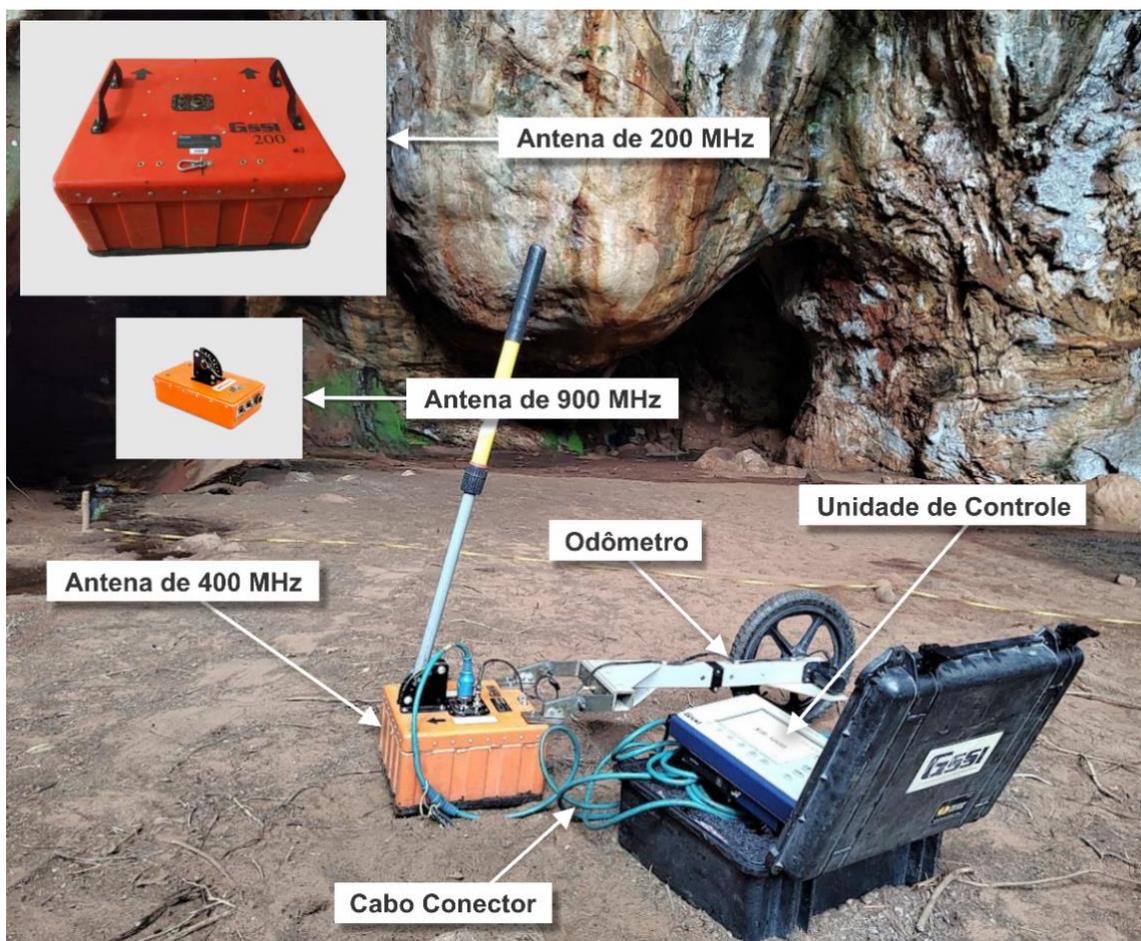


Figura 13 - Fotografias ilustrando os equipamentos utilizados para aquisição dos perfis de GPR 2D, sendo: antenas de 200, 400 e 900 MHz, odômetro para o acionamento do trigger, unidade de controle com sistema SIR 3000 (GSSI) e cabo conector da antena

O uso de antenas com frequências centrais diferentes, se complementam e ao mesmo tempo atendem a propósitos distintos na pesquisa. A antena de 400 MHz foi escolhida para a caracterização do arqueoambiente por oferecer um bom equilíbrio entre resolução e profundidade de penetração.

- **Primeira Campanha:**

Antecedendo o início das escavações no sítio, a primeira campanha foi realizada em setembro de 2021. Para aquisição de dados, utilizou-se uma antena GPR de 400 MHz para efetuar levantamentos pseudo-3D nos Compartimentos A e B, registrando perfis 2D paralelos, em modo *common offset* (Figura 14a e 14b).

A delimitação de áreas nos compartimentos A e B foi estabelecida de maneira a maximizar a linearidade e a abrangência dos espaços. Os dados de GPR pseudo-3D gerados são obtidos através de algoritmos de perfis 2D equidistantes armazenados sequencialmente, mas não necessariamente de igual comprimento. Para garantir a precisão dos modelos pseudo-3D, os perfis 2D paralelos devem

ter a coordenada inicial idêntica (Sandmeier, 2011). No entanto, devido às irregularidades na área, isso pode ser difícil de alcançar em condições reais.

Uma solução pode ser encontrada implementando um sistema de georreferenciamento a partir da geração de uma reflexão comum a todos os perfis (Borges, 2007; Canata, 2019). A coordenada dessa reflexão em cada perfil, ou seja, sua ocorrência em “x” metros, é ajustada linearmente entre os perfis paralelos para assegurar a correlação entre eles. Para gerar esse ponto de reflexão comum em todos os perfis, foi utilizado um cabo de aço em superfície, disposto entre duas trenas (Figura 14c). Além disso, foram realizadas linhas de controle transversais para amarração dos dados.

Essa metodologia garante a precisão das aquisições por meio do ajuste no posicionamento dos perfis 2D, realizada no pré-processamento, padronizando as posições de reflexão do cabo de aço presentes nos radargramas.



Figura 14 - Fotografias das aquisições de campo da primeira campanha, sendo: a) Aquisição de dados GPR com antena de 400 MHz da Área A1, compartimento A; b) Aquisição de dados GPR com antena de 400 MHz da Área B1, compartimento B; c) Esquema ilustrando o referenciamento da aquisição da Área A.

A aquisição de dados no compartimento A consistiu em 290 perfis GPR paralelos, adquiridos com espaçamento de 10 cm, que cobriram uma área de aproximadamente 250 m². No compartimento B foram obtidos 86 perfis GPR paralelos, adquiridos com espaçamento de 20 cm, que cobriram uma área de cerca de 138 m². As áreas investigadas nos Compartimentos A e B foram denominadas Área A1 e Área B1, respectivamente (Figura 15). O propósito dessas aquisições foi de realizar uma varredura abrangente para obter uma visão geral das características subsuperficiais e identificar pontos de interesse para novas investigações com o GPR (anomalias) e escavações futuras.

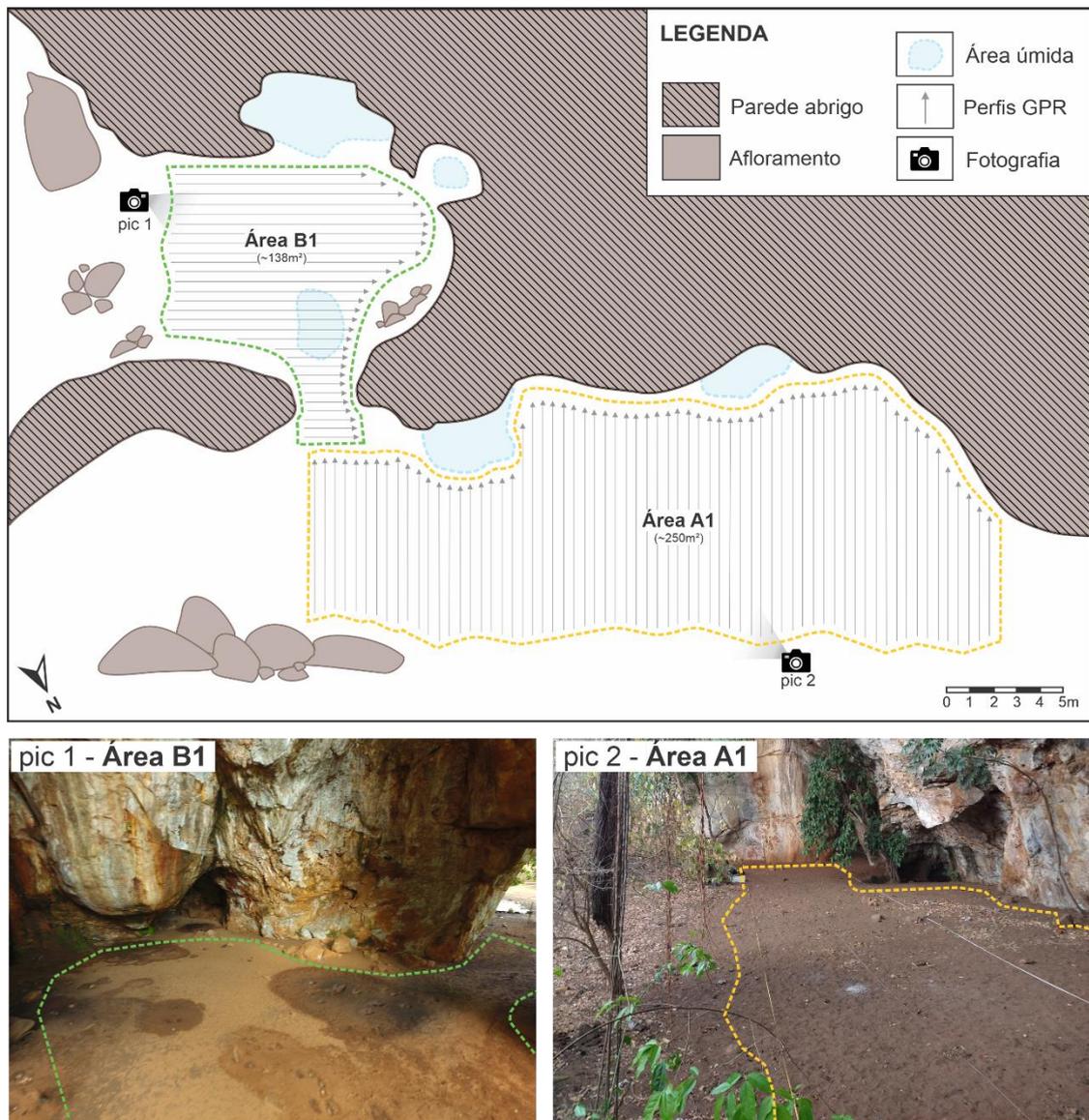


Figura 15 - Croqui com as projeções das linhas de aquisição GPR e fotografias dos respectivos compartimentos B e A. Croqui modificado de Schmitz *et al.* (1989).

- **Segunda Campanha:**

A segunda campanha ocorreu em novembro de 2021, nesta ocasião a equipe de arqueólogos estava com uma escavação em andamento. Foi utilizado um modelo diferente de GPR, o Detector DUO da IDS, focando em áreas potenciais identificadas na campanha anterior (Figura 16).



Figura 16 - Fotografia da aquisição de dados GPR, utilizando o equipamento Detector DUO, fabricado pela empresa IDS Georadar.

- **Terceira Campanha:**

A terceira campanha ocorreu em março de 2022, juntamente com a continuidade das escavações arqueológicas. Conforme mencionado anteriormente, após a análise dos dados coletados na primeira campanha, foram identificadas áreas de interesse no compartimento A para serem submetidas a estudos pseudo-3D de detalhe. Essas áreas foram nomeadas por Áreas A2, A3 (Figura 17) e situavam-se nas proximidades da área em escavação. Para aquisição foi utilizado o GPR SIR 3000, da empresa GSSI, acoplado a uma antena de 900 MHz. A transição para uma antena de frequência elevada teve como objetivo coletar imagens de alta resolução, bem como obter uma compreensão mais refinada das respostas reflexivas identificadas anteriormente.

A dimensão da área A2 foi de aproximadamente 3x9 m, sendo coletados 62 perfis GPR paralelos, espaçados de 10 em 10 cm. Já na área A3, foram adquiridos 64 perfis, abrangendo uma área de 3x4 m, também espaçadas em 10 cm.

Adicionalmente, uma área denominada por A4 também foi estudada. Esta área está localizada em uma região do compartimento A, a qual a delimitação da área A1 não pode abranger devido a falta de linearidade na localização de ambas, pois tal fato impossibilita a construção do arranjo pseudo-3D. Na área A4 foram coletados 79 perfis paralelos com espaçamento de 10 cm, abrangendo uma área de aproximadamente 4x3 m.

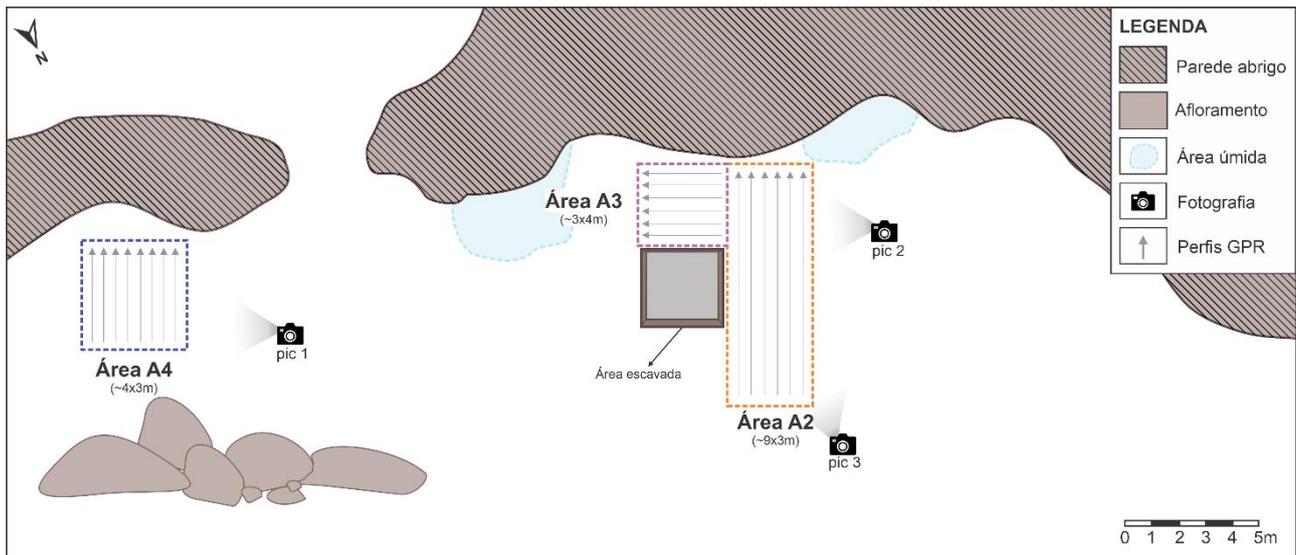


Figura 17 – Esquema ilustrando: croqui do sítio arqueológico com a indicação das áreas de interesse A2, A3 e A4; "Fotografia" representa as áreas e a direção de onde as fotografias foram tiradas; "Perfis GPR" indica as direções de aquisição dos perfis 2D paralelos, coletados com espaçamento de 10cm. "Área úmida" destaca regiões com presença de umidade decorrente da percolação de água da parede do abrigo. Croqui modificado de Schmitz *et al.* (1989).

- **Quarta Campanha:**

A quarta campanha foi realizada um ano depois, em março de 2023, nessa ocasião o estágio da escavação tinha avançado consideravelmente. Essa campanha teve o objetivo de complementar os estudos relativos a caracterização do paleoambiente, bem como realizar aquisições estratégicas para confirmar e amarrar a resposta reflexiva do GPR com os vestígios arqueológicos. Foram coletados 57 perfis aleatórios nos dois compartimentos, utilizando as antenas de 400 e 200 MHz (Figura 18).

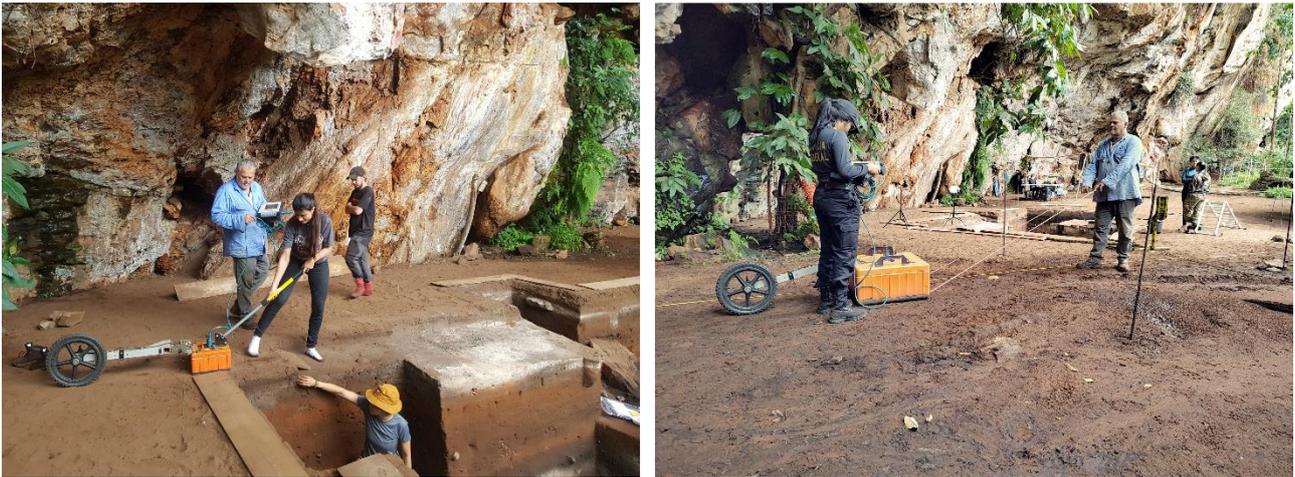


Figura 18 - Fotografias da aquisição de dados GPR da quarta campanha, utilizando o equipamento SIR 3000 com antenas de 900 e 200MHz respectivamente.

4.3 Processamento de dados

Os dados GPR 2D da Área A1 e B1, coletados na primeira campanha, foram processados utilizando o software ReflexW, versão 8.5 (Sandmeier 2010). A rotina de processamento para seções 2D seguiu a seguinte sequência (Figura 19):

- **Correção do tempo zero:** Ajusta o início do registro de tempo do sinal GPR para zero no contato com o solo. Esse ajuste garante que a base de tempo esteja correta e que todas as medidas de profundidade sejam precisas.
- **Filtro Dewow:** Remove as flutuações de baixa frequência (ou "wow") do sinal, que podem ser causadas por variações lentas na transmissão de energia ou por características do equipamento. Esse filtro é importante para estabilizar o sinal antes de análises mais detalhadas.
- **Remoção do Background:** Elimina ruídos de fundo consistentes e outras interferências que não são parte das reflexões de interesse. Isso ajuda a destacar as características verdadeiras do subsolo ao remover componentes estáticos ou repetitivos que não representam variações estruturais ou composicionais.
- **Ganho de decaimento de energia:** Compensa a perda de energia do sinal à medida que ele penetra mais profundamente no subsolo, aumentando a amplitude dos sinais recebidos de profundidades maiores para que eles possam ser comparáveis em magnitude aos sinais de menor profundidade.
- **Filtro passa-banda:** Aplica um filtro que permite apenas a passagem de sinais dentro de uma banda de frequências específica, eliminando frequências muito baixas e muito altas. Isso é útil

para reduzir ruídos e melhorar a clareza das reflexões de interesse.

- **Migração Diffraction Stack:** Corrige a posição de elementos difratados no subsolo, como pequenos objetos ou irregularidades, que podem distorcer ou deslocar reflexões. Isso melhora a precisão da localização das características detectadas no subsolo.
- **Conversão do tempo para profundidade:** Transforma as leituras de tempo, que são como o radar registra os dados, em profundidade, usando a velocidade conhecida de propagação das ondas no material estudado. Isso é essencial para interpretar corretamente a localização das características subterrâneas.

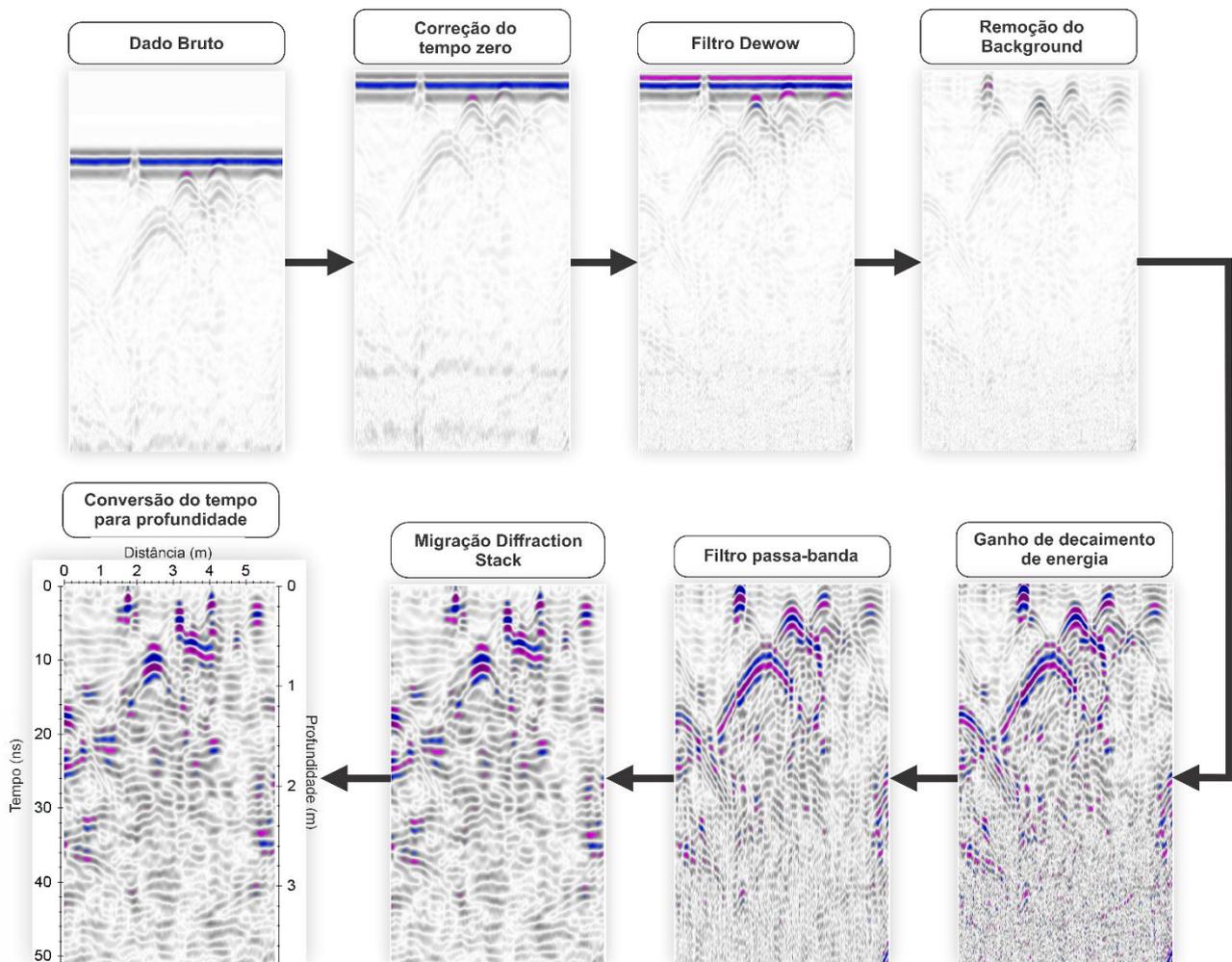


Figura 19 - Fluxograma do processamento de dados de GPR.

Segundo Jol (2008), a determinação da profundidade de um levantamento GPR pode ser realizada por meio de vários métodos: medições laboratoriais da constante dielétrica e da condutividade elétrica do solo; inserção de um objeto em profundidade conhecida para medir o tempo de viagem nos dois sentidos; medição angular das reflexões usando-se antena transmissor-receptor

separada (técnica *Common Mid-Point* - CMP); e análise da forma das hipérboles detectadas no radargrama.

Para conversão do tempo em profundidade foi seguido o quarto método descrito acima. Esse método envolve a análise da largura das hipérboles observadas nos radargramas, fornecendo uma estimativa da velocidade das ondas eletromagnéticas. Hipérboles estreitas indicam velocidades lentas da onda EM no solo; hipérboles largas indicam velocidades mais altas (Jol, 2008).

Os softwares de processamento GPR permitem a aplicação desses cálculos automaticamente. O usuário pode inserir a velocidade de propagação estimada ou permitir que o software a estime com base em reflexões hiperbólicas identificadas. A Figura 20 mostra a correspondência da hipérbole observada no software ReflexW:

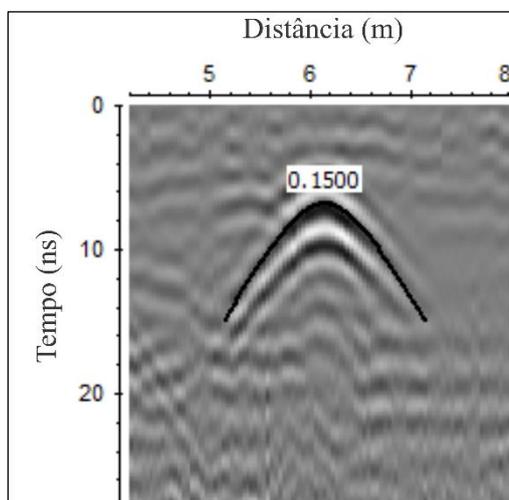


Figura 20 – Radargrama destacando o valor de 0,15 m/ns da velocidade do meio para uma hipérbole identificada em um dos perfis.

4.3.1 Geração dos perfis GPR pseudo-3D

Um modelo pseudo-3D pode ser construído armazenando sequencialmente as diferentes linhas 2D dentro de um único arquivo (bloco pseudo-3D). As linhas 2D utilizadas para formar o bloco pseudo 3D, podem estar processadas ou serem dados brutos. No caso de serem dados brutos, o processamento é feito para todo o bloco pseudo-3D bruto. Conforme mencionado anteriormente, os perfis 2D coletados devem apresentar coordenada inicial idêntica, bem como incrementos fixos, como o número de traços, o número de pontos por traço e o tempo (Sandmeier, 2011). Desse modo, a posição da reflexão comum, gerada pelo cabo de aço, foi corrigida para o bloco pseudo-3D conforme demonstrado na Figura 20 a seguir:

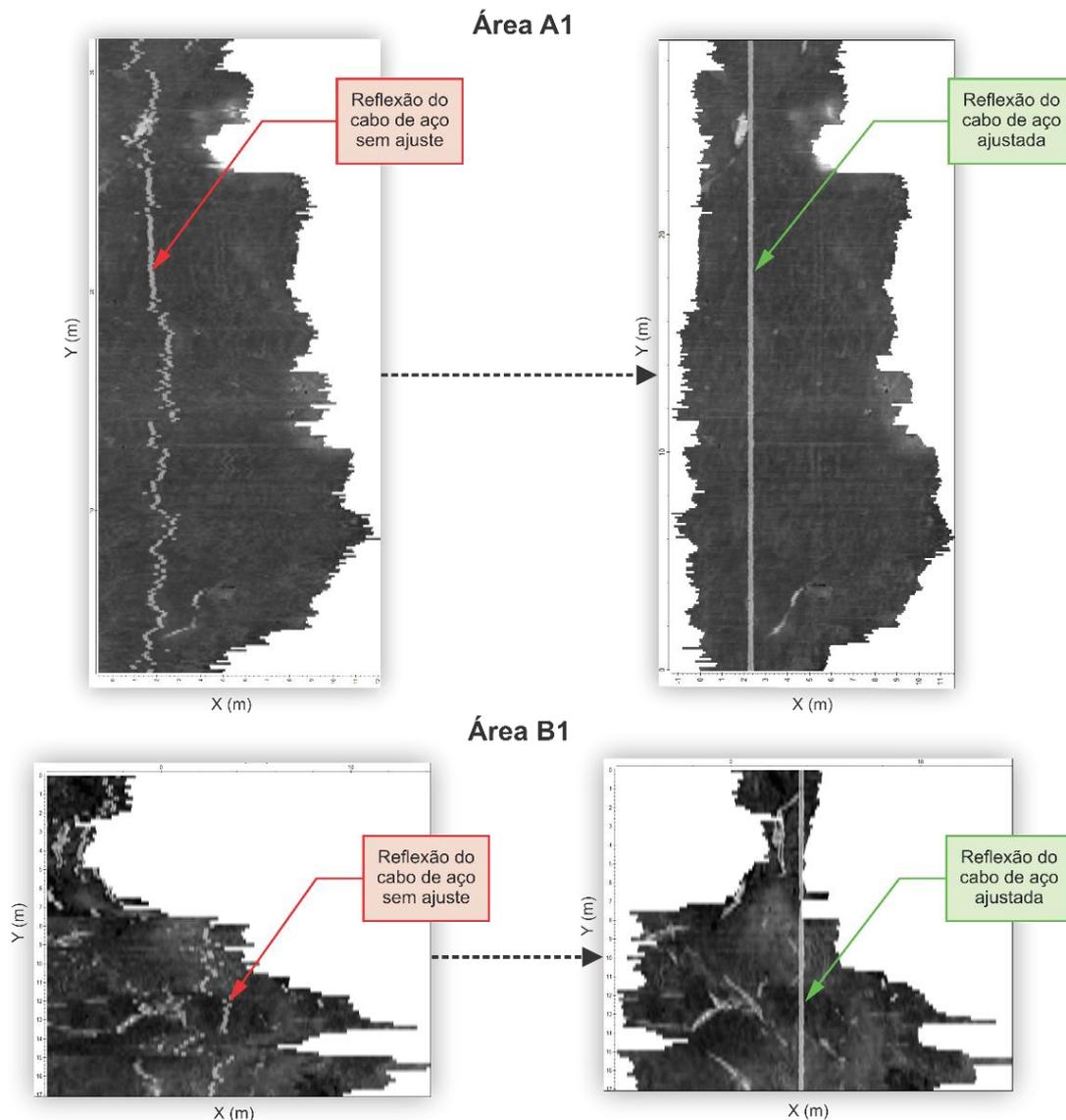


Figura 21- Perfis GPR pseudo-3D gerados para as áreas A1 e B1, onde sem o ajuste da reflexão do cabo de aço e à direita após a correção.

4.4 Resultados e Interpretações

Os resultados das investigações arqueológicas GPR dependem não só das competências do operador, mas também de uma série de fatores ambientais. De acordo com Ristić *et al.* (2020), alguns fatores podem afetar significativamente a precisão e a eficácia do GPR nas investigações arqueológicas. Esses fatores podem incluir: o teor de umidade e a composição mineral do solo, bem como o tamanho, a forma, a profundidade e o estado de conservação dos objetos ou restos mortais buscados.

No mesmo sentido, Conyers (2012) enfatiza que para interpretar imagens bidimensionais e tridimensionais de dados GPR, os usuários devem pensar geologicamente, biologicamente, geofísica

e arqueologicamente, muitas vezes ao mesmo tempo. Sendo assim, a essência de qualquer interpretação do GPR reside na habilidade de reconhecer algumas limitações desse método e, no mínimo, adquirir conhecimento sobre as variáveis que podem influenciar a área onde os dados foram coletados.

Na investigação do Sítio GO-Ja-02, a presença de fatores ambientais introduziu uma camada adicional de desafio na interpretação dos dados GPR. No contexto da área de estudos, esses fatores foram:

- Dinâmica de gotejamento, percolação e retenção da água no solo da área;
- Presença de elementos com características reflexivas semelhantes: blocos de rocha e raízes;
- Estratigrafia complexa, com diferentes ciclos deposicionais;

A consideração destes fatores foi importante para a interpretação precisa dos dados GPR, demandando uma abordagem interdisciplinar na análise, conforme sugerido por Conyers (2012). Reconhecer estas limitações e variáveis específicas da pesquisa permite uma interpretação mais cuidadosa, potencialmente levando a uma compreensão mais precisa dos resultados GPR.

4.4.1 Padrões de Reflexão

Mitchum *et al.* (1977) afirmam que a interpretação do resultado de um radargrama do GPR é realizada principalmente através da diferenciação dos padrões de reflexão apresentados nos dados.

Uma série de traços de reflexão coletados ao longo de uma seção, provenientes de interfaces planas com impedâncias elétricas distintas, gerará um conjunto de pulsos refletidos alinhados na mesmo tempo de registro ao longo do radargrama, que é chamada simplesmente de reflexão plana. Esses tipos de reflexões são geralmente geradas a partir de um limite subterrâneo, como um horizonte estratigráfico ou alguma outra descontinuidade física, como o lençol freático, um horizonte de solo ou qualquer outra estrutura horizontal de interesse (Conyers, 2013).

Ainda, segundo Conyers (2013), podem ocorrer reflexões de fontes pontuais, as vezes chamadas de difrações, que são geradas a partir de uma feição ou objeto com dimensões iguais ou inferiores ao conteúdo de frequência irradiado. Os materiais em subsuperfície que geram reflexões de fontes pontuais, como, por exemplo, bloco de rocha e raiz, são visíveis em perfis bidimensionais como reflexões hiperbólicas, mesmo que tenham sido gerados a partir de um “ponto”. Um grande número ou densidade de hipérbolas num perfil de reflexão pode muitas vezes dificultar a interpretação porque muitas reflexões hiperbólicas pouco espaçadas têm eixos que interferem entre si e produzem

perfis muito complexos (efeito de cáusticas; Berry & UPSTI, 1980).

Tais considerações foram o ponto de partida para a análise dos resultados, onde foi necessário realizar uma classificação das respostas reflexivas buscando uma compreensão aprofundada das características subsuperficiais das áreas. Essa tarefa ocorreu com a análise integrada dos padrões de reflexão (PR) das seções 2D com os cortes em profundidade nos blocos pseudo-3D, que foram caracterizados quanto a amplitude da reflexão, geometria e posicionamento das anomalias.

A análise dos dados GPR coletados no sítio arqueológico GO-Ja-02 revelou quatro padrões de reflexão distintos (PR-1 a PR-4), cada um associado a diferentes elementos do subsolo. A seguir serão apresentados os padrões de reflexão observados nos resultados de GPR obtidos na aquisição de dados no sítio:

- **PR-1 e PR-2: Blocos de rocha e Raízes**

Os padrões de reflexão PR-1 e PR-2 são correspondentes a blocos de rocha e raízes, respectivamente. Suas ocorrências variam entre um bloco de rocha único (PR-1a) ou um conjunto de blocos de rochas (PR-1b). Da mesma forma, as raízes podem aparecer como uma única raiz (PR-2a) ou um conjunto de raízes (PR-2b).

Nos radargramas 2D, um bloco de rocha (PR-1a) e uma raiz (PR-2a) possuem características reflexivas similares. Ambos são caracterizados por padrões de reflexões hiperbólicas de baixa, média ou alta amplitude, dependendo da geometria, da disposição do objeto e da impedância elétrica com o solo (Figuras 22c, 23c, 24c, 25c e 26c). Nos cortes em profundidade do bloco pseudo-3D (também conhecidos como “*time slices*” ou “*depth slices*”), que são visualizações horizontais dos dados GPR em diferentes profundidades, os blocos de rochas apresentam anomalias pontuais (Figura 22b). Em contrapartida, as raízes aparecem como anomalias alongadas e contínuas, com variações de sinuosidade, estreitamento e amplitude (Figuras 22b e 24b).

Com base nas diferenças anômalas, foi possível individualizar os refletores relacionados a blocos de rochas e raízes. No perfil 2D da Figura 22c, observa-se a ocorrência de reverberação de sinal relativo ao PR-1a, quando o bloco de rocha está muito próximo à superfície (fenômeno de reverberação do sinal eletromagnético). Essas reverberações são causadas pela alta impedância dielétrica das rochas, que reflete repetidamente o sinal dentro do bloco antes de retornar à antena receptora (Conyers, 2013), podendo ser um elemento complicador na análise dos dados, devido a possibilidade de mascarar reflexões de feições localizadas em profundidades logo abaixo da reflexão reverberada.

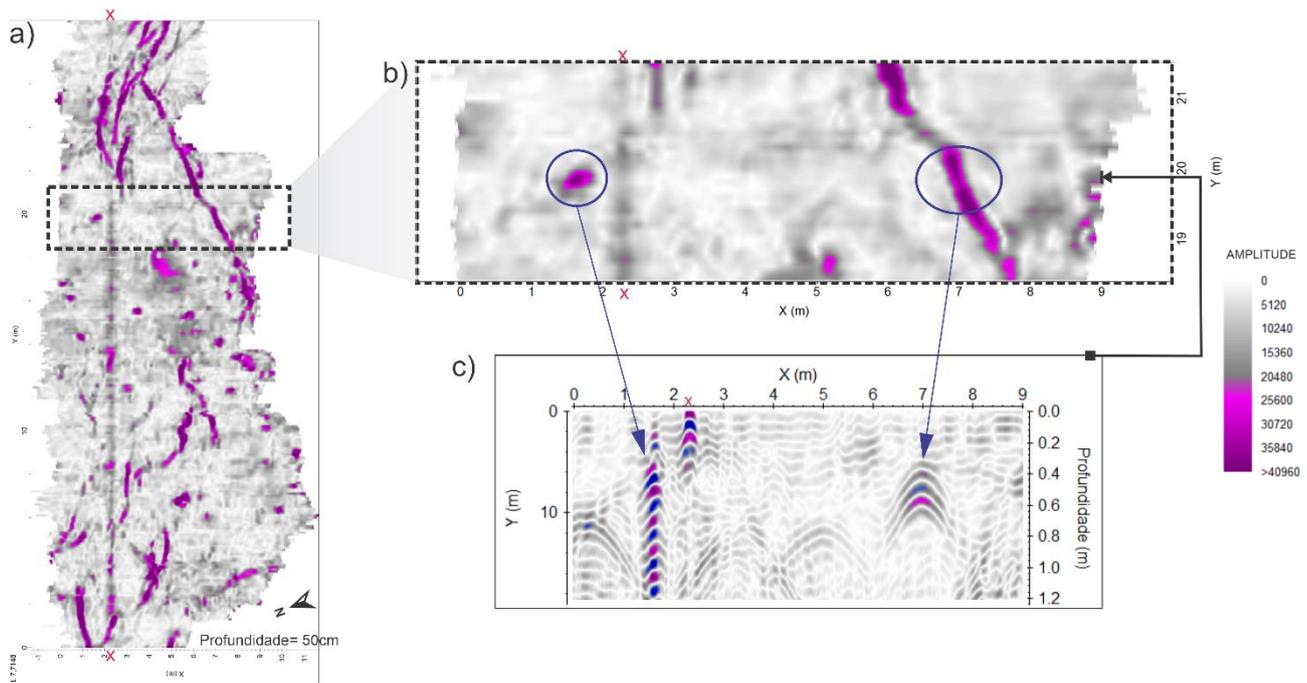


Figura 22 - a) Corte em profundidade (50 cm) do bloco pseudo-3D da área A1; b) Zoom de detalhe do corte em profundidade do bloco pseudo-3D com as anomalias de um bloco e rocha e uma raiz; c) Perfil 2D (posição 19,9 m) com a respectiva reflexão de um bloco de rocha (PR-1a) e de uma raiz (PR-2a). O símbolo x (vermelho) representa a anomalia do cabo de aço utilizado no georreferenciamento das seções.

Conjunto de blocos rochas e conjunto de raízes (PR-1b e PR-2b, respectivamente) também geram padrões de reflexão similares nos radargramas 2D. Nos perfis 2D as reflexões tanto das rochas (Figura 23c), quanto das raízes (Figura 24c), são caracterizadas por reflexões hiperbólicas caóticas devido à sua distribuição irregular e variação em tamanho. Já no corte em profundidade do bloco pseudo-3D, os conjuntos de raízes são caracterizados por anomalias alongadas, contínuas e são vistas se entrelaçando (Figura 24b).

Já os blocos de rocha apresentam-se como anomalias pontuais (Figura 23b). Caso os blocos de rocha estejam muito próximos uns aos outros, pode acontecer de ocasionar uma única anomalia pontual forte, aparentando ser apenas um único bloco de rocha de grande dimensão e não de vários blocos (Figura 25b). Sendo assim, a distinção entre as anomalias é mais efetiva no perfil 2D.

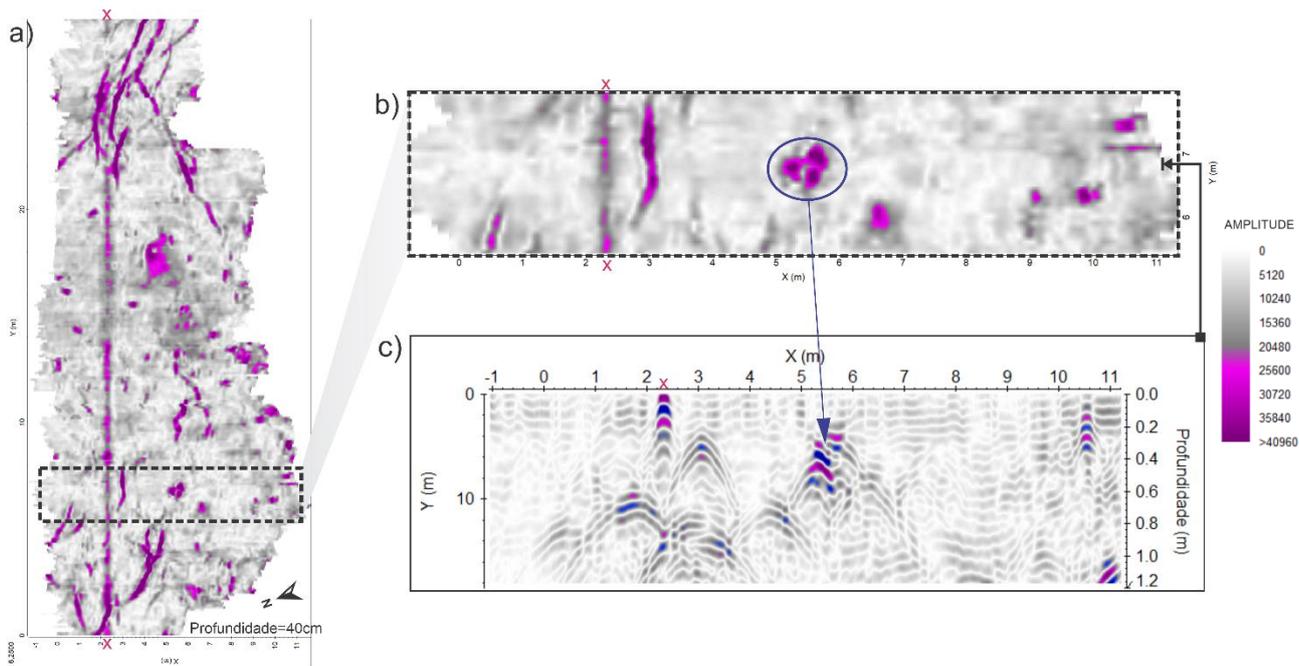


Figura 23 - a) Corte em profundidade (40 cm) do bloco pseudo-3D da área A1; b) Zoom de detalhe do corte em profundidade do bloco pseudo-3D com as anomalias de um conjunto de blocos de rochas; c) Perfil 2D (posição 6,80 m) com a respectiva reflexão do conjunto de blocos de rochas (PR-1b). O símbolo x (vermelho) representa a anomalia do cabo de aço utilizado no georreferenciamento das seções.

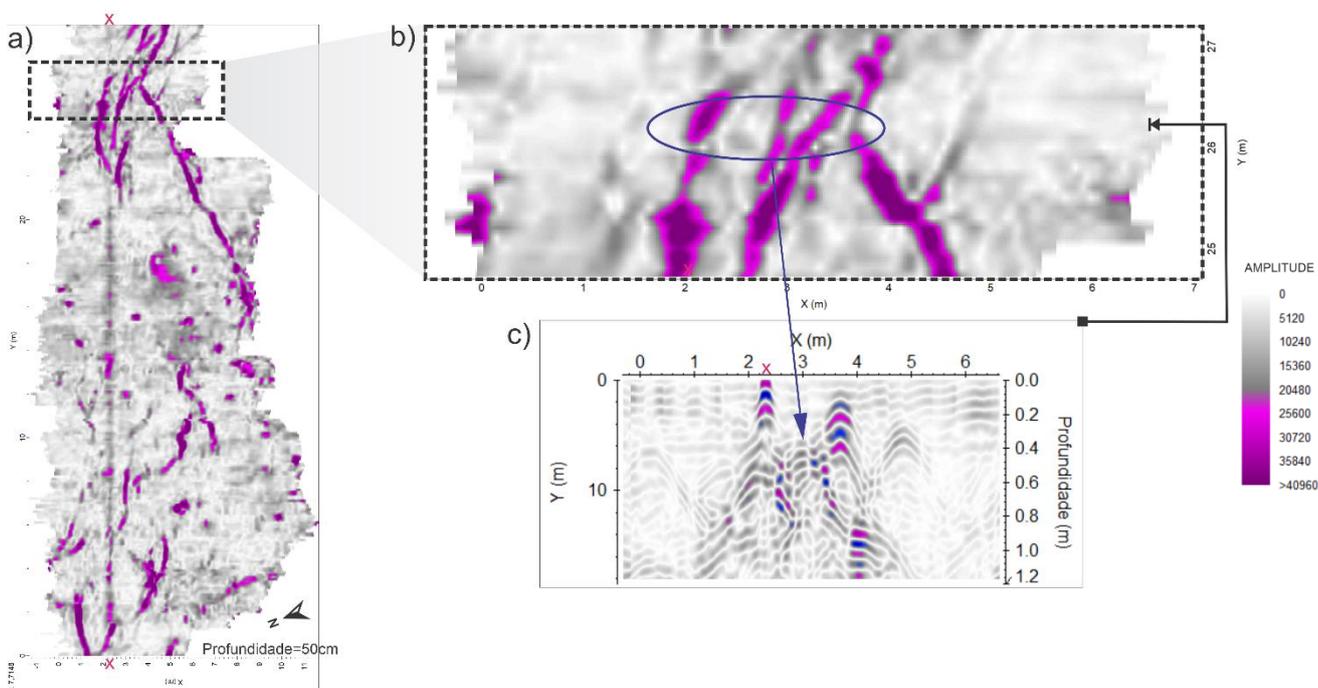


Figura 24 - a) Corte em profundidade (50 cm) do bloco pseudo-3D da área A1; b) Zoom de detalhe do corte em profundidade do bloco pseudo-3D com as anomalias de um conjunto de raízes; c) Perfil 2D (posição 26,2 m) com a respectiva reflexão de um conjunto de raízes (PR-2b). O símbolo x (vermelho) representa a anomalia do cabo de aço utilizado no georreferenciamento das seções.

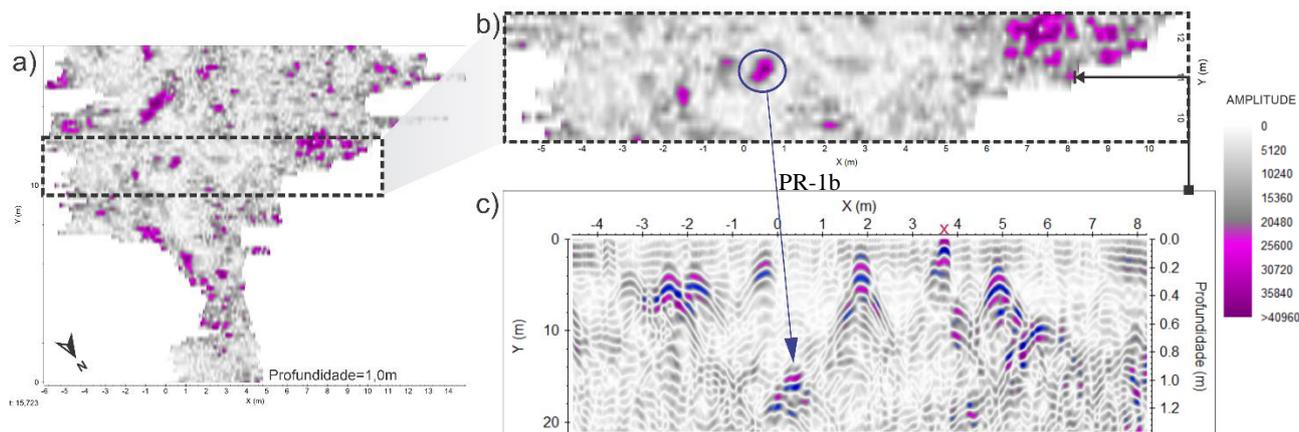


Figura 25 - a) Corte em profundidade (1 m) do bloco pseudo-3D da área B1. b) Zoom de detalhe do corte em profundidade do bloco pseudo-3D com a anomalia de um conjunto de blocos de rocha. c) Perfil 2D em $y=11,0$ m com a respectiva reflexão de um conjunto de blocos de rocha (PR-1b). O símbolo x (vermelho) representa a anomalia do cabo de aço utilizado no georreferenciamento das seções.

- **PR-3: Topo da rocha**

O padrão de reflexão PR-3 foi interpretado como representativo do topo da rocha em subsuperfície. No perfil 2D, esse padrão é caracterizado por reflexões hiperbólicas caóticas ou contínuas e de alta amplitude; quando contínuas elas são geralmente horizontais ou suavemente onduladas, marcando a interface entre o sedimento sobrejacente e a rocha subjacente (Figura 26c). Eventualmente, ocorre um refletor linear e inclinado oposto a direção do perfil, relacionado a reflexão da parede do abrigo (ruído eletromagnético).

No bloco pseudo-3D elas apresentam-se como uma espécie de “conglomerado” de anomalias pontuais, justapostas e de alta amplitude (Figura 26b).

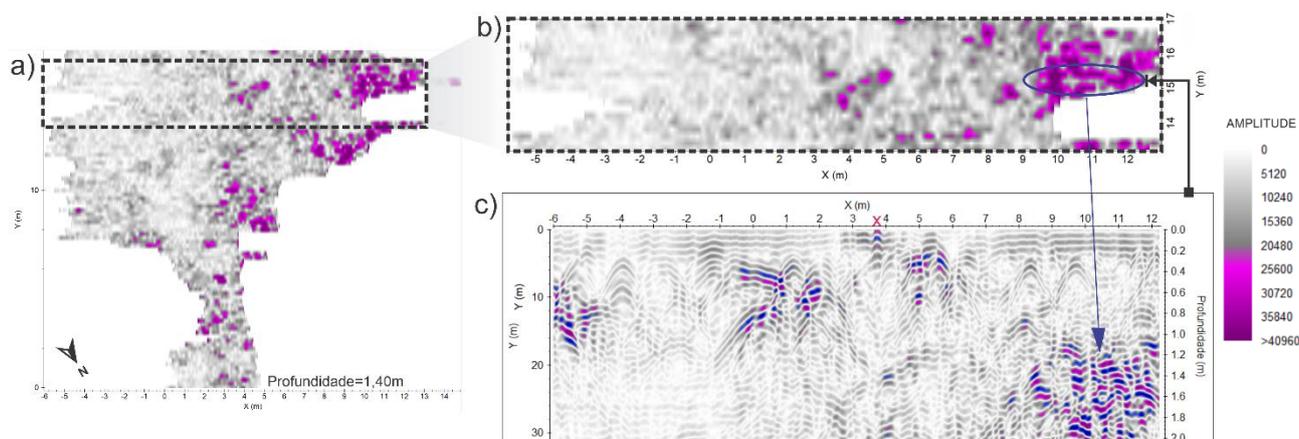


Figura 26 - a) Corte em profundidade (1,40 m) do bloco pseudo-3D da área B1; b) Zoom de detalhe do corte em profundidade da anomalia do topo da rocha; c) Perfil 2D em $y=15,1$ m com a respectiva reflexão do topo da rocha em subsuperfície (PR-3). O símbolo x (vermelho) representa a anomalia do cabo de aço utilizado no georreferenciamento das seções.

- **PR-4: Sedimento**

Considerando os estudos estratigráficos realizados na área, esperava-se obter uma boa correlação dos resultados de GPR no mapeamento das interfaces das camadas identificadas pelos pesquisadores. No entanto, os padrões de reflexão característicos de interfaces sedimentares foram observados em um número limitado de perfis. Uma possível explicação para essa limitação é a pouca diferenciação significativa entre as propriedades dielétricas dos materiais integrantes das camadas, que, por não apresentarem contrastes eletromagnéticos suficientes, não geraram reflexões significativas.

Apesar disso, uma interface apresentou visibilidade significativa. Norteando-se pelos estudos realizados na área Costa (2023), e pelas etapas de escavação e estudos preliminares em andamento, infere-se que o resultado encontrado esteja relacionado a presença de um sedimento carbonático. Nos resultados GPR 2D, o sedimento carbonático manifesta-se como um padrão de reflexão de amplitude média a alta (PR-4), com refletores planos, contínuos, horizontais ou levemente inclinados (Figura 27c). Já no corte em profundidade do bloco pseudo-3D, vemos uma região anômala de média a alta amplitude, contínua, com geometria que delineia uma área ampla (Figura 27b).

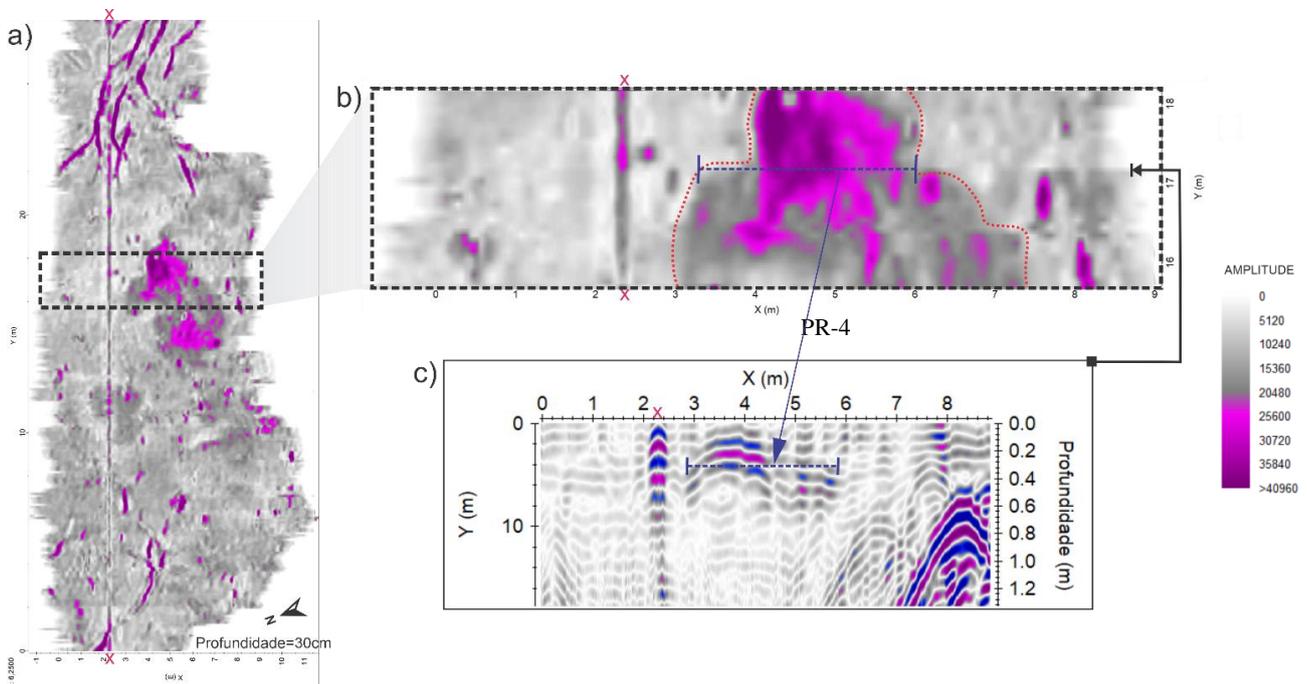


Figura 27 - a) Corte em profundidade (30 cm) do bloco pseudo-3D da área A1; b) Zoom de detalhe do corte em profundidade evidenciando as áreas anômalas relativas à presença do material carbonático c) Perfil 2D em $y=17,0$ m com a reflexão possivelmente relacionada a com a ocorrência do material carbonático (PR-4) em uma área delimitada por tracejado vermelho. O símbolo x (vermelho) representa a anomalia do cabo de aço utilizado no georreferenciamento das seções.

4.4.2 Caracterização do Arqueoambiente

Após a caracterização dos padrões de reflexão e a consequente formação do conhecimento a cerca de sua natureza, procedeu-se a interpretação quanto ao mapeamento anomalias identificadas nos cortes em profundidade do bloco 3D. No caso dos cortes em profundidade gerados a partir dos perfis coletados no compartimento A, eles foram plotados em relação a demarcação da área de escavação em andamento.

Para tal, foi utilizado o croqui da área de escavação, identificado na Figura 31. Este croqui é parte integrante dos arquivos do acervo do Projeto Serranópolis e ilustra o estado atual da escavação com base nas informações disponíveis (abril de 2024). Ele servirá como um referencial geográfico dos dados coletados no compartimento A, permitindo a orientação quanto a localização das anomalias analisadas.

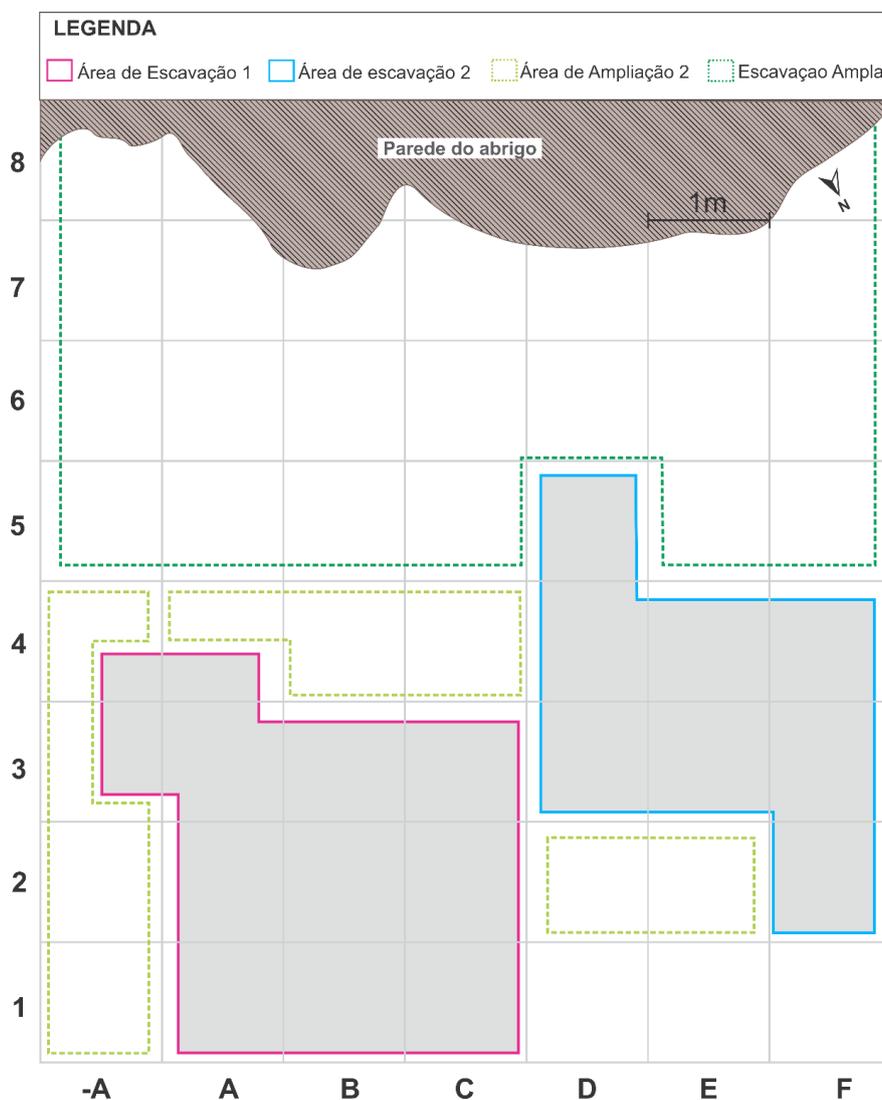


Figura 28 - Croqui ilustrando o estado atual da escavação com base nas informações disponíveis até abril de 2024.
Fonte: Modificado de Projeto Serranópolis.

Os padrões de reflexão identificados foram analisados buscando estabelecer uma correlação com as estruturas arqueológicas ou as características geológicas observadas nas áreas escavadas. A correlação desses dados teve o intuito de validar as anomalias detectadas pelo GPR, possibilitando estender a caracterização para as áreas ainda não escavadas do sítio. O mapeamento de anomalias será mostrado em diferentes figuras contendo os cortes em profundidade selecionados. Essa fase de mapeamento teve como objetivo maior servir de preparação para a subsequente intenção: sugestão de áreas com potencial para escavação.

A identificação e mapeamento das anomalias referentes ao início do topo da rocha em profundidade (PR-4), aliado a determinação da distribuição espacial de blocos de rochas (PR-1) e raízes (PR-1) constituem um dos principais requisitos para atingir o objetivo da caracterização do arqueambiente do Sítio GO-Ja-02. Na análise foi verificado a presença constante de anomalias de blocos de rocha e raízes, tanto no compartimento A quanto no B, bem como uma grande variação na amplitude dessas anomalias.

A variabilidade nas amplitudes percebidas para as raízes, pode ser atribuída a vários aspectos. A heterogeneidade do material é um fator principal, pois as raízes não são uniformes em sua composição, com diferentes partes como córtex, medula, xilema e floema apresentando propriedades dielétricas distintas (Guo *et al.*, 2013). O conteúdo de água nas raízes é outro fator, raízes com maior conteúdo de água geralmente apresentam amplitudes mais altas devido à maior permissividade elétrica da água (Hirano *et al.*, 2009). A orientação e geometria das raízes em relação à direção de propagação da onda eletromagnética, bem como seu tamanho, forma e sua profundidade no solo também afetam a intensidade da reflexão (Cui *et al.*, 2011). Por fim, o estado fisiológico das raízes influencia as amplitudes observadas, com raízes vivas e saudáveis geralmente produzindo amplitudes mais altas em comparação com raízes mortas ou em decomposição (Guo *et al.*, 2013).

Quanto aos blocos de rocha (blocos de arenito), as variações de amplitude podem ser explicadas quanto a composição mineral. Diferentes composições minerais dentro do arenito podem resultar em variações na permissividade elétrica (Martínez & Byrnes, 2001). A porosidade e saturação do arenito são igualmente importantes, afetando significativamente suas propriedades dielétricas (Cassidy, 2009). O tamanho e a forma dos blocos de arenito também influenciam as amplitudes observadas, com blocos maiores ou mais irregulares potencialmente produzindo reflexões mais intensas (Daniels, 2004). O grau de intemperismo dos blocos de arenito é outro fator relevante, podendo alterar as propriedades físicas e químicas da rocha e, conseqüentemente, sua resposta ao GPR (Sass, 2007).

A partir dessas constatações, pode-se inferir que as características reflexivas encontradas no contexto da área sinalizem um fator complicador aos eventuais estudos GPR voltados para a

identificação de artefatos arqueológicos. Principalmente devido à grande variação na amplitude dessas anomalias. Essas variações ocorrem devido aos diferentes valores obtidos para o coeficiente de reflexão entre os materiais que compõem o determinado elemento e o meio circundante, bem como a outros fatores que influenciam a interação das ondas eletromagnéticas com esses elementos. Porém, tal fato não descarta a possibilidade da identificação de artefatos arqueológicos. A utilização de rotinas de processamento avançadas, aliadas ao conhecimento das propriedades elétricas dos materiais em subsuperfície, podem ocasionar indicações de sucesso.

As Figura 29 e 30 apresentam três cortes em profundidade do bloco pseudo-3D, destacando o mapeamento das anomalias associadas aos blocos de rochas (linha amarela) e as raízes (linha preta) em profundidades rasas de 20 cm, 50 cm e 80 cm nas áreas A1 e B1. Essas profundidades foram escolhidas pois, na análise das anomalias com o aumento da profundidade do bloco pseudo-3D, verificou-se que até 1 m de profundidade há predominância de anomalias relacionadas a blocos de rocha menores que 50 cm e de sistemas de raízes.

Nos cortes da área A1 até 30 cm de profundidade (Figura 29a), é possível notar a presença significativa de blocos de rochas e raízes. Enquanto a presença de blocos de rocha é mais distribuída em toda área, as raízes se concentram nas áreas das quadrículas O a T e -C à -F. Na profundidade de 50 cm é observado um aumento na quantidade de blocos de rocha e na dimensão desses blocos e conseqüentemente, da amplitude das anomalias (Figura 29b). Do mesmo modo, a quantidade de raízes é intensificada, bem como de sua amplitude. Em 80 cm é percebida tanto uma diminuição da ocorrência e da amplitude das anomalias das rochas e das raízes (Figura 29c).

Nos cortes da área B1, até 30 cm de profundidade (Figura 30a), é possível notar principalmente a ocorrência de raízes, com a presença de alguns blocos de rochas. Na profundidade de 50 cm é observado acentuado aumento na quantidade de raízes, bem como da amplitude das anomalias e um pouco aumento na quantidade de blocos de rocha (Figura 30b). Esse cenário muda completamente em 80 cm, as anomalias relativas as raízes são pouco vistas, em contrapartida as anomalias referentes aos blocos de rochas são intensificadas (Figura 30c).

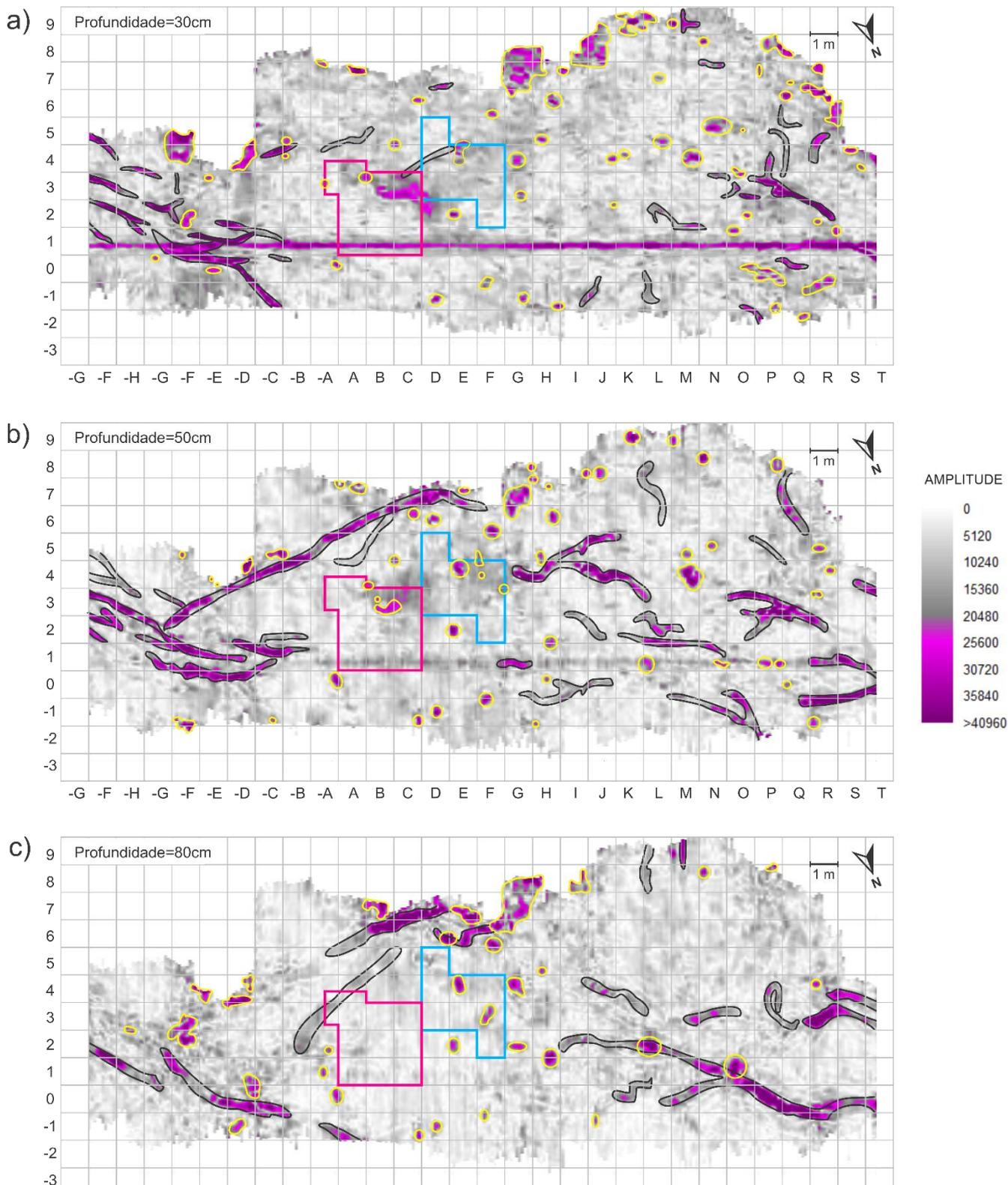


Figura 29 - Cortes em profundidades (20 cm, 50 cm e 80 cm) 3D mostrando o mapeamento das anomalias relacionadas a blocos de rochas (linha amarela) e raízes (linha preta) na área B1 em diferentes profundidades: 20 cm, 50 cm e 80 cm. Essas figuras exemplificam a metodologia de demarcação e identificação das anomalias.

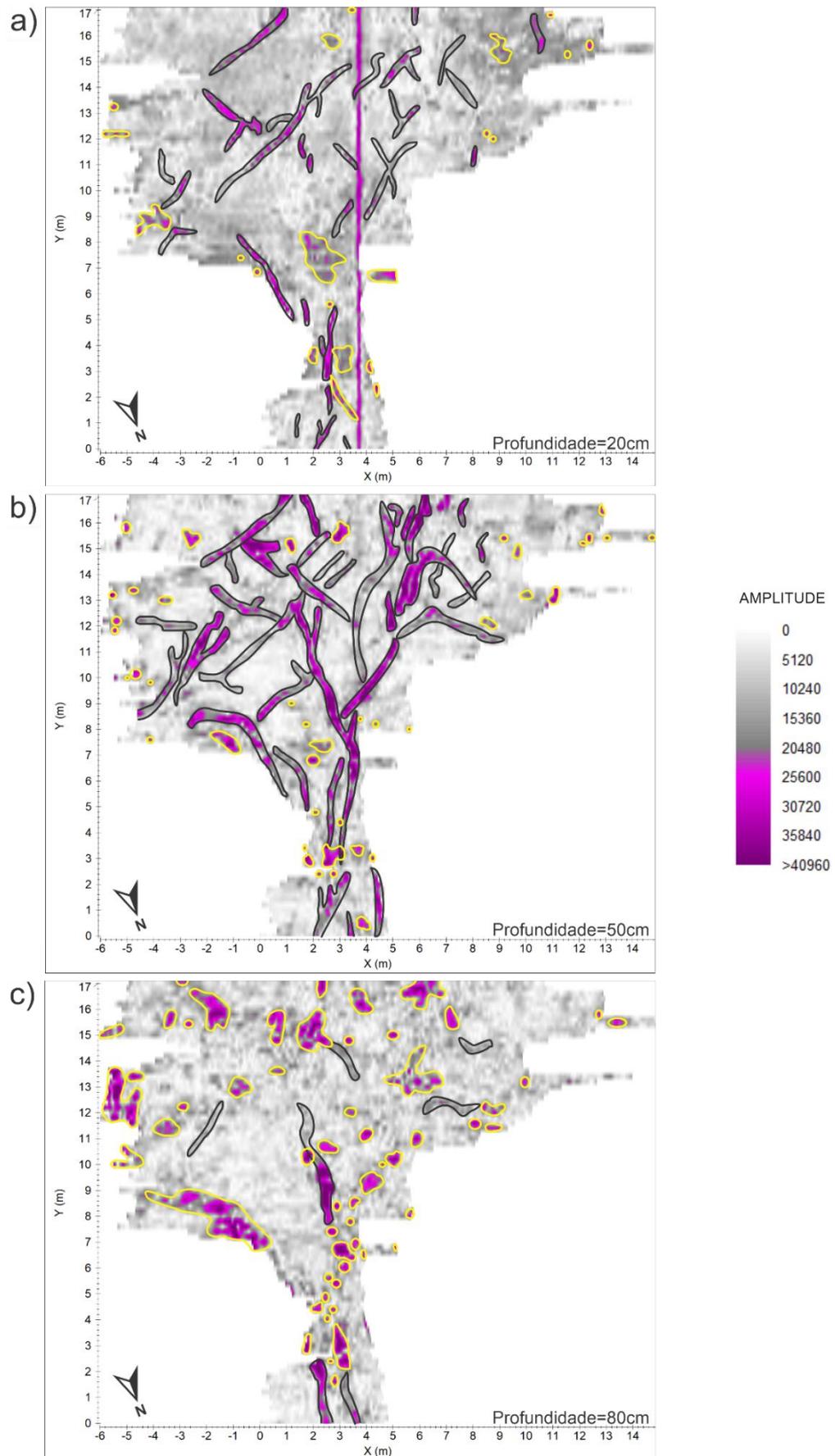


Figura 30 - Cortes em profundidades (20 cm, 50 cm e 80 cm) mostrando o mapeamento das anomalias relacionadas a blocos de rochas (linha amarela) e raízes (linha preta) na área B1 em diferentes profundidades: 20 cm, 50 cm e 80 cm. Essas figuras exemplificam a metodologia de demarcação e identificação das anomalias.

As próximas análises se concentram na visualização e interpretação de múltiplos cortes em profundidades mais elevadas (> 1m), oferecendo uma visão mais ampla da distribuição espacial, não só dos elementos blocos de rochas e raízes, mas também do topo da rocha em subsuperfície.

O objetivo principal desta análise é mapear e delimitar zonas de concentração e distribuição, desses elementos, bem como suas variações em diferentes profundidades. Ao identificar áreas com alta densidade de blocos rochosos e a profundidade em que a rocha é encontrada, podemos inferir aspectos importantes sobre a formação e evolução do sítio arqueológico. Essas informações são fundamentais para compreender o contexto geológico e arqueológico do local, além de serem essenciais para o planejamento de futuras escavações.

É importante destacar que a presença por si só de raízes e blocos de rocha não são impedimento para a inviabilidade de uma escavação. Na realidade, essas características geológicas e biológicas são comuns em muitos sítios arqueológicos e não necessariamente tornam a escavação impossível. No entanto, é crucial reconhecer que tais elementos podem tornar o processo de escavação mais desafiador e complexo.

A presença de raízes e blocos de rocha, especialmente quando ocorrem em conjuntos extensos, pode demandar técnicas de escavação mais cuidadosas e, por vezes, especializadas. Grandes sistemas de raízes, por exemplo, podem requerer remoção meticulosa para evitar danos a possíveis artefatos ou estruturas arqueológicas adjacentes. Da mesma forma, conjuntos de blocos de rocha de grande extensão podem necessitar de equipamentos específicos ou abordagens alternativas de escavação.

Estes desafios podem resultar em um ritmo mais lento de trabalho, aumentando o tempo necessário para a investigação de determinadas áreas. Além disso, podem exigir recursos adicionais em termos de mão de obra especializada, ferramentas e, possivelmente, tecnologias de suporte para garantir uma escavação precisa e segura. Portanto, este mapeamento servirá como uma ferramenta de consulta para os arqueólogos atuantes na área do sítio, auxiliando-os na tomada de decisão.

As Figuras a seguir, irão mostrar uma série de cortes em profundidade do bloco pesado-3D para a área A1 e B1, onde cada figura é composta por imagens de cortes em profundidades organizados em linhas e colunas. É importante notar que, embora a aquisição GPR tenha alcançado profundidades maiores, a análise foi limitada até o ponto onde não se detectavam mais variações substanciais nos dados. Além disso, para esses resultados foi utilizada uma rotina de processamento utilizando um ganho mais elevado com o objetivo principal realçar as anomalias.

Esta abordagem permite focar nas camadas que apresentam informações relevantes para a interpretação arqueológica e geológica do sítio. Para a área A1, a profundidade máxima analisada foi de 2,52 metros e os cortes em profundidade para esta área foram realizados em intervalos de

aproximadamente 17 cm. Para a área B1, foi de 1,63 metros, cortes em profundidade realizados a cada 10 cm aproximadamente. As profundidades máximas determinadas para cada área representam os limites além dos quais não foram observadas mudanças significativas nas características do subsolo detectáveis pelo GPR.

A decisão de iniciar as marcações em profundidades mais profundas para cada área (1,0 m para A1 e 90 cm para B1) complementa a análise das camadas mais superficiais apresentada nas figuras anteriores (Figuras 29 e 30). As zonas de maior amplitude, destacadas por linhas tracejadas pretas, indicam regiões onde o sinal do GPR apresenta respostas mais intensas, logo, mostram onde há maiores concentrações dos fatores que influenciam fortemente a reflexão das ondas eletromagnéticas do radar (raízes, blocos de rocha ou o topo da rocha). Estas marcações foram realizadas a partir de profundidades específicas para cada área estudada: na área A1, as zonas foram demarcadas a partir de 1 metro de profundidade, enquanto na área B1, a demarcação iniciou-se a partir de 90 centímetros de profundidade.

A análise da área A1 (Figura 31) revela uma evolução das características subsuperficiais com o aumento da profundidade indicando variações significativas tanto laterais quanto verticais na distribuição de materiais rochosos e sedimentares. Detalhadamente:

1. Profundidades superficiais (0,16 m a 0,83 m):
 - Distribuição esparsa de blocos rochosos, com dimensões máximas de 50 cm.
 - Desenvolvimento progressivo de sistemas radiculares, com maior densidade nas bordas laterais da área.
2. Profundidades intermediárias (1,0 m a 1,6 m):
 - Aumento significativo na intensidade das anomalias detectadas.
 - Redução abrupta das assinaturas de raízes a partir de 1,17 m de profundidade.
 - Emergência de uma estrutura tripartite distinta: a) Zona de alta concentração de anomalias na região esquerda ($Y < 10$ m, $X > 0$ m) b) Zona de alta concentração na região direita ($Y > 20$ m, $X > 5$ m) c) Zona central caracterizada por menor densidade de anomalias (10 m $< Y < 20$ m, $X > 2$ m)
 - Na região esquerda, observa-se um incremento contínuo na presença de material rochoso, incluindo blocos superiores a 1 m. As anomalias próximas à parede do abrigo sugerem possível afloramento da rocha em subsuperfície.
3. Profundidades elevadas (1,84 m a 2,52 m):
 - Persistência de áreas com baixa concentração de anomalias na região central, indicando a continuidade do pacote sedimentar além de 2,52 m de profundidade.

- Diminuição das anomalias de alta amplitude na região direita, sugerindo também a extensão do pacote sedimentar.
- Manutenção de anomalias de alta amplitude na região esquerda, particularmente próximo à parede do abrigo, com destaque para um grande bloco rochoso localizado em $Y = 12$ m e $X = 5$ m.

A análise da área B1 (Figura 32) revela uma estrutura subsuperficial complexa, caracterizada por uma transição gradual de um ambiente dominado por raízes nas camadas superficiais para um substrato mais rochoso em profundidade. Detalhadamente:

1. Camada superficial (0,10 m a 0,60 m):

- Predominância de sistemas radiculares extensos, distribuídos amplamente pela área.
- Presença esparsa de blocos rochosos, geralmente com dimensões inferiores a 50 cm.
- Transição notável aos 0,60 m de profundidade, marcada por uma redução na densidade de raízes e um aumento correspondente na presença de material rochoso.

2. Camada intermediária (0,91 m a 1,22 m):

- Continuação da tendência de diminuição na densidade e clareza das assinaturas de raízes.
- Região central caracterizada por baixa ocorrência de anomalias de alta amplitude, exceto por: a) Blocos rochosos isolados b) Agrupamentos de blocos rochosos com dimensões de até 1 m
- Emergência de zonas com alta concentração de material rochoso, particularmente na faixa de $5 \text{ m} < Y < 10 \text{ m}$.

3. Camada profunda (1,32 m a 1,63 m):

- Intensificação das anomalias de alta amplitude na região próxima à parede do abrigo ($Y > 8$ m e $X < 7$ m), sugerindo a presença do topo rochoso em profundidade.
- Manutenção de uma área com baixa amplitude de anomalias na região esquerda, indicando a continuidade do pacote sedimentar nesta zona.
- Ocorrências pontuais de conjuntos de blocos rochosos na área de sedimentação contínua.

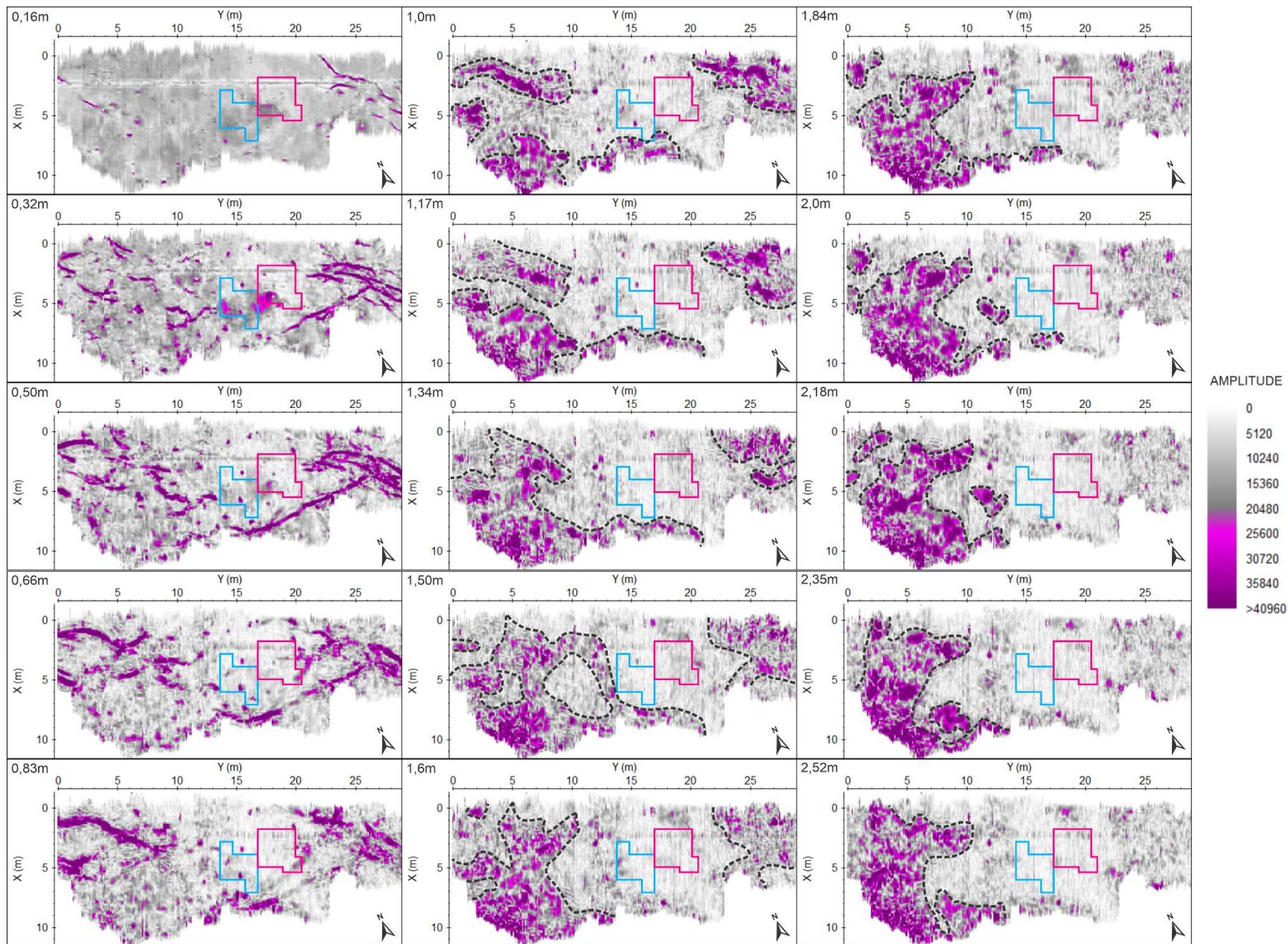


Figura 31 - Série de cortes em profundidade para área A1, com aumento da profundidade em intervalos de 16 ou 17 cm. A linha tracejada em preto mapeia as áreas com maiores concentrações de anomalias de raízes e principalmente de blocos de rocha e/ou do topo rochoso.

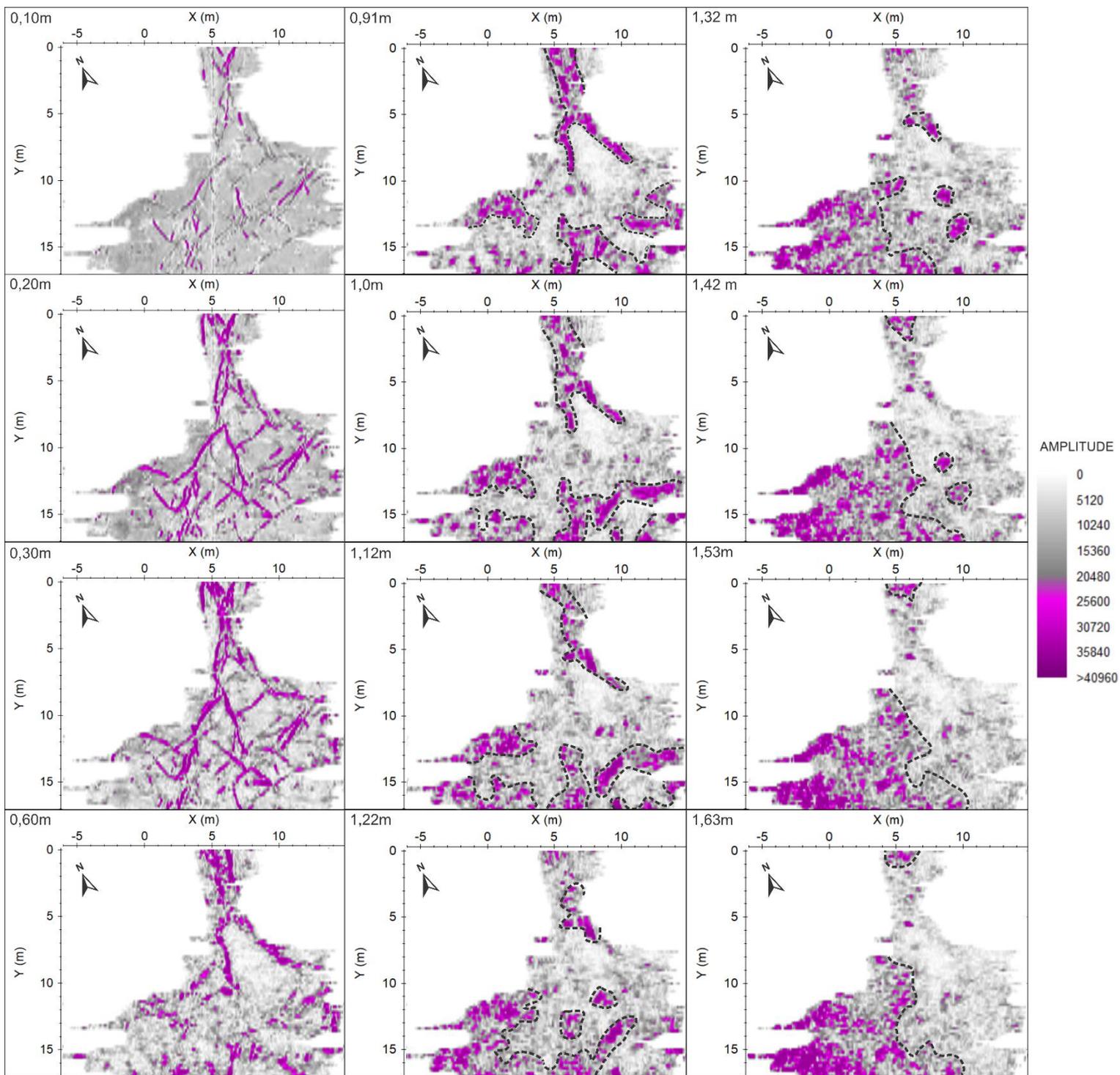


Figura 32 - Série de cortes em profundidade para área B1, com aumento da profundidade em intervalos de 10 cm. A linha tracejada em preto mapeia as áreas com maiores concentrações de anomalias de raízes e principalmente de blocos de rocha e/ou do topo rochoso.

4.4.3 Mapeamento do sedimento carbonático

A relevância deste sedimento carbonático para os estudos arqueológicos é destacada pela possibilidade de explicar particularidades no contexto da geoarqueologia do sítio. Inicialmente, considerou-se que essa camada poderia ser um fenômeno natural. No entanto, as análises subsequentes sugerem que ela pode ter resultado de atividades humanas no local.

Embora os estudos detalhados sobre a geoarqueologia do Sítio GO-Ja-02 ainda estejam em andamento e não tenham sido publicados, os arqueólogos têm feito inferências importantes sobre sua formação desse sedimento carbonático: também referido por “camada carbonática” os sedimentos são caracterizados por ter a presença de carbonato de cálcio em sua composição, cinzas de fogueiras, ocorrência de lentes carbonática de textura fina, compostas por calcário calcítico; majoritariamente carbonato de cálcio; derivado de conchas trituradas (Figura 33a).

Adicionalmente, foi observado que em certos locais, essa camada apresenta uma variação sedimentar distinta, ao passo que os arqueólogos não a denominam como "feição compacta". Os arqueólogos postulam que esta feição resulta da interação entre a lente carbonática e as cinzas provenientes de fogueiras. Notavelmente, nas regiões onde houve interação, identificou-se um processo de queima do material, que aliado à percolação contínua de água, culminou na formação de uma feição de coloração cinza-escura, caracteristicamente compacta e cimentada, formando uma espécie de "piso endurecido" (Figura 33b). Além disso, os arqueólogos atribuem a preservação dos achados ósseos à existência desta camada superficial específica, que atuou como camada protetora, preservando características vitais como o pH do sedimento.

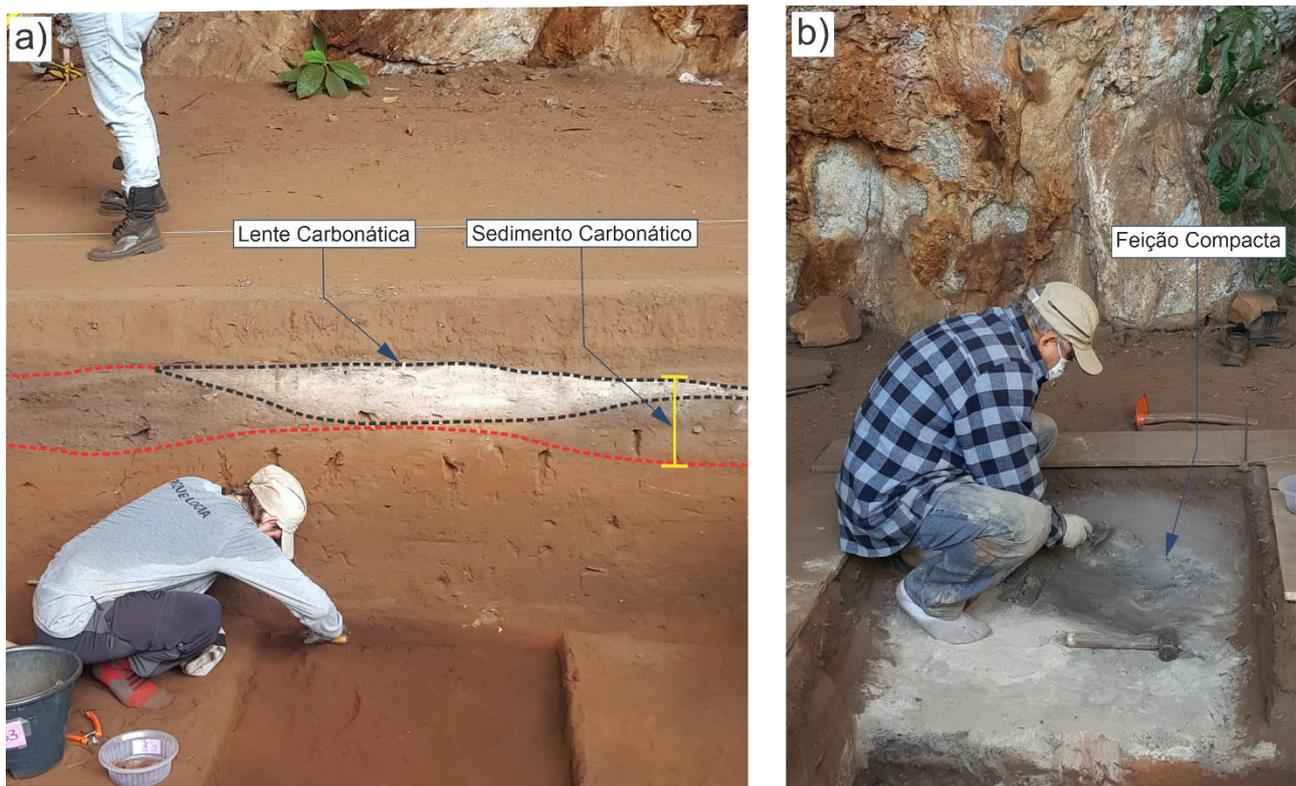


Figura 33 - Fotografias de campo que evidenciam dois diferentes contextos da camada carbonática: a) Perfil na área de escavação, com aproximadamente 60 cm de profundidade, com destaque o pacote de sedimento carbonático com a presença de uma lente da camada carbonática, a 20 cm de profundidade. b) Escavação em área onde foi encontrada a “feição compacta” a 20 cm de profundidade, gerado a partir do contato entre a camada carbonática e as cinzas da fogueira.

Para o mapeamento do sedimento carbonático, foram gerados cortes horizontais em intervalos estratégicos, que permitiam acompanhar a evolução dessa camada. Também foi utilizada uma rotina de processamento com ganho mais alto, que proporcionou uma melhor visualização para essa camada.

A anomalia referente a presença de sedimentos carbonáticos, manifesta-se como uma região predominantemente de média amplitude, com algumas regiões de alta amplitude. A anomalia começa a ser vista a partir de 20 cm de profundidade (Figura 34a), se expandindo até chegar em sua extensão máxima observada em 30 cm (Figura 34b) e cessando em 50 cm (Figura 34c). Correlacionando o resultado GPR com o observado na área escavada, foi observado que a feição compacta não apresenta uma alteração significativa na amplitude do sinal eletromagnético que permita distingui-la claramente da camada carbonática. Ambas as feições exibem amplitudes variando de média a alta, dificultando a diferenciação precisa entre elas apenas com base na amplitude do sinal.

Outra característica observada foi que nos locais onde há percolação de água recorrente, a visualização de estruturas subjacentes foi dificultada. A composição de textura fina do material carbonático, as cinzas de fogueiras, aliados a presença de água, atuaram como um atenuador do sinal eletromagnético, absorvendo uma quantidade significativa de energia das ondas de radar.

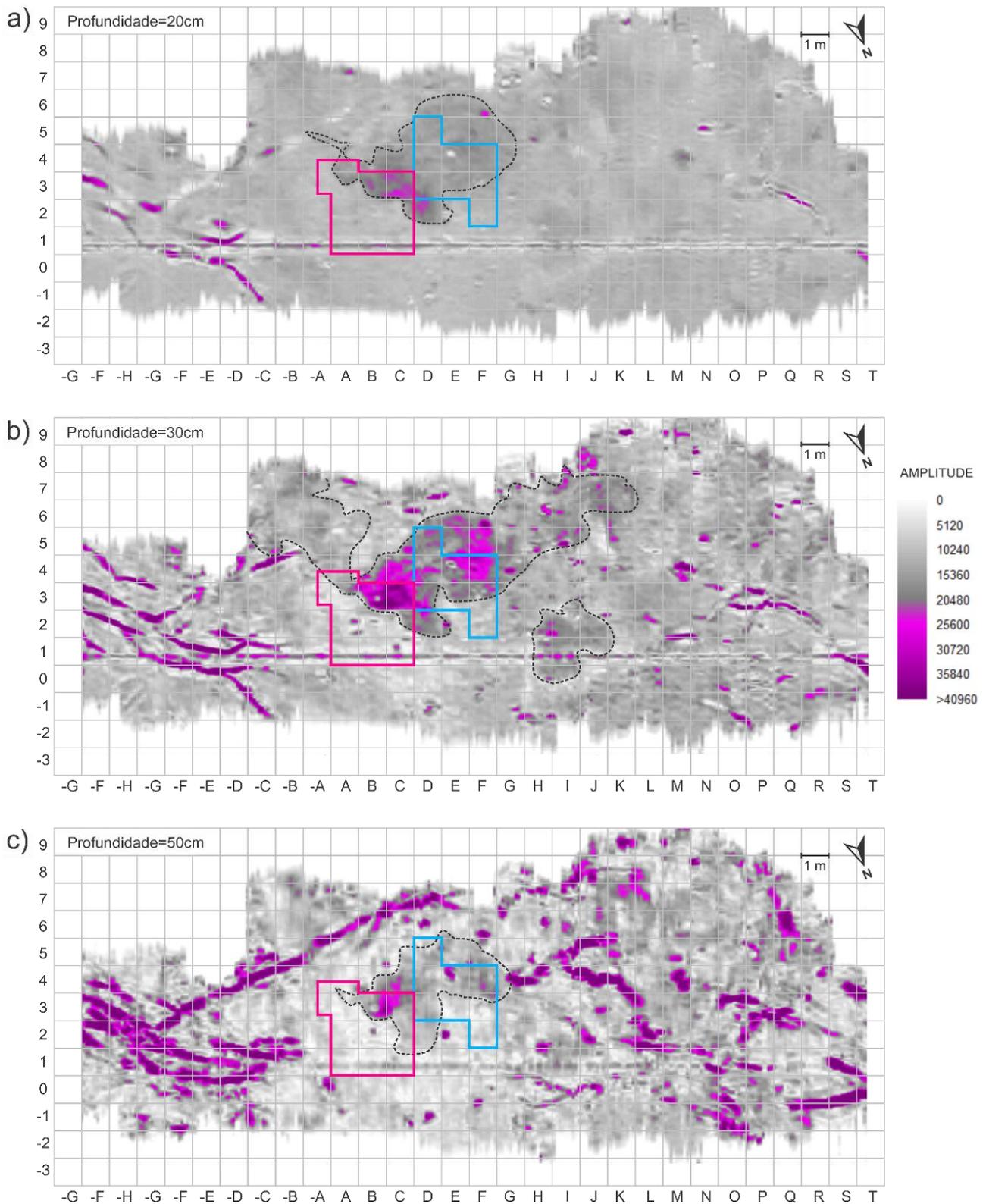


Figura 34 - Cortes em profundidades (20 cm, 50 cm e 80 cm) do bloco pseudo-3D mostrando o possível mapeamento das anomalias relacionadas a ocorrência do sedimento carbonático (tracejado preto) na área A1. Essas figuras exemplificam a metodologia de demarcação e identificação das anomalias.

4.4.4 Sugestão de locais para escavação

Para realizar a sugestão de locais de escavação, as áreas com potencial para escavação foram identificadas considerando diversos fatores, justificados a partir do contexto da área estudada:

Fatores e justificativa:

- **Presença do sedimento carbonático**

Esses depósitos são evidências de atividade humana. Portanto, a identificação do sedimento carbonático, pode fornecer informações valiosas sobre a dinâmica de ocupação e uso do espaço pelos grupos antigos habitantes, além do maior potencial de achados arqueológicos.

- **Espessura do pacote de sedimentos e conseqüentemente da profundidade do topo da rocha:**

A espessura do pacote de sedimentos está diretamente relacionada à profundidade do topo da rocha, pois um pacote de sedimentos espesso significa que a rocha subjacente está localizada em uma profundidade maior, conseqüentemente, permitindo uma escavação mais profunda. Escavações profundas são essenciais para agregar conhecimentos sobre a estratigrafia do sítio.

- **Presença de blocos rochas:**

A presença de blocos de rochas apresenta um duplo contexto que pode influenciar tanto positivamente quanto negativamente o processo de escavação. Por um lado, áreas com grande quantidade blocos de rochas, principalmente quando esses blocos forem maiores que 50-60 cm, podem ser extremamente desafiadoras para escavar. Isso pode tornar a escavação mais trabalhosa e demorada, aumentando os desafios logísticos e operacionais.

Por outro lado, a presença de blocos de rochas pode ser de grande interesse, considerando que estudos anteriores realizados por Schmitz *et al.* (1982) verificaram que muitos sepultamentos estavam frequentemente relacionados à ocorrência de blocos de rochas em sua proximidade, indicando que podem ter alguma relação com o tipo de prática funerária exercida. Assim, embora a presença de blocos de rochas possa representar um desafio, ela também pode sinalizar a proximidade de descobertas arqueológicas valiosas, justificando o esforço adicional necessário para a escavação.

- **Presença de raízes**

A presença de alta densidade de raízes em áreas de interesse arqueológico é geralmente vista

como um fator negativo, pois pode causar muitas interferências durante o processo de escavação. Além de tornar a escavação mais trabalhosa, as raízes podem danificar artefatos delicados, comprometendo a integridade dos achados arqueológicos. Diante disso, os arqueólogos precisarão ponderar a viabilidade de se escavar áreas com grande quantidade de raízes. A decisão deve considerar o potencial arqueológico da área em comparação com os desafios e recursos necessários para a escavação.

Metodologia de Ranqueamento e Delimitação:

A metodologia de ranqueamento pensada, combina os resultados GPR com o conhecimento do contexto arqueológico da área, com o objetivo de identificar as áreas de maior potencial para serem escavadas. A metodologia leva em consideração os fatores e suas justificativas descritos anteriormente, atribuindo pesos a cada um deles. Por meio da atribuição do peso será possível calcular o score com base na soma ponderada desses fatores para cada quadrícula (1 m) da grade plotada sobre o bloco psedo-3D analisado, criando um sistema de pontuação objetivo.

A seguir, são detalhados os passos desta metodologia:

1. Mapeamento da Área: Utilizou-se a divisão da área total do sítio em uma grade de unidades menores, tipicamente quadrados de 1m x 1m. Esta segmentação permite uma avaliação detalhada e localizada das características do terreno.
2. Fatores: Para cada unidade da grade, foram avaliados cinco critérios principais, cada um com um peso atribuído conforme sua justificativa abordada no título anterior:
 - Fatores Positivos:
 - a) Presença de sedimento carbonático (Peso: +5)
 - b) Espessura do pacote de sedimentos (Peso: +4)
 - c) Presença de blocos de rochas com potencial arqueológico (Peso: +3)
 - Fatores Negativos:
 - d) Presença de raízes (Peso: -3)
 - e) Presença de blocos de rochas sem potencial arqueológico (Peso: -2)
3. Avaliação das Unidades: Cada unidade foi avaliada em uma escala de 0 a 10 para cada fator, onde 0 representa a ausência total ou a condição menos favorável, e 10 representa a presença máxima ou a condição mais favorável para os critérios positivos, e o inverso para os critérios negativos.

4. Cálculo do Score: O score de cada unidade foi calculado utilizando a seguinte fórmula:

$$\text{Score} = (5a + 4b + 3c - 3d - 2e)$$

Onde a, b, c, d, e são as avaliações atribuídas a cada critério, respectivamente.

5. Delimitação de Áreas Prioritárias:

- Estabeleceu-se um limiar de score (por exemplo, score > 50) para considerar uma unidade como de "alta prioridade".
 - Unidades adjacentes que excediam este limiar foram agrupadas, formando áreas contíguas de interesse arqueológico.
 - Estas áreas foram contornadas e designadas como prioritárias.
6. Ranqueamento: As áreas prioritárias foram classificadas com base na média dos scores das unidades contidas em cada área, do maior para o menor, determinando assim as prioridades (P1, P2, P3, etc.).

O resultado dessa análise será um croqui das áreas A1 e B1, apresentando as áreas prioritárias, conforme mostra as Figuras 35 e 36. Esse material poderá ser utilizado como base de consulta para os arqueólogos, auxiliando na tomada de decisões no planejamento das escavações.

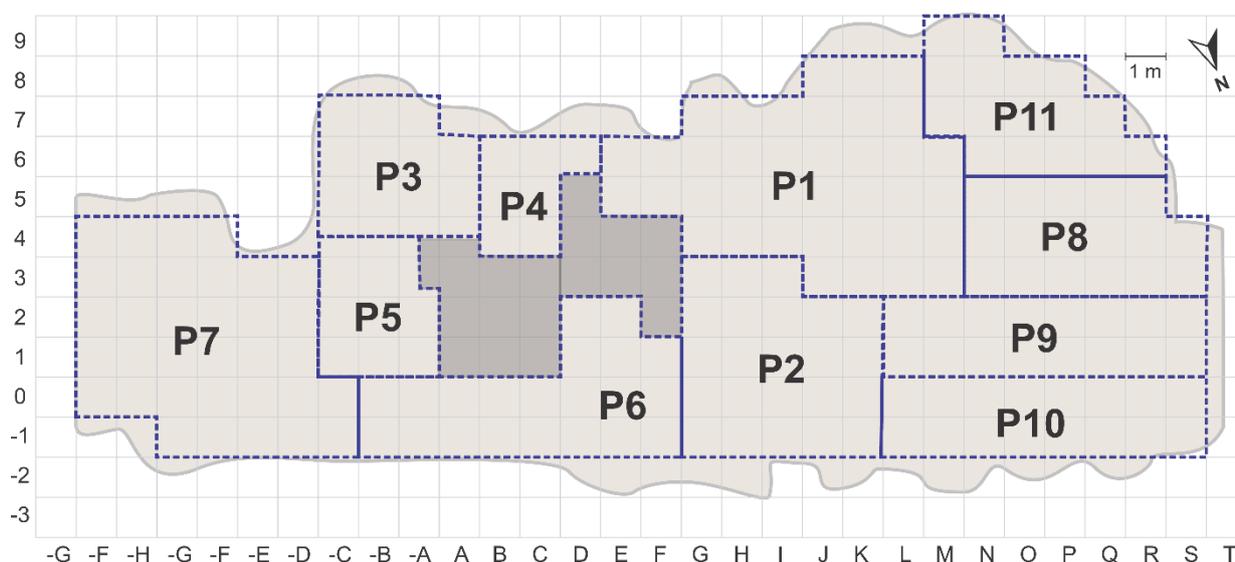


Figura 35 - Croqui da área de escavação A1, destacando 12 áreas prioritárias (P1-P10) identificadas através do cálculo de fatores e escores para cada quadrícula.

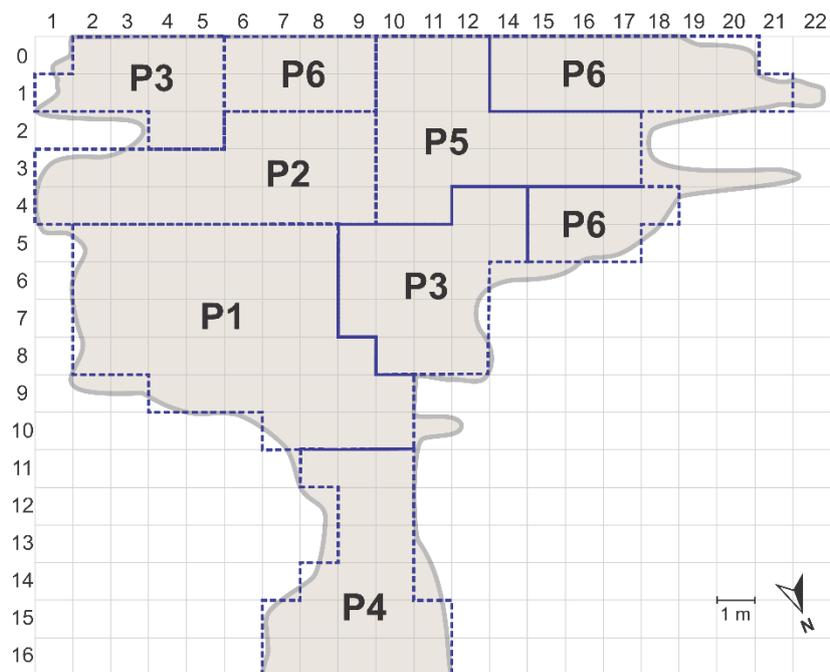


Figura 36 - Croqui da área de escavação B1, destacando 6 áreas prioritárias (P1-P6) identificadas através do cálculo de fatores e escores para cada quadrícula.

Após a identificação inicial das áreas prioritárias, procedeu-se a uma etapa de consolidação e agrupamento. Nesta fase, áreas prioritárias adjacentes ou próximas foram agrupadas para formar zonas de interesse mais amplas. Por exemplo, áreas contíguas ou proximamente relacionadas em seus valores de score, foram combinadas em uma única zona prioritária expandida. A consolidação levou em consideração a continuidade espacial das características geofísicas identificadas, permitindo uma abordagem mais abrangente do resultado. (Figuras 37 e 38).

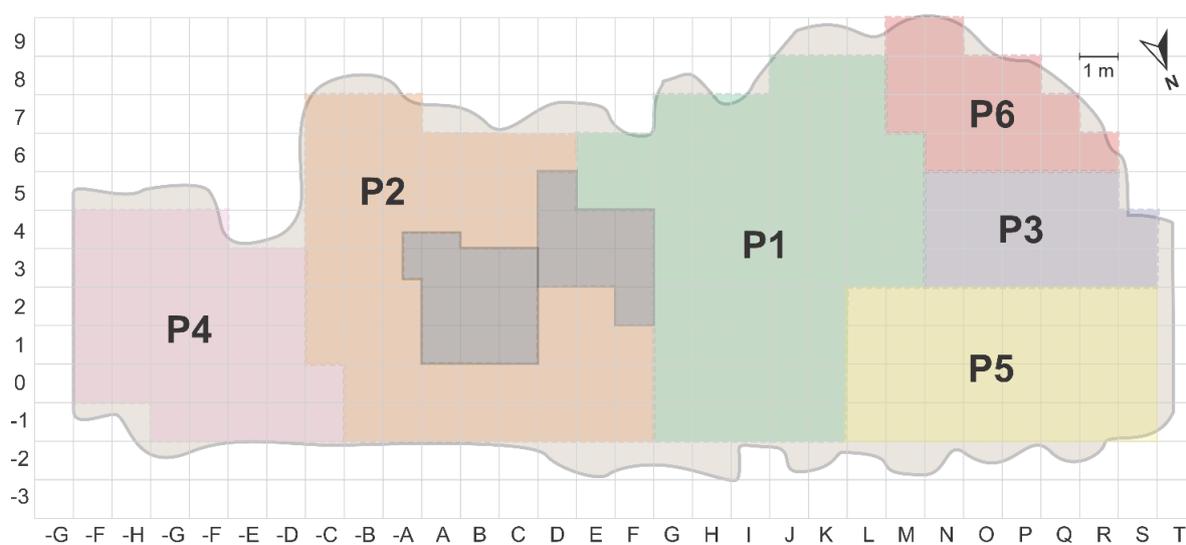


Figura 37 - Croqui da área de escavação A1, destacando 6 áreas prioritárias (P1-P6) que foram agrupadas para formar zonas de interesse mais amplas, identificadas através da análise anterior a partir de áreas contíguas ou proximamente relacionadas em seus valores de score.

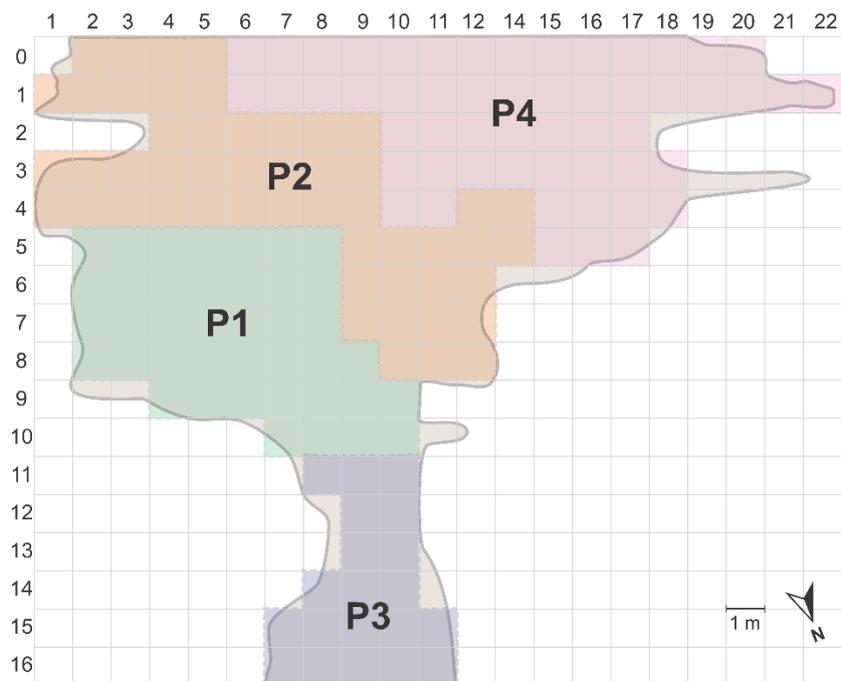


Figura 38 - Croqui da área de escavação B1, destacando 4 áreas prioritárias (P1-P4) que foram agrupadas para formar zonas de interesse mais amplas, identificadas através da análise anterior a partir de áreas contíguas ou proximamente relacionadas em seus valores de score.

CAPÍTULO 5

5. Conclusões

Os principais resultados e contribuições deste estudo abrangem diversos aspectos, tanto da investigação geofísica quanto da arqueológica. A análise dos dados GPR revelou padrões de reflexão distintos, associados a diferentes elementos do subsolo, como blocos de rocha, raízes, o topo da rocha e a existência de um sedimento carbonático particular. Com a análise tridimensional dos dados GPR, foi possível discriminar a identidade das anomalias, bem como obter uma visualização espacial detalhada da distribuição de elementos em subsuperfície.

Além disso, uma contribuição significativa deste estudo foi o desenvolvimento de uma metodologia de ranqueamento para priorizar áreas de escavação arqueológica. Sua objetividade, baseada em critérios quantificáveis, reduz a subjetividade na seleção de áreas para escavação, enquanto sua flexibilidade permite ajustes conforme as particularidades de cada sítio. A eficiência na otimização dos recursos de escavação, direcionando-os para áreas de maior potencial, é complementada pela reprodutibilidade da metodologia, que pode ser aplicada em novos estudos.

É importante ressaltar que, embora esta metodologia forneça uma base para a priorização de áreas de escavação, ela deve ser utilizada em conjunto com o conhecimento especializado dos arqueólogos e as particularidades de cada sítio arqueológico. A delimitação a posteriori das áreas prioritárias permite uma abordagem adaptativa, onde o julgamento pode refinar e ajustar as áreas sugeridas pela análise quantitativa.

Outro aspecto importante é que, embora o foco deste estudo tenha sido a caracterização do arqueambiente através da análise de padrões de reflexão GPR associados principalmente a elementos geológicos, existe a possibilidade de que algumas reflexões possam estar relacionadas a artefatos arqueológicos. A detecção de artefatos individuais por GPR depende de vários fatores,

incluindo o tamanho do artefato, sua composição, a frequência da antena utilizada e principalmente da existência de contraste dielétrico entre o artefato e o solo circundante.

A antena de 400 MHz utilizada neste estudo, oferece um bom equilíbrio entre resolução e profundidade de penetração para os objetivos de caracterização do arqueoambiente. No entanto, esta frequência pode não ser ideal para a detecção de artefatos menores. Além disso, a complexidade do ambiente subsuperficial, com a intensa presença de blocos de rocha e raízes, tende a dificultar a identificação de reflexões específicas de artefatos.

As limitações encontradas, como a dificuldade em distinguir certas estruturas devido à similaridade nas propriedades dielétricas, destacam a importância de uma abordagem multidisciplinar na interpretação dos dados GPR. A combinação de conhecimentos geofísicos, geológicos e arqueológicos mostrou-se essencial para uma interpretação abrangente e precisa dos resultados.

Futuros estudos focados especificamente na detecção de artefatos poderiam se beneficiar do uso de antenas de frequência mais alta para melhorar a resolução, combinado com técnicas de processamento avançadas e correlação com dados de escavações. Além disso, recomenda-se integração com outras técnicas geofísicas, exemplo: Eletrorresistividade e Sísmica.

Por fim, este estudo ressalta a importância da integração de tecnologias avançadas, como o GPR, na preservação e estudo do patrimônio arqueológico. A abordagem não invasiva do GPR não apenas permite uma investigação detalhada sem perturbar o sítio, mas também contribui para fomentar a conservação destes importantes registros históricos para futuras gerações.

Referências Bibliográficas

- Alves, I. V. D. S. (2022). Análise sedimentológica dos estratos do perfil norte da área de escavação do sítio arqueológico GO-Ja-02, Serranópolis, Goiás.
- Annan, A. P. (1992). Ground penetrating radar workshop notes. Sensors & Software, Mississauga, Canada.
- Annan, A. P. (2009). Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar. In H. M. Jol (Ed.), Ground Penetrating Radar Theory and Applications (pp. 3-40). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science.
- Annan, A. P., & Cosway, S. W. (1992). Ground penetrating radar survey design. In 5th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems.
- Aragão, R. D. C., Luiz, J. G., & Lopes, P. R. D. C. (2010). Metodologia geofísica aplicada ao estudo arqueológico dos sítios Bittencourt e Jambuaçu, Estado do Pará. *Revista brasileira de geofísica*, 28, 249-263.
- Atkinson R J C 1953 *Field Archaeology* (London: Methuen)
- Balieiro, F. L. (2020). O uso de imagens para entender a paisagem no Sítio Arqueológico o GO-JA-02, Serranópolis, Goiás.
- Berry, M. V., & Upstill, C. (1980). IV catastrophe optics: morphologies of caustics and their diffraction patterns. *Progress in optics*, 18, 257-346.
- Borges, W. R. (2007). Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no planejamento urbano e meio ambiente: estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP (Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo).
- Buco, C. A., Ignacio, E. G., Brito, M. A., & Santos, J. C. (2020). Ground Penetrating Radar application in archaeological sites of Serra da Capivara National Park, Brazil. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 32, 102439.
- Butnor, J. R., Doolittle, J. A., Kress, L., Cohen, S., & Johnsen, K. H. (2001). Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States. *Tree Physiology*, 21(17), 1269-1278.
- Canata, R. E., Ferreira, F. J. F., Borges, W. R., Salvador, F. A. S., & Bongioiolo, A. B. S. (2019). GPR 3D aplicado no Sítio Controlado de Geofísica Forense da UFPR. 16th International Congress of the Brazilian Geophysical Society.
- Cassidy, N. J. (2009). Electrical and magnetic properties of rocks, soils and fluids. In *Ground penetrating radar theory and applications* (pp. 41-72). Elsevier.

- Cezar, G. da S., da Rocha, P. L. F., Buarque, A. & da Costa, A. (2001). Two Brazilian archaeological sites investigated by GPR: Serrano and Morro Grande. *Journal of Applied Geophysics*, 47, 227–240.
- Conyers, L. B. (2006). Ground-penetrating radar techniques to discover and map historic graves. *Historical Archaeology*, 40(3), 64-73.
- Conyers, L. B. (2010). Ground-penetrating radar for anthropological research. *Antiquity*, 84(323), 175-184.
- Conyers, L. B. (2012). *Interpreting Ground-Penetrating Radar for Archaeology*. Walnut Creek: Left Coast Press.
- Conyers, L. B. (2013). *Ground-penetrating radar for archaeology*. Rowman & Littlefield.
- Conyers, L. B. (2015). Analysis and interpretation of GPR datasets for integrated archaeological mapping. *Near Surface Geophysics*, 13(6), 645-651.
- Conyers, L. B., & Leckebusch, J. (2010). Geophysical archaeology research agendas for the future: Some ground-penetrating radar examples. *Archaeological Prospection*, 17(2), 117-123.
- Costa, M. F.; Rubin, J. C. R. De; Barberi, M. (2023) Complexo Arqueológico de Serranópolis, GO: Preservação e Gestão do Patrimônio Cultural. Relatório Final. Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia. Disponível em: <https://sistemas.pucgoias.edu.br/sigep/relatorioPublico/imprimir?ic=21723>.
- Cui, X., Chen, J., Shen, J., Cao, X., Chen, X., & Zhu, X. (2011). Modeling tree root diameter and biomass by ground-penetrating radar. *Science China Earth Sciences*, 54(5), 711-719.
- Daniels, D. J. (1996). Surface-penetrating radar. *Electronics & Communication Engineering Journal*, 8(4), 165-182.
- Daniels, D. J. (2004). *Ground penetrating radar (Vol. 1)*. Iet.
- Davis, J. L., & Annan, A. P. (1989). Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical prospecting*, 37(5), 531-551.
- Farias, M. S. S. (2010). *Monitoramento da qualidade da água na bacia hidrográfica do Rio Cabelo*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.
- Fisher, E., McMechan, G. A., & Annan, A. P. (1992). Acquisition and processing of wide-aperture ground-penetrating radar data. *Geophysics*, 57(3), 495-504.
- Franceschetti, G. *Electromagnetics: theory, techniques, and engineering paradigms*. Springer Science & Business Media, 2013.
- Gaffney, C. (2008). Detecting trends in the prediction of the buried past: a review of geophysical techniques in archaeology. *Archaeometry*, 50(2), 313-336.

Gaffney, C., & Gater, J. (2003). *Revealing the buried past: geophysics for archaeologists*. Stroud: Tempus.

Gaffney, C., Gater, J., Linford, P., Gaffney, V., & White, R. (2004). Large-scale systematic fluxgate gradiometry at the Roman city of Wroxeter. *Archaeological Prospection*, 7(2), 81-99.

Ghilardi, M., & Desruelles, S. (2009). Geoarchaeology: where human, social and earth sciences meet with technology. *SAPIENS. Surveys and Perspectives Integrating Environment and Society*, (2.2).

Gonçalves, L., Sampaio, H. A., Alves, M. I., & Bettencourt, A. (2008). Ground penetrating radar mapping in rescue archaeology: a study from pego late Bronze Age settlement, Braga (NW Portugal).

Goodman, D., Nishimura, Y., & Rogers, J. D. (1995). GPR time slices in archaeological prospection. *Archaeological prospection*, 2(2), 85-89.

Guedes, N. M. R., & Maio, C. A. (2021). A importância da patrimonialização dos sítios arqueológicos de arte rupestre na Paraíba. *Revista Paralelo*, 13(1), 59-76.

Guidon, N.; Lage, M. C. S. M.; Bucu, C. A.; Cavalcante, L. C. D.; Pessis, A. M.; Macedo, A. O.; Vergne, C. (2019) Agentes naturais de degradação em sítios rupestres do Parque Nacional Serra da Capivara, Piauí, Brasil. *Fundamentos, São Raimundo Nonato*, v. 16, n. 1, p. 7-29,

Guo, L., Chen, J., Cui, X., Fan, B., & Lin, H. (2013). Application of ground penetrating radar for coarse root detection and quantification: a review. *Plant and Soil*, 362(1), 1-23.

Gustavsen, L., Stamnes, A. A., Fretheim, S. E., Gjerpe, L. E., & Nau, E. (2020). The effectiveness of large-scale, high-resolution ground-penetrating radar surveys and trial trenching for archaeological site evaluations—A comparative study from two sites in Norway. *Remote Sensing*, 12(8), 1322.

Hammon III, W. S., McMechan, G. A., & Zeng, X. (2000). Forensic GPR: finite-difference simulations of responses from buried human remains. *Journal of Applied Geophysics*, 45(3), 171-186.

Hirano, Y., Dannoura, M., Aono, K., Igarashi, T., Ishii, M., Yamase, K., ... & Kanazawa, Y. (2009). Limiting factors in the detection of tree roots using ground-penetrating radar. *Plant and Soil*, 319(1), 15-24.

Holten, B., & Sterll, M. (2017). Peter Wilhelm Lund: life and work. *Archaeological and Paleontological Research in Lagoa Santa: The Quest for the First Americans*, 11-26.

IPHAN. (2024). Patrimônio Arqueológico. Governo Federal. Disponível em: <https://www.gov.br/iphan/pt-br/patrimonio-cultural/patrimonio-arqueologico>

IPHAN. (2022). Histórico: 2022 registra o maior número de sítios arqueológicos já cadastrados pelo IPHAN. Governo Federal. Disponível em: <https://www.gov.br/iphan/pt->

br/assuntos/noticias/historico-2022-registra-o-maior-numero-de-sitios-arqueologicos-ja-cadastrados-pelo-iphan

- Jol, H. M. (Ed.). (2008). Ground penetrating radar theory and applications. Elsevier.
- Jones, G. (2008). Geophysical mapping of historic cemeteries. *Technical Briefs in Historical Archaeology*, 3(1), 25-38.
- Keller, G. V. (1987). Rock and mineral properties. *Electromagnetic methods in applied geophysics*, 1, 13-51.
- Kipnis, R., & Scheel-Ybert, R. (2005). Arqueologia e paleoambientes. In C. R. G. Souza, K. Suguio, A. M. S. Oliveira, & P. E. Oliveira (Eds.), *Quaternário do Brasil* (pp. 343-362). Ribeirão Preto: Holos.
- Lacerda Filho, J. V., Rezende, A., & Silva, A. (2000). Geologia e recursos minerais do Estado de Goiás e do Distrito Federal. CPRM; METAGO; UnB.
- Leckebusch, J. (2003). Ground-penetrating radar: A modern three-dimensional prospection method. *Archaeological Prospection*, 10(4), 213-240.
- LOEWER, M. (2018). On the frequency-dependence of electrical soil properties and their influence on ground-penetrating radar. Tese de Doutorado. Technische Universität Berlin.
- Loewer, M., Igel, J., & Wagner, N. (2015). Spectral decomposition of soil electrical and dielectric losses and prediction of in situ GPR performance. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(1), 212-220.
- Lopes, L. S. (2020). A cultura material e a materialidade: o contexto arqueológico do GO-JA-02, Complexo Serranópolis, Goiás.
- Lourdeau, A. (2010). Le technocomplexe Itaparica: Définition techno-fonctionnelle des industries à pièces façonnées uniaxialment à une face plane dans le centre et le nord-est du Brésil pendant la transition Pléistocène-Holocène et l'Holocène ancien. (Tese de Doutorado). Université Paris Ouest Nanterre La Défense, Paris.
- Martindale, A., Wadsworth, W., Simons, E., Whiting, B., & Grier, C. (in press). The challenges of signal interpretation of burials in ground-penetrating radar. *Archaeological Prospection*.
- Martinez, A., & Byrnes, A. P. (2001). Modeling dielectric-constant values of geologic materials: An aid to ground-penetrating radar data collection and interpretation. *Current Research in Earth Sciences*, 247(1), 1-16.
- Martorana, R., Capizzi, P., Cosentino, P. L., & Messina, N. (2023). Geophysical surveys for archaeological investigations: An overview. *Surveys in Geophysics*, 44(1), 1-47.
- Mentzer, S. M. (2017). Rockshelter settings. In *Archaeological Soil and Sediment Micromorphology* (pp. 23-32). John Wiley & Sons, Ltd.

Milani, E. J., França, A. B., & Schneider, R. L. (1994). Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da PETROBRÁS*, 8(1), 69-82.

Milani, E. J., Melo, J. H. G., Souza, P. A., Fernandes, L. A., & França, A. B. (2007). Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2), 265-287.

Mitchum Jr, R. M., Vail, P. R., & Sangree, J. B. (1977). Seismic stratigraphy and global changes of sea level: Part 6. Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences: Section 2. Application of seismic reflection configuration to stratigraphic interpretation.

Moreira, M. L. O., Moreton, L. C., Araújo, V. A., Lacerda Filho, J. V., & Costa, H. F. (2008). *Geologia do Estado de Goiás e Distrito Federal. Escala 1: 500.000. Goiânia: CPRM/SIC-FUNMINERAL.*

Neal, A. (2004). Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-science reviews*, 66(3-4), 261-330.

Neubauer, W., Eder-Hinterleitner, A., Seren, S., & Melichar, P. (2002). Georadar in the Roman civil town Carnuntum, Austria: An approach for archaeological interpretation of GPR data. *Archaeological prospection*, 9(3), 135-156.

Neto, P. X., & de Medeiros, W. E. (2003). Uma abordagem prática para corrigir os efeitos de propagação no sinal do GPR, e sua importância na melhoria do imageamento. In 8th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. European Association of Geoscientists & Engineers.

Nóbrega, J. T. N. (2012). Sepultamentos Pré-Históricos: Um Protocolo alternativo para extração de DNA dos ossos antigos no Bioma Cerrado do Brasil Central.

Nogueira, R. A. S. (2015). Arqueologia da paisagem, Serranópolis na interpretação dos espaços sociais. *Revista Habitus-Revista do Instituto Goiano de Pré-História e Antropologia*, 13(1), 89-112.

Nogueira, R. A. S., et al. (2014). A construção do patrimônio arqueológico em Serranópolis, Goiás.

Olhoeft, G. R. (1996). Application of ground penetrating radar. In *Proceedings of the 6th International Conference on Ground Penetrating Radar*.

Pereira, C. C., Rubin, J. C., & Cremon, H. E. (2023). Variáveis geomorfométricas e machine learning na predição de sítios arqueológicos em Serranópolis - Goiás - Brasil.

Petri, S., & Fúlfaro, V. J. (1983). *Geologia do Brasil. São Paulo: TA Queiroz.*

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(6), 1141-1148.

- Powers, M. H. (1997). Modeling frequency-dependent GPR. *The Leading Edge*, 16(11), 1657-1662.
- Pyrgaki, M. (2023). Impact of COVID-19 crisis on archaeology: challenges for the future.
- Radel, C. (2022). Análise da paisagem no conjunto de sítios do Núcleo "A": Serranópolis, Goiás.
- Ramos, M. P. D. M. (2016). As indústrias líticas do Holoceno médio no Sítio GO-JA-01: uma reavaliação a partir da abordagem tecnofuncional. TCC (Bacharelado), PUC Goiás.
- Ribeiro, C. M. (2016). Arqueologia e Paisagem na Região de Serranópolis, Goiás: Um Estudo de Caso Sobre o Sítio GO-JA-03.
- Rodrigues, S. I., Porsani, J. L., Santos, V. R. N., DeBlasis, P. A., & Giannini, P. C. (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(10), 2081-2088.
- Rubin, J. C. R., & Silva, R. T. (2004). Arqueologia, dinâmica das vertentes e perdas de solo. *Revista do Museu de Arqueologia e Etnologia*, (14), 179-193.
- Rubin, J. C. R., Barberi, M., Júnior, A. S., Viana, S. A., & Silva, R. T. (2003). A ocupação humana na região do Cerrado Goiano: o panorama arqueo-geomorfológico. *Revista Goiana de Geografia*, 23(1), 35-54.
- Rubin, J. C. R., et al. (2017). Efeitos da erosão em sítios arqueológicos no estado de Goiás: casos de Serranópolis e Palestina de Goiás. *Revista Clio*, 32(1), 37-67.
- Rubin, J. C. R., et al. (2022). Sítios arqueológicos ao Núcleo B de Serranópolis, Goiás: tipos e intensidades de impactos naturais e antrópicos. *Revista de Arqueologia*, 35(3), 52-68.
- Sandmeier, K. J. (2012). ReflexW manual, version 7.0. Karlsruhe, Germany: Sandmeier Scientific Software.
- Santiago, D. G. (2015). Motivações, critérios e diretrizes no tombamento de sítios arqueológicos pelo IPHAN. Dissertação de Mestrado, IPHAN.
- Schmitz, P. I. (1976-1977). Arqueologia de Goiás: sequência cultural e datações de C14. *Anuário de Divulgação Científica*, 3-4, 1-15.
- Schmitz, P. I., Barbosa, A. S., Jacobus, A. L., & Ribeiro, M. B. (1989). Arqueologia nos cerrados do Brasil Central: Serranópolis I. *Pesquisas, Antropologia*, 44, 1-208.
- Schmitz, P. I., Rosa, A. O., & Bitencourt, A. L. V. (2004). Arqueologia nos cerrados do Brasil Central: Serranópolis III. *Pesquisas, Antropologia*, 60, 1-286.

Schmitz, P. I., Barbosa, A. S., Miranda, A. F., Ribeiro, M. B., & Barbosa, M. O. (1996). Arqueologia nos cerrados do Brasil Central: Sudoeste da Bahia e leste de Goiás, o Projeto Serra Geral. *Pesquisas, Antropologia*, 52, 1-196.

Scopel, I.; Peixinho, D. M.; Assunção, H. F.; Mariano, Z. F.; Moragas, W. M.; Sousa, M. S.; Moraes, R. S.; Melo; N. A.; Carvalho, E. O.; Freitas, V. V.; Carvalho, N. R.; Soares, M. M. F.; Silva, M. R. A formação de areais e seu controle na região de Jataí e Serranópolis, Goiás. Jataí: Universidade Federal de Goiás – Campus Avançado de Jataí, 2005.

Soares, A. L. R., & Klamt, S. C. (2023). A política pública de proteção de sítios arqueológicos no Brasil: uma análise histórica. *Revista Direito UFMS*, 9(1), 194-216.

Sternberg, B. K., & McGill, J. W. (1995). Archaeology studies in southern Arizona using ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 33(1-3), 209-225.

Tatum, D., & Francke, J. (2012). Constructing 3D GPR images with all the useful information. In 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR) (pp. 111-116). IEEE.

Trinks, I., Johansson, B., Gustafsson, J., Emilsson, J., Friborg, J., Gustafsson, C., ... & Östman, A. (2010). Efficient, large-scale archaeological prospection using a true three-dimensional ground-penetrating radar array system. *Archaeological Prospection*, 17(3), 175-186.

Viana, S. A., Ramos, M. P., Rubin, J. C. R., Barberi, M., & Boëda, E. (2016). O complexo arqueológico de Serranópolis, GO: notas sobre a cronologia regional e mudanças culturais no Holoceno. *Cadernos do CEOM*, 29(45), 181-211.

Zhao, W., Forte, E., Pipan, M., & Tian, G. (2015). Ground Penetrating Radar (GPR) attribute analysis for archaeological prospection. *Journal of Applied Geophysics*, 114, 141-158.