

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**FRANCISCO DE OLIVEIRA ALVES**

**GEOFÍSICA APLICADA À ARQUEOLOGIA: ESTUDO NO SÍTIO  
ARQUEOLÓGICO HISTÓRICO SÃO JOSÉ II, HERVAL-RS**

**Caçapava do Sul**

**2021**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

A474g Alves, Francisco de Oliveira  
Geofísica aplicada a arqueologia: estudo no sítio  
arqueológico histórico São José II, Herval-RS / Francisco de  
Oliveira Alves.  
142 p.  
  
Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade  
Federal do Pampa, GEOLOGIA, 2021.  
"Orientação: Ezequiel Galvão de Souza".  
  
1. Sítio Arqueológico. 2. GPR. 3. Magnetometria. 4. Herval.  
I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal do Pampa

**FRANCISCO DE OLIVEIRA ALVES**

**GEOFÍSICA APLICADA À ARQUEOLOGIA: ESTUDO NO SÍTIO ARQUEOLÓGICO  
HISTÓRICO SÃO JOSÉ II, HERVAL-RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Geologia da Universidade Federal  
do Pampa, como requisito parcial para  
obtenção do Título de Bacharel em Geologia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em:

11 de maio de 2021.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Ezequiel Galvão de Souza

Orientador

UNIPAMPA

---

Dr. Jonathan Duarte Marth

## IMP

---

Me. Lenon Melo Ilha

UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **Jonathan Duarte Marth, Usuário Externo**, em 12/05/2021, às 16:40, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **EZEQUIEL GALVAO DE SOUZA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/05/2021, às 16:52, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LENON MELO ILHA, Técnico de Laboratório Área**, em 13/05/2021, às 10:32, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0524023** e o código CRC **6F5450CC**.

Universidade Federal do Pampa, Campus Caçapava do Sul

“Dedico este trabalho à minha avó Zely (in memoriam), que sempre me fez acreditar que tudo daria certo e me ensinou a não fraquejar perante aos “*puaços*” da vida. Aos meus pais Sandra e João Francisco e meu irmão Rafael que sempre foram minha válvula de escape, meu ombro amigo e o meu tudo para tudo. Agradeço do fundo do meu coração. ”

## AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente ao meu pai João Francisco Belem Alves (Quiki), a minha mãe Sandra de Oliveira Alves e meu irmão Rafael de Oliveira Alves por tudo, o apoio incondicional, todo auxílio prestado, principalmente, nos momentos mais delicados e difíceis, não só nesse percurso acadêmico, mas em toda minha vida, a sua batalha incessante para que eu conseguisse concluir minha graduação, ainda sou grato por toda paciência que tiveram comigo, todo carinho e afeto, toda preocupação, por não deixarem eu me sentir sozinho ou cabisbaixo, sempre buscando o meu bem-estar e minha felicidade e nunca mediram esforços para me ajudar, sem esses três eu, hoje, nada seria.

Sou grato a Deus e Nossa Senhora, pois minha fé neles, foi o que nunca me deixou fraquejar.

Agradeço aos meus demais familiares, meus tios e tias, meus padrinhos e madrinhas e minhas avós que sempre torceram pelo meu sucesso, em especial a minha Vó Zely (Laila), que sempre me proporcionou alegrias e motivação, mas por infelicidade do destino, não pode ver essa minha conquista.

Agradeço aos amigos, que acompanharam e fizeram parte dessa trajetória, logo sou grato aos colegas de aula, ao Bloco do Zebu, Bloco de Notas e aos LPH.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Ezequiel Galvão de Souza (Zaza), por me repassar seus conhecimentos e acreditar em mim e no meu potencial, me auxiliando de todas as formas possíveis para que concluísse, com êxito, esse trabalho e durante esse percurso ter se tornado um grande amigo.

Por fim agradeço a toda equipe do Instituto de Memória e Patrimônio, pela disponibilidade, atenção, ensinamentos e auxílio durante a pesquisa que originou este trabalho.

“Trago a estirpe pampeana  
De nunca tropear sozinho  
Meus parceiros amadrinho  
Sacudindo pasto e terra  
Tiro o chapéu para quem erra  
Mas corrige o seu caminho

[..]Então reponto meus dias  
Mirando ao longe a cancela  
Sempre se abrem janelas  
A quem com fibra e denodo  
Sabe que a estada é pra todos  
Basta andar sobre ela

Se os tempos passam ao trote  
A nossa história os compreende  
Quando o anseio se estende  
Pealando em fim a resposta  
Que o indivíduo se mostra  
Nos princípios que defende

E assim vou contemplando  
O mundo que se oferece  
Recorrendo as velhas preces  
Diante da posteridade  
Pois sei que a felicidade  
Só conquista quem merece [..]”

*João Francisco Belem Alves*

## **RESUMO**

O estado do Rio Grande do Sul ao longo dos anos vem sendo alvo de diversos estudos arqueológicos, que buscam evidenciar acontecimentos remotos, e assim caracterizar novos sítios arqueológicos utilizando das mais diversas ferramentas. Esse trabalho buscou evidenciar vestígios de ocupações históricas, fazendo registro de estruturas de possíveis contextos de um Sítio Arqueológico Histórico no município de Herval-RS. Para esse trabalho foi posta em prática a geoarqueologia, área de estudo que utiliza de métodos e ferramentas das geociências para investigações arqueológicas. Desta forma foram aplicados métodos geofísicos, sendo eles, a magnetometria e o Ground Penetrating Radar (GPR). A área alvo do estudo foi designada com base em uma pesquisa elaborada por profissionais do Instituto de Memória e Patrimônio (Pelotas/RS). Os resultados desse trabalho locais dentro da área do sítio onde pode haver a presença de vestígios arqueológicos, para influenciar e motivar escavações posteriores nas áreas apontadas neste, denotando o potencial das geociências na interpretação histórica.

**Palavras Chaves:** Sítio Arqueológico, Herval, GPR, magnetometria.

## **ABSTRACT**

The state of Rio Grande do Sul over the years has been the target of several archaeological studies, which seek to highlight remote events, and thus characterize new archaeological sites using the most diverse tools. This work sought to evidence traces of historical occupations, recording structures of possible contexts of a Historic Archaeological Site in the municipality of Herval-RS. For this work, geoarcheology was put into practice, a study area that uses methods and tools from geosciences for archaeological investigations. In this way, geophysical methods were applied, namely, magnetometry and the Ground Penetrating Radar (GPR). The target area of the study was designated based on a survey carried out by professionals from the Institute of Memory and Heritage (Pelotas / RS). The results of this work are local within the area of the site where there may be the presence of archaeological remains, to influence and motivate further excavations in the areas indicated in this, denoting the potential of geosciences in historical interpretation.

**Keywords:** Archaeological Site, Herval, GPR, magnetometry.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de situação e localização da área de estudo.....	21
Figura 2 - Principais unidades geotectônicas do Sul do Brasil e Uruguai: .....	22
Figura 3 - Mapa geotectônico simplificado do Batólito de Pelotas.....	26
Figura 4 - Mapa da geologia local .....	28
Figura 5 - Modelo digital de elevação da área .....	29
Figura 6 - Poço em meio à silvicultura com empilhamento de telhas .....	35
Figura 7 - Mosaico com 2 possíveis alicerces de construção .....	36
Figura 8 - Possível alicerce de construção .....	36
Figura 9 - Cano antigo disperso na área.....	37
Figura 10 - Mosaico evidenciando materiais construtivos dispersos na área.....	37
Figura 11 - Muro de pedra nas extremidades do Sítio.....	38
Figura 12 - Representações das metodologias de magnetometria (gradiômetro) (A), resistividade elétrica (arranjo Wenner) (B), e GPR-Ground Penetrating Radar (C). (Desenhos, Bruno Poluha).....	41
Figura 13 - Representação do campo magnético terrestre .....	45
Figura 14 - Representação dos movimentos de rotação.....	46
Figura 15 - Representação do fluxo do campo magnético terrestre .....	46
Figura 16 - Representação esquemática da variação magnética obtida em uma estação fixa..	48
Figura 17 - Levantamento magnético terrestre e perfil da intensidade medida .....	50
Figura 18 - (A) Princípio de funcionamento do método GPR considerando um ambiente composto por duas camadas. (B) Traço contendo os registros dos tempos de chegada da onda direta pelo ar ( $A_w$ ), onda direta pela terra ( $G_w$ ) e da onda refletida na interface formada pelas camadas 1 e 2.....	53
Figura 19 - Exemplo de seção de Radargrama de 200 MHz.....	54
Figura 20 - Ilustração da reflexão do sinal eletromagnético em uma interface entre duas camadas em subsuperfície .....	55
Figura 21 - Modo de aquisição dos dados de GPR . a) Offset comum; b) Wide angle reflection and refraction; c) Common Mid Point .....	56
Figura 22 - Esquema de perdas de GPR.....	57
Figura 23 - Ilustração conceitual da movimentação de cargas associadas com as correntes de condução.....	60

Figura 24 - Ilustração conceitual da movimentação de cargas associadas com as correntes de deslocamento .....	61
Figura 25 - Esquema da Lei de Snell .....	66
Figura 26 - Uma representação usando raios. Os ângulos de incidência ( $\theta_1$ ), de reflexão ( $\theta'_1$ ) e de refração ( $\theta_2$ ) estão indicados. ....	66
Figura 27 - Figura esquemática de resolução longitudinal e lateral do sinal do GPR .....	67
Figura 28 - Alcance e resolução lateral podem ser determinados considerando a resposta de dois alvos localizados, ou em linha (a) ou lado a lado (b).....	68
Figura 29 - Representação de uma onda eletromagnética propagando-se para direita.....	72
Figura 30 - Representação de um pulso eletromagnético emitido por aparelhos de GPR.....	74
Figura 31 - Relação entre velocidades e frequências para diferentes condutividades .....	75
Figura 32 - Os sinais de radar de penetração no solo (GPR) são espalhados por heterogeneidades nas propriedades dos materiais, o que reduz os sinais transmitidos .....	78
Figura 33 - Um sistema de radar de penetração no solo (GPR) emite e detecta sinais de ondas de rádio. Existem muitos sinais e caminhos possíveis e o objetivo é maximizar a resposta alvo e minimizar outras.....	79
Figura 34 - Ilustração esquemática do levantamento Common offset ao longo de uma linha mostrando os principais parâmetros de especificação do levantamento .....	81
Figura 35 - Perfil de levantamento distribuído por várias linhas de levantamento. A resposta do solo é medida em pontos discretos ao longo da linha de levantamento.....	81
Figura 36 - Seção de GPR medida com radar em superfície e separação de antena fixa (deslocamento comum) sobre uma anomalia com uma permissividade diferente do material hospedeiro. ....	82
Figura 37 - a)CMP e b)WARR, onde S denota a localização do transmissor e R denota as localizações do receptor .....	84
Figura 38 - Método de sondagem CMP .....	85
Figura 39 - Arranjo WARR realizado; as antenas utilizadas foram as de 25 MHz.....	86
Figura 40 - Contorno de navio Viking identificados a partir de dados do georadar .....	88
Figura 41 - Equipamento magnetômetro GEM Systems GSM-19 .....	97
Figura 42 - Levantamento magnético .....	98
Figura 43 - Ground Penetrating Radar (GPR) de frequência de 200 MHz.....	100
Figura 44 - Levantamento com GPR .....	100
Figura 45 - Radargrama dos dados brutos.....	101

Figura 46 - Radargrama após aplicação da correção do tempo-zero.....	102
Figura 47 - Seção radargrama após aplicação do filtro dewow.....	102
Figura 48 - Seção readargrama após aplicação do filtro passa-banda .....	102
Figura 49- Seção radargrama após aplicação do ganho manual.....	103
Figura 50 - Seção radargrama após aplicação do ganhos linear e exponencial.....	103
Figura 51- Seção radargrama após remoção do background. ....	104
Figura 52 - Seção radargrama após aplicação do filtro de deconvolução .....	104
Figura 53 - Seção Radargrama após migração do tempo para profundidade.....	105
Figura 54 - Seção radargrama final após correção topográfica com retângulos vermelhos indicando as zonas anômalas utilizando a paleta de cor gray 1.....	105
Figura 55- Seção radargrama final utilizando a paleta de cores bluegrayred. ....	105
Figura 56 - Mapa magnetométrico do campo magnético total.....	108
Figura 57 - Mapa magnetométrico de amplitude do sinal analítico .....	109
Figura 58 - Perfil 1a .....	116
Figura 59 - Perfil 1b .....	117
Figura 60 - Perfil 2a .....	118
Figura 61 - Perfil 2b .....	118
Figura 62 - Perfil 3a .....	119
Figura 63 - Perfil 3b .....	120
Figura 64 - Perfil 4a .....	121
Figura 65 - Perfil 4b .....	121
Figura 66 - Perfil 4c .....	122
Figura 67 - Perfil 5a .....	123
Figura 68 - Perfil 5b .....	123
Figura 69 - Perfil 6a .....	124
Figura 70 - Perfil 6b .....	124
Figura 71 - Mapa de pontos indicados para escavação .....	127

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	18
2.1 Geral	18
2.2 Específicos	18
3 JUSTIFICATIVA	19
4 ÁREA DE ESTUDO	20
4.1 Localização	20
4.2 Geologia Regional	22
4.2.1 Batólito de Pelotas	23
4.3 Geologia Local	25
5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	30
5.1 Contexto Histórico de Herval e sua Importância para Arqueologia do Município	30
5.1.1 Formação Histórica do Município	30
5.1.2 A Importância da História no Contexto Arqueológico	33
5.2 Geofísica na Prospecção Arqueológica	38
5.2.1 Principais Aplicações	41
5.2.1.1 Arqueologia de Paisagem	42
5.2.1.2 Exploração e delimitação dos sítios arqueológicos	43
5.2.1.3 Análise de arquitetura e descrição dos elementos arqueológicos específicos	44
5.3 Método Magnético	44
5.3.1 Campo geomagnético	47
5.3.2 Princípio físico do método	48
5.3.3 Levantamento magnético na Arqueologia	49
5.4 Ground Penetrating Radar (GPR)	52
5.4.1 Princípios do método	57
5.4.2 Propriedades Eletromagnéticas dos Materiais	59
5.4.2.1 Condutividade elétrica	59
5.4.2.2 Permissividade dielétrica	60
5.4.2.3 Permeabilidade magnética	62
5.4.3 A Interação da Onda Eletromagnética com o Meio	63
5.4.3.1 Reflexão e Refração - Lei de Snell	65
5.4.4 Resolução Espacial e Profundidade de Penetração	67
5.4.5 Velocidade e Propagação da Onda Eletromagnética	72
5.4.6 Atenuação	77
5.4.7 Ruído	79
5.4.8 Aquisição de Dados	80

5.4.8.1 Common Offset	80
5.4.8.2 Métodos Common Mid Point (CMP) e Wide angle reflection and refraction (WAAR)	83
5.4.9 Levantamento por radar de penetração do solo (GPR) na Arqueologia	86
6 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA PARA PROCESSAMENTO E TRATAMENTO DOS DADOS	89
6.1 Processamento de dados magnetometria	89
6.2 Tratamento de dados magnetometria	89
6.2.1 Correções:	89
6.2.2 Filtros:	90
6.3 Processamento de dados GPR	90
6.3.1 O intervalo de um registro	92
6.3.2 Posição de início do sinal	92
6.3.3 Ponto por traço	92
6.3.4 Superposição de traços	92
6.3.5 Correções dos sinais	92
6.3.7 Ganhos	93
6.3.8 Deconvolução	94
6.3.9 Migração	94
6.3.10 Filtragem de sinais	94
7 METODOLOGIA	96
8 RESULTADOS	97
8.1 Magnetometria	107
8.1.1 Interpretação	109
8.2 GPR	110
8.2.1 Interpretação	114
8.3 Áreas de Interesse para Escavação	125
9 CONSIDERAÇÕES FINAIS	128
REFERÊNCIAS	130
ANEXOS	134

## INTRODUÇÃO

A geoarqueologia caracteriza-se como um ramo da ciência que utiliza de quaisquer métodos, conceitos e técnicas da ciência da Terra como base de conhecimento para estudos de artefatos e processos relacionados a criação de registros arqueológicos (CREMASCHI, 2000; RAPP & HILL, 1998).

Os estudos geoarqueológicos ajudam a compreender como a paisagem se transformou no decurso do tempo, como as comunidades humanas do passado exploraram e modificaram os seus territórios, como se formaram os depósitos arqueológicos e quais são as informações que podemos recolher da análise estratigráfica, em última análise, em que forma os grupos humanos interagem com o contexto paisagístico em que viveram (ANGELUCCI, 2006).

A busca por evidências da história através do resgate geoarqueológico exige a cada instante que as ferramentas apresentem respostas mais satisfatórias em um curto espaço de tempo e evitem gastos errôneos em escavações. Neste âmbito, muitos profissionais têm apostado em ferramentas geofísicas, as quais compactuam com essas exigências.

A geofísica vem sendo uma ferramenta recorrente para pesquisadores que tentam compreender o passado da humanidade. Nesse aspecto, a geofísica tenta amenizar ambiguidades de onde situam-se resquícios arqueológicos, visando escavações que possam vir a ocorrer em locais não propícios e acarretar na destruição de sítios e patrimônios históricos.

Portanto, o presente trabalho consiste em um estudo multidisciplinar, envolvendo dois ramos da ciência, a arqueologia e a geologia, as quais objetivam explicar e desvendar acontecimentos em tempos remotos. O uso mútuo dessas disciplinas é fundamental no entendimento da atual civilização, seus costumes, crenças, entre outros.

Por meio de evidências de ocupação humana, cientistas conseguem estabelecer como se comportavam e interagiam antigos povos, seus aspectos culturais, suas técnicas e como se desenvolveram com o passar dos anos. Tal compreensão permite ao pesquisador que faça uma transição no tempo, exercendo uma ligação entre passado e presente.

O território que corresponde ao Rio Grande do Sul sempre foi cenário para pesquisas arqueológicas que buscam resgatar os vestígios arqueológicos de diversas tribos indígenas que ocupavam esse território ao longo de milhares de anos, desde antes da vinda dos colonizadores

européus. Destaca-se a presença de distintos grupos (gês<sup>1</sup>, os guaranis<sup>2</sup> e pampeanos). Hoje também é habitual a investigação de todo processo de colonização europeia. Historiadores e arqueólogos relatam que quando colonizadores chegaram na região, onde hoje é situado o estado sul-rio-grandense, implantaram construções, sendo exemplares da arquitetura colonial, como igrejas, sedes de fazendas, conventos, colégios e casas-forte<sup>3</sup> visando consolidar o povoamento do estado.

No estado do RS há um sítio histórico localizado no município de Herval, o qual incorpora estruturas arquiteturais da sede administrativa de uma fazenda que evidenciam a ocupação pretérita no local. No ano de 2016 ocorreu uma vistoria na área, exercida pelo Instituto de Memória e Patrimônio (IMP), no qual foram identificados remanescentes arquitetônicos como tijolos, alicerces, manilhas e um poço, associados à localização da sede de uma fazenda, esse conjunto de informações culminou para classificação da propriedade como um Sítio Arqueológico Histórico. No IPHAN o sítio encontra-se registrado como Sítio São José II.

A área de atuação deste trabalho decorre de um estudo arqueométrico que utilizou de métodos geofísicos com o objetivo de caracterizar vestígios materiais em subsuperfície, visando respostas satisfatórias na prospecção arqueológica. Além de se tratarem de métodos de pesquisa não destrutivos e com respostas rápidas, facilitam a identificação de zonas onde há a presença de materiais de interesse histórico.

No presente trabalho foram utilizados os equipamentos geofísicos Ground Penetrating Radar (georadar – GPR) para compreensão das características e propriedades presentes no subsolo da área alvo, e a magnetometria para anomalias<sup>4</sup> que contrastem com materiais cerâmicos<sup>5</sup>, vestígios relacionados ao uso do fogo ou ainda artefatos metálicos.

O trabalho foi realizado em parceria com o Instituto de Memória e Patrimônio, Pelotas - RS, ocorrendo em uma área previamente estudada por pesquisadores da instituição.

---

<sup>1</sup> "Descendiam dos mais antigos caçadores do interior do Rio Grande do Sul. Seus principais grupos eram Caaguás e Guaianás. Todos falavam a mesma língua. Suas casas eram de palha com quatro divisões internas, abrigando de 20 a 25 famílias, mas eram nômades devido às ameaças dos inimigos e à necessidade de procurar novas áreas de caça e de plantio (JASKULSKI, 21-).

<sup>2</sup> " Os Guarani constituem uma das sociedades indígenas brasileiras mais numerosas (LITAIFF, 2014). Grupos indígenas sempre nômades (BRANDÃO, 1990).

<sup>3</sup> Residências, que podiam ser usadas como abrigos contra ameaças, sendo fortificadas para isso. Também é um tipo de construção que pode ser considerado como arcaico para a Idade Moderna (1452-1789) (CASTRO, 2016).

<sup>4</sup> "Variação pontual das propriedades físicas de um corpo.

<sup>5</sup> "Arte ou a técnica de produção de artefatos de objetos tendo a argila como matéria-prima. Qualquer classe de material sólido inorgânico, não-metálico que seja submetido a altas temperaturas.

O intuito foi localizar possíveis alvos não identificados em pesquisas anteriores, auxiliando na determinação dos principais locais para escavações futuras, através de uma prospecção não invasiva e que evidencie a presença de elementos de interesse arqueológicos presentes no subsolo, contribuindo para estudos futuros e sendo aplicada uma metodologia que não foi empregada anteriormente na área.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

Como objetivo central, o estudo busca identificar a, possível, localização de vestígios arqueológico por meio de ferramentas geofísicas.

### **2.2 Específicos**

- Integrar as geociências na prospecção arqueológica;
- Aplicar métodos geofísicos, para evidenciar potenciais pontos para escavações, sem alterar ou destruir as propriedades do local, assim, não afetando o Sítio Arqueológico;
- Acrescentar informações a uma área com potencial arqueológico, visando identificar quaisquer resultados que apontem materiais relacionados a construções pretéritas que existiram na área;
- Interpretações de linhas de Magnetometria e GPR;
- Identificar anomalias, que se associam a materiais situados em subsuperfície, com dinâmicas relevantes, apontadas nos refletores de GPR;
- Determinar áreas propícias para escavações.

### **3 JUSTIFICATIVA**

A justificativa que sustenta o trabalho está intrinsecamente associada à sua importância em caráter acadêmico, pois esse faz uso de uma área de estudo multidisciplinar. Assim, corrobora no acréscimo de informações, expondo a relevância das geociências em pesquisas de caráter arqueológico sendo um tema pouco recorrente em pesquisas da universidade.

A motivação que culminou nessa obra foi o interesse pessoal do autor em utilizar as geociências para contribuição da interpretação histórica, pois o mesmo sempre foi um entusiasta do ramo. A escolha da temática, assim como, a área de estudo, se dá para tentar comprovar a eficácia da geofísica nos estudos arqueológicos, identificando onde estariam depositados materiais de interesse histórico.

Como um incremento a mais para motivação do autor e importância do trabalho, observou-se que este tema é pioneiro na UNIPAMPA, Campus Caçapava do Sul, o que pode incentivar outros graduandos a explorarem mais o assunto.

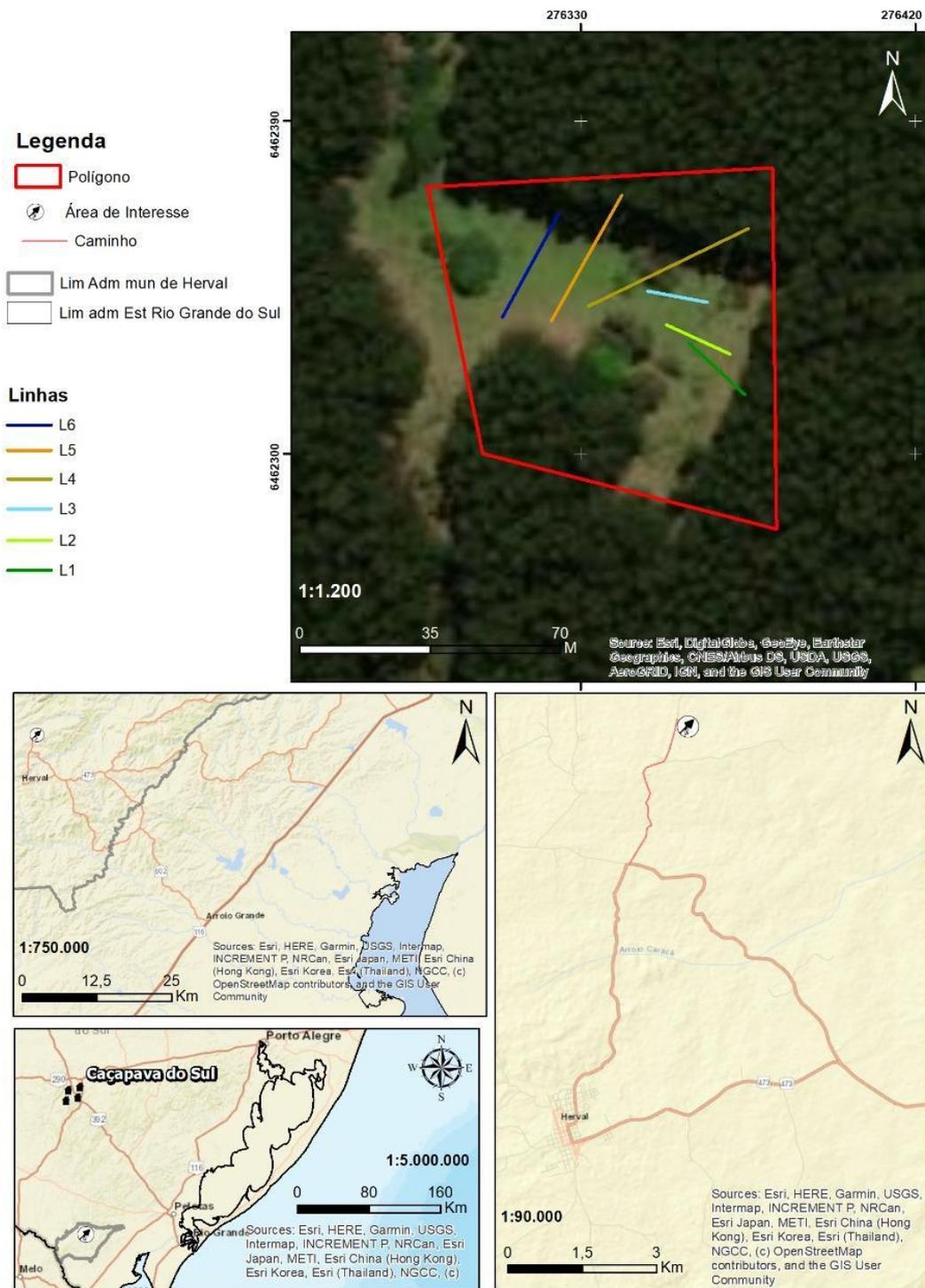
Outro aspecto que culminou na elaboração desse trabalho é demonstrar o valor da aplicação de métodos indiretos nas pesquisas arqueológicas visto que toda e qualquer escavação acaba por ocultar um pouco dos vestígios da área em estudo e a geofísica pode auxiliar a mitigar esse infortúnio já que obtém respostas sem contatar diretamente com o subsolo. Também se espera que alunos e pesquisadores de outras instituições possam se inspirar nos resultados desta pesquisa, aplicando a metodologia na mesma região, com aparelhos mais apropriados e com maior janela de tempo para realizar seus estudos.

## **4 ÁREA DE ESTUDO**

### **4.1 Localização**

O Sítio Arqueológico São José II situa-se na fazenda São José, que se distancia aproximadamente 7 Km a noroeste do município de Herval, o qual está inserido na Mesorregião do Sudeste Rio-Grandense, a cerca 391 Km da capital Porto Alegre. Para acessar o Sítio estudado, partindo da UNIPAMPA campus Caçapava do Sul, segue-se na Av. Pedro Anunciação na orientação sudeste em direção à avenida Pres. Kenedy, vira-se à esquerda na Av. Pres. Kennedy até chegar no trevo com a BR-392. Na BR-392 segue-se em sentido ao município de Santana da Boa Vista, até chegar ao trevo com a ERS-153 continuando em direção ao município de Bagé, até chegar ao trevo com a BR-293 onde vira-se à esquerda em sentido a Pinheiro Machado até chegar no trevo com a RS-608., Percorre-se aproximadamente 60 Km pela ERS-608 até chegar na área de estudo, delimitada no mapa de localização (Figura 1).

Figura 1 - Mapa de situação e localização da área de estudo.



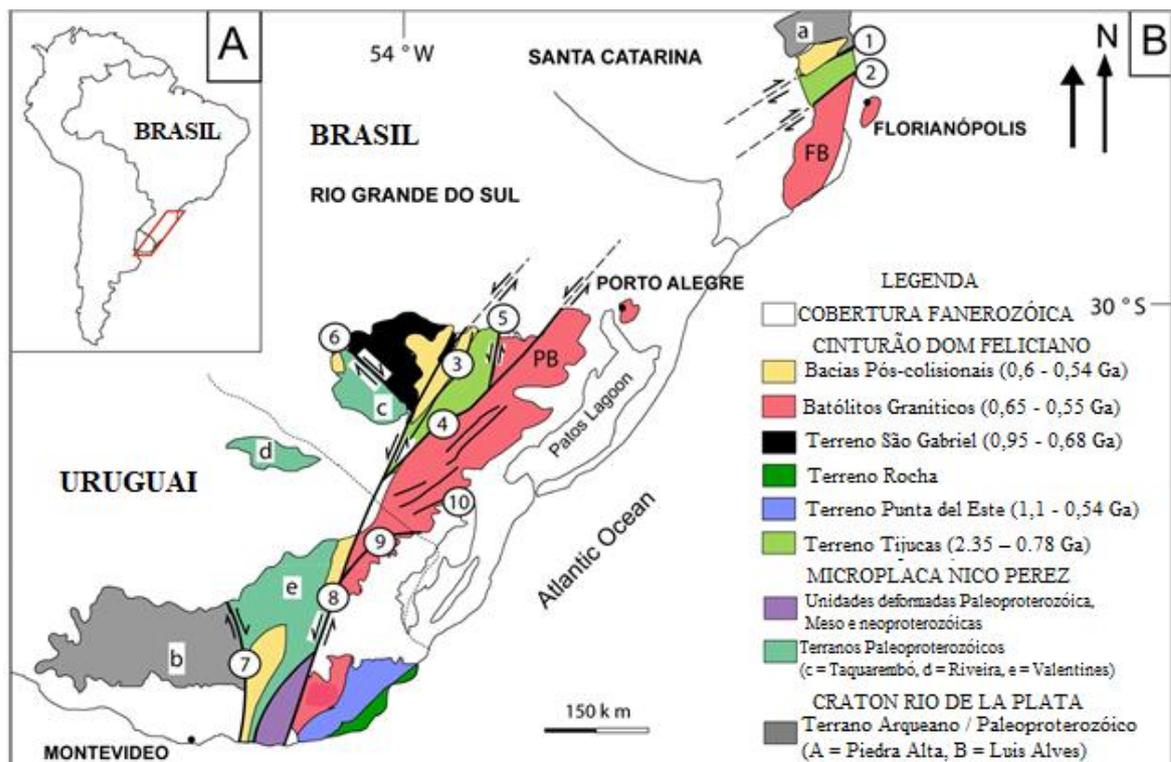
Fonte: Extraída da CPRM e modificado pelo autor

## 4.2 Geologia Regional

A geologia que compõe a área de atuação deste trabalho está inserida no Escudo Sul-riograndense e é alvo de estudo de diversos pesquisadores. Havendo numerosas pesquisas que contemplam informações sobre sua geocronologia, suas associações litológicas e os eventos relacionados a esta.

O Escudo Sul-rio-grandense é composto por terrenos metamórficos de médio a alto grau que instituem as áreas de embasamento Paleoproterozóico, intercalados com associações de rochas que explicitam a evolução de uma zona de convergência de placas durante o Neoproterozóico (PHILIPP et. al, 2007). A extremidade entre estas unidades é demarcada por zonas de cisalhamento dúcteis em escala continental, as quais foram responsáveis pela segmentação das unidades pré-cambrianas e por seu arranjo como faixas alongadas, seguindo a direção NE-SW, que passaram a constituir os Cinturões Vila Nova, Tijucas e Dom Feliciano (PHILIPP et. al, 2007) como ilustra a figura 2.

Figura 2 - Principais unidades geotectônicas do Sul do Brasil e Uruguai: **a** - Terreno Luis Alves; **b** - Terreno Florida; **c** - Terreno Taquarembó; **d** - Terreno Rivera, **e** - Terreno Valentines. Zonas de cisalhamento dúctil: **1** - Itajai-Perimbó, **2** - Major Gercino, **3** - Caçapava do Sul, **4** - Dorsal de Canguçu, **5** - Passo do Marinheiro, **6** - Ibaré, **7** - Sarandí del Yí, **8** - Sierra Ballena, **9** - Cerro Amaro, **10** - Arroio Grande



Fonte: Adaptado de Philipp et al. (2016)

O Cinturão Dom Feliciano (CDF) é o segmento sul da Província da Mantiqueira, e evidencia um segmento crustal fortemente deformado e migmatizado entre 650 e 620 Ma (FERNANDES et al. 1992; CHEMALE *et al.* 1995; BITENCOURT & NARDI 2000; PHILIPP e MACHADO 2005; SAALMANN et al. 2005, 2006, 2010; HARTMANN et al. 1999, 2000, 2011; BASEI et al. 2011; CHEMALE JR. 2012; PHILIPP et al. 2014, 2016). Remanescentes da crosta continental mais antiga são representados por septos expostos em Santa Catarina (HARTMANN et al. 2000; BASEI et al. 2008), Rio Grande do Sul (PHILIPP e MACHADO 2005, 2008; HARTMANN et al. 2008, 2011 apud. PHILIPP et al. 2016) e Uruguai (HARTMANN et al. 2000 apud. PHILIPP et al. 2016).

O cinturão Dom Feliciano é composto por unidades rochosas desenvolvidas durante três grandes eventos orogênicos: o Passinho (890 - 860 Ma), o São Gabriel (770 - 680 Ma) e o Dom Feliciano (650 - 540 Ma) (ex: CHEMALE JR. 2000; HARTMANN et al. 2007; SAALMANN et al. 2010 apud. PHILIPP et al. 2014, 2016). O CDF é dividido de oeste para leste em: i) Terreno São Gabriel; ii) Terreno Tijucas; iii) Batólito Pelotas e Florianópolis; e iv) Terrenos Rocha e Punta del Este.

#### **4.2.1 Batólito de Pelotas**

A área do estudo encontra-se inserida no Batólito Pelotas, o qual localiza-se na porção leste do ESRG e na zona central do CDF, sendo composto por um conjunto de suítes graníticas Neoproterozóicas (Ediacaran), geradas durante e após o climax da orogenia Dom Feliciano (PHILIPP et al., 2016). O batólito é um complexo plutônico multi-intrusivo de aproximadamente 400 Km de comprimento e 120 km de largura, composto por granito, gabro e diorito, assim como enxames de diques riolíticos a basálticos (PHILIPP & MACHADO 2005). Os granitóides evidenciam uma geração inicial de suítes cálcio-alcálicas alto K, com afinidade metaluminosa a peraluminosa, acompanhada por um magmatismo alcalino e, por fim, intrusões peralcalinas menos volumosas (PHILIPP & MACHADO 2005, OLIVEIRA et al. 2015 apud. PHILIPP et al., 2016).

As zonas de cisalhamento no batólito são evidenciadas por cinturas miloníticas com foliação subvertical, seguidas de uma lineação de estiramento sub-horizontal, e foram ativas durante a formação do batólito, controlando a intrusão das suítes graníticas (Fig. 10) (FERNANDES et al. 1992, KOESTER et al. 2001b, PHILIPP et al. 2003 apud. PHILIPP et

al., 2016). Episódios sin-colisionais de movimentos dúcteis compressoriais foram sequenciados por um período pós-colisional extensional (PHILIPP et al. 2003, 2007).

No Batólito Pelotas são reconhecidas as suítes graníticas Pinheiro Machado (SPM), Erval (SE), Viamão (SV), Encruzilhada do Sul (SES), Cordilheira (SC), Dom Feliciano (SDF) e Piquiri (SP), esta última constituída essencialmente por sienitos (PHILIPP, 1998; PHILIPP et al., 2002) (Figura 2). A unidade mais antiga do batólito é o Granito Quitéria, seguida da Suíte Cordilheira, Complexo Pinheiro Machado, e das suítes Viamão, Erval, Piquiri, Encruzilhada do Sul, Dom Feliciano (FRANTZ et al. 2003).

O pico de colisão foi controlado por compressão e novos episódios de cisalhamento ao longo da Zona de Cisalhamento Dorsal de Canguçu, associados à geração de magmas graníticos a básicos (PHILIPP et al. 2016). A porção norte do Batólito de Pelotas é dominada pelos volumosos leucogranitos pós-colisionais da Suíte Dom Feliciano, que ocorreram no final do Neoproterozóico.

Os *inliers* do embasamento são compostos por rochas metamórficas de baixo a alto grau, que ocorrem em vastas áreas na porção norte do batólito e como xenólitos de dimensões centimétricas a decamétricas nas regiões central e sul. As principais exposições estão inseridas nos granitos da Suíte Encruzilhada do Sul, e são xenólitos de paragneisses do Complexo Várzea do Capivarita (CVC) e ortogneisses do Complexo Arroio dos Ratos (CAR) (FERNANDES et al. 1992, PHILIPP et al. 2016). Na mesma região, na parte norte do Batólito de Pelotas, está o Anortosito Capivarita (CA) (CHEMALE et al. 2011 apud. PHILIPP et al., 2016).

Grandes exposições do CVC e CAR ocorrem como “*roof pendants*” nos granitóides da Suíte Encruzilhada do Sul e, em menor escala, na Suíte Cordilheira. O CAR é composto por gnaisse de tonalito e granodiorito cortado por granito, que expõe contatos tectônicos com o paragneisses de CVC (MARTIL et al. 2011, GREGORY et al. 2015 apud. PHILIPP et al. 2016). As rochas de ambos os complexos foram metamorfoseadas sob condições metamórficas de médio a alto grau (LIMA et al. 1998, GROSS et al. 2006, PHILIPP et al. 2013). Nesta área, o Anortosito Capivarita e as demais rochas que compõem o embasamento paleoproterozóico registram o metamorfismo colisional sob condições de fácies anfíbolito superior (FERNANDES et al. 1992, CHEMALE JR. et al. 2011, PHILIPP et al. 2016).

As idades temáticas dos ortogneisses do CAR são de aproximadamente 2,2 - 2,0 Ga (LEITE et al. 2000, SILVA et al. 2005, GREGORY et al. 2015 apud. PHILIPP et al. 2016). Vários outros corpos menores de gnaisse foram descritos destacando a ocorrência generalizada

de orto- e paragnaisse de alto grau, e também a presença de grandes xenólitos de xisto, quartzito e mármore do Complexo Porongos nas regiões de Herval e Pedro Osório (PHILIPP et al. 2003).

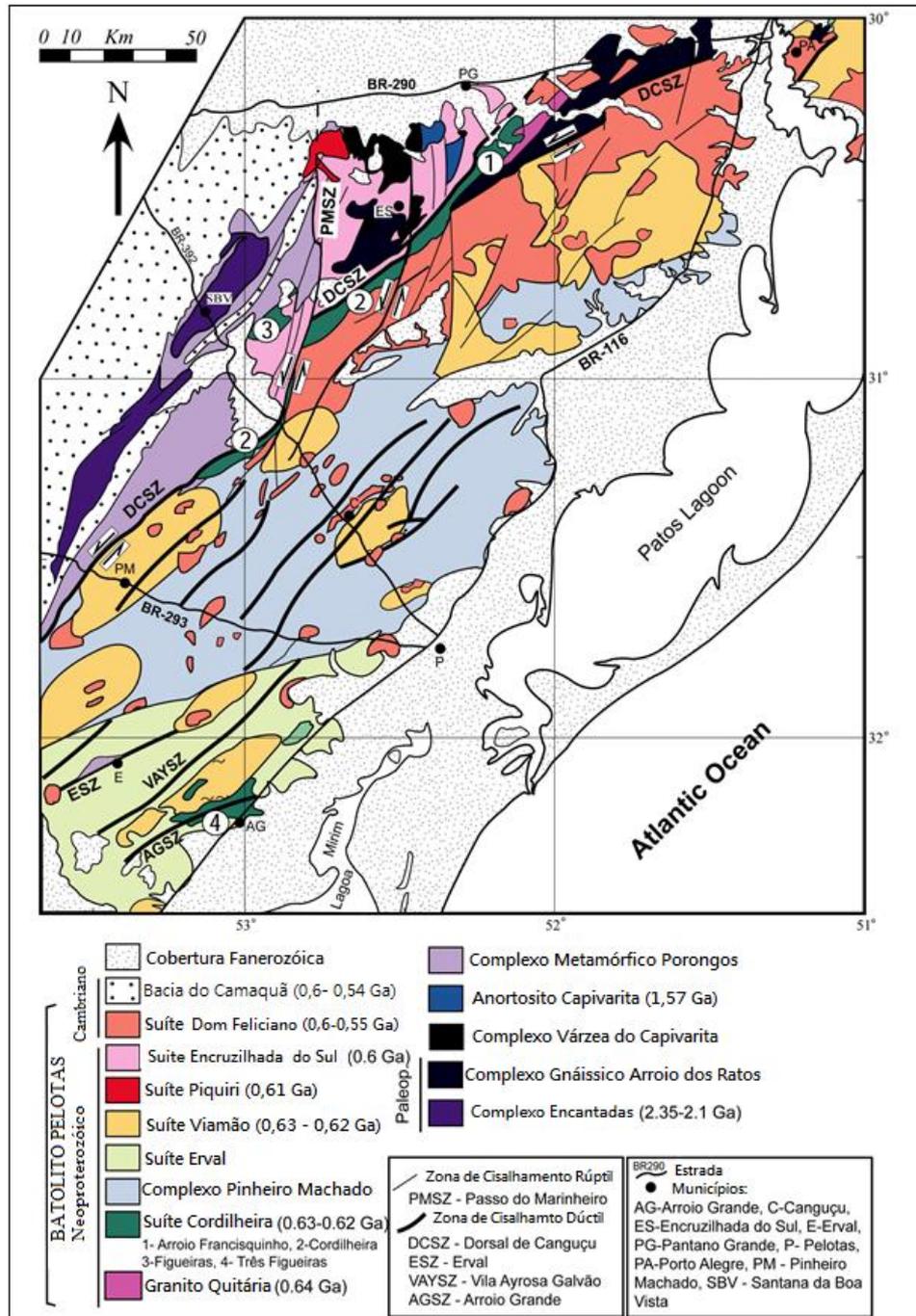
### **4.3 Geologia Local**

De acordo com a literatura, na região de estudo, afloram as Suítes Erval (SE) e Dom Feliciano (SDF) e Suítes Pinheiro Machado (SPM) (Figura 3). As Suítes Erval (SE) e Dom Feliciano (SDF) mostram-se relativamente mais evoluídas em comparação a SPM. Na SE são mais frequentes xenólitos das suítes (SPM, SC e SV) (PHILIPP et al., 2003).

A SE está subjacente à extremidade sul do BP e estende-se no sentido NE – SW (PHILIPP, 1998). Cobrindo aproximadamente 20% da área do batólito, inclui corpos graníticos situados a sul do lineamento estrutural de Capão do Leão; Pedro Osório; Basilio; Pedras Altas (PHILIPP et al., 2003). As rochas graníticas da Suíte Erval exibem estruturas magmáticas primárias, como alinhamento de feldspato K e biotita. Esta suíte está composta por corpos graníticos que ainda não foram geologicamente individualizados (PHILIPP et al., 2007).

Já a SDF, é a suíte mais jovem, e está subjacente à parte norte do Batólito perfazendo cerca de 20% da sua área (Figura 2). As intrusões SDF são leucocráticas e exibem granulação fina, média e grossa. Localmente, apresentam deformação dúctil incipiente nas margens (PHILIPP & MACHADO, 2005). O SDF mostra um intervalo de composição restrito ( Fig. 4 ) e é caracterizado por grande homogeneidade composicional, estrutural e petrográfica (PHILIPP & MACHADO, 2005).

Figura 3 - Mapa geotectônico simplificado do Batólito de Pelotas



Fonte: Adaptado de Philipp et al. (2016)

A polígono de estudo desse trabalho está inserida na Suíte Pinheiro Machado (SPM) (Figura 4). Na estratigrafia do batólito, a SPM é tida como a mais antiga. A SPM trata-se da suíte mais expressiva entre as demais, cobrindo cerca de 30% da área. É a única suíte de composição expandida, tendo o predomínio de granodioritos e monzogranitos, com tonalitos, dioritos e quartzo-dioritos subordinados (PHILIPP et al., 2003) que apresentam cores cinzentas

e estruturas magmáticas, como orientação mineral e bandamentos irregulares definidos por concentração de minerais máficos. (HARTMANN et al. 2007).

São habituais indícios de misturas de magmas, assim como existência de enclaves microgranulares dioríticos, centimétricos, arredondados a subarredondados, em contatos quase sempre curvos e lobados com a rocha hospedeira. Ocorrem, ainda, xenólitos de gnaisses graníticos e granitóides com texturas miloníticas, rochas calcissilicáticas, anfíbolitos e paragnaisses (PHILIPP et al., 2003).

O Complexo Pinheiro Machado é constituído por biotita granodioritos a biotita monzogranitos, de afinidade cálcicoalcalina alto-K, com ocorrência subordinada de tonalitos e dioritos (PHILIPP, 1998; PHILIPP & MACHADO, 2005 apud. PHILIPP et al., 2007). Apesar da beleza e da estrutura movimentada, as rochas nessa suíte apresentam um relevo homogêneo e muito arrasado, composto por coxilhas alongadas, sem grandes áreas de exposição e com manto de alteração com espessuras métricas (HARTMANN et al. 2007) esse caráter topográfico é ilustrado na figura 5.

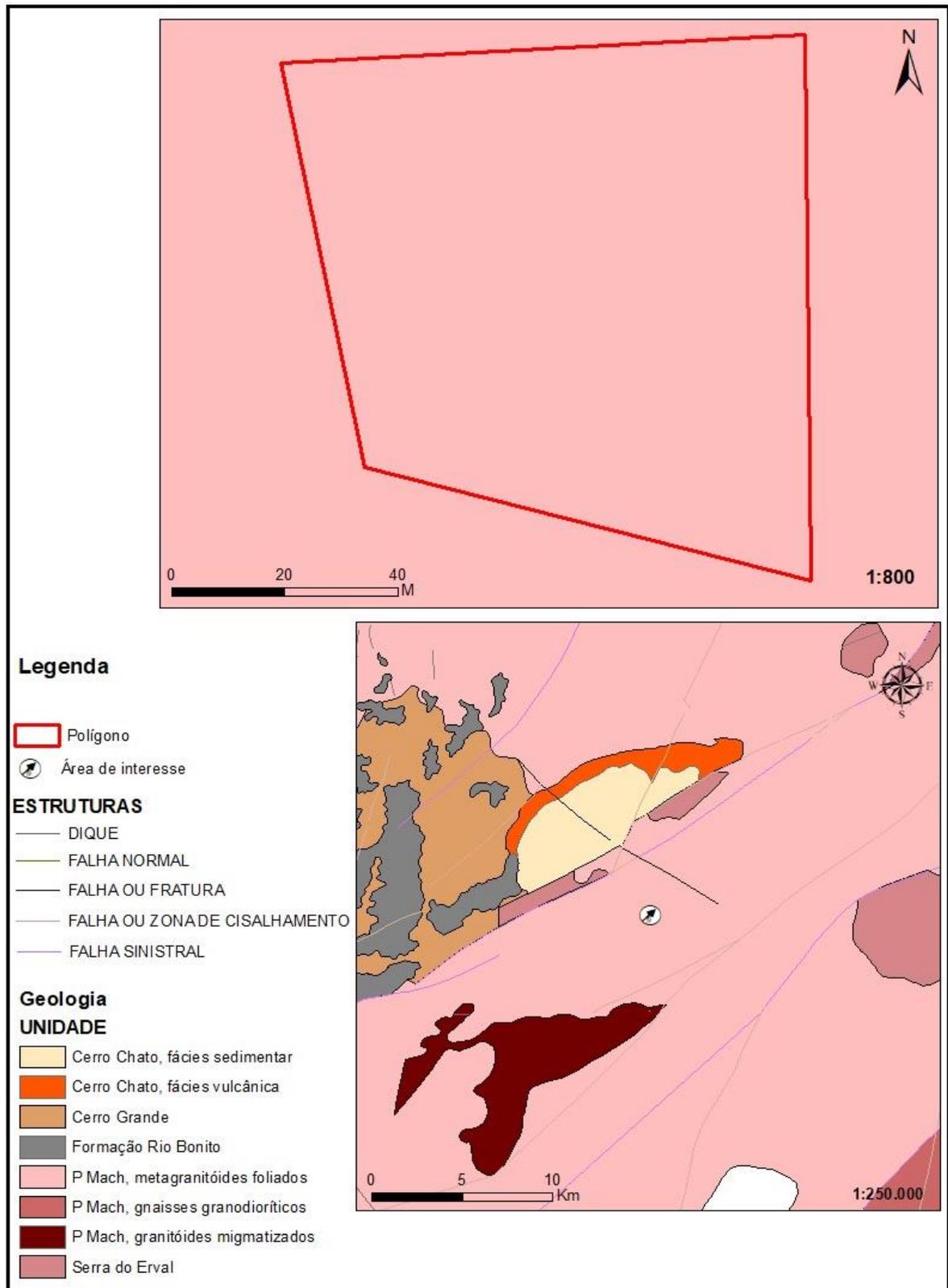
Quadro 1 - Resumo das principais feições geológicas das suítes graníticas do Batólito Pelotas

Suítes	Composição	Minerais Essenciais	Minerais Acessórios	Textura/Estrutura	Observações
Pinheiro Machado (SPM)	Grano/monzo (tona/dior/q-dior)	Plag>Qzo>FK >Biot	zir, ala, apa, tit, mag	equi (inequi), hpi orient,méd/gros	enclaves microgr máficos; misturas de magmas; xenólitos: gn, gr, anfib e calc
Dom Feliciano (SDF)	Sieno/álcali-feld (Qzo sienito)	FK>Qzo>Plag >Biot	ala, zir, tit,apa,opa	equi, hipi, gros	enclaves microgr e micáceos raros; pirocláticas, riolitos e básicas; <i>greisen</i> c/ Sn
Erval (SE)	Monzo (sieno)	Plag, FK, Qzo e Biot	zir, apa, opa	equi, hipi, méd/gros, flx mag	Xenólitos; mármore, anfib, gn e SPM

**Abreviações utilizadas:** *Minerais:* **anf** - anfíbólio; **ala** - allanita; **apat** - apatita; **Biot** - biotita; **FK** - feldspato de potássio; **gra** - granada; **mag** - magnetita; **opa** - opacos; **Plag** - plagioclásio; **Qzo** - quartzo; **tit** - titanita;; **zir** – zircão. *Textura/Estrutura:* **equi** - equigranular; **flx mag** - fluxo magmático; **gros** - grossa; **hipi** - hipidiomórfica; **ineq** - inequigranular; **méd** - média; **orient** – orientada. *Composição:* **álcali-feld** - álcali-feldspato granítica; **grano** - granodiorítica; **monzo** - monzogranítica; **dior** - diorítica; **Q-dior** - quartzo-diorito, **sieno** - sienogranítica; ton – tonalítica. *Observações:* **anfib** - anfíbolitos; **gn** - gnaisse; **gr** - granito; **microgr** - microgranular.

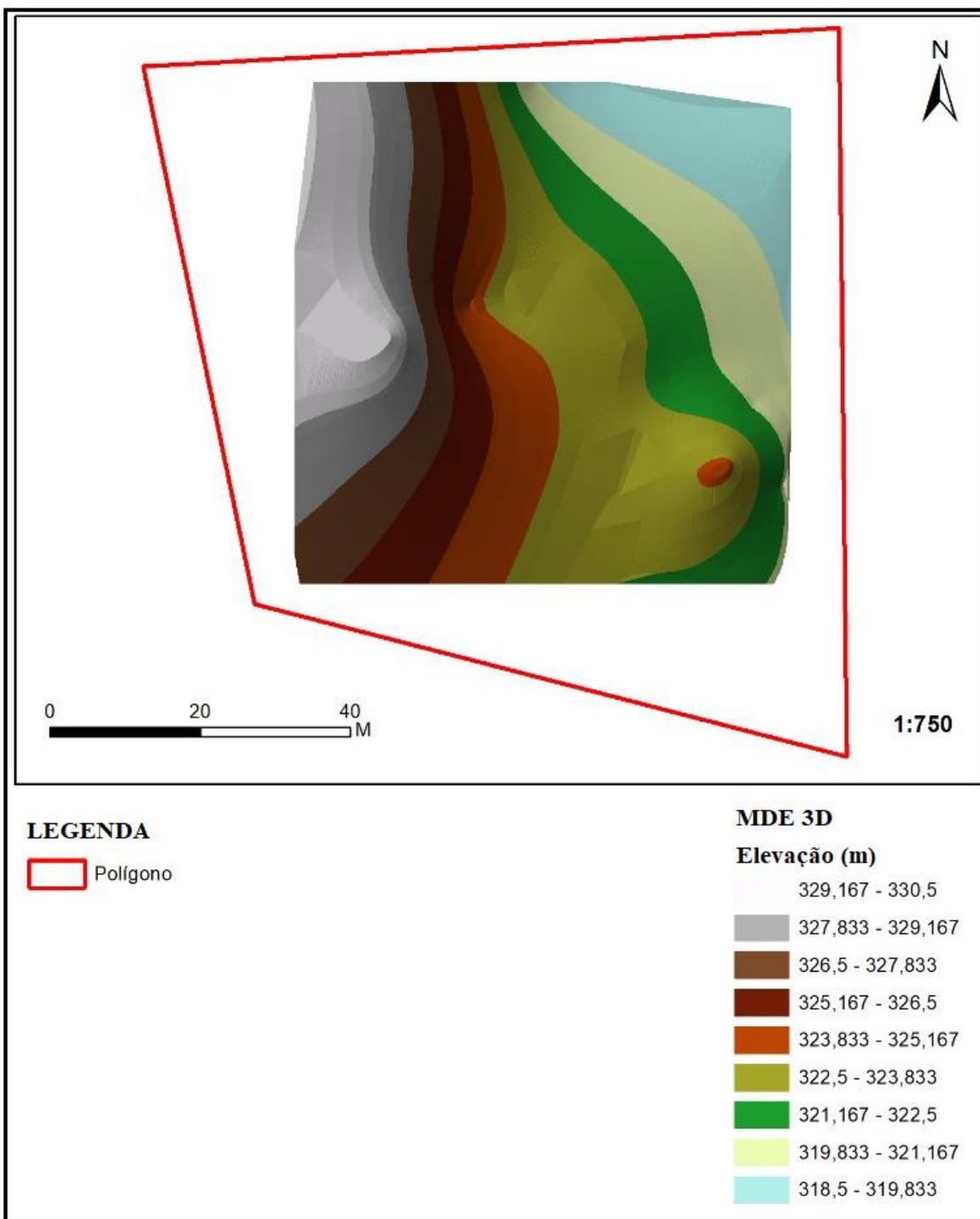
**Fonte:** Adaptado de Philipp et al. (2003)

Figura 4 - Mapa da geologia local



Fonte: O autor

Figura 5 - Modelo digital de elevação da área



Fonte: O autor.

## 5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 5.1 Contexto Histórico de Herval e sua Importância para Arqueologia do Município

#### 5.1.1 Formação Histórica do Município

Herval, assim como outras cidades dispostas sobre o escudo sul-rio-grandense, apresenta relatos, como exposto nos trabalhos de SCHMITZ (1979); RÜTHSCHILLING (1985); COPÉ (1986), que registram eventos e materiais correlacionados à ocupações pré-coloniais. Já trabalhos como o de MEDEIROS (1980); PEIXOTO & CERQUEIRA (2006); COUTO (2010) detalham evolução histórica do município a partir de movimentos mais recentes. Este tópico e o subsequente foram escritos totalmente baseados nas constatações e obras de PEIXOTO & CERQUEIRA (2006); COUTO (2010) e em relatórios do Instituto de Memória e Patrimônio elaborados pelo Arqueólogo Jorge Luiz de Oliveira Viana e a Arqueóloga Luciana da Silva Peixoto no ano de 2020 (discorrido no tópico 5.1.2) dando as devidas referências.

O século XVIII é lembrado na história por muitas discordâncias territoriais entre Portugal e Espanha que envolviam o atual estado do Rio Grande do Sul. Essas disputas começaram no século XVII com a fundação da Colônia do Sacramento pelo povo português (COUTO, 2010). Dito isso, o município de Herval (nome deriva da extração de erva, que era abundante na região) tem suas origens no final do século XVIII quando o gaúcho Rafael Pinto Bandeira<sup>6</sup> arquitetou um acampamento militar para ampliar as fronteiras portuguesas estabelecidas pelo Tratado de Santa Ildefonso<sup>7</sup> (COUTO, 2010).

Entretanto, devido ao Tratado assinado em 1777, a área que corresponde ao município de Herval ficou para os espanhóis e Pinto Bandeira decidiu avançar até o Rio Jaguarão, que no momento, era propriedade portuguesa (COUTO, 2010). No final do Século XVIII, à margem direita do Arroio do Herval, dá-se origem a uma Igreja, um quartel e um quadro de trincheiras. Em virtude dessa disputa incessante, trabalhadores tinham de se prevenir, tendo sobre suas posses ferramentas de defesa, como espadas e boleadeiras (COUTO, 2010).

---

<sup>6</sup> 1º gaúcho a comandar todas as forças militares do Continente de São Pedro, o atual Rio Grande do Sul (BENTO, 1996).

<sup>7</sup> O tratado de Santo Ildefonso havia sido elaborado em 1777 e assinado em 1778. De acordo com suas disposições, a Colônia do Sacramento e as terras a leste do rio Uruguai caberiam à Espanha, incluindo o território das missões orientais. Portugal seria soberano da região do Rio Grande e adjacências, passando o limite fronteiro pelo rio Jacuí (DA SILVA, 2018)

Após intensos conflitos que envolveram os portugueses e espanhóis, em virtude da violação (invasão do acampamento militar de Pinto Bandeira) das determinações contidas no Tratado de 1777, o comandante das formaturas lusitano abandonou a região (COUTO, 2010). Dentre as obras atribuídas a Bandeira, uma foi a Igreja construída em 1791, a qual foi devastada devido à ocorrência de um incêndio no ano 1823, sendo outra edificada nas proximidades da antiga povoação, nomeada então de São João Batista. Em 18 de Janeiro de 1825, por um alvará Real, a região tornou-se a 20ª Freguesia da Província com a denominação de São João Batista de Eral (COUTO, 2010).

De acordo com a literatura, a economia local se estabelecia baseada na exploração de três classes “industriais”, que davam ocupação a muitos empregados (MEDEIROS, 1980 apud. COUTO, 2010). Eram essas:

**A indústria pastoril** que abrangia os carneadores e esquiladores que aproveitavam o coró dos animais abatidos para comércio e confecção, existiam campeiros, domadores, trançadores, que confeccionavam laços e outros materiais de couro cru e, por fim, os tosquiadores (COUTO, 2010);

**A indústria agrícola** abrangia os lavradores, os ceifadores, os emedadores e os trilhadores (COUTO, 2010);

**A indústria extrativa** empregava, certamente, demais artesãos, no entanto, não há muitas informações sobre esses empregados, visto que os ervais foram devastados rapidamente (COUTO, 2010).

Se aproveitando dos movimentos econômicos, escravistas como Bonifácio José Nunes e Antônio Madruga de Bitencourt, foram plantadores de mandioca e fabricantes de farinha em engenhos situados em suas terras. José Nunes detinha uma olaria de tijolos e telhas, aprimorando as construções da época, já que as casas eram elaboradas de *pau-a-pique* e cobertas por palha (COUTO, 2010). No entanto, durante a revolução farroupilha (1835-1845) a região sofre uma grande crise econômica, relacionada aos confrontos dos legalistas, comandados por João da Silva Tavares, e os farroupilhas representados por Félix Vieira (COUTO, 2010).

Em 1881, ocorre um grande marco para Herval, por meio da Lei Provincial nº 1.326, de 20/05/1881 a localidade consegue sua emancipação política de Jaguarão (PEIXOTO & VIANA, 2020). É importante ressaltar que de um estratégico acampamento militar, Herval tornou-se uma região essencial, devido a importância de sua pecuária e o entrosamento dessa com o restante do Brasil (COUTO, 2010). Em 1881, é instalada a vila de Herval na região de

Pelotas. O enorme registro da polivalência histórica no patrimônio arquitetônico do município, assim como a importância da arte cemiterial até hoje preservada, evidencia o avanço obtido pelos habitantes da localidade entre o final do século XIX e início do século XX (PEIXOTO & CERQUEIRA, 2006).

A história relata, que o desenvolvimento da economia de Herval, teve ligação com trabalho escravo, onde havia fazendeiros que chegavam a possuir mais de cem cativos (MEDEIROS apud. COUTO, 2010). Nesse caso, tratar-se-ia de fazenda com charqueada, olaria e plantações. O tratamento dispensado a esses trabalhadores foi duro, motivando atos de resistência (COUTO, 2010).

Ao longo do séc. XIX, o comércio existente entre cidades maiores, a exemplo de Bagé e Pelotas, colaborou para a formação e crescimento de povoados que viriam a se tornar centros urbanos estratégicos para etnias comerciárias, tendo como principal exemplo os árabes libaneses, cuja presença deixa até hoje fortes vestígios em cidades próximas a fronteira, como é o caso de Herval (PEIXOTO & CERQUEIRA, 2006).

Em 1938, durante o Estado Novo, no governo estadual do Interventor Federal Cordeiro de Faria, natural da cidade de Jaguarão, foram criadas quatro cidades: Piratini, Herval, Canguçu e Painheiro Machado (PEIXOTO & CERQUEIRA, 2006). Era, então, comum que os pecuaristas morassem em Pelotas, vivendo no meio urbano, e tivessem suas propriedades implantadas na campanha de municípios menores tais como Herval do Sul (PEIXOTO & CERQUEIRA, 2006).

De acordo com informações disponibilizadas abertamente no site da Prefeitura de Herval, sua evolução histórica pode ser resumida da seguinte forma:

1791 – Início do povoamento de São João Batista de Herval.

1825 – Elevação à Freguesia ( 18 de janeiro ).

1871 – Elevado à Município ( Lei 757 de 04/05 ).

1881 – A sede é elevada à Vila ( Lei 1326 de 20/05 ).

1883 – É instalada a 1º Câmara de Vereadores ( 20/03 ).

1892 – É votada a 1º Lei Orgânica ( 05/08 ).

1938 – A sede é elevada à Cidade ( decreto – Lei N° 311 de 02/03 ).

### 5.1.2 A Importância da História no Contexto Arqueológico

Compreendendo que as aglomerações, que ocorreram após o tratado de Santo Ildefonso em 1777 no envolvimento aos acampamentos militares, foram responsáveis pelo início das povoações urbanas, ou por sua elevação à categoria de freguesia, como por exemplo: Arroio Grande, Bagé, Piratini, Dom Pedrito, Santana do Livramento, Quaraí, Jaguarão e Erval (IMP, 2020).

A cada avanço ou recuo das fronteiras estabelecidas, até então, pelos tratados entre coroa portuguesa e coroa espanhola, foi dando-se origem a novas estratégias de povoamento, com doações de sesmarias, na intenção de garantir a territorialidade (IMP, 2020). No século XVIII, a estratégia empregue pelos lusitanos que garantiriam a posse e defesa das áreas situadas no sul do Brasil, foi a instalação de acampamentos militares e a edificação de fortes e presídios, assim como a distribuição de sesmarias a pessoas de prestígio e/ou militares (IMP, 2020).

O processo de doação de terras por meio dos títulos de concessão de sesmarias, e a legitimação dos “arranchementos”, foi um dos grandes responsáveis pelo avanço português em terras de domínio espanhol (SOARES, 2011 apud. IMP, 2020). Com a exclusão dos espanhóis na Vila de Rio Grande, no ano de 1776, novos caminhos foram abertos para que as pessoas fossem aos poucos ocupando o território. Assim, ao final do Século XVIII, o número de sesmarias doadas na área ao sul do rio Piratini aumentou de forma brusca (OSÓRIO, 2006 apud. IMP, 2020).

Pelo edital de 31 de agosto de 1746 houve a maior transferência, registrada, de açorianos para o Brasil, estando Herval, incluído entre os municípios de destino (BARROSO, 2002 apud. IMP, 2020). A ocupação territorial e a estruturação da rede urbana fundamentaram-se em três ações complementares: à concessão de terras, a abertura de vias de comunicação e a implantação de assentamentos urbanos (ROCCA, 2009 apud. IMP, 2020)

Associado a todos os movimentos descritos, muitas estruturas foram sendo despovoadas ao longo dos anos, sedes de fazendas foram sendo ofuscadas ou suprimidas para utilização de novas culturas. Isso se dá concatenado a diversos fatores, como a migração de grandes produtores para os principais centros urbanos, erradicando da vida pacata, em suas estâncias no interior para o mundo agitado e moderno. Esse egresso acarretou no despovoamento de suas sedes e ao longo dos anos essas estruturas se degradaram até sucumbirem de vez.

Entretanto, há localidades que mantêm parte visível de sua estrutura, com materiais e arquiteturas em ótimos estados de preservação, que foram repassadas e administradas por uma

mesma linhagem familiar no decorrer das gerações. Um exemplo é o Sítio Arqueológico Histórico Santa Heloísa 02, que era sede da Fazenda Santa Heloísa.

De acordo com o diagnóstico de Jorge Luiz de Oliveira Viana e Luciana da Silva Peixoto em 2020:

[..] O sítio se localiza na porção sul-sudoeste da Fazenda Santa Heloísa, que pertencia ao quinto, dos sete distritos de Herval. A propriedade era de posse de José Érico da Silva Souto até ser vendida para a Votorantim Celulose e Papel (VCP). A Fazenda foi herdada de seu pai, o Coronel da reserva do exército brasileiro, José d'Ávila Souto. Primeiramente José Érico tornou-se administrador na década de 1980, e posteriormente proprietário em 1992, quando seu pai faleceu.

Segundo moradores, no complexo de edificações da área da sede (que hoje compõe o Sítio Arqueológico Histórico Santa Heloísa 02) moravam diversas famílias de funcionários. Um dos moradores conta que o menor número de que se lembra é de 10 famílias compartilhando aquele espaço da Estância. Porém, apesar do número de pessoas que viviam ali, não havia venda ou qualquer outro tipo de comércio [..].

Inúmeros são os sítios históricos que abrangem a região e se assemelham às configurações do sítio Santa Heloísa 02, demais locais expõem estruturas remanescentes nas proximidades, como é o exemplo da Fazenda Santa Matilde e da Fazenda São José.

Levando em consideração todo o contexto histórico da região e informações dos materiais (canos, alicerces, tijolos e um poço) que foram identificados durante vistorias elaboradas pela equipe técnica do IMP em 2016, na fazenda São José II, área alvo deste trabalho, há a hipótese que essa possa ser uma típica sede de fazenda associada às primeiras ocupações de fronteira.

De acordo com as informações cedidas pelo IMP o sítio arqueológico São José II situa-se na porção norte da Fazenda São José II. Tendo sido registrado junto ao CNSA (Cadastro Nacional de Sítios Arqueológicos) como “remanescentes arquitetônicos da sede administrativa da fazenda” na data em que ocorreu seu registro, o mesmo apresentava somente negativos da construção (IMP, 2016).

O local em que se encontra o sítio arqueológico apresenta um poço com telhas capa canal nele escoradas (Figura 6). Este poço está próximo aos eucaliptos. Na poligonal encontram-se ainda possíveis alicerces de construção (figura 7), materiais dispersos como manilhas (Figura 9), tijolos (Figura 10) e também um muro de pedra nas limitações do sítio (figura 11). É possível

que este material construtivo disperso pela superfície do terreno originalmente fizesse parte da antiga construção (IMP, 2016).

Entretanto, como observado no decorrer dos apontamentos de Jorge Luiz de Oliveira Viana e Luciana da Silva Peixoto, grande parte das informações locais não se encontram na bibliografia e sim pelas lembranças e informações concedidas por cidadãos que habitam ou habitaram a Fazenda ou nas suas redondezas. Logo, ressalta-se que durante a pesquisa que originou esse trabalho, o autor não conseguiu contatar nenhum morador que possuísse informações sobre o sítio em questão.

Figura 6 - Poço em meio à silvicultura com empilhamento de telhas



**Fonte:** Instituto de Memória e Patrimônio, 2016

Figura 7 - Mosaico com 2 possíveis alicerces de construção



Fonte: O autor

Figura 8 - Possível alicerce de construção



Fonte: O autor

Figura 9 - Cano antigo disperso na área



Fonte: O autor

Figura 10 - Mosaico evidenciando materiais construtivos dispersos na área



Fonte: O autor

Figura 11 - Muro de pedra nas extremidas do Sítio



Fonte: Instituto de Memória e Patrimônio, 2016

## 5.2 Geofísica na Prospecção Arqueológica

Um estudo geofísico baseia-se em um conjunto de medições realizadas na superfície terrestre por meio de perturbações geradas. Essas são resultantes das propriedades físicas do subsolo e são transmitidas para superfície (OSELLA, *et al.* 2009). Respostas produzidas são recebidas por um sensor específico capacitado para armazenar informações, uma análise detalhada permite a caracterização e detecção do subsolo. Dessa forma é fundamental descobrir onde uma região difere-se suficientemente de outra, em algum aspecto físico, partindo desse conjunto de dados uma imagem detalhada do subsolo pode ser gerada (OSELLA, *et al.* 2009).

O arqueólogo objetiva em seu estudo identificar em subsuperfícies locais propícios a escavações, economizando tempo e dinheiro, assim, a geofísica por se tratar de um método não interativo, vem sendo crescentemente utilizada.

Linford (2006), identificou durante seus estudos sobre geofísica arqueológica que uma das primeiras aplicações dessa, foram implementadas por Atkinson na Grã-Bretanha em 1946, quando o mesmo realizou uma pesquisa de resistividade elétrica, no local de um monumento de rochas do período neolítico<sup>8</sup>, na vila de Dorchester on Thames, no condado de Oxfordshire, sudeste da Inglaterra.

Atkinson<sup>9</sup> aderiu a técnica de resistividade elétrica, a qual, na época, já estava

---

<sup>8</sup> O período Neolítico foi caracterizado pelo espetacular crescimento técnico da manipulação da pedra, o seu polimento, como e principalmente pelo desenvolvimento da agricultura iniciada no período anterior (NAVARRO,2006).

<sup>9</sup> Arqueólogo britânico nascido no condado de Dorset no sudeste da Inglaterra (22 de janeiro de 1920 - 10 de outubro de 1994) Em 1944, tornou-se Assistente de Arqueologia no Museu de Ashmolean. Em 1949, ele foi nomeado professor na Universidade de Endiburgo. dirigiu escavações em Stonehenge para o Ministério das Obras entre 1950 e 1964. Durante esse período, ele ajudou a trazer teorias sobre as origens e a construção de Stonehenge para um público mais amplo. Ficou famoso por suas contribuições práticas à técnica arqueológica e por suas

empregada e com resultados satisfatórios no ramo da engenharia civil, no entanto, seus estudos provaram grande importância da sua aplicação, também, na identificação de restos arqueológicos, ressalta-se que os estudos de Atkinson auxiliaram para a escavação no Stonehenge<sup>10</sup>(LINFORD, 2006).

No início da década de 1980, a geofísica tornou-se uma grande ferramenta para prospecção arqueológica, devido a seu notório potencial para corroborar nessa ciência. Os principais países a fazerem uso desses métodos foram Alemanha, França e Estados Unidos da América, estimulando um progresso na especialização em técnicas de pesquisa, aquisição, processamento e interpretação de dados, aspectos os quais resultaram em uma disciplina hoje denominada Geofísica Arqueológica (SALA *et al.*, 2012).

Há distintas denominações ao verdadeiro significado ou qual a definição mais apropriada a ser atribuída a geofísica na prospecção arqueológica. No entanto, de forma genérica, é interpretada como extensas explorações elaboradas com o uso de métodos e aparelhos que tem como seu resultado a geração de mapas que retratam propriedades do subsolo, auxiliando de forma significativa na obtenção de dados informativos de vestígios arqueológicos. (SALA *et al.*, 2012).

Atualmente existe um leque de métodos de *Geofísica Rasa*, entre os quais podem ser citados o GPR, a resistividade elétrica, a magnetometria, o eletromagnético indutivo (ou condutivímetro), a sísmica de reflexão, microgravidade, entre outros. Na Arqueologia, as metodologias mais empregadas são: a magnetometria, resistividade elétrica e georadar (figura 12) (WYNN, 1986; cf. JOHNSON, 2006 apud SCOTT, *et al.*, 2017).

Não há um padrão formal para a realização de levantamento geofísico em arqueologia, principalmente porque existem muitos parâmetros que determinam o resultado, e existem vários fins para os quais podem ser utilizados os resultados. Uma variedade de técnicas geofísicas está disponível (por exemplo magnetômetro, a resistividade e raio de penetração no solo (GPR)) e cabe ao pesquisador escolher uma metodologia específica para a coleta de dados com qualquer uma dessas técnicas (por exemplo, uma pesquisa em grade com uma separação de transectas específica). As escolhas serão feitas de acordo com as questões arqueológicas apresentadas (SCHMIDT, *et al.* 2016).

---

soluções pragmáticas para problemas no local, listadas no manual que ele escreveu chamado *Field Archaeology*. (informações extraídas do site de la parisien, na data de 10/10/2019).

<sup>10</sup> Conjunto de enormes blocos de rochas dispostos em círculo. O monumento fica no sul da Inglaterra, perto da cidade de Salisbury, no condado de Wiltshire. A estrutura foi construída por etapas, entre 3,5 mil e 5 mil anos atrás

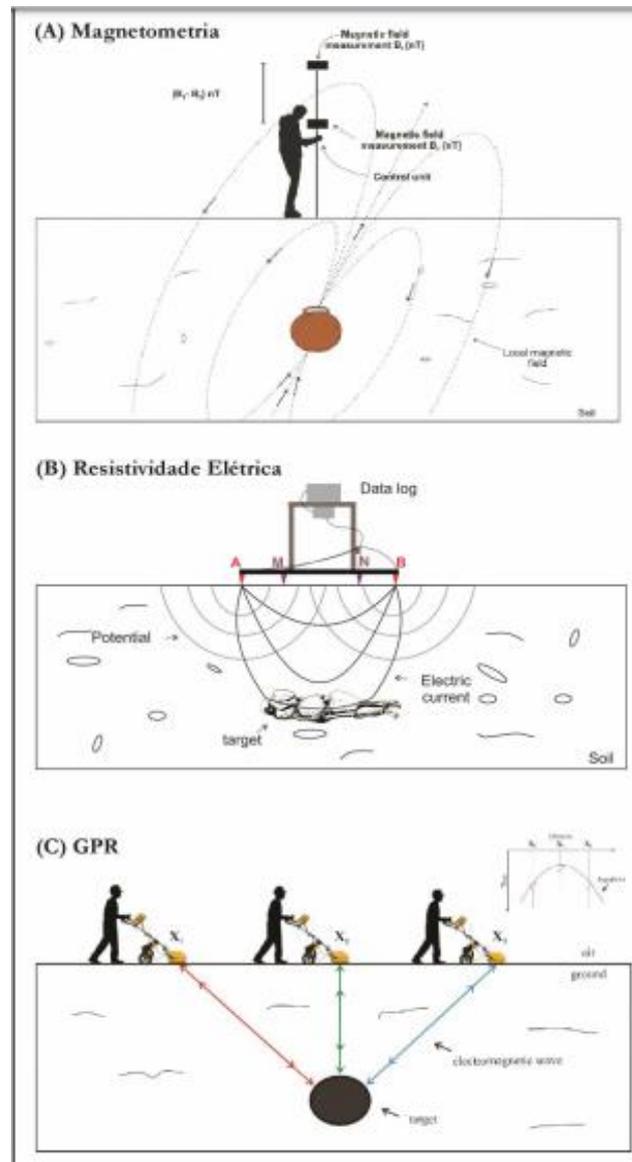
A prospecção geofísica provou ser uma ferramenta útil para ajudar os arqueólogos a melhorar seu conhecimento de sítios arqueológicos. Nas últimas décadas, seu uso cresceu e sua literatura especializada foi desenvolvida.

Nos últimos anos, a capacidade, assim como a qualidade, resolução e velocidade dos sensores vem em uma crescente significativa. Enfatiza-se, ainda, a redução dos custos de aplicação dos métodos. Tais aspectos corroboram para que atualmente a prospecção arqueológica, a partir da geofísica, seja uma das principais e mais valiosas ferramentas de pesquisa para os arqueólogos (SALA *et al.*, 2012).

Segundo Sala *et al.* (2012), levantamentos geofísicos se encaixam nas mais diversas funções para contribuição em investigações arqueológicas como delimitação, descrição, geração de mapas que evidenciam registros passados. Com baixos custos e de forma não interativa, não causam danos as propriedades pedológicas da região de estudo, permitindo uma nova maneira de elaborar projetos e estudos arqueológicos.

A Geofísica Arqueológica melhorou drasticamente, diversos padrões para estudo do passado, a exemplo da identificação da área exata coberta de um único projeto, ajudando arqueólogos a explorar amplas áreas e compreender os locais com uma óptica mais abrangente, e não somente pelos objetos, materiais ou restos (SALA *et al.*, 2012). No Brasil, na década de 1980 houve um grande marco na aplicação de métodos geofísicos na prospecção arqueológica. O estudo fez uso, na época, de métodos elétricos e magnéticos no mapeamento de sítios da cultura e cerâmica na Ilha de Marajó no *Sítio Teso dos Bichos* (ROOSEVELT 1989,1991 apud BRITO-SCHIMMEL, 2002).

Figura 12 - Representações das metodologias de magnetometria (gradiômetro) (A), resistividade elétrica (arranjo Wenner) (B), e GPR-Ground Penetrating Radar (C). (Desenhos, Bruno Poluha)



Fonte: Extraído de Scott, J. A. *et al.*, 2017

### 5.2.1 Principais Aplicações

A geofísica foi aplicada em uma múltipla escala de investigações arqueológicas, às vezes, em formas imaginativas ou incomuns. Mas podemos traçar as linhas brutas de uma pequena classificação da maioria das pesquisas comuns por seus objetivos (SCHMIDT, *et al.* 2016).

### 5.2.1.1 Arqueologia de Paisagem

A arqueologia de paisagem é denotada pelos arqueólogos, como a interação humana com o meio físico no passado, ou seja, registros de construções, de criação de estradas, desmatamentos que ocorreram em tempos remotos, porém deixaram evidências que não desvaneceram no passar do tempo. Para muitos a arqueologia de paisagem, trata-se da conexão das ciências arqueológicas com as ciências geológicas, dispondo das diversas ramificações que se associam a estas, a exemplo da biogeografia<sup>11</sup>, geopolítica<sup>12</sup>, geoarqueologia, história, arqueobotânica<sup>13</sup> entre outras (MORAIS, 1999 apud OLIVEIRA, 2007).

Partindo dessa premissa pode se compreender que há uma grande variedade de métodos para resolução de indagações atribuídas a identificação de registros paisagísticos preservados. Devido a essa amplitude de ciências para corroborar com essa, pode-se atribuir valor à implementação de dados geofísicos interpolados com Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) que auxiliam em pesquisas de grandes áreas, economizando tempo em campo.

Através da interação de dados provenientes de imagens aéreas ou ainda de satélites multiespectrais, é possível obter mapas em detalhe de extensas áreas. (SCHMIDT, *et al.* 2016). Os mais diversos padrões e fatores são atribuídos para designar o que de fato é paisagem, ou seja, sua formação estaria inteiramente associada aos comportamentos do meio físico ou da interação humana com o meio. Custódio (2016), aborda essa temática exaltando os fatores relevantes nessa discussão, utilizando de distintas fontes de informações, ainda, associa o auxílio imposto por ferramentas SIGs para interpretações arqueológicas.

Ferramentas SIGs são fatores importantes dos mais diversos aspectos a se pontuar no meio da ciência arqueológica, tais ferramentas, devido a seus padrões tecnológicos, indicam localizações precisas, atribuem dados a imagens que georreferenciam as mesmas, e são representados em projeções cartográficas (McCOY, 2009; WHEATLEY, 2004 apud CUSTÓDIO, 2016). Com a evolução de softwares de processamentos de dados SIG, foram impulsionados novos projetos de arqueologia de paisagem, pois, devido ao alto potencial

---

<sup>11</sup>A biogeografia é um ramo da Geografia Física que estuda a distribuição dos seres vivos na superfície terrestre, as causas que a condicionam, tendo seus pressupostos teóricos e metodológicos fortemente baseados na interdisciplinaridade (SANTOS & CARVALHO, 2012).

<sup>12</sup> " Fernandes (2002) classifica a geopolítica como a ciência do Estado enquanto organismo geográfico tal como este se manifesta no espaço.

<sup>13</sup> "A arqueobotânica é uma disciplina que aborda conceitos e definições tanto da arqueologia quanto da botânica e seu objetivo é estudar as inter-relações entre os seres humanos e a vegetação (FÉLIX,2014).

computacional, podem ser analisadas grandes áreas em boa resolução, facilitando a interpretação de acontecimentos passados por meio dessas (CUSTÓDIO, 2016).

Com resultados obtidos por imageamento de satélite unificados a métodos geofísicos, com potencial de varredura de uma grande área seria, então, possível identificar localizações que foram afetadas por atividades antrópicas, a exemplo a magnetometria, cedendo valores associados ao soterramento de objetos, bem como o uso do fogo. Ainda existem outras técnicas potenciais, como medições de fosfato e condutividade do solo, fatores que ajudam a entender como ocorre o transporte, assim como, a utilização de terra no passado (SCHMIDT, *et al.* 2016).

#### **5.2.1.2 Exploração e delimitação dos sítios arqueológicos**

Desde o início deste século tem sido comum para equipes de pesquisa arqueológicas envolvidas em projetos de longo prazo usar da geofísica para revisitar suas investigações (SCHMIDT, A, *et al.* 2016).

Schmidt et al. (2016), explica que, levando-se em conta que a escavação completa de alguns sítios arqueológicos poderiam ser uma obra de décadas, a possibilidade de explorar a área completa do sítio e ter uma clara delimitação de vestígios é definitivamente a melhor maneira de tomar decisões sobre onde cavar e por que fazê-lo.

Portanto pode-se entender que um reconhecimento prévio, por meio de ferramentas indiretas, pouparia tempo e custos durante pesquisas arqueológicas. A geofísica configuraria uma das principais ferramentas de aceleração desse processo. O contraste com as propriedades físicas de superfície e/ou subsuperfície ajuda a identificar alvos, em um menor espaço de tempo, possibilitando escavações mais eficientes.

A literatura corrobora com o impulso e estímulo de autores para com o uso de equipamentos geofísicos, já que são de baixa magnitude documentos relatam ineficiência dos mesmos. Entretanto no cenário nacional nota-se uma escassez em registros de aplicações dessas técnicas, o que acarreta no descaso para essa forma de exploração (ALLEN, *et al.* 2017).

### **5.2.1.3 Análise de arquitetura e descrição dos elementos arqueológicos específicos**

Algumas técnicas de levantamento geofísico são mais sensíveis para a morfologia de objetos tais como GPR ou resistividade e são utilizados em escalas menores (SCHMIDT, *et al.* 2016).

Schmidt et al. (2016) aborda que usando sensores e metodologias especificamente pensadas para a indústria de construção e engenharia, os geofísicos que aplicaram essas técnicas podem resolver os problemas relacionados com a restauração da arquitetura ou para obter imagens de objetos arqueológicos específicos.

A capacidade do GPR de alta frequência faz com que seja comumente usado como uma ferramenta de diagnóstico na arquitetura de restauração, uma vez que o uso de análise 3D poderia ajudar a obter informações de objetos escondidos e estruturas de obras históricas (SCHMIDT, *et al.* 2016). Utilizando antenas de 600 MHz a 2,2 GHz, o GPR pode ser usado para a imagem de estruturas ocultas, de um edifício, detectar rachaduras em blocos de pedra ou detectar pequenas cavidades em paredes. Uma maior frequência implica numa resolução menor de levantamento, evidenciando detalhes da estrutura em estudo. Aplicações de resistividade de alta resolução foram usados com sucesso para detectar e delimitar rachaduras ou para testar a integridade dos materiais de construção, também usando configurações 3D de pequena escala (SCHMIDT, *et al.* 2016).

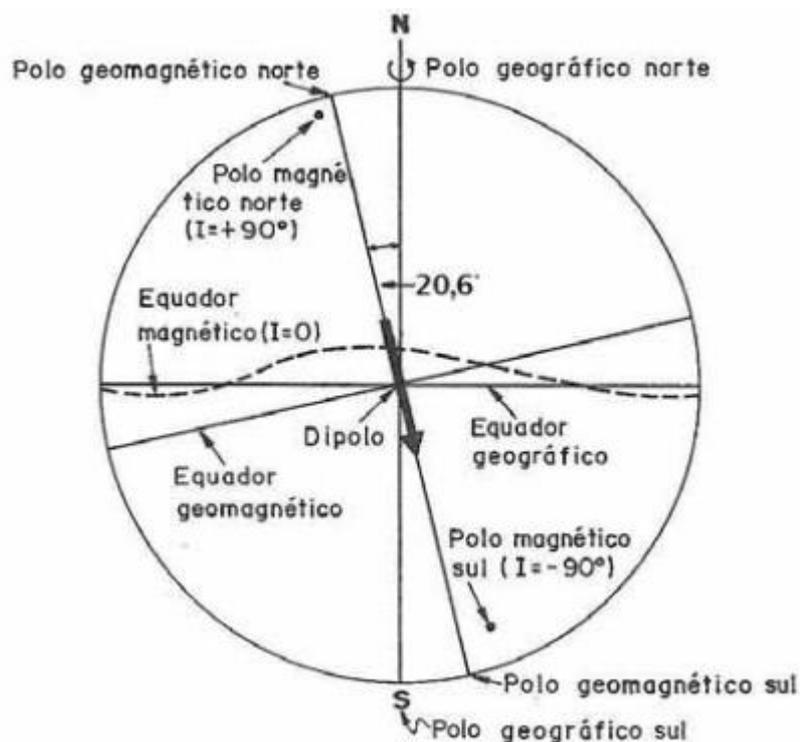
### **5.3 Método Magnético**

A magnetometria trata-se de outra técnica a ser utilizada na detecção de elementos arqueológicos. Anomalias magnéticas relacionam-se com mudanças de temperatura de subsuperfície, por exemplo, devido à existência de paleofogueiras, fator que aumenta, instantaneamente a temperatura no solo. As anomalias também se associam ao soterramento de objetos como vasilhas, fragmentos cerâmicos e urnas funerárias elaboradas com argilas. (ARAGÃO, *et al.* 2010).

O método magnético baseia-se no cálculo da magnitude e orientação do campo magnético terrestre (figura 13). Este, por sua vez, é influenciado pelo campo magnético gerado no núcleo terrestre, assim como magnetizações propagadas por resquícios dos corpos rochosos que integram a crosta terrestre. A grandeza física medida é a suscetibilidade magnética e remanescência.

Segundo Gandolfo *et al.* (2017), essa grandeza evidencia a competência de um material se magnetizar na presença de um campo magnético externo. Caso fora ferromagnético irá ocasionar uma perturbação pontual no campo magnético terrestre natural.

Figura 13 - Representação do campo magnético terrestre



Fonte: Extraído de SEIXAS, 2014

Sabe-se que o campo magnético da terra é um dos objetos de estudos geofísicos mais antigos. O interesse da humanidade no magnetismo começou como uma fascinação com as propriedades curiosas e atrativas do mineral magnetita.<sup>14</sup> Desde a época da primeira tomada de consciência do homem sobre o comportamento magnético, vários avanços na física do magnetismo foram obtidos, ajudando a geofísica a compreender a morfologia e origem do campo magnético da Terra (LOWRIE, 2007).

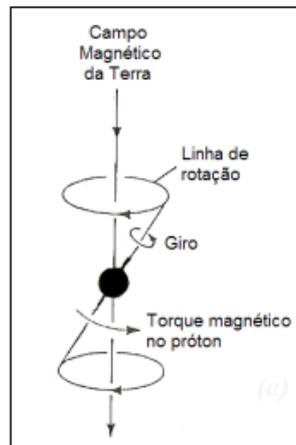
De acordo com Kearey (2009), todo material conhecido apresenta propriedades magnéticas em uma escala atômica. Assim, cada átomo presente se comporta como um dipolo em razão dos *spins* de seus elétrons e do percurso orbital desse ao redor do núcleo.

As órbitas dos elétrons sofrem rotação quando inseridas em um campo magnético (figura 14), esse processo sucede, assim, a formação de outro campo magnético oposto ao

<sup>14</sup> "Magnetita é um mineral de brilho metálico, de elevada dureza, traço preto e caráter fortemente magnético, comportando-se como um ímã natural (ORTIZ, 2000).

campo ao que os elétrons foram aplicados (KEAREY, 2009). Partindo dessa premissa, segundo Louro (2013), o material quando inserido a um campo magnético sofre perturbações que acarretam a indução magnética.

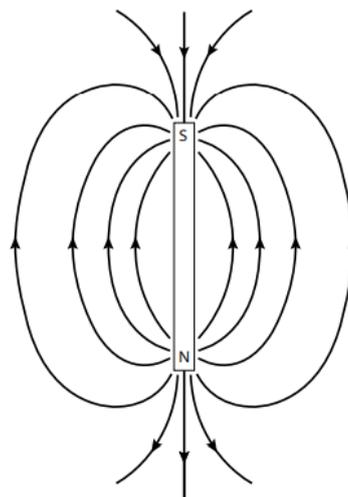
Figura 14 - Representação dos movimentos de rotação



Fonte: Extraído de MELO, 2007

Pode-se imaginar a Terra como um grande ímã, onde os polos magnéticos contêm grandes cargas magnéticas análogas ao comportamento das extremidades dos ímãs (carga positiva na extremidade norte e negativa na extremidade sul) como ilustrado na figura 15. Essas cargas são denotadas como um motor do campo magnético externo ao ímã, em comparação às cargas elétricas acumuladas nos limites de um material eletricamente polarizado e são encarregadas por um campo elétrico externo ao corpo.

Figura 15 - Representação do fluxo do campo magnético terrestre



Fonte: Extraído de Kearey (2002)

### 5.3.1 Campo geomagnético

As pesquisas ao longo dos anos estipularam uma gama de explicações sobre a origem do campo magnético terrestre. No entanto, até os dias atuais há divergência em meio a essas. A hipótese mais aceita atribui a origem desse campo à ocorrência de fenômenos de indução eletromagnética que ocorrem no interior da Terra, onde correntes elétricas são conduzidas em meio ao manto inferior e o núcleo externo da Terra em uma profundidade de cerca 200 km, tal processo é conhecido como dínamo hidromagnético (CAMPBELL, 1997 apud DINIZ & LIMA, 2010).

As fontes de origem do campo magnético terrestre são classificadas em três grandes categorias, sendo essas o *Campo Principal*, o qual, tem sua origem no núcleo da Terra e oscila sua direção e sua magnitude ao passar do tempo; *O Campo Externo*, que qualifica uma porção muito baixa do campo geomagnético e é oriundo de correntes elétricas ionizadas na atmosfera superior, geralmente causando anomalias de baixa magnitude; e, por fim, as *Anomalias Magnéticas* que são constituídas pelas variações que ocorrem no campo principal, sendo originadas por um arranjo não homogêneo de minerais magnéticos da superfície terrestre, tornando-se os principais alvos da prospecção magnética (SILVA, 1986; MELO, 2007; GONÇALVES, 2008).

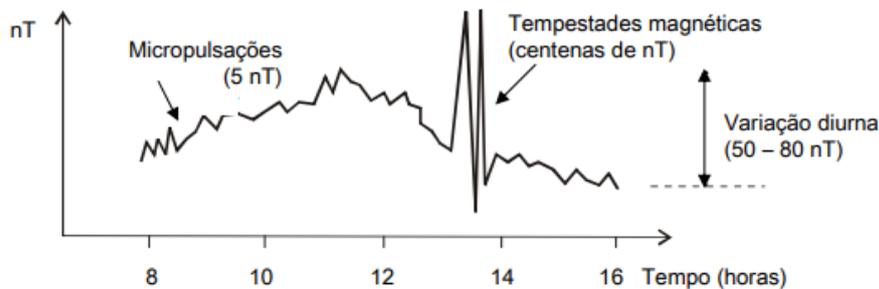
Partindo desses fatores e compreendendo que toda substância em escala atômica é magnetizada, essas magnetizações são divididas em diamagnética, paramagnética, ferromagnética e antiferromagnética. As duas primeiras necessitam de um campo indutor para produção de magnetismo, reverso ao que ocorre nos outros dois, onde esses não têm a necessidade de um campo indutor, sendo assim, de maior importância já que apresentam maior suscetibilidade magnética (KEAREY, 2009).

O campo magnético sofre variações ao decorrer do tempo, enfatiza-se a *variação secular*, a *variação diurna* e as *tempestades magnéticas* (figura 16) (KEAREY, 2009). A variação secular ocorre em largas escalas de tempo (MELO, 2007); a variação diurna é correlata a alterações no campo geomagnético em um intervalo de tempo de 24 horas onde o apogeu dessa ocorre por volta das 11 horas e, por sua vez, são originadas por movimentos da ionosfera associada as irradiações solares entre o hemisfério iluminado e o noturno (MELO, 2007); Por fim as tempestades magnéticas correlatas as grandes oscilações de amplitudes que podem perdurar por curtos a grandes intervalos de tempo, ou seja, de horas a dias, concernentes a

perturbações de campos externos a ionosfera e, em sua grande porção, devido a excessiva emissão de irradiações solares (MELO, 2007).

Ressalta-se que variações geradas por tempestades magnéticas não podem ser corrigidas, logo, durante essas tempestades o levantamento é inviável.

Figura 16 - Representação esquemática da variação magnética obtida em uma estação fixa



Fonte: Extraído de Melo, 2007.

### 5.3.2 Princípio físico do método

O campo magnético surge pelo fluxo magnético entre dois pólos ou cargas elétricas. A força exercida entre dois pólos magnéticos de intensidade  $m_1$  e  $m_2$ , separados por uma distância  $r$  é determinada por:

$$F = \frac{\mu_0 m_1 m_2}{4\pi\mu_R r^2} \quad (1)$$

Onde  $\mu_0$  e  $\mu_R$  são constantes que correspondem à permeabilidade magnética do vácuo e à permeabilidade magnética relativa do meio entre os pólos; quando estes apresentam cargas de sinais diferentes a força magnética é atrativa e repulsiva quando apresentarem cargas de mesmo sinal.

O campo magnético  $B$  gerado por um pólo de intensidade  $m$  a uma distância  $r$  do pólo é definido como a força exercida sobre uma unidade de pólo positiva naquele ponto, sendo assim

$$B = \frac{\mu_0 m}{4\pi\mu_R r^2} \quad (2)$$

A intensidade de magnetização é denotada como  $H$ , no sistema internacional (SI) de unidades é expresso em  $A\ m^{-1}$ . A densidade do fluxo magnético, medida sobre uma área perpendicular à direção de fluxo, é conhecida como indução magnética ou campo magnético  $B$ , sendo este proporcional a  $H$ . A lei de indução de Lenz relaciona a taxa de variação do fluxo magnético em um circuito à tensão a ele associada, de forma que  $B$  é expresso em  $V\ s\ m^{-2}$  [Weber ( $Wb$ )  $m^{-2}$ ]. A unidade  $Wb\ m^{-2}$  é mais conhecida como tesla (T).

A constante  $\mu$  caracterizada como permeabilidade magnética é expressa em  $Wb\ A^{-1}\ m^{-1}$  ou Henry (H)  $m^{-1}$ .

O tesla é uma unidade muito grande para expressar as pequenas anomalias magnéticas geradas pelas rochas, por isso se utiliza o nanotesla (nT), que equivale a  $10^{-9}$  T (KEAREY, 2002).

Quando um corpo está sob influência de um campo magnético externo ele pode adquirir uma magnetização na direção deste campo, que é perdida quando o mesmo é retirado deste campo, este fenômeno é conhecido como magnetização induzida  $M$  ou polarização magnética, resultando no alinhamento dos dipolos elementares.

A intensidade induzida de magnetização é proporcional à intensidade da força de magnetização  $H$  do campo induzido, sendo assim:

$$M = kH \quad (3)$$

O fator de proporcionalidade  $k$  é uma propriedade física do material, chamado de suscetibilidade magnética. É uma medida da facilidade com que o material pode ser magnetizado. Devido a  $M$  e  $H$  apresentarem as mesmas unidades ( $A\ m^{-1}$ ),  $k$  é uma quantidade adimensional. A suscetibilidade da maioria dos materiais é dependente da temperatura e, em alguns materiais (ferromagnéticos e ferrimagnéticos)  $k$  depende de  $H$  (LOWRIE, 2007).

### 5.3.3 Levantamento magnético na Arqueologia

O método magnético é normalmente utilizado para pesquisar áreas extensas de maneira rápida e eficaz, visto que os sensores do magnetômetro não precisam estar em contato com o solo (Fig. 17). Devido a essa característica os magnetômetros podem realizar leituras

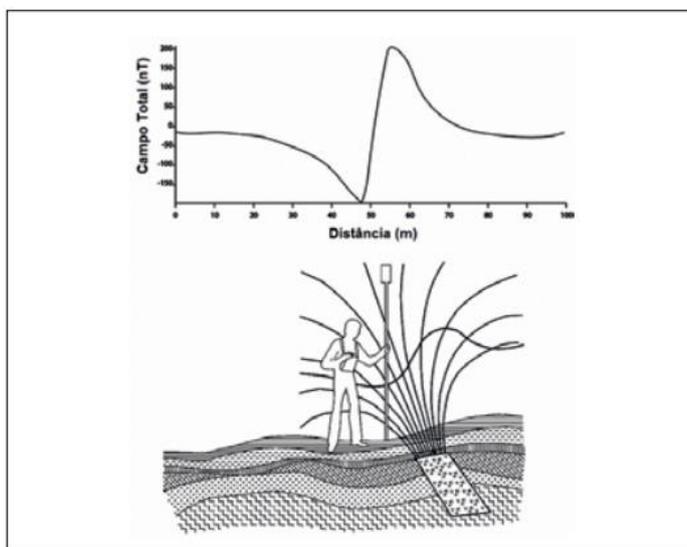
sobre obstruções, vegetação e outros materiais de superfície, logo, o levantamento em grandes áreas pode ser estudado em um dia (CONYERS, 2017).

As leituras magnéticas são então processadas gerando mapas do campo magnético total que permitem o reconhecimento de padrões anômalos como uma forma de visualizar materiais em subsuperfície de interesse arqueológico e evidenciam a extensão e natureza de sítios arqueológicos enterrados e características relevantes de paisagens pretéritas “*escondidas*” no subsolo (BENECH, 2007; MOHAMED ALI, 2012 apud CONYERS, 2017). Partindo da premissa que o levantamento magnético (Figura 17) para ser de interesse dos geofísicos no registro arqueológico, deve estar relacionado a objetos com propriedades magnéticas (LINFORD, 2006).

O pesquisador Martin Aitken constatou durante estudos a respeito de fornos romanos de cerâmica que diversos fenômenos arqueológicos estão associados a processos semi-industriais. Os processos semi-industriais são responsáveis pela geração de altas temperaturas as quais são capazes de alterar a composição química de minérios compostos por ferro presentes no solo, onde, no passado, foram empregues fogueiras ou fornos.

Ainda, discute-se que altas propriedades magnéticas podem ser oriundas de compostos altamente magnéticos, a exemplo das cinzas de combustíveis, alusivo a solo queimado operados para combustão de fornos. O material apontado geralmente é derivado de mudanças químicas em minérios de argila que expõem frequências magnéticas de baixa magnitude (LINFORD, 2006).

Figura 17 - Levantamento magnético terrestre e perfil da intensidade medida



Fonte: Gandolfo *et al.*, 2017.

O levantamento magnético talvez tenha se tornado, junto ao GPR, o método mais usado para o levantamento geofísico na localização de materiais arqueológicos. O método pode ser aplicado em uma gama de tipos de geologia e tipos de solo com a vantagem da aquisição rápida de dados em campo e a capacidade, sob condições adequadas, de localizar características arqueológicas bastante sutis (LINFORD, 2006).

De acordo com Linford (2006), o levantamento magnético teria fundamental aplicação na espera de resultados e um curto-espaço de tempo, sendo assim, uma ferramenta útil para diagnósticos prévios em terrenos destinados a edificações. Esses padrões, quando condicionados para a arqueologia, manifestam anomalias magnéticas as quais geram-se por meio de corpos sedimentares ou por influência de contrastes de propriedades físicas oriundas de rochas que foram empregadas em construções passadas e no momento encontram-se enterradas (SCHMIDT *et al.*, 2016).

Contudo, Schmidt *et al.* (2016) ressalta que as anomalias resultantes das propriedades magnéticas de resquícios arqueológicos são condicionadas pelo meio onde se encontram. Com o entendimento desses padrões, nota-se que materiais como fornos pretéritos ou construções queimadas forjam anomalias com alto contraste.

No caso de materiais com propriedades basicamente engendradas por partículas de ferro, como os manipulados na confecção de um forno, estarão sujeitos a um acréscimo na polarização a todo instante em que o forno for acionado. Tendo em mente que temperaturas na casa dos 700°C são suficientes para alterar as propriedades magnéticas do material (SCHMIDT *et al.*, 2016).

A mesma lógica cabe para tijolos ou qualquer material que faça uso de cerâmica, onde as anomalias exibirão alto contraste, devido ao seu campo magnético gerado, durante as medições. Objetos compostos integralmente por ferro expõem altas anomalias, que são correlatas às suas dimensões e peso, o que acaba por ser um fator importuno durante o levantamento magnético (SCHMIDT *et al.*, 2016).

A magnetometria responde com diversos materiais arqueológicos, seus contrastes, geralmente, associam-se a argilas queimadas, tendo em vista que esse material, durante o passar do tempo, adquire magnetização, acarretando altas respostas no campo magnético, a magnetização é obtida após o seu resfriamento no campo magnético terrestre (ALVES, 1979).

Alves (1979) documenta que o levantamento magnético pode ser aplicado na identificação principalmente de camadas de ocupação, já que solos povoados geralmente

apresentam alta suscetibilidade magnética, concatenada a alteração da hematita para magnetita que ocorre correlato a fermentação de matéria orgânica<sup>15</sup>. Alves (1979), aponta que, por meio da magnetometria, pode ser feita a identificação de cavidades preenchidas, a exemplo de fornos elaborados em tempos remotos, caso esses sejam preenchidos por material orgânico, apontará uma pequena anomalia.

A abundância de ferro nos ambientes urbanos reais não permite o uso de sistemas magnéticos, onde as anomalias produzidas por esses objetos de ferro poderiam ser centenas ou milhares de vezes maior do que a cavidade de uma parede enterrada por exemplo (SCHMIDT *et al.*, 2016).

Os dispositivos utilizados na magnetometria são divididos em duas famílias, dependendo do equipamento usado para medições. Os magnetômetros totais de campo leem todo o valor do campo magnético da Terra com um único sensor (SCHMIDT *et al.*, 2016). Uma vez que este campo magnético tem variações diurnas, geofísicos podem utilizar um sensor magnético adicional colocado num local de referência para corrigir os dados de pesquisa por meio da variação diurna (SCHMIDT *et al.*, 2016).

Muitas vezes é difícil compreender como objetos enterrados, além das estruturas ferrosas modernas, podem influenciar até mesmo as mais fracas variações locais do campo magnético da Terra (LINFORD, 2006). No entanto, o fascínio experimentado pelos primeiros praticantes deste método continua a revelar paisagens arqueológicas ocultas à medida que mais incrementos sensíveis e sofisticados são atribuídos aos aparelhos de levantamentos magnéticos.

#### **5.4 Ground Penetrating Radar (GPR)**

O GPR é um método geofísico que se baseia na propagação e reflexão de ondas eletromagnéticas em altas frequências (10 MHz a 2,5 GHz). Os princípios físicos e matemáticos são fundamentados pela teoria eletromagnética. Em geral, os equipamentos de GPR detêm um par de antenas, um produtor de sinais eletromagnéticos e um sistema para registro destes. Uma das antenas é usada para transmitir um sinal eletromagnético através da subsuperfície, ao passo que a outra capta esses sinais após a sua reflexão por diferentes alvos no subsolo (FRANCO, 2005).

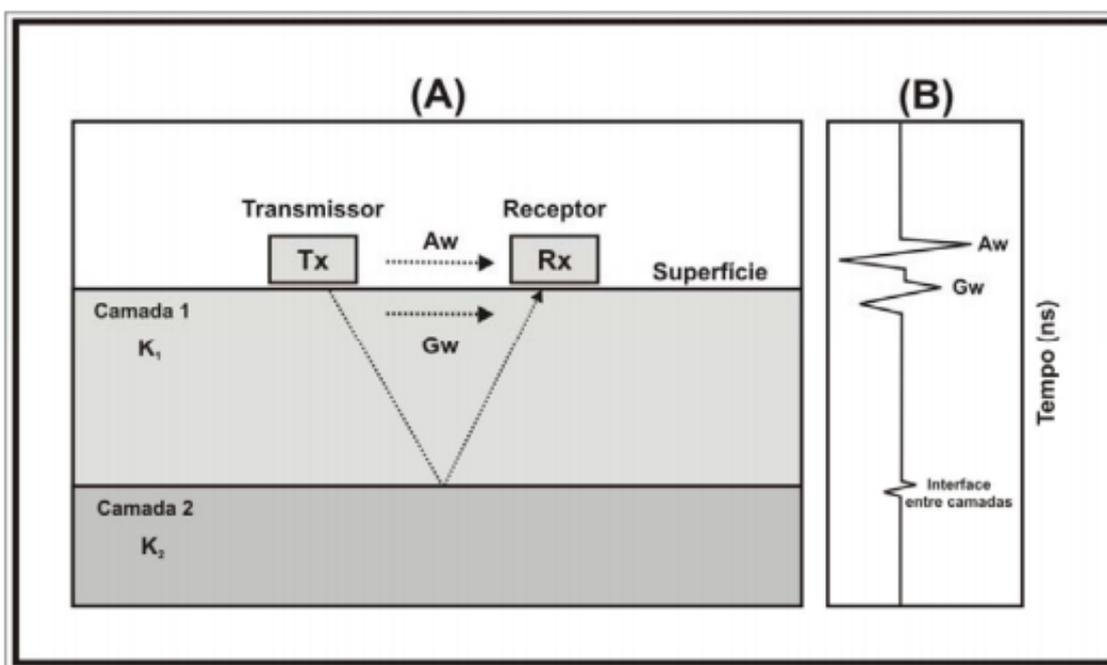
---

<sup>15</sup> A matéria orgânica do solo é constituída por compostos de carbono em diferentes graus de associação com as fases minerais do solo originados a partir da decomposição de resíduos vegetais e animais (ZANDONADI *et al.* 2014).

A antena transmissora radia pulsos eletromagnéticos em direção a subsuperfície e a antena receptora registra os sinais refletidos na interface entre os alvos que apresentam propriedades elétricas contrastantes. A energia refletida permite deduzir informações sobre alvos pontuais, estruturas inclinadas ou horizontais, de acordo com o formato do refletor. Os sinais eletromagnéticos são registrados por meio de sistemas digitais de acordo com o tempo de percurso entre a radiação e a reflexão dos campos eletromagnéticos, medidos em nanossegundos (ns) (DAVIS & ANNAN, 1989 apud RODRIGUES, 2009).

Na figura 18 é possível entender o trabalho do aparelho GPR, a ilustração supõe um local constituído por duas camadas de constantes dielétricas  $K_1$  e  $K_2$ . Está também representado o traço com a presença da onda direta pelo ar ( $A_w$ ), a onda direta através da terra ( $G_w$ ) e o registro do tempo duplo de viagem até a interface (OLIVEIRA, 2001 apud FRANCO, 2004).

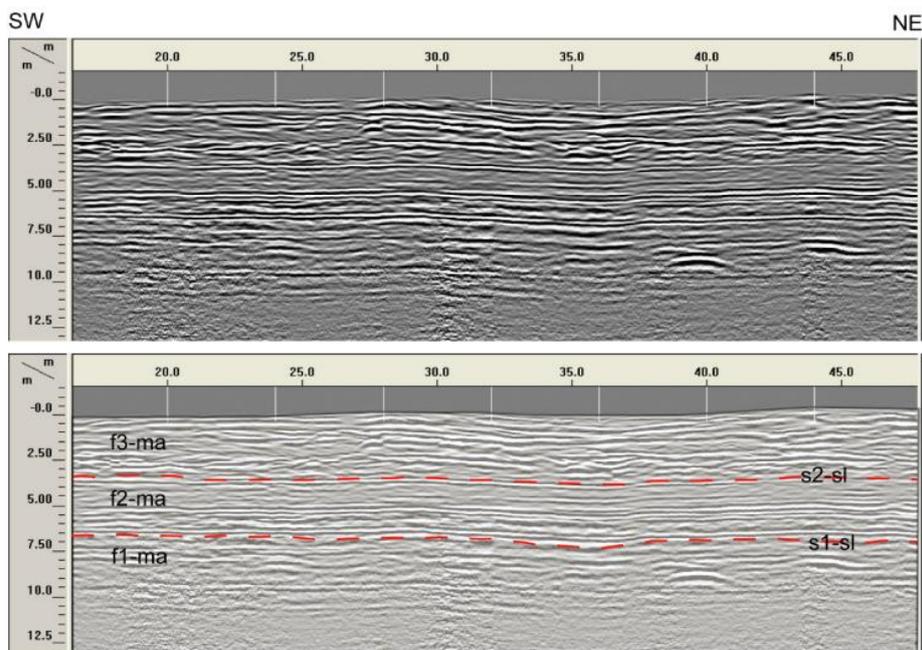
Figura 18 - (A) Princípio de funcionamento do método GPR considerando um ambiente composto por duas camadas. (B) Traço contendo os registros dos tempos de chegada da onda direta pelo ar ( $A_w$ ), onda direta pela terra ( $G_w$ ) e da onda refletida na interface formada pelas camadas 1 e 2



Fonte: Extraído de Franco, 2004.

Durante a aquisição de dados, os padrões de reflexão atribuem linhas horizontais que tem como produto, por meio dessas, um radargrama (Figura 19). Como dito, esse é composto por diversas linhas, e cada é oriunda da interação dos sinais emitidos pelo GPR com as características do subsolo. Ao tempo que as ondas se espalham, interagem com divergentes propriedades elétricas do objeto, assim ocorre uma alteração em sua velocidade (NEAL, 2004).

Figura 19 - Exemplo de seção de Radargrama de 200 MHz



Fonte: Extraído de Fracalossi *et al.*, 2010

Ao tempo em que as ondas são emitidas em subsuperfície, interceptando diversos objetos alvos, o que acarreta a propagação de um sinal que será refletido, onde o contraste estará ligado às propriedades físicas apresentadas pelo alvo, o equipamento processa esse sinal de forma simples, onde, quanto maior o contraste, maior será a amplitude e reflexão apontada pelo equipamento (ALLEN, *et al.*, 2017).

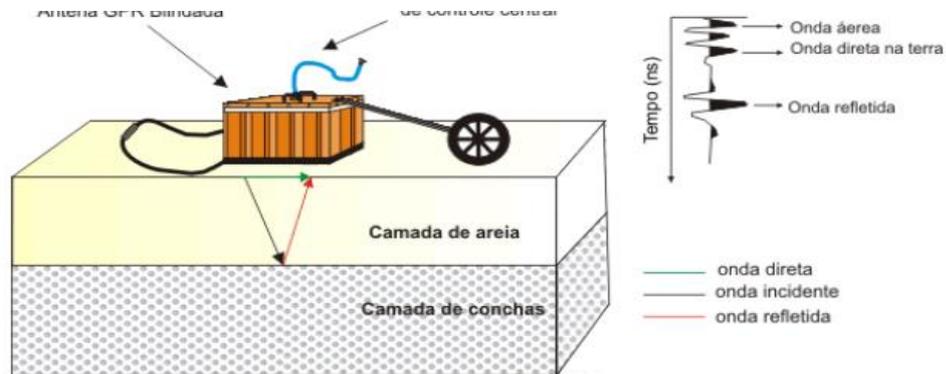
Para saber a profundidade em que se encontra o alvo, é calculado, então, o tempo de reflexão. De modo que algumas ondas são refletidas e outras seguem se propagando e são refletidas por materiais que se encontram em maior profundidade, ou ainda, apresentam propriedades distintas até o momento de sua atenuação. Os dados obtidos então são processados em programas específicos que fornecem plantas e representações em três dimensões (ALLEN, *et al.*, 2017).

Rodrigues (2009), explica da seguinte forma como é feita a obtenção dos dados por meio do GPR:

Para se obter os dados GPR, as antenas transmissora e receptora são movidas ao longo de um perfil por meio de incrementos espaciais constantes, resultando, assim, em uma imagem baseada nas variações laterais das propriedades físicas dos materiais em subsuperfície em função do tempo de percurso da onda eletromagnética (RODRIGUES, 2009).

O mesmo autor ainda ilustra (Figura 20), de forma simples objetiva, o percurso esquemático de uma onda eletromagnética refletindo em uma interface, entre duas camadas.

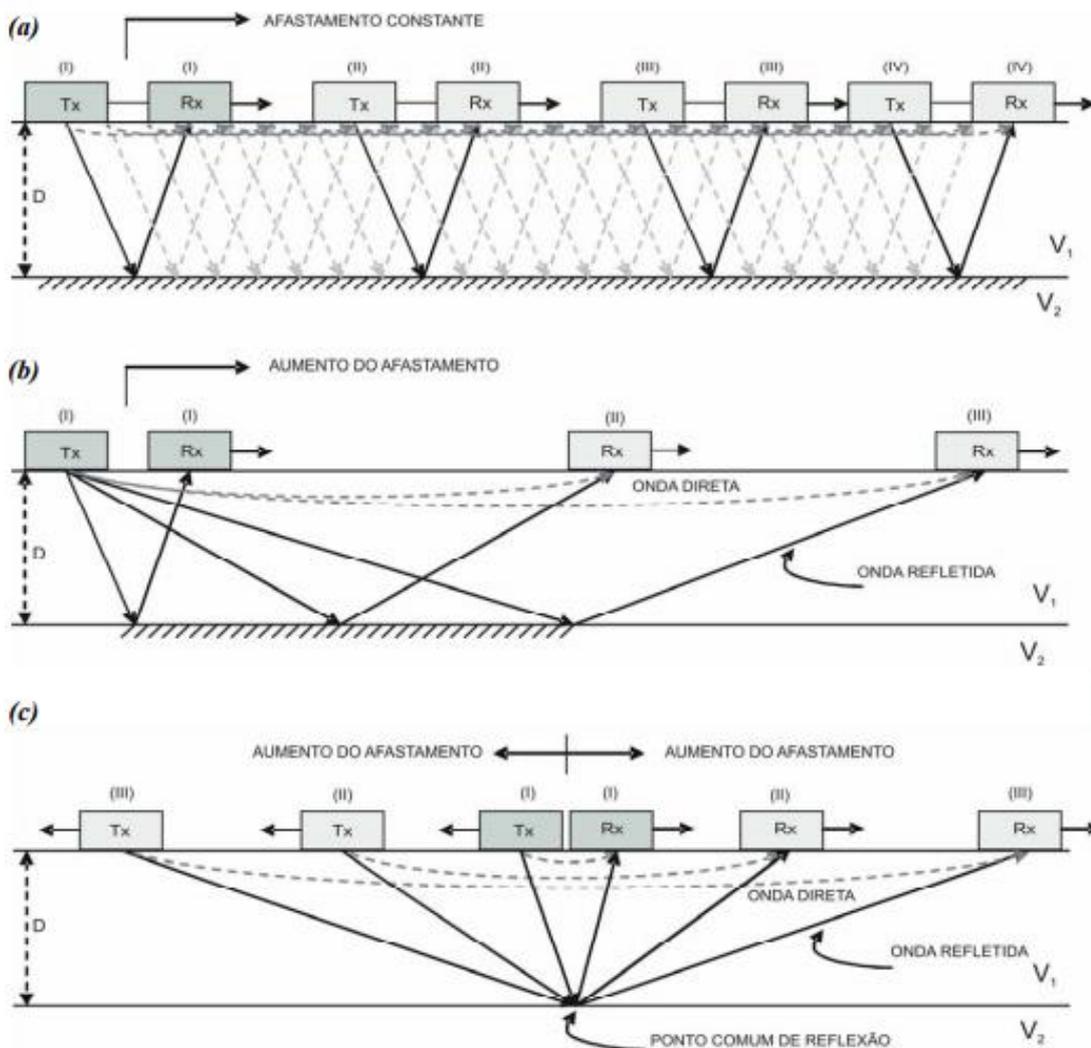
Figura 20 - Ilustração da reflexão do sinal eletromagnético em uma interface entre duas camadas em subsuperfície



Fonte: Extraído de Rodrigues, 2009.

As técnicas de operação para aquisição de dados por meio do GPR pode ser ramificada em 3 categorias, sendo esses o *Offset comum* (Figura 21 a), perfil de reflexão com afastamento constante; o *Wide angle reflection and refraction* (WAAR) (Figura 21 b) onde ocorre sondagem de velocidades onde uma antena se encontra fixa, ao passo que a outra antena é movimentada; e, por fim, o *Common Mid Point* (CMP) (Figura 21 C), onde as antenas são movimentadas isocronicamente de forma harmônica em referência a um ponto de convergência meio (MELO, 2007).

Figura 21 - Modo de aquisição dos dados de GPR . a) Offset comum; b) Wide angle reflection and refraction; c) Common Mid Point



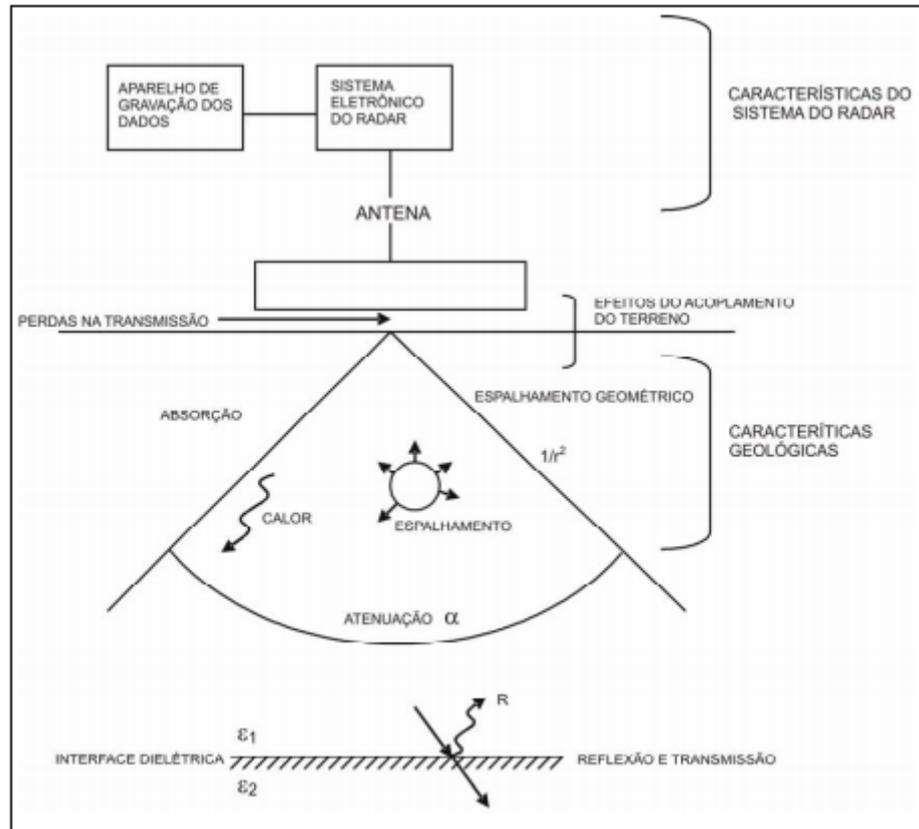
Fonte: Reynolds, 1997 adaptada por Melo, 2007.

Para estabelecer o raio de dispersão que o radar pode alcançar deve-se considerar não apenas padrões instrumentais, mas fatores correlatos com a atenuação do sinal, alusivo a perdas ocasionadas por processos de difusão ou ainda abertura angular do feixe do radar (Figura 22) (MELO, 2007).

Contudo, diversos autores salientam que se deve atentar a diversos aspectos que possam gerar ruídos, ou seja, dados não desejados que sejam captados pelo aparelho onde o não tratamento desse pode causar grandes interferências nos valores obtidos podendo tendenciar a resultados errôneos. O ruído pode ser oriundo de diversas fontes, tais como aparelhos

eletrônicos, torres de alta tensão e veículos automotores que se apresentarem nas proximidades da área do levantamento.

Figura 22 - Esquema de perdas de GPR



Fonte: Extraído de Melo, 2007

### 5.4.1 Princípios do método

O GPR atua em faixas de alta frequência, os fundamentos deste método encontram-se na teoria de propagação das ondas eletromagnéticas. O eletromagnetismo clássico detalha a geração e propagação de campos e ondas eletromagnéticas (campos elétricos e magnéticos acoplados) através de quatro leis físico-matemáticas: A lei de Faraday, a lei de Ampère, a lei de Gauss para a eletricidade e a lei de Gauss para o magnetismo (WENTWORTH, 2009).

A lei de Faraday mostra que a variação do campo magnético com o tempo cria campo elétrico, ou seja, campos magnéticos variantes no tempo produzem um campo elétrico (WENTWORTH, 2009) estabelecendo que a força eletromagnética induzida em um circuito fechado vale a variação temporal do fluxo magnético através da área por ele delimitada (DIONISIO, 2010). A equação abaixo mostra essa lei:

$$\varepsilon = \Delta\Phi / \Delta t \quad (3)$$

A lei de Ampère serve para determinar a intensidade de campo magnético para distribuições simétricas de carga (WENTWORTH, 2009) conforme um corpo condutor é trilhado por uma corrente elétrica variável, imediatamente é elaborada em volta desse corpo um campo magnético. A equação abaixo mostra essa lei:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \partial\mathbf{D}/\partial t \quad (4)$$

A lei de Gauss, para o campo elétrico mostra que o fluxo do campo elétrico através de uma superfície fechada hipotética (superfície gaussiana) é proporcional à carga contida dentro dela (carga líquida) (ARAUJO et al., 2007). A equação abaixo mostra essa lei:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = q/\varepsilon_0 \quad (5)$$

A lei de Gauss para o magnetismo é um modo formal de afirmar que os monopolos magnéticos não existem, logo, o fluxo magnético será zero. De acordo com essa lei, o fluxo magnético através da superfície é zero porque não existe uma “carga magnética” (monopolo magnético) que possa ser envolvida pela superfície (HALLIDAY et al. 2013). A equação abaixo mostra essa lei:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (6)$$

Onde: E vetor campo elétrico; B vetor indução magnético; H vetor campo magnético; a densidade volumétrica de carga elétrica; J vetor densidade de corrente de condução; D vetor de deslocamento elétrico

Visto que o *GPR* utiliza ondas de rádio num espectro de frequência entre 10 MHz e 1000 MHz, lhe é conferido a característica de método investigativo de resolução muito alta (PAIXÃO, 2005).

No modo bi estático (mais usual) a antena transmissora radia um pulso eletromagnético de alta frequência que se propaga através da subsuperfície. A antena receptora capta o sinal originalmente emitido pela transmissora, vindo de diferentes percursos (PAIXÃO, 2005).

## 5.4.2 Propriedades Eletromagnéticas dos Materiais

Do ponto de vista da teoria eletromagnética faz-se necessário ter conhecimento das relações constitutivas do meio que determinam propriedades específicas dos materiais em subsuperfície, quais sejam: condutividade elétrica ( $\sigma$ ), permissividade elétrica ( $\epsilon$ ) e permeabilidade magnética ( $\mu$ ) (CORREIA et al., 2019).

### 5.4.2.1 Condutividade elétrica

Em resumo a condutividade é denotada pelo modo que um fluxo de carga livre forma uma corrente quando um campo elétrico externo está presente sendo fonte de equilíbrio entre o campo livre aplicado e a densidade do volume corrente. A condutividade elétrica de um determinado material refere-se a sua facilidade em conduzir corrente elétrica. Ou seja, a habilidade que um meio tem de conduzir eletricidade é denotada como condutividade ( $\sigma$ ). Esta propriedade elétrica do meio é de suma importância para a propagação de ondas eletromagnéticas (DAVIS & ANNAN 1989).

Matematicamente a densidade de corrente de condução e o campo elétrico estão relacionados pela Lei de Ohm (equação 7):

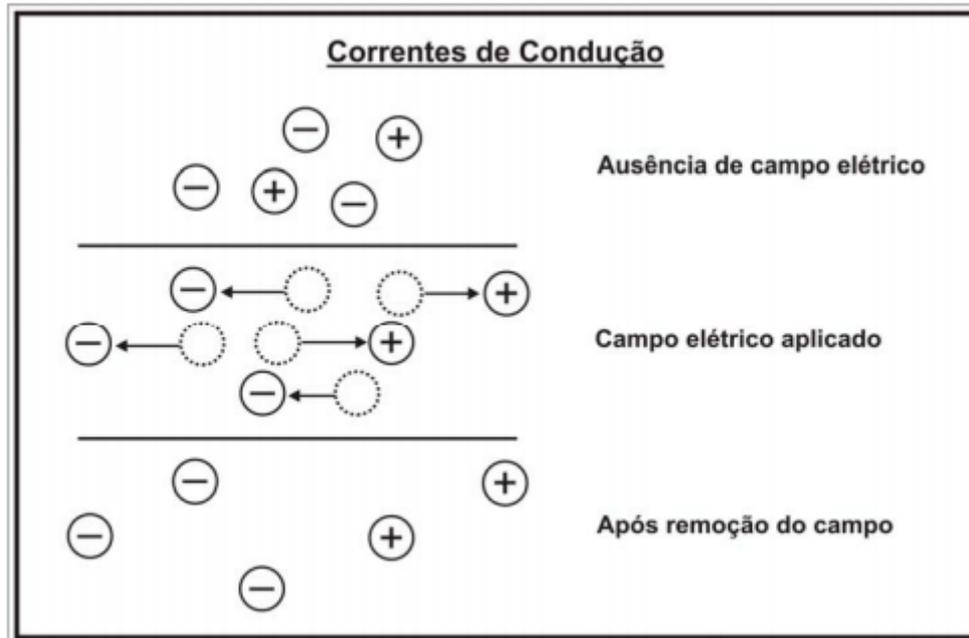
$$J = \sigma \cdot E \quad (7)$$

Onde:  $\sigma$  = condutividade elétrica (S/m); J = Densidade de Corrente de condução (A/mv<sup>2</sup>);

O principal mecanismo de correntes de condução nas atividades geológicas se dá por meio do fluxo de íons por entre soluções fluídas inseridas em vazios e fissuras (ANNAN 2000; AGUIAR, 2005). Logo quanto maior o percentual de água, íons dissolvidos e a porosidade do meio, maior será sua condutividade (AGUIAR, 2005).

As correntes de condução surgem quando a carga livre acelera para uma velocidade final (basicamente instantaneamente) quando um campo elétrico (E) é aplicado. Enquanto o campo elétrico é aplicado a carga se move, quando o campo elétrico é removido, a carga desacelera e estabiliza-se (ANNAN, 2003). Esses conceitos estão ilustrados na Figura 23.

Figura 23 - Ilustração conceitual da movimentação de cargas associadas com as correntes de condução.



Fonte: Extraída de Franco, 2004

Observa-se na figura 23 que as correntes de condução representam um mecanismo de dissipação de energia para um campo eletromagnético. A energia extraída do campo eletromagnético é transformada em calor e, assim, é remetida para o meio (ANNAN, 2003).

#### 5.4.2.2 Permissividade dielétrica

A Permissividade dielétrica é uma constante proporcional entre a intensidade do campo elétrico externo aplicado e vetor externo (AGUIAR, 2005), ou seja, para elementos habituais, a densidade do instante dipolar é equivalente ao campo elétrico aplicado e a constante de equivalência citada é a conhecida como permissividade elétrica do material (ANNAN, 2003).

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} , \tag{8}$$

Que se relaciona com as correntes de deslocamento (JD) da seguinte forma:

$$\vec{J}_D = \frac{d\vec{D}}{dt} \therefore \vec{J}_D = \epsilon \frac{d\vec{E}}{dt} , \tag{8.1}$$

Onde  $\epsilon$  é a permissividade elétrica, definida por:

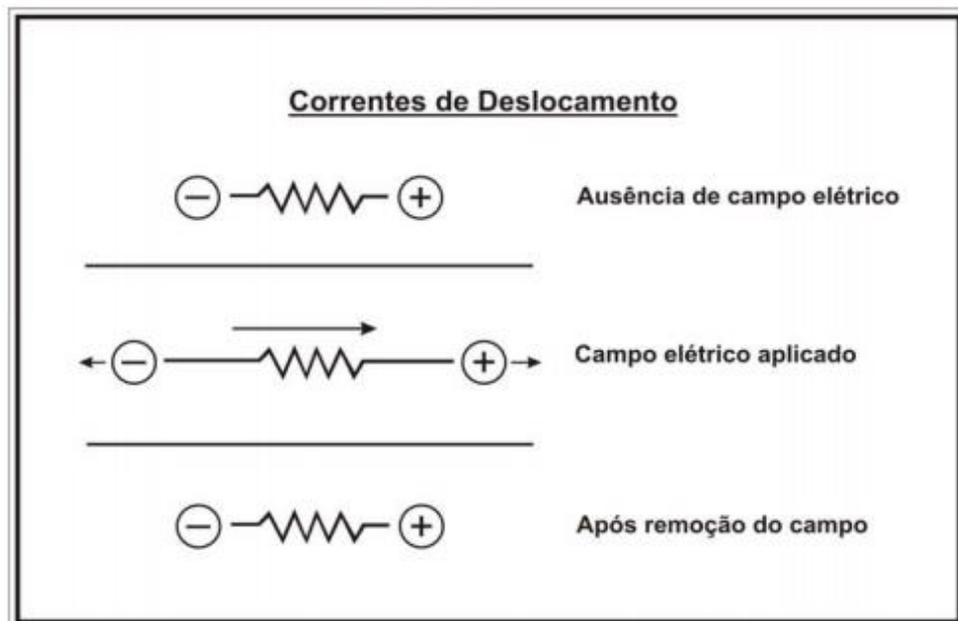
$$\varepsilon = K\varepsilon_0 \quad (8.2)$$

Sendo K a constante dielétrica do meio e  $\varepsilon_0$  a permissividade elétrica no vácuo.

A permissividade dielétrica é uma quantidade macroscópica que relaciona o campo elétrico à polarização macroscópica do material (ALMEIDA, 2015). A permissividade descreve a capacidade de um material de armazenar e liberar energia eletromagnética na forma de carga elétrica e está classicamente relacionada à capacidade de armazenamento dos capacitores (CASSIDY, 2009 apud. TAKAHASHI et al., 2012).

A permissividade influencia muito a propagação da onda eletromagnética em termos de velocidade, impedância intrínseca e refletividade (TAKAHASHI et al., 2012). A alternância de uma posição de equilíbrio para outra, é a causa do crescimento de energia retida pelo material. Retirando-se o campo, as cargas regressam a seu ponto inicial e a energia armazenada é, então, liberada (OLIVEIRA, 2001 apud. FRANCO, 2005). A Figura 24 descreve em detalhe este evento.

Figura 24 - Ilustração conceitual da movimentação de cargas associadas com as correntes de deslocamento



Fonte: Extraído de Franco, 2005

Tanto a condutividade elétrica quanto a permissividade dielétrica são importantes, porque afetam diretamente a atenuação e a propagação das ondas de radar (ANNAN, 1996). A permissividade dielétrica está totalmente associada à velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas, tratando-se de um quesito complexo que detalha as propriedades elétricas dos materiais submetidos a frequências elevadas (ARAUJO, 2012).

Em ambientes naturais, a corrente que se origina em resposta da aplicação de um campo eletromagnético, nada mais é que uma mistura da corrente de condução com a de deslocamento (ARAUJO, 2012). Estas associações físicas estão detalhadas na equação abaixo:

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_C + \mathbf{J}_D = \sigma \mathbf{E} + \epsilon \frac{d\mathbf{E}}{dt} \quad (9)$$

Onde:

J - corrente elétrica;  $J_C$  - corrente de condução;  $J_D$  - corrente de deslocamento;  $\sigma$  - condutividade;  $\epsilon$  - permissividade dielétrica; E - campo elétrico; t - tempo

#### 5.4.2.3 Permeabilidade magnética

A terceira relação constitutiva do meio, é dada pela seguinte fórmula:

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (10)$$

Onde o parâmetro  $\mu$  é a permeabilidade magnética do material, sendo responsável por associar a indução magnética (B) a intensidade do campo magnético (H) e a constante de proporcionalidade. A permeabilidade magnética, demonstra como os momentos magnéticos atômicos e moleculares intrínsecos reagem a um campo magnético (ANNAN, 2009)

A permeabilidade poder ser representada de forma mais complexa:

$$\mu_r = \mu' - i\mu'' = 1 + \chi_m \quad (10.1)$$

Na equação acima, observa-se que a energia eletromagnética está retida no material, essa é conhecida como permeabilidade magnética estática. Contudo a fração utópica da expressão designa o total de perdas magnéticas em razão de correntes turbilhonares, histerese, viscosidade magnética do material, sendo conhecida como permeabilidade magnética viscosa (AGUIAR, 2005).

Comumente, estudos com Georadar apresentam materiais com permeabilidade magnética próxima a 1. Dito isso, na sua maior parte, os materiais terrestres se comportam de maneira isotrópica em relação a permeabilidade magnética, logo para elaborar um tratamento tensorial, o tensor utilizado deve tratar-se de uma constante multiplicada por uma matriz 3x3 (AGUIAR, 2005):

$$\mu = \mu I \quad (10.2)$$

A permeabilidade magnética encontra-se relacionada com as características elétricas intrínsecas de blocos de construção de materiais físicos. De forma simples, partículas carregadas, formam átomos, estes por sua vez geram moléculas, tendo uma propriedade mecânica conhecida como spin (ANNAN, 2003).

Quando combinado com a carga da partícula, o spin ocasiona com na partícula tendo um dipolo magnético. Quando um elétron se move em torno de um núcleo atômico, o movimento da carga também pode criar um instante magnético (ANNAN, 2003).

A analogia a ser feita é ter uma carga elétrica distribuída uniformemente em uma bola esférica e, em seguida, girar essa bola. A carga giratória resultante parece ser um loop circular de corrente, que por sua vez origina um dipolo magnético (ANNAN, 2003). As propriedades magnéticas são essencialmente as propriedades de uma mudança elétrica movendo-se em um caminho fechado (ANNAN, 2003).

#### **5.4.3 A Interação da Onda Eletromagnética com o Meio**

Como base teórica deste método utilizam-se de conceitos geométricos, assim como a teoria do eletromagnetismo clássico de Maxwell, a qual associa os campos elétricos e magnéticos com suas fontes. Estas são denominadas equações de continuidade, que determinam o comportamento desses campos em locais onde há descontinuidade com o meio (AGUIAR, 2005).

De acordo com Lorrain & Corson (1972); Carcione (1986) as equações para o campo magnético e elétrico são dadas pelas seguintes formas:

$$\nabla \vec{D} = \rho_f \quad (11.1)$$

$$\nabla \vec{B} = 0 \quad (11.2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \vec{M} \quad (11.3)$$

$$\nabla \times \vec{H} = -\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad (11.4)$$

De maneira genérica, os meios de estudos são antrópicos. Logo, a associação que há entre as grandezas é expresso por meio dos tensores da permissividade, permeabilidade e condutividade (CARCIONE, 1996 apud. AGUIAR, 2005).

$$\vec{D} = \vec{\epsilon} * \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (11.5)$$

$$\vec{B} = \vec{\mu} \vec{H} \quad (11.6)$$

$$\vec{J} = \vec{\sigma} * \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{J}_m \quad (11.7)$$

Onde  $J_m$  trata-se da densidade da corrente em razão da polarização, assim como a magnetização do elemento em consequência dos campos elétrico e magnético aplicados nesse, já as expressões  $\epsilon$ ,  $\mu$  e  $\sigma$  encontra-se por três tensores de diâmetros 3x3 (CARCIONE, 1996 apud. AGUIAR, 2005).

Podendo em meios homogêneos e isotrópicos as equações serem simplificadas para:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (11.8)$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \quad (11.9)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (11.10)$$

#### 5.4.3.1 Reflexão e Refração - Lei de Snell

A trajetória da onda é explicada pela lei de Snell em que uma onda incidente sobre uma interface que dissocia meios com propriedades eletromagnéticas distintas, logo, acabará por ser em parte refletida e refratada (ARAUJO, 2012). A fórmula de Snell (equação 12) descreve uma relação entre a reflexão, a refração e os ângulos de incidência (igual ao ângulo de reflexão) e refração para meios com características físicas diferentes (ARAUJO, 2012):

$$\frac{\text{Sen } \phi_1}{\text{Sen } \phi_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (12)$$

onde  $\phi_1$  = ângulo de incidência  $V_1$  = Velocidade do meio 1  $\phi_2$  = ângulo de refração  $V_2$  = Velocidade do meio.

Na lei de Snell, a quantidade de reflexão ou refração que acontecerá na extremidade entre dois meios, decorre do ângulo de incidência e da velocidade de propagação das ondas (ARAUJO, 2012). Geralmente, com o acréscimo da permissividade relativa ( $\epsilon$ ), mais elevado fica o cone de transmissão. O contrário pode vir a acontecer caso os materiais gradualmente diminuam sua permissividade relativa, assim, o cone de transmissão expande-se em profundidade (ARAUJO, 2012).

A refração denota o fenômeno que acontece no momento que a luz, ao transpassar ao limite entre dois meios, sofrendo uma oscilação em sua velocidade de propagação, logo, um declínio de velocidade (DA SILVA et al.), e o estudo da refração, considerando a oscilação na velocidade de propagação da luz, define-se, para os meios homogêneos e transparentes, um valor conhecido como índice de refração (DA SILVA et al.).

Podemos estabelecer o índice de refração ( $n$ ) de um meio como sendo o quociente entre a velocidade de propagação da luz no vácuo ( $c$ ) e sua velocidade de propagação no meio considerado ( $v$ ) (DA SILVA et al.). Expresso pela equação:

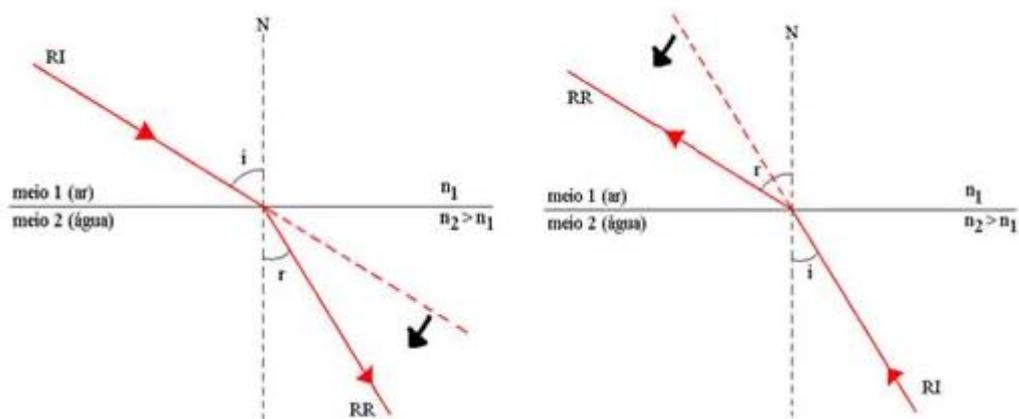
$$n = c / v \quad (13)$$

A Lei de Snell, também, é comumente conhecida no meio físico como sendo a 2ª lei da refração, descreve que na refração, o produto do índice de refração do meio, no qual se encontra o raio pelo seno do ângulo que esse raio forma com a reta normal à interface no ponto de incidência, é constante (DA SILVA et al.). Matematicamente, expressado pela seguinte fórmula:

$$n_1 \text{ sen } \theta_i = n_2 \text{ sen } \theta_r \quad (14.1)$$

Onde,  $(n_1)$  é o índice de refração do meio 1,  $(n_2)$  é índice de refração do meio 2 onde ocorre a refração,  $(\theta_i)$  é o ângulo de incidência da luz no segundo meio e  $(\theta_r)$  é o ângulo de refração ao qual o feixe de luz sofre ao passar do 1 um para o meio 2 (DA SILVA et al.).

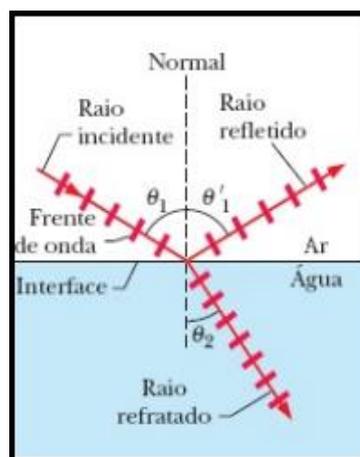
Figura 25 - Esquema da Lei de Snell



Fonte: Extraído de Da Silva et al.

O outro fenômeno é a reflexão que acontece quando uma onda atinge uma superfície plana entre dois meios com propriedades distintas e retorna com mesmo ângulo de chegada, se propagando no meio incidente sem alteração de velocidade.

Figura 26 - Uma representação usando raios. Os ângulos de incidência ( $\theta_1$ ), de reflexão ( $\theta'_1$ ) e de refração ( $\theta_2$ ) estão indicados.



Fonte: Extraído de Halliday et al., (2000)

O fenômeno descrito e ilustrado acima obedece a Lei de reflexão, onde, o raio refletido está no plano de incidência e tem um ângulo de reflexão igual ao ângulo de incidência (HALLIDAY, 2000). Isso significa que:

$$\theta_i = \theta_r \quad (14.2)$$

Onde  $\theta_i$  é o ângulo incidente do raio perpendicular à frente de onda,  $\theta_r$  o ângulo do raio perpendicular à frente de onda refletida.

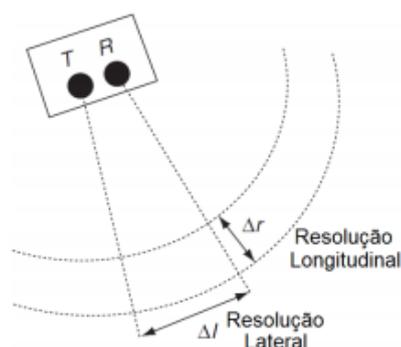
#### 5.4.4 Resolução Espacial e Profundidade de Penetração

Os aspectos mais importantes do *GPR* são a resolução e a profundidade de penetração. Ambos dependem principalmente da frequência do sinal transmitido e das propriedades elétricas do material (permeabilidade magnética; condutividade elétrica; permissividade dielétrica) (PAIXÃO, 2005).

Como o GPR detecta objetos em subsuperfície, o questionamento que sempre surge é com que precisão o objeto alvo pode ser localizado e quais informações detalhadas podem ser extraídas sobre a geometria do objeto (ANNAN, 2003).

A resolução determina precisamente a posição do alvo, estando intimamente relacionada com os atributos geométricos do alvo que podem ser extraídos (tamanho, forma, espessura, etc.). A resolução se divide em dois tópicos: Resolução longitudinal (alcance ou profundidade) e Resolução lateral (ou angular) (ANNAN, 2003). Os conceitos básicos são ilustrados na Figura 27.

Figura 27 - Figura esquemática de resolução longitudinal e lateral do sinal do GPR



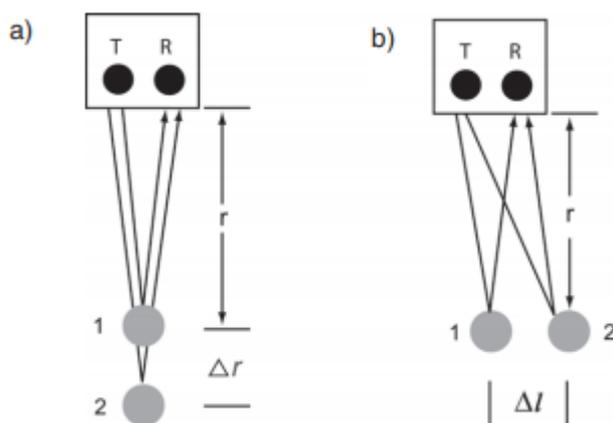
Fonte: Extraído de Carli, (2006)

Entretanto, há a necessidade de diferenciar materiais a uma mesma profundidade. Assim, a resolução espacial é definida por características da antena e do sinal empregado. Em um levantamento de Georadar a seleção do equipamento que será usado é essencial para solucionar todas exigências específicas da pesquisa (CARLI, 2006).

Dito isso, a aparelhagem definida, deve saciar todos os padrões entre resolução espacial, tamanho da antena, alcance do sinal a ser processado e a penetrabilidade no material, na qual na maioria dos casos está ligada com a frequência da antena utilizada. Características do meio como argilominerais, água, matéria orgânica entre outros pode afetar a penetrabilidade do sinal no meio (DANIELS, 2004 apud. CARLI, 2006). A compreensão da resolução aborda as questões fundamentais dos conceitos de detecção de GPR. Esses conceitos também são comuns a medições sísmicas e, de fato, são aplicáveis a qualquer técnica onde o fenômeno de onda é usado para detectar objetos à distância (ANNAN, 2003).

Por meio da interpretação dos fatores da resolução do sinal, é possível realizar um aperfeiçoamento do sinal e arranjo do levantamento. A Resolução do sinal de Georadar compõe-se por duas constituintes, a resolução longitudinal (alcance ou profundidade) e a resolução lateral (angular ou deslocamento lateral do sinal) como ilustra a Figura 27 (ANNAN, 2009). A resolução lateral e longitudinal é determinada matematicamente analisando um sistema simples de respostas do sinal para dois alvos pontuais (Figura 28).

Figura 28 - Alcance e resolução lateral podem ser determinados considerando a resposta de dois alvos localizados, ou em linha (a) ou lado a lado (b).



Fonte: Annan, (2005)

Para dois alvos alinhados, 1 e 2, a distinção no período em que os sinais tendem a percorrer o alvo, está intrinsecamente associado à distância que os diferencia. Na ilustração

acima observamos que o prazo de percurso de trajeto para o alvo 1 será definido pela equação 15.1;

$$t_1 = \frac{2d}{v} \quad (15.1)$$

No caso do alvo 2 usa-se equação 15.2;

$$t_2 = \frac{2d+2\Delta r}{v} \quad (15.2)$$

E para determinar a diferença entre ambos, expressa-se matematicamente com a equação 15.3.

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2\Delta r}{v} \quad (15.3)$$

Ressalta-se que a distinção entre os tempos tem de superior a 1/4 da largura do pulso aplicado, para que desse modo o eco obtido, seja nítido (ANNAN, 2005).

Ainda, o comprimento da resolução longitudinal é calculado por meio equação 15.4;

$$\Delta r \geq \frac{W_v}{4} \quad (15.4)$$

Onde W é a largura do pulso de sinal emitido e  $v$  é a velocidade do meio.

Assim, utilizando a fórmula citada, obtém-se o valor da largura do pulso e a velocidade no meio, os quais apontam qual é a resolução. O comprimento da resolução longitudinal é explícito pela distância da fonte em um ambiente perfeito. No entanto, a atenuação e dispersão do sinal em longos percursos irá prejudicar a resolução longitudinal (ANNAN, 2005 apud. DE CARLI, 2006).

A resolução lateral é descrita da mesma maneira que é ilustrada na figura 11, em que o período do trajeto em direção ao alvo 1 é obtido pela equação 15.1. E o período de percurso para o segundo alvo a partir da equação 16.1. E a diferença entre estes pela equação 16.2 (ANNAN, 2003).

$$t_2 = \frac{2(d^2 + \Delta l^2)^{1/2}}{v} \quad (16.1)$$

$$\Delta t = \frac{2[(d^2 + \Delta l^2 - d)^{1/2}]}{v} \quad (16.2)$$

Em geral, nos levantamentos realizados por GPR o alvo de interesse encontra-se com um significativo intervalo em relação ao conjunto de antenas medidoras, assim, considera-se que a distância do arranjo entre as antenas é inferior a distância entre cada ponto medido em superfície e, também, a profundidade ao alvo (ANNAN, 2003). Dessa forma, temos, que a diferença em tempo é dada pela expressão:

$$\Delta l \approx \frac{\Delta t^2}{vd} \quad (16.3)$$

Sendo a resolução lateral expressa por:

$$\Delta l \geq \sqrt{\frac{vdW}{2}} \quad (16.4)$$

Sabe-se então que a resolução lateral irá depender da velocidade do meio ( $v$ ), da largura do pulso ( $W$ ), e da distância entre o alvo e do sistema de leitura em superfície ( $d$ ) (ANNAN, 2005).

A resolução lateral está relacionada com o conceito da zona de Fresnel, na qual expressa a mesma relação para interferência de sinais (senoidais) monocromáticos (ANNAN, 2003). Com sinais de GPR, a largura do pulso ( $W$ ) está diretamente associada com a largura da banda ( $B$ ) na qual está estritamente associada à frequência central utilizada ( $f_c$ ) (ANNAN, 2005).

$$W = \frac{1}{B} = \frac{1}{f_c} \quad (16.5)$$

Sendo o comprimento de onda da frequência central expressa pela equação 16.6, assim, o comprimento da resolução lateral é dado pela equação 16.7 (ANNAN, 2003):

$$\lambda_c = \frac{f_c}{v} \quad (16.6)$$

$$\Delta l = \sqrt{\frac{d\lambda_c}{2}} \quad (16.7)$$

Conclui-se que a resolução é determinada pelo período do pulso emitido, controlado pela largura da banda de frequência do sistema. Os sistemas de *GPR* são projetados para alcançar uma banda de frequências, aproximadamente, igual ao valor da frequência central. Assim, a resolução aumenta com o aumento da frequência central (PAIXÃO, 2005). Por outro lado, a profundidade de investigação é fortemente controlada pela condutividade elétrica do solo combinada com a frequência central do sistema, no ANEXO B é ilustrado os múltiplos valores de condutividade de acordo com o material.

A frequência central é fundamental para a profundidade em que uma onda eletromagnética penetra em subsuperfície, sendo a principal limitação do Georadar. Quanto maior a frequência de onda transmitida, menor é o seu comprimento, conseqüentemente melhor será sua resolução em subsuperfície e menor a profundidade de penetração. Em contrapartida, quanto menor for a frequência, maior será a penetração da onda EM transmitida (DO NASCIMENTO et al, 1998), no entanto menor será a resolução.

A profundidade de penetração da onda está diretamente relacionada às propriedades elétricas dos materiais geológicos, condutividade elétrica e constante dielétrica. Na tabela 2 há a correlação dos valores de frequência central de distintas antenas vs. sua profundidade máxima de penetração. De acordo com Porsani (1999) os valores apontados na tabela foram obtidos por uma série de estudos práticos, elaborados por diferentes fabricantes de equipamentos GPR.

Tabela 1 - Frequência central das antenas vs profundidade máxima de penetração (m)

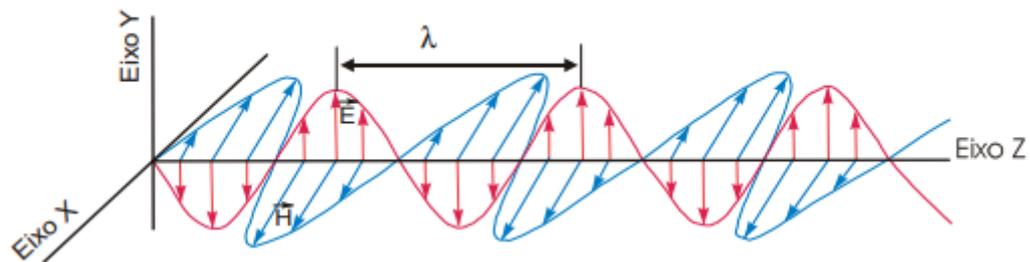
Frequência central (MHz)	Profundidade Máxima de Penetração (m)
1000	1
400	2
200	4
100	25
50	30
25	40
10	50

Fonte: Extraído de Nichetti, 2018

### 5.4.5 Velocidade e Propagação da Onda Eletromagnética

As ondas eletromagnéticas (Figura 29) são definidas por seu comprimento, que é, por sua vez, determinado pela força oscilante que os produz. Esta frequência é medida em unidades de hertz (LEKEBUSCH, 2003; CONYERS, 2004 apud. GIDUSKO & SCHULTZ, 2014). As principais propriedades do campo de onda são a velocidade, atenuação e impedância EM (ANNAN, 2003), sendo estes condicionados as propriedades elétricas do meio, como condutividade e constante dielétrica.

Figura 29 - Representação de uma onda eletromagnética propagando-se para direita



Fonte: Extraído de VIEIRA, 2003

O GPR verifica os padrões das ondas do campo EM. As fórmulas compiladas por Maxwell espelham a oscilação, tanto do campo elétrico, como, do campo magnético no tempo. Estando diretamente sujeita a magnitude relativa da perda de energia para a energia armazenada, deste modo os campos podem difundir e propagar como ondas (ANNAN, 2009).

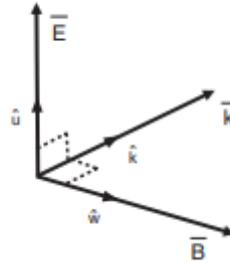
Ressalta-se que para pesquisas com georadar serem viáveis, as condições do meio devem ser favoráveis para respostas do sinal de radar como propagação de onda (ANNAN, 2009).

O caráter de onda torna-se mais evidente quando as equações de Maxwell são reformuladas, utilizando o campo elétrico e os parâmetros das relações constitutivas, temos a equação para o de onda (ANNAN, 2009):

$$\nabla^2 \times \vec{E} + \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (18)$$

As soluções da equação transversa da onda são denominadas de soluções de ondas planas das equações de Maxwell. A interação entre os vetores  $\vec{E}$  (campo elétrico),  $\vec{B}$  (campo

magnético) e  $\vec{k}$  (direção de propagação do campo eletromagnético) (ANNAN, 2009) assumindo a seguinte forma:



Dito isso, as soluções de ondas planas das equações de Maxwell são expressas matematicamente pela seguinte equação:

$$\vec{E} = f(\vec{r} \cdot \vec{k}, t) \hat{u} \quad (19.1)$$

Relação vetorial ortogonal, entre E, B e k

Onde,  $\vec{r}$  é o vetor no qual descreve a posição espacial e  $f(\vec{r} \cdot \vec{k}, t)$  satisfazem a equação (19), sendo  $\beta = \vec{r} \cdot \vec{k}$  a distância na direção de propagação (ANNAN, 2009):

$$\frac{\partial^2}{\partial \beta^2} f(\beta, t) - \mu\alpha \frac{\partial}{\partial t} f(\beta, t) - \mu\epsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} f(\beta, t) = 0 \quad (19.2)$$

De acordo com Annan, (1992) e Daniels (1996) a velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio é dada pela equação:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (19.3)$$

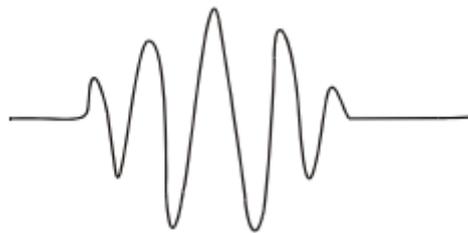
sendo  $c$  a velocidade da onda EM no vácuo ( $2,99863 \times 10^8$  m/s).

Levando em conta as equações de Maxwell no vácuo, em sua totalidade os integrantes dos campos eletromagnéticos satisfazem a equação da onda unidimensional (ALONSO, 1972; REITZ et al., 1982; GRIFFITHS, 1999; NUSSSENVEIG, 1997 apud. ANNAN, 2009) exposta com a fórmula a seguir:

$$c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \quad (19.4)$$

A propagação das ondas de radar tem como principais fatores determinantes a velocidade de propagação e a atenuação. A velocidade da onda eletromagnética é a resposta das propriedades que ela atravessa, a variação dessas, implica na oscilação de velocidade da onda. O pulso eletromagnético (Figura 30) tem velocidade de propagação controlada apenas pelas propriedades dielétricas dos materiais.

Figura 30 - Representação de um pulso eletromagnético emitido por aparelhos de GPR



Fonte: Extraído de Vieira, 2003

Segundo Davis e Annan (1989) a constante dielétrica  $\epsilon^*$  (ou permissividade relativa) é dada por:

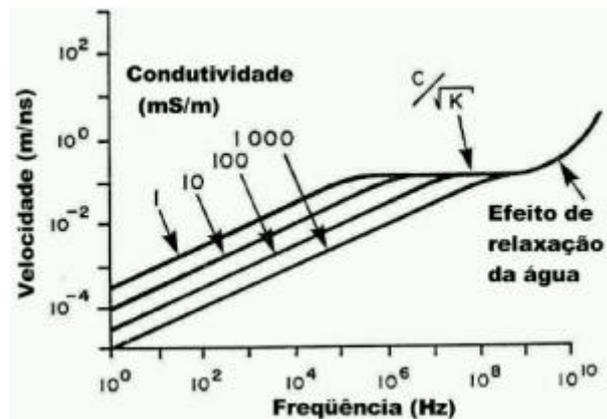
$$\epsilon^* = \epsilon' + i\epsilon'' \quad (20.1)$$

onde  $\epsilon'$  é a parte real da constante dielétrica e  $\epsilon''$  sua parte imaginária (ou a parte relativa às perdas de energia). Separando  $\epsilon''$  em seus componentes de alta frequência e condutividade de corrente contínua, a constante dielétrica pode ser escrita como:

$$\epsilon^* = \epsilon' + i \left[ \epsilon'' + \frac{\sigma_{dc}}{\omega \epsilon_0} \right] \quad (20.2)$$

onde  $\sigma_{dc}$  é a condutividade (em S/m);  $\omega$  é a frequência angular ( $2\pi f$ );  $\epsilon_0$  é a permissividade no vácuo ( $8,854 \times 10^{-12}$  F/m), e é um termo dependente da frequência, relativo as perdas associadas ao fenômeno de relaxação. Este fenômeno pode ser observado através da figura 31 que mostra a relação entre a velocidade da onda eletromagnética e a frequência para diferentes condutividades (DAVIS e ANNAN, 1989).

Figura 31 - Relação entre velocidades e frequências para diferentes condutividades



Fonte: Extraída de Mendes, 2008

Davis e Annan, (1989) apontam que para haver reflexões e/ou refrações das ondas eletromagnéticas no meio é necessária a existência de contraste suficiente entre as propriedades elétricas do alvo e do meio encaixante, pois, não havendo tal contraste, torna-se impossível detectar qualquer anomalia causada pelo alvo.

O coeficiente de reflexão é um parâmetro que nos concede uma estimativa da propagação das ondas EM, calculando a quantidade de energia refletida num semi-espaco plano se houver incidência no meio de transmissão. Sua formulação matemática é:

$$\epsilon^* = \epsilon' + i \left[ \epsilon'' + \frac{\sigma_{dc}}{\omega \epsilon_0} \right] \quad (20.3)$$

onde R é a quantidade de energia refletida,  $\epsilon'_1$  e  $\epsilon'_2$  são as constantes dielétricas dos meios 1 e 2 respectivamente.

De acordo com Reynolds (1997), a velocidade da onda eletromagnética nos materiais é descrita por:

$$v = c / \{ (\epsilon_r \mu_r / 2) [(1 + P^2) + 1] \}^{1/2} \quad (20.4)$$

onde c é a velocidade de propagação da onda eletromagnética no vácuo ( $3 \times 10^8$  m/s), r é a permissividade dielétrica relativa,  $\mu_r$  é a permeabilidade magnética e P é o fator de perda dado por:

$$P = \sigma / \omega \epsilon \quad (20.5)$$

onde  $\sigma$  é a condutividade, a frequência angular  $\omega = 2\pi f$ , onde  $f$  é a frequência (no caso do GPR é a frequência central da antena), a permissividade  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ , onde  $\epsilon_0$  é a permissividade no vácuo que tem o valor de  $8,854 \times 10^{-12}$  F/m.

Em materiais geológicos resistivos, ou seja, com baixa perda dielétrica temos que,  $\epsilon'' \approx 0$ , logo,  $\epsilon_r = \epsilon'$ , também,  $P \approx 0$  e  $\mu_r \approx 1$ , então a velocidade da onda se reduz a:

$$v = \frac{c}{(\epsilon')^{1/2}} \quad (20.6)$$

Todas as propriedades da onda exibem um comportamento semelhante. Em baixas frequências, as propriedades da onda dependem da raiz quadrada da frequência empregada, indicando um comportamento difuso do campo (ANNAN, 2009).

Em altas frequências, as propriedades tornam-se independentes da frequência do sinal, caso a permissividade dielétrica ( $\epsilon$ ), a condutividade elétrica ( $\sigma$ ) e a permeabilidade magnética ( $\mu$ ) sejam independentes da frequência, logo, o comportamento de alta frequência é o caráter de maior importância para o GPR (ANNAN, 2009).

No caso de um meio simples, onde todas as componentes de frequência e velocidade variam e sofrem atenuação ao mesmo tempo (ANNAN, 2009), pode-se expressar a velocidade, atenuação e impedância como:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{c}{\sqrt{k}} \quad (21.1)$$

$$(21.2)$$

$$\alpha = \sqrt{\mu \epsilon \sigma^2} = Z_0 \sigma \sqrt{k} \quad (21.3)$$

$$(21.3)$$

$$Z = \sqrt{\mu \epsilon} = Z_0 \sqrt{k}$$

Como mencionado, na grande maioria dos casos de GPR, é assumido que a propriedade de permissividade magnética no meio seja igual ou próxima de seu valor no vácuo, sendo assim utiliza-se  $\mu = \mu_0$  ( $\mu_0 = 1,25 \times 10^{-6}$  H/m). A leitura do sinal do GPR normalmente exibe uma mudança ascendente gradual na velocidade e atenuação com a frequência dominante empregada pela fonte no meio (ANNAN, 2009).

A velocidade ( $v$ ) de uma onda eletromagnética é dita pela função de sua frequência ( $f$ ), a velocidade da luz no espaço livre ( $c$ ), a média da corrente dielétrica relativo ao meio ( $r$ ), da permeabilidade magnética relativa ( $r$ ) e condutividade elétrica ( $\sigma$ ).

Ressalta-se que, em geral, materiais geológicos, tem  $\mu_r$  com valor igual a 1 (NEAL, 2004). Matematicamente a equação  $x$  é expressa pela fórmula:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r \cdot \frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2}}{2}}} \quad (22)$$

onde:  $\sigma/\omega$ : fator atenuante. e  $\omega = 2\pi f$ , é a frequência angular (rad s<sup>-1</sup>).

Para matérias de baixa perda, a exemplo da areia limpa e o cascalho, a influência da condutividade elétrica ( $\sigma$ ) sobre a faixa de frequência do GPR é mínima, presumindo-se que:  $\sigma/\omega = 0$  (DAVIS & ANNAN, 1989; REYNOLDS, 1997 apud NEAL 2004)

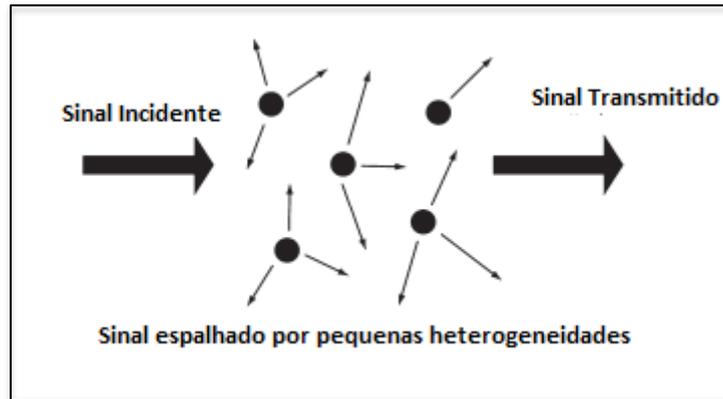
Geralmente, a velocidade da onda eletromagnética diminui com a profundidade, afinal tem-se uma tendência das camadas mais inferiores encontrarem-se com um maior volume de saturação aquosa, fator que eleva o valor da corrente dielétrica. Sabendo isso, na onda eletromagnética emitida pelo georadar, a divisão da atenuação não pode estar relacionada propriamente ao campo de velocidades (ZEHOU et al., 2001 apud. NETO, 2006)

Cabe a ressalva que dentre as três propriedades elétricas do meio somente a *Condutividade Elétrica* e a *Permissividade Elétrica* controlam a velocidade, já que a *Permeabilidade Magnética* diminui oscilação nos meios geológicos, em exceção quando há minerais magnéticos (ilmenita, magnetita e pirrotita) (TELFORD; GELDART; SHERIF, 1990 apud. FURTADO, 2009).

#### 5.4.6 Atenuação

Os sinais de radar que penetram no solo são invariavelmente transmitidos por meios complicados. Os sinais encontram propriedades elétricas e magnéticas heterogêneas em muitas escalas. Heterogeneidades em menor escala geram respostas fracas ou indetectáveis, mas sua presença tem impacto sobre os sinais à medida que eles passam. As heterogeneidades extraem energia à medida que o campo EM passa e a espalha em todas as direções (ANNAN, 2009) como pode ser observado na figura 32.

Figura 32 - Os sinais de radar de penetração no solo (GPR) são espalhados por heterogeneidades nas propriedades dos materiais, o que reduz os sinais transmitidos



Fonte: Adaptado de Annan (2009).

Em qualquer ponto em uma frente de onda, o sinal incidente com potência por unidade de área colide com dispersões locais de pequena escala, que são caracterizadas pelo tamanho espacial  $A$ , e número por unidade de volume  $N$  (ANNAN, 2009).

O campo elétrico ou magnético será atenuado com uma atenuação de espalhamento coeficiente (ANNAN, 2009) Em outras palavras, o campo elétrico diminuirá com a distância  $r$  como:

$$E = E_0 e^{-\alpha_s r} \quad (23.1)$$

onde:

$$\alpha_s = \frac{NA}{2} \quad (23.2)$$

E  $A$  é a seção transversal de espalhamento.

A atenuação de dispersão é muito dependente da frequência; examinar a resposta de pequenas dispersões conhecidas como dispersão de Rayleigh é informativo. A seção transversal de espalhamento de Rayleigh de um pulso é expressa da seguinte forma (ANNAN, 2009):

$$A = Ca^6 f^4 \quad (24)$$

Onde  $C$  é uma constante com unidades de  $1/m^4 \text{ Hz}^4$ ,  $a$  é o raio da esfera, e  $f$  é a frequência.

A atenuação de espalhamento deve ser adicionada à atenuação de perda ôhmica ou de material para determinar a atenuação total que o sinal GPR verá à medida que viaja através de um meio dielétrico heterogêneo com perdas (ANNAN, 2009).

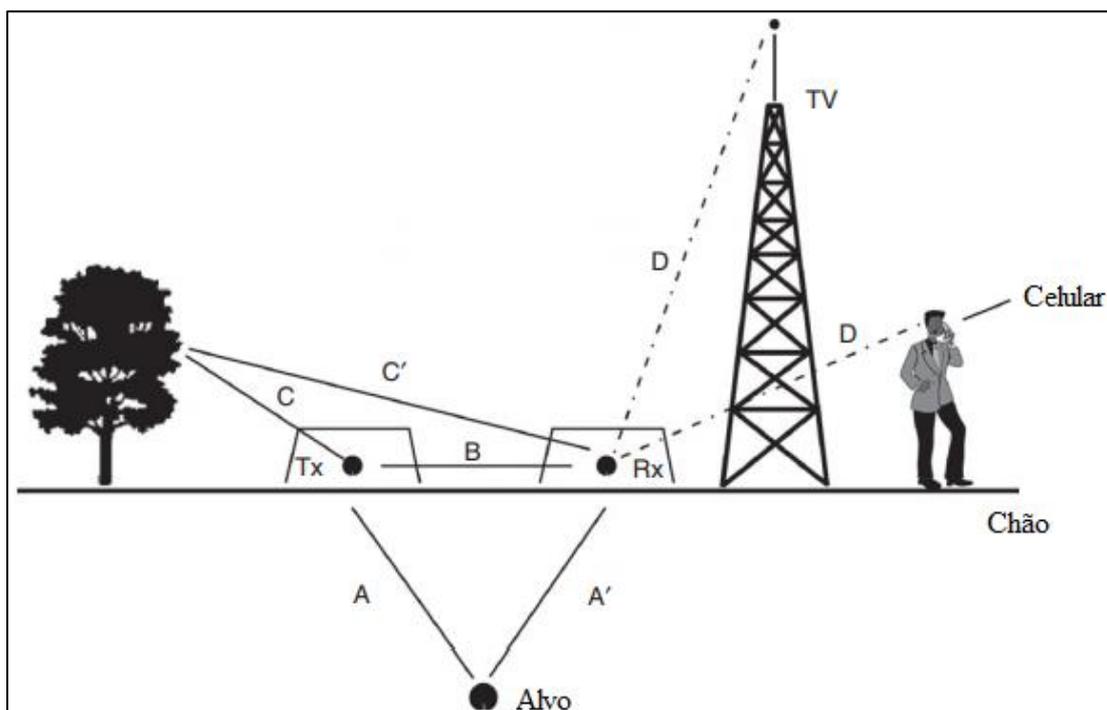
$$\alpha_{\text{total}} = \alpha_{\text{ohmic}} + \alpha_{\text{scattering}} \quad (25)$$

O efeito da dispersão do volume foi reconhecido muito cedo pela comunidade de sonorização de rádio como um fator limitante na sondagem de gelo. A dispersão de volume é fundamental no gelo porque a atenuação ôhmica é muito menor do que na maioria dos solos e materiais rochosos (ANNAN, 2009).

#### 5.4.7 Ruído

Os sistemas GPR são essencialmente receptores de banda larga e são, portanto, suscetíveis à interferência de várias fontes feitas pelo homem, incluindo transmissores de televisão, transmissores de rádio FM, telefones móveis (celulares) e suas torres de transmissão, walkie-talkies e outros tipos de comunicação de rádio (CONYERS e GOODMAN, 1997; OLHOEFT, 1999, 2000). A figura 33 mostra a interferência que afeta traços individuais em um perfil de reflexão coletado imediatamente adjacente a uma base aérea militar.

Figura 33 - Um sistema de radar de penetração no solo (GPR) emite e detecta sinais de ondas de rádio. Existem muitos sinais e caminhos possíveis e o objetivo é maximizar a resposta alvo e minimizar outras.



Fonte: Adaptado de Annan (2009).

Em alguns casos, o ruído de fundo aleatório pode ser reduzido pelo empilhamento de traços no momento da coleta de dados (OLHOEFT, 1999 apud. NEAL, 2004), ou escolhendo uma frequência de antena significativamente diferente daquela do ruído (CONYERS e GOODMAN, 1997 apud. NEAL, 2004). No entanto, o primeiro aumenta o tempo de coleta de dados e o segundo pode comprometer os objetivos iniciais do levantamento (NEAL, 2004).

O ruído sistemático também pode ser gerado em perfis de radar, os mais comuns dos quais são múltiplos de 'toque'. Estes são eventos múltiplos de 'reflexão' de várias origens e são normalmente dominados por uma única frequência que obscurece os reflexos primários (SENSORES e SOFTWARE, 1998 apud. NEAL, 2004).

O toque pode resultar de sobrecargas de energia nas antenas e outros ruídos do sistema, levando a bandas horizontais, normalmente de baixa frequência (YOUNG et al., 1995; GEOPHYSICAL SURVEY SYSTEMS, 1996; CONYERS e GOODMAN, 1997 apud. NEAL, 2004).

O toque é comum onde cabos de aço são usados para conectar o transmissor com o receptor ao console, porque eles podem atuar como uma segunda antena ou radiador (ANNAN e DAVIS, 1992). Este efeito é significativamente reduzido com o uso de cabos de fibra ótica. (ANNAN e DAVIS, 1992 apud. NEAL, 2004).

Neal et al. (2002) registram o toque de alta frequência durante o levantamento da parte superior média e inferior de uma praia mista e de cascalho e atribuiu-o à presença de águas subterrâneas salinas altamente condutoras. Condutor argilas também geram zumbidos de alta frequência semelhantes.

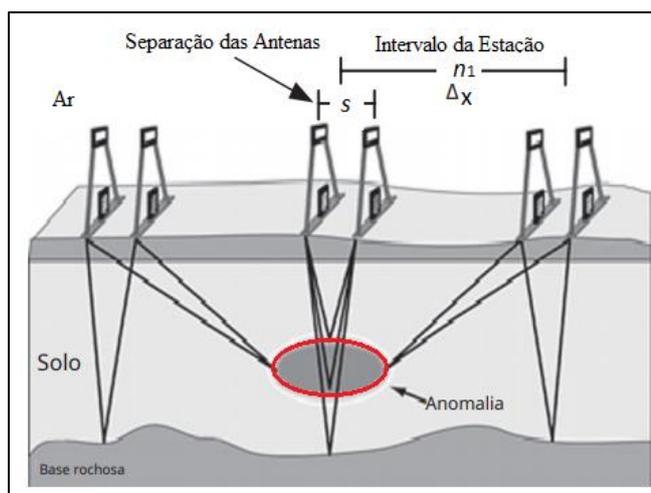
## **5.4.8 Aquisição de Dados**

### **5.4.8.1 Common Offset**

Levantamentos Common offset, são métodos de reflexão de deslocamento comum, que implantam um único transmissor e receptor, onde há um deslocamento fixo ou espaçamento entre as unidades em cada local de medição. O intuito dessa forma de aquisição é compreender o alvo de uma única vez. As antenas de transmissão e recepção possuem caráter de polarização específico para detectar o campo gerado (ANNAN, 2009).

As antenas são implantadas em uma geometria fixa (separação (s) e orientação) e tem medições feitas em intervalos regulares da estação ( $\Delta x$ ) como ilustrado na Figura 1.27

Figura 34 - Ilustração esquemática do levantamento Common offset ao longo de uma linha mostrando os principais parâmetros de especificação do levantamento

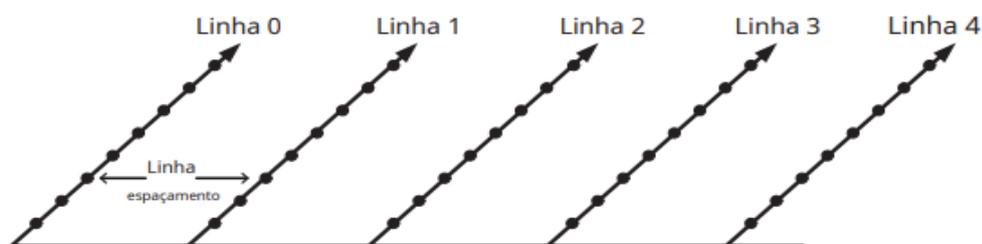


Fonte: Adaptado de Annan, 2009

Dados com espaçamento uniforme são normalmente desejados a fim de facilitar a aplicação de técnicas de processamento e melhorar a visualização dos dados. Logo o objetivo dos levantamentos de reflexão de deslocamento comum é mapear a refletividade do subsolo *versus* a posição espacial (ANNAN, 2009).

Variações na amplitude de reflexão e atraso de tempo indicam variações em  $v$ ,  $\alpha$ , e  $Z$ . Pesquisas de GPR que utilizam a aquisição por common offset são tradicionalmente conduzidas em linhas de pesquisa “retas” e os sistemas são projetados para operar dessa maneira. A cobertura da área muitas vezes envolve a aquisição de dados em uma grade retilínea de linhas, que cobrem a área, como representado na Figura 35 (ANNAN, 2009).

Figura 35 - Perfil de levantamento distribuído por várias linhas de levantamento. A resposta do solo é medida em pontos discretos ao longo da linha de levantamento.



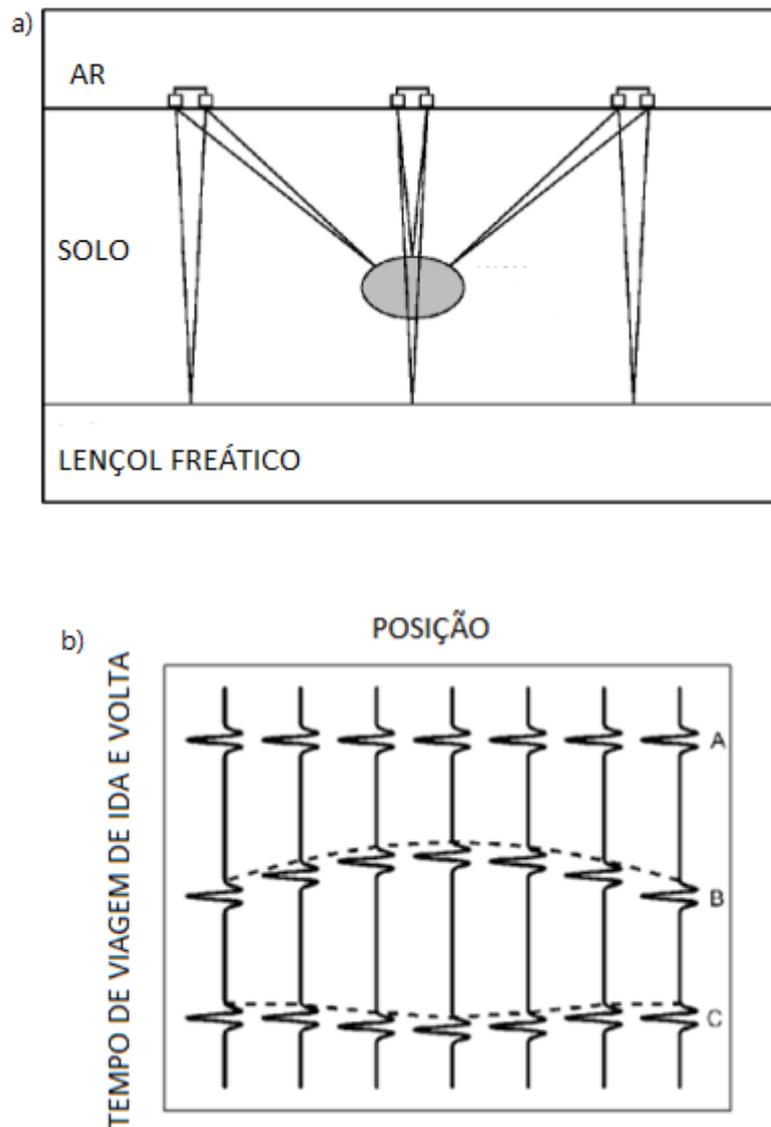
Fonte: Adaptado de Annan, 2009

Os parâmetros que definem um levantamento de deslocamento comum são: a frequência central GPR, a janela de tempo de gravação, o intervalo de amostragem, o

espaçamento da estação, o espaçamento da antenna, o espaçamento da separação de linha e a orientação da antenna (ANNAN et al., 2009). No método citado observa-se que a energia que o GPR transmite para o solo será (parcialmente) refletida quando forem encontrados contrastes na permissividade no solo.

A Figura 36 (a) mostra uma seção GPR idealizada medida com radar de superfície e uma separação de antenna fixa (deslocamento comum) sobre uma anomalia (por exemplo, um tubo cheio de água) com uma permissividade diferente do material hospedeiro, conforme mostrado na Fig. 36 (b) (ANNAN et al., 2009).

Figura 36 - Seção de GPR medida com radar em superfície e separação de antenna fixa (deslocamento comum) sobre uma anomalia com uma permissividade diferente do material hospedeiro.



Fonte: Adaptado de Annan, 2009.

Visto que o GPR emite ondas em todas as direções, a energia refletida é medida antes que o GPR esteja diretamente sobre a mesma (Figura 36. a). Os eventos refletidos na seção de radar traçam uma hipérbole (Figura 36. b) porque a energia refletida durante a medição do GPR encontra-se diretamente sobreposta a anomalia, tendo, assim, a distância de viagem mais curta (tempo) enquanto todas as outras ondas terão uma distância maior para viajar (ANNAN et al., 2009).

Analisando a figura 36.b) vê-se que a velocidade média da onda no solo determina a convexidade da hipérbole de reflexão B; ou seja, determina quanto tempo as ondas precisam para percorrer a distância extra. A velocidade média entre a superfície do solo e a anomalia,  $V_{solo}$ , pode ser determinada a partir de um GPR ajustando a hipérbole aos tempos de chegada medidos em várias posições  $x$  (ANNAN et al., 2009):

$$V_{solo} = \frac{2\sqrt{x^2 + d^2}}{t_{rw,x}} \quad (26)$$

Onde  $x$  é a posição relativa à orientação do objeto de dispersão (vértice da hipérbole),  $d$  é a profundidade da dispersão objeto, e  $t_{rw,x}$  é o tempo de chegada da onda refletida na posição  $x$  que foi corrigido com tempo zero.

Se a seção GPR for medida com uma separação significativa da antena,  $a$ , isso também deve ser incluído na determinação da velocidade da seguinte forma (ANNAN et al., 2009):

$$V_{solo} = \frac{\sqrt{(x - 0.5a)^2 + d^2} + \sqrt{(x + 0.5a)^2 + d^2}}{t_{rw,x}} \quad (27)$$

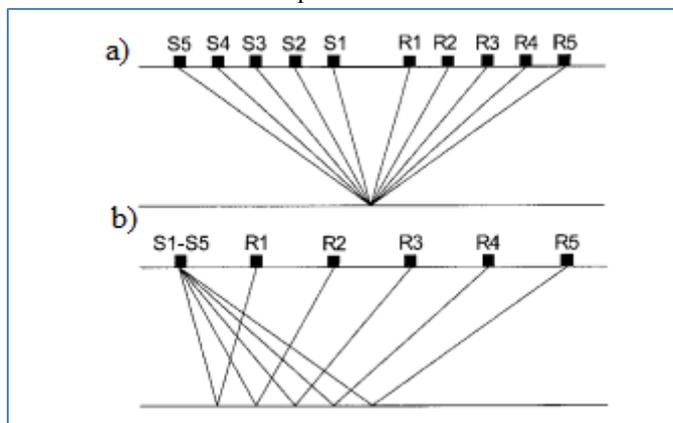
#### 5.4.8.2 Métodos Common Mid Point (CMP) e Wide angle reflection and refraction (WAAR)

Embora, às vezes, não seja tão preciso quanto os métodos de deslocamento comum, as técnicas de onda direta fornecem uma maneira adicional de determinar a velocidade da onda de radar no campo (CONYERS e LUCIUS, 1996). Nestes tipos de testes, duas antenas são separadas, com o material a ser testado localizado entre os dois. Uma antena então transmite o sinal para a outra, e o tempo de transmissão unilateral entre os dois pode ser medido. Se a distância entre as duas antenas for conhecida, a velocidade pode ser calculada (CONYERS e LUCIUS, 1996).

Um tipo de teste é chamado de Common Mid Point (CMP) (Figura 37.a) (FISHER et al. 1994; TILLARD e DUBOIS, 1995; MALAGODI, ORLANDO e ROSSO 1996; LECKEBUSCH 2003 NEAL 2004; PERROUD e TYGEL 2005), e um teste semelhante é o

Wide angle reflection and refraction (WAAR) (Figura 37.b) (IMAI et al. 1987; MILLIGAN e ATKIN 1993; REYNOLDS, 2011).

Figura 37 - a)CMP e b)WARR, onde S denota a localização do transmissor e R denota as localizações do receptor



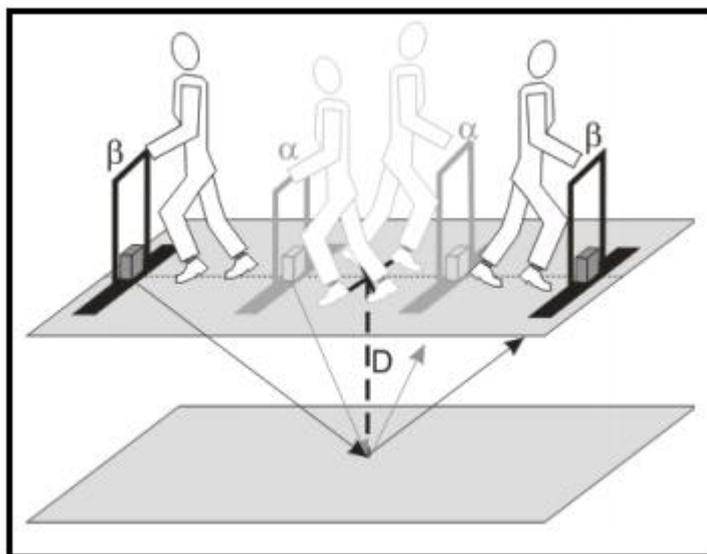
Fonte: Reynolds, 2011

Em todos esses tipos de testes, é necessário que o sistema GPR permita que duas antenas sejam separadas. Se as únicas duas antenas disponíveis para um teste de onda direta não forem de mesma frequência, mas estão próximas (antenas de 400 e 500 mega-hertz), ambas podem ser usadas, pois elas irão transmitir e receber dentro da largura de banda uma da outra (REYNOLDS, 2011).

Em ambos os testes WARR e CMP, a energia do radar é enviada de uma antena para os outros à medida que são movidos a uma distância cada vez maior. Reflexão individual e vestígios são geralmente coletados (e muitas vezes empilhados para melhorar sua qualidade) em modo passo para este tipo de teste. As ondas de radar que se movem entre as antenas passarão tanto pelo ar quanto pelas camadas próximas à superfície do solo e serão recebidas na outra (figura 37) (REYNOLDS, 2011).

No método CMP (figura 38), ambas as antenas são colocadas primeiro uma ao lado da outra no chão, e um traço de reflexão é coletado. Pode haver três ou mais chegadas de ondas coletadas neste local: um que viaja no ar, um ao longo da interface ar-solo e possivelmente mais que são refletidos e refratados de interfaces enterradas no solo (REYNOLDS, 2011).

Figura 38 - Método de sondagem CMP: O X no meio das localizações da antena representa o ponto médio para CMP e duas posições da antena são mostradas em  $\alpha$  e  $\beta$ , onde a distância entre as antenas é o deslocamento de Tx-Rx. A profundidade ( $D$ ) para a interface refletora de subsuperfície é mostrada junto ao caminho do raio para o sinal refletivo

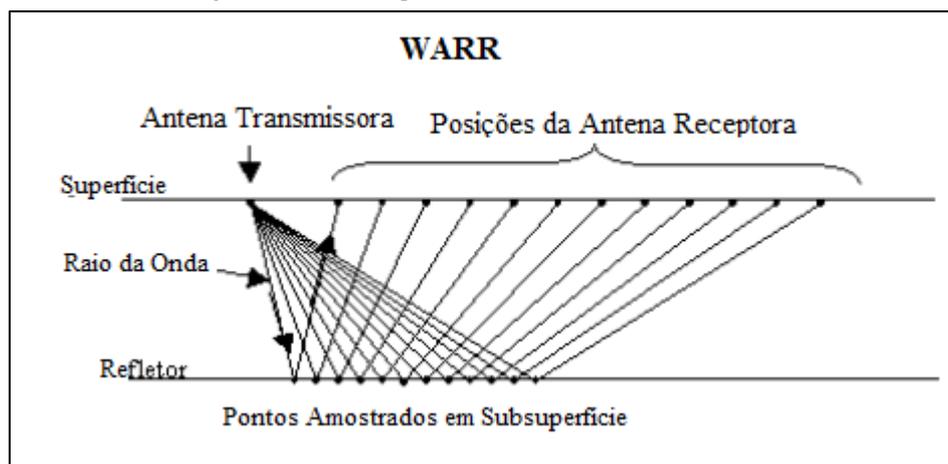


Fonte: extraído de Jacob e Urban (2015)

Este procedimento de coleta é repetido muitas vezes até que as antenas estejam separadas por até 5 ou 10 metros. A energia continuará a viajar por vários caminhos entre as duas antenas, e se as chegadas de ondas que viajaram dentro do solo podem ser identificadas, e a distância entre as duas antenas é conhecida, a velocidade pode ser calculada (NEAL, 2006).

Em testes de WARR (figura 39), deve haver camadas de subsuperfície para refletir a energia que são horizontais ou não caem muito. Isto ocorre, pois, a energia deve se mover de forma previsível entre as duas antenas, o que raramente acontece (REYNOLDS, 2011). Além disso, para que o resultado dos testes WARR sejam precisos, deve-se presumir que a velocidade das camadas individuais não muda de maneira abrupta lateralmente, o que também acontece raramente (REYNOLDS, 2011).

Figura 39 - Arranjo WARR realizado; as antenas utilizadas foram as de 25 MHz, sendo que a antena transmissora ficou fixa no início do arranjo e a antena receptora foi sendo deslocada com um incremento de 20 cm



Fonte: Extraído de Dourado et al., 2011

#### 5.4.9 Levantamento por radar de penetração do solo (GPR) na Arqueologia

Como fora explicado anteriormente, o GPR é contemplado com antenas de baixa a alta frequência, essa propriedade está diretamente relacionada a profundidade e grau de resolução que o aparelho pode gerar durante o processamento de dados. Compreendendo esse conceito e seu funcionamento, na arqueologia os aparelhos que são compostos por antenas de mais baixa frequência possuem a capacidade de evidenciar materiais em maiores profundidades, no entanto, objetos com pequenas dimensões não seriam registrados pelo aparelho, enquanto antenas de mais alta frequência são capazes de expor a presença de artefatos rasos e de pouca dimensão (SALA *et al.*, 2012). Logo entende-se que com o aumento da frequência, o grau de penetração diminui.

Muitos adotam o GPR como a técnica mais eficiente, para prospecção em sítios arqueológicos, o que acarreta um crescimento significativo dessa aplicação. Em âmbitos urbanos, se torna uma ferramenta de notória utilidade, já que consegue suprir limitações encontradas nas demais.

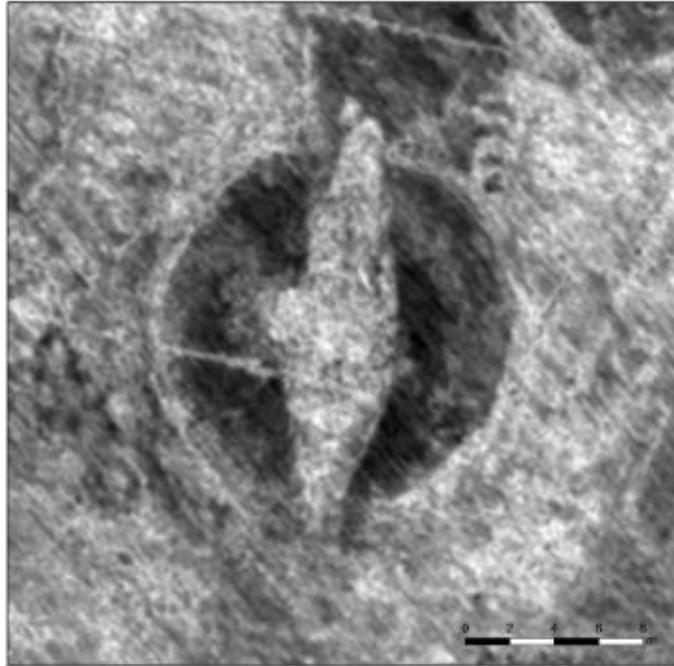
Em sua totalidade a prospecção por GPR parte do princípio composto pela transmissão de ondas eletromagnéticas e por uma antena que apresenta uma frequência que varia de 10 a 2600 Mhz (figura 12 c) (ALLEN, *et al.*, 2017). Aplicação do GPR no contexto arqueológico é facultativa por tratar-se de um método não invasivo, sendo aplicados para verificação de profundidades rasas inferiores a 3 metros. Desse modo, pode ser utilizado como método base para o reconhecimento de resquícios arqueológicos em uma prospecção não interativa (CEZAR *et al.*, 2001 apud ARAGÃO *et al.* 2010) ou sendo uma técnica complementar a magnetometria em alguns casos (BARRADAS *et al.*, 1999 apud ARAGÃO *et al.* 2010).

Quando sua aplicação é feita correlata com o método magnético, sua principal contribuição é na interpretação e descrição das anomalias geradas pela suscetibilidade magnética, já que seus princípios registrarão. Assim, a profundidade do material que tenha gerado essa anomalia, assegura o local mais propício a escavação, diminuindo as probabilidades de erro geradas por anomalias enganosas (ARAGÃO *et al.* 2010).

O GPR é muito vantajoso quando se trata de uma prospecção rápida e objetiva, tendo em vista que os resultados já podem ser observados em meio ao processo de levantamento de dados (ARAGÃO *et al.* 2010). Feições arqueológicas, como solos de ocupação, urnas e dutos enterrados, alicerces de construções e túneis produzem padrões nos registros do GPR bem característicos e podem ser distinguidos dos padrões associados ao material naturalmente depositado durante os processos geológicos. Dentre esses padrões, destacam-se as descontinuidades laterais nos refletores presentes nos registros causadas normalmente pelo revolvimento do subsolo durante os enterramentos, e as formas hiperbólicas, que podem ser causadas pela presença de urnas, dutos e alicerces de construções (ARAGÃO, *et al.* 2010).

Na literatura esse método apresenta resultados satisfatórios associado a diversas descobertas de grande valor histórico. No ano de 2018, o Instituto Norueguês de Pesquisa do Patrimônio Cultural (NIKU), noticiou a descoberta, por meio de imagens geradas por GPR (figura 40), de um navio funerário viking, enterrado no Condado de Østfold, sudoeste da Noruega, a matéria relata que o navio apresentaria 13 metros de comprimento e foi coberto a mais de 1.000 anos.

Figura 40 - Contorno de navio Viking identificados a partir de dados do georadar



**Fonte:** Instituto Norueguês de Pesquisa do Patrimônio Cultural (NIKU), 2018

## **6 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA PARA O PROCESSAMENTO E TRATAMENTO DOS DADOS**

Como produto final de uma prospecção geofísica os dados levantados se apresentam em forma de mapas, seções e radargramas. Para uma interpretação mais fiel desses produtos são necessárias correções em meio ao processo para, assim, obter um resultado mais confiável e semelhante a realidade. Cada método tem suas particularidades, assim como erros e para solução desses, filtros e correções específicas durante o processamento dos dados são necessários.

### **6.1 Processamento de dados magnetometria**

Assim como todo método geofísico, a magnetometria necessita de correções, previamente a geração do seu resultado, devido a interferências que possam ser causadas, por elementos metálicos nas proximidades do levantamento, tempestade magnéticas entre outros. Antecipadamente a análise do produto final, os valores obtidos no levantamento de campo devem ser reparados com o intuito de aprimorar a resolução e ter maior fidelidade as anomalias, conseguindo, assim, descartar efeitos geológicos malquistos, remover ruídos de fontes superficiais e subsuperficiais (LUIZ; SILVA, 1983 apud MELO, 2007).

Partindo dessa premissa, lista-se abaixo as etapas e os procedimentos para o tratamento dos dados, essa fundamentação se dá em relação aos resultados objetivados por meio desse método pelo autor, logo não foram listados correções e/ou processos que não serão aplicados.

### **6.2 Tratamento de dados magnetometria**

#### **6.2.1 Correções:**

**Correção da Variação Diurna:** São feitas medidas por meio de uma estação física, instantaneamente as medições feitas na localização desejada, as medições devem ocorrer em um intervalo de 5 a 15 minutos, com um magnetômetro fixo e outro usado na prospecção, assim essa correção é elaborada pelo cálculo da diferença entre os valores obtidos no magnetômetro base e o usado nas medições (MELO, 2007)

**Correção Topográfica:** Realizada através de cartas representando os elementos do campo geomagnético e a correção de latitude é feita subtraindo-se das medidas, o valor do campo normal da Terra, representado pelo IGRF (LUIZ; SILVA, 1983 apud MELO, 2007).

## 6.2.2 Filtros:

### a) Filtro de Redução às latitudes arbitrárias:

Esse filtro consiste num ajuste mais geral dos vetores de magnetização e de direção de medidas às latitudes de interesse. Os filtros de redução ao pólo e redução ao equador são casos particulares desse filtro (SILVA, 1986 apud MELO, 2007).

### b) Redução ao pólo:

O processo de redução ao pólo transforma a anomalia obtida em qualquer ponto do globo, numa anomalia observada no pólo norte magnético, onde a magnetização e o campo regional são verticais (DOBRIN; SAVIT, 1988 apud MELO, 2007).

A redução ao pólo é o meio para remover as assimetrias causadas por uma magnetização não vertical ou campo regional, produzindo um conjunto simples de anomalias a interpretar, com o valor máximo (pico) sobre o centro da fonte de anomalia. Esse procedimento faz uso de algoritmos de convolução no domínio do espaço ou algoritmos no domínio de Fourier (DOBRIN; SAVIT, 1988 apud MELO, 2007).

### c) Filtro de Redução ao Equador

Esse filtro realça o campo produzido por estruturas lineares, como diques e falhas, que tem a direção aproximadamente paralela ao campo magnético. O Filtro consiste numa rotação do vetor tal que o campo geomagnético e as magnetizações façam um ângulo normal com o norte geográfico e estejam perpendiculares à maior superfície do corpo, onde a indução é máxima e o campo tem a maior intensidade (SILVA, 1986 apud MELO, 2007).

### d) Filtros de derivadas verticais e horizontais

Os filtros de derivadas servem para realçar anomalias causadas por fontes mais profundas. Os filtros de derivadas verticais usam funções harmônicas dadas por  $(u^2 + v^2)^{n/2}$ , onde  $n$  é a ordem da derivada, não dependendo da função em particular, mas somente da condição de que a função obedece à equação de Laplace (SILVA, 1986 apud MELO, 2007).

## 6.3 Processamento de dados GPR

Antes da aplicação de qualquer método é de fundamental importância um entendimento da área de estudo para assim saber quais processos devem ser aplicados, ou seja, o objetivo deve estar bem claro assim como o alvo de estudo. Partindo dessa premissa, com

dados prévios essenciais em posse, mapas cartográficos, bibliografias básicas sobre geologia e outros padrões, estabelece-se a aquisição em campo (AGUIAR, 2005).

Estando de acordo com o parágrafo anterior, o processamento dos dados se dá em acompanhamento dos dados levantados em campo, todas informações úteis devem ser documentadas, de forma sucinta e simples, porém, minuciosa, registrando características que possam acarretar na produção de ruídos no produto final, o radargrama. Uma cópia dos dados brutos não processados deve sempre ser mantida e arquivada para controle de qualidade e além de permitir um processamento adicional se necessário for (SCHMIDT et al., 2015).

Todo o processamento deve ser documentado de forma clara. Interferência nos dados que não podem ser corrigidas computacionalmente devem ser descritas e distinguidas de eventuais anomalias arqueológicas (SCHMIDT et al., 2015). Se os dados foram seriamente comprometidos durante a coleta, um retorno ao local para um novo levantamento das áreas deve ser considerado (SCHMIDT et al., 2015).

Deve-se atentar a padrões como as propriedades morfológicas da superfície onde caminha a antena, a presença de refletores ao longo da linha estabelecida, a presença de circuitos elétricos de alta voltagem, além de incidentes que possam ocorrer no decorrer do caminhamento com a antena, esses geralmente por desatenção do operador (AGUIAR, 2005).

As superfícies que possuem salientes irregularidades tendem a registrar no processamento ruídos de alta frequência. Devido a essas condicionantes, deve-se atentar a influência de elementos externos, que possam causar consequências negativas.

Ainda, outros efeitos que interferem no registro do sinal podem ser apontados como trocas laterais de materiais, erros do operador, esses devem ser atentados e caso ocorram devem ser demarcados e registrados em imediato, caso não ocorra esse procedimento, esse acabara pôr a emitir índices a antena incondizentes, atribuindo valores de profundidade errôneos (AGUIAR, 2005).

Ressaltando esses aspectos, e sendo minucioso quanto aos mesmos, o trabalho pode prosseguir em laboratório. Em sua totalidade, todos equipamentos de GPR existentes apresentam padrões que podem ser alterados, com isso, devem ser verificadas todas as funções que competem as propriedades do aparelho, sendo ideal reconhecer qual a profundidade estipulada a se alcançar durante o estudo, tal qual, a resolução (AGUIAR, 2005).

### **6.3.1 O intervalo de um registro**

O intervalo de um registro (R), define seu comprimento temporal, isto é, define a máxima coordenada vertical no radargrama (tempo duplo) que se alcança no radargrama. Portanto delimita uma janela temporal de registro (AGUIAR, 2005).

### **6.3.2 Posição de início do sinal**

Este parâmetro permite selecionar o tempo de início da janela temporal. O tempo final da mencionada janela vem determinado pela adição do tempo de início e do intervalo de registro (AGUIAR, 2005).

### **6.3.3 Ponto por traço**

Este parâmetro determina a amostra de cada traço, isto é, os pontos utilizados para sua representação. Cada um destes pontos, é um valor digital que define uma porção do traço da onda refletida (AGUIAR, 2005).

A relação entre este parâmetro, o intervalo e o número de traços registrados por segundo determina para cada antena concreta, em grande medida, a resolução que se tem durante o estudo (AGUIAR, 2005).

### **6.3.4 Superposição de traços**

Este procedimento se utiliza para melhorar a relação entre o sinal e o ruído quando este é aleatório. Isto é, quando se trata de eventos que não se registram para tempos iguais em vários traços consecutivos.

### **6.3.5 Correções dos sinais**

#### **a) Correções estáticas**

As correções estáticas são um tipo de processamento que tem como objetivo compensar o atraso da primeira chegada à superfície e também os efeitos oriundos das variações bruscas da velocidade de propagação da onda no meio (EVERETT, 2013). Os traços de radar medidos ao longo de um perfil são deslocados individualmente ao longo do eixo temporal, tal que normalmente o primeiro pico de um pulso que chega mais cedo encontrando-se alinhado a um dado temporal comum (EVERETT, 2013).

O desalinhamento do traço é causado por diversos fatores, incluindo desvio no transmissor ou receptor eletrônico, irregularidades nos cabos que conectam o transmissor e o receptor eletrônico às antenas, nos próprios conectores ou então em pequenas variações a espaçamento e orientação entre a antena TX – RX ao longo do perfil (EVERETT, 2013). A

correção de tempo zero melhora a coerência espacial, ou correlação de traço cruzado, da seção de tempo resultante e a prepara para processamento posterior (EVERETT, 2013).

#### **b) Ganho**

Se há rápida atenuação das ondas eletromagnéticas produzidas por meio materiais somarmos a atenuação que se produz pela expansão geométrica da frente de ondas, o resultado é que a amplitude das reflexões diminui rapidamente com a profundidade (AGUIAR, 2005).

#### **6.3.6 Dewow**

Um aspecto único dos dados de GPR origina-se da proximidade entre o receptor e o transmissor. Os campos próximos ao transmissor contêm energia de baixa frequência associada a campos eletrostáticos e indutivos, que decaem rapidamente com a distância. Essa energia de baixa frequência geralmente produz um componente de variação lenta no tempo para os dados de campo medidos (ANNAN, 2009).

A energia citada faz com que o nível básico do sinal recebido se incline para cima ou para baixo. Esse efeito ficou conhecido como “*wow*”. O processo de sinal “*wow*” pode ser suprimido aplicando um filtro temporal de alta perda ao sinal detectado (ANNAN, 2009). Este processo é conhecido como “*dewow*”. Em sistemas analógicos mais antigos, o processo *dewow* era aplicado em um circuito analógico no momento da aquisição. Os sistemas modernos aplicam a filtragem digital em tempo real ou na pós-aquisição (ANNAN, 2009).

#### **6.3.7 Ganhos**

Os sinais de radar são atenuados muito rapidamente à medida que se propagam para o solo. Os sinais de profundidades maiores são muito pequenos quando comparados aos sinais de profundidades menores. A exibição simultânea desses sinais requer condicionamento antes da exibição visual. A equalização das amplitudes aplicando uma função de ganho dependente se o tempo irá compensar a rápida queda nos sinais de radar de profundidades maiores (ANNAN, 2009).

Essa amplificação variável no tempo é referida ao ganho de tempo e ganho de faixa ao manipular dados GPR. A atenuação no solo pode ser altamente variável (ANNAN, 2009). Existem várias maneiras de aplicar o ganho de tempo aos dados do radar. O ganho deve ser selecionado com base em um modelo físico a priori, não capricho do usuário, com o objetivo de minimizar artefatos criados pelo processo (ANNAN, 2009).

### **6.3.8 Deconvolução**

Esse processo comprime o pulso de radar, aumentando com isso a resolução temporal do sinal. A eficácia desta etapa de processamento em dados de GPR é um assunto controverso entre pesquisadores da área (POPINI, 2001 apud MELO, 2007). O objetivo da desconvolução é normalmente maximizar a largura de banda e reduzir a dispersão do pulso para maximizar a resolução (ANNAN, 2009).

A desconvolução de dados GPR raramente produziu muitos benefícios. Parte da razão para isso é que o pulso GPR normal é o mais curto e o mais comprimido que pode ser obtido para a largura de banda e as condições de sinal para ruído fornecidas. Os casos em que a desconvolução provou ser benéfica ocorrem quando reverberação do sistema está presente (ANNAN, 2009).

### **6.3.9 Migração**

A migração é a conversão espacial (FISHER et al., 1992), que tenta remover a direcionalidade da fonte e do receptor dos dados de reflexão. O objetivo é reconstruir a distribuição de refletividade do radar geometricamente correta da subsuperfície. A migração requer conhecimento da estrutura de velocidade, o que muitas vezes a torna um processo iterativo, pois a velocidade do plano de fundo é ajustada iterativamente para otimizar a imagem (ANNAN, 2009).

Em resumo, nesta etapa, os dados registrados e processados no domínio  $(x, t)$ , são transferidos para o domínio  $(x, z)$ . Os refletores são posicionados no modelo de subsuperfície e as difrações são colapsadas em um ponto. Assim, a migração de dados de radar posiciona os refletores quanto à sua posição, mergulho e profundidade (POPINI, 2001 apud MELO, 2007).

### **6.3.10 Filtragem de sinais**

#### **a) Filtros horizontais (ou espaciais)**

Filtragem aplicada horizontalmente de acordo com o registro. Está relacionado ao número de traços registrados pelo equipamento onde, anomalias altas tem alto número de traços o inverso ocorre com anomalias com baixo comprimento de onda (AGUIAR, 2005). Esse filtro tem como principal finalidade eliminar o ruído dos sinais, os quais podem ser de alta ou baixa magnitude. Logo os filtros de passa baixa diminuem ruídos de baixos traços e os de passa alta elimina valores altos de traços (AGUIAR, 2005).

#### **b) Filtros verticais (ou temporais):**

Estes filtros se aplicam à coordenada temporal do registro, isto é, no sentido vertical sobre cada um dos traços adquiridos. Por isso recebem o nome de filtros verticais ou temporais. Trata-se de uma filtragem frequencial aplicada sobretudo a cada um dos traços que compõem o radargrama (AGUIAR, 2005).

#### **6.3.11 Correção topográfica**

Um fator que muito contribui para distorcer as reflexões é a variação topográfica do terreno onde se realiza o levantamento (PESTANA & BOTELHO). Uma correção topográfica é necessária uma vez que os sinais de SP tendem a aumentar na direção descendente, ao longo do gradiente hidráulico local. Foi comumente observado que as leituras de SP são mais ruidosas em áreas com vegetação densa, em relação a áreas com vegetação esparsa, devido à atividade bioelétrica (EVERETT, 2013).

Por causa da profundidade de exploração rasa do GPR, compensar a topografia é essencial. Para pequenas variações de superfície, os traços de dados de deslocamento no tempo podem compensar as variações topográficas (ANNAN, 2009).

## 7 METODOLOGIA

No presente trabalho os dados foram adquiridos por métodos indiretos, sendo realizada uma varredura geofísica na área de estudo onde buscou-se identificar padrões anômalos relacionados a materiais arqueológico, previamente a essa varredura foi feito um levantamento de campo para reconhecimento da área, averiguando as vias de acesso, geologia local e pontos estratégicos para aplicação da metodologia.

A elaboração de cada etapa do trabalho contou com pesquisas na literatura, reunindo informações de todos os aspectos abordados. Esta foi primordial, para contextualização e confecção do trabalho, sendo o uso das mesmas, a base para elaboração desse documento. No entanto, enfatiza-se referenciais que abordam as seguintes temáticas: *Herval e Seu Potencial Arqueológico*; *Geofísica na Prospecção Arqueológica*; *Levantamento Magnético*; *Levantamento por GPR*, respectivamente.

Sequencialmente foi feita a compilação de dados cartográficos para geração de mapas que auxiliaram na interpretação da área e serviram como referencial na designação dos locais que foram aplicados os métodos e técnicas expostos neste trabalho. Os produtos gerados durante esta etapa foram elaborados por intermédio do software *Qgis*.<sup>16</sup>

Após a revisão literária e confecção dos mapas de situação e localização, deu-se início às práticas de campo, tal como fora explanado no início deste. Nessa etapa foi feita a caracterização e descrição dos aspectos fisiográficos e paisagísticos. Sendo registrado todos aspectos geológicos da localidade, além da remoção de materiais que pudessem implicar em interferências durante a leitura dos métodos.

Todas etapas de campo contaram com o auxílio da equipe técnica do Instituto da Memória e Patrimônio, os membros possuíam experiência em segurança de campo, geolocalização, arqueologia e história.

Após a realização das etapas abordadas, foram então empregues os métodos geofísicos, para verificar os contrastes das propriedades físicas dos materiais presentes no subsolo, buscou-se valores anômalos relacionados com elementos índices do registro histórico. Das técnicas empregues em campo, a primeira foi o método magnético, servindo como complemento para as respostas obtidas pelo método eletromagnético, enfatiza-se que a magnetometria é um método

---

<sup>16</sup>Software para trabalhar com mapas e informações geográficas. É usado para criar e usar mapas, compilar dados geográficos, analisar informações mapeadas, compartilhar e descobrir informações geográficas, usar mapas e informações geográficas em vários aplicativos e gerenciar informações geográficas em um banco de dados.

passivo e não destrutivo, não emitindo energias magnéticas ao sítio. Posteriormente, foi aplicado o método Ground Penetrating Radar (GPR), o qual serviu para identificação das propriedades dos materiais imersos no subsolo.

Ambas aplicações foram feitas ao longo de linhas, em perfis estratégicos, demarcando pontos específicos. A distância entre cada linha foi estipulada de acordo com as características e limitações do terreno. No método magnético foram utilizados dois magnetômetros GEM Systems GSM-19 (Figura 41), um operando como estação móvel e o outro como estação base, para corrigir o efeito da variação diurna do campo geomagnético.

Figura 41 - Equipamento magnetômetro GEM Systems GSM-19



Fonte: Extraído site [www.gemsys.ca](http://www.gemsys.ca) em 08/11/2019

Para a aquisição dos dados foram realizados 6 perfis magnetométricos (Figura 42), baseados na viabilidade de acesso na área e em informações aderidas na literatura. Logo, foi idealizado a elaboração dos perfis com as seguintes extensões:

Perfil 1: 16,25 m;

Perfil 2: 20 m;

Perfil 3: 17,6 m;

Perfil 4: 45,5 m;

Perfil 5: 38,25 m;

Perfil 6: 32 m;

sendo aplicados pontos espaçados transversalmente a cada 0,75 m, para geração de um mapa de melhor detalhe, quanto de melhor resolução.

O perfil apontado foi realizado nas proximidades de onde em vistoria do IMP, foram identificados objetos de interesse arqueológico como canos, tijolos e alicerces de construção.

Ressalta-se que até a data do levantamento foi evidenciada apenas as características dos vestígios identificados em superfície, no entanto, não há informações sobre as dinâmicas de algum material encontrado no subsolo.

Figura 42 - Levantamento magnético



**Fonte:** O autor

Posteriormente a realização das etapas de campo, os dados brutos oriundos do levantamento magnético passaram por um processamento básico realizado no software Oasis Montaj da Geosoft voltado para mapeamento e processamento de dados geofísicos. Durante esse procedimento tentou excluir-se possíveis interferências que perturbam a leitura dos dados, para isso foram aplicadas as correções de variação diurna e a filtragem dos sinais que se deu por meio dos Filtros de Redução as Latitudes Arbitrárias, Redução ao Pólo, Filtro de Redução ao Equador e Filtros de Derivadas Verticais e Horizontais (ver tópico 6.2).

Feita essa filtragem gerou-se o mapa de valores do campo magnético total da área, a fim de evidenciar as anomalias magnéticas dos materiais inseridos em subsuperfície. Exalta-se que esse não fornece informações de profundidade e sim dados bidimensionais.

Durante o processamento no Oasis Montaj optou por gerar-se o mapa de amplitude do sinal analítico (ASA) que de acordo com Blum et al. (1999) expõe uma assinatura das fontes

magnéticas, realçando as altas frequências e eliminando as baixas, evidenciando as extremidades em corpos largos e o centro em feições estreitas, estando, única e exclusivamente, associado a amplitude de magnetização. Assim os corpos de contraste alto do campo magnético total foram salientados enquanto os de menor amplitude foram expostos mais linearmente.

Após um levantamento de detalhe e estipulação dos perfis magnetométricos, foi aplicada a técnica de GPR (Figura 43) que por sua vez, como mostrada na confecção desse, tem as melhores respostas para com a prospecção arqueológica. A antena de Ground Penetrating Radar (GPR) que foi utilizada possui frequência de 200 MHz da fabricante italiana *Ingegneria Dei Sistemi* IDS® (Figura 44). O arranjo utilizado foi o common offset (ver tópico 5.4.8.1).

O método foi aplicado sobreposto aos perfis de levantamento magnetométrico, implicando na objetividade de correlacionar os valores das seções radargramas, com as amplitudes magnéticas. No GPR foi acoplado um GPS <sup>17</sup>(Global Positioning System) de precisão para leitura das coordenadas.

---

<sup>17</sup> Sistema de navegação que permite encontrar localizações geográficas de um receptor em superfície terrestre.

Figura 43 - Ground Penetrating Radar (GPR) de frequência de 200 MHz da fabricante IDS®



Fonte: O Autor

Figura 44 - Levantamento com GPR

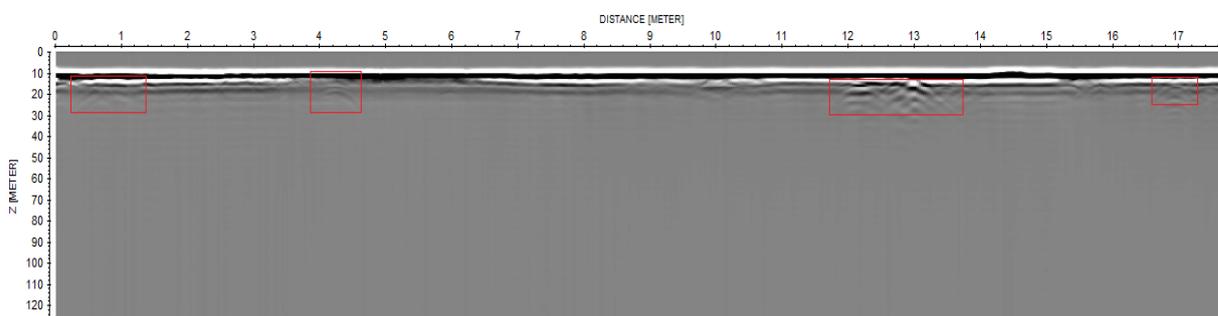


Fonte: O Autor

Assim verificou-se onde as anomalias são coincidentes. Os perfis foram feitos de forma estratégica e contínua, para melhor detalhamento e localização geográfica de refletores de interesse arqueológico, os valores das lacunas foram calculados por intermédio do algoritmo do *nearest-neighbor* (vizinho mais próximo). Os dados obtidos por meio do levantamento de GPR foram processados no software ReflexWin<sup>18</sup>.

O processamento e tratamentos dos dados obtidos pelo GPR se deu da seguinte forma, primeiramente os dados foram importados para o software Reflex Win, e dessa etapa gerou-se o radargrama dos dados brutos (Figura 45), verificou-se então a qualidade dos dados e identificou-se os refletores visíveis precedente ao processamento a fim de comparação com o produto final. Os refletores observados encontram-se indicados por retângulos vermelhos.

Figura 45 - Radargrama dos dados brutos



Fonte: O Autor

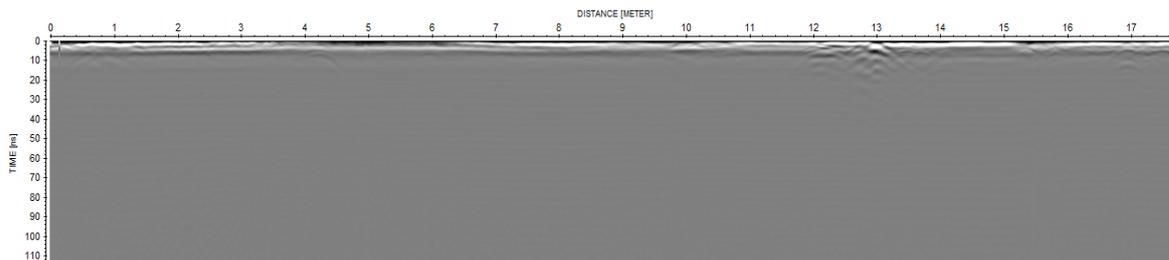
O processo prosseguiu utilizando de filtros 1D e 2D, sequencialmente descritos abaixo:

**Correção do tempo zero**, visto que o termo Tempo Zero representa o tempo de chegada da primeira onda da reflexão da interface ar/solo, assinalando a localização da superfície do terreno. O filtro buscou corrigir os traços/perfis ajustando para a posição da primeira onda. Observa-se que após a aplicação do filtro as camadas situadas até os 12 ns sumiram (Figura 46).

---

<sup>18</sup> Software projetado para controle de parâmetros georadar, recepção de dados com exibição simultânea do computador e registro de arquivos no disco rígido, bem como para processamento e impressão de arquivos.

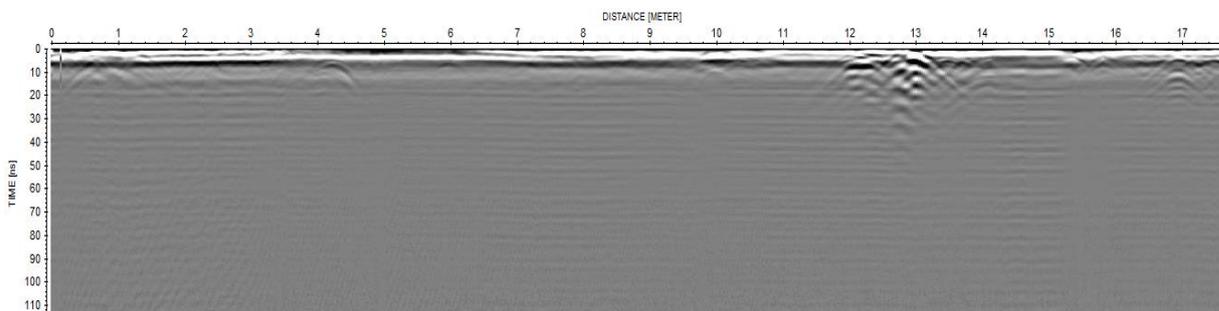
Figura 46 - Radargrama após aplicação da correção do tempo-zero



Fonte: O Autor

**Filtro dewow** a fim de eliminar ruídos elétricos e estáticos, removendo valores de baixa frequência indesejados, caso esse não fosse aplicado, poderia vir a omitir dados de baixas amplitude registrados no sistema. Percebeu-se que após esta aplicação alguns refletores, antes omitidos, foram expostos.

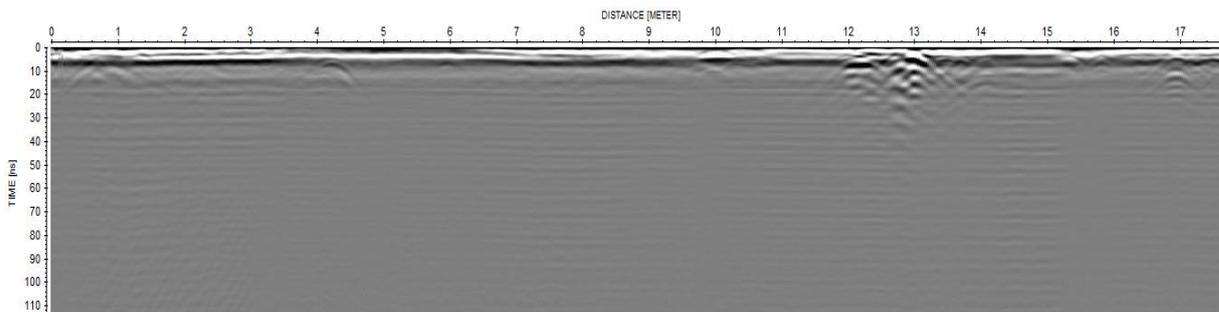
Figura 47 - Seção radargrama após aplicação do filtro dewow



Fonte: O Autor

**Filtro passa-banda**, para verificar onde situavam-se os sinais de maior amplitude, assim eliminando as frequências mais baixas e as frequências mais altas em relação a frequência de corte, utilizou-se como frequência de corte 80 Mhz e 400Mhz. Nota-se que ruídos da parte inferior do radargrama foram eliminados.

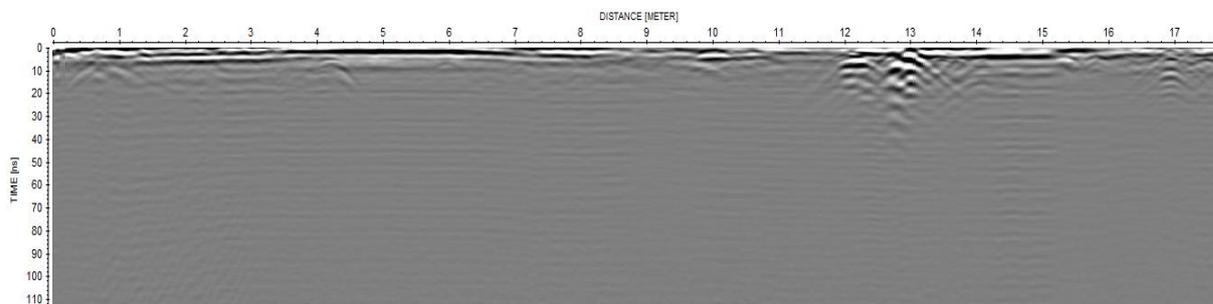
Figura 48 - Seção readargrama após aplicação do filtro passa-banda



Fonte: O Autor

**Ganho manual** a opção permite estabelecer uma janela de ganho digitalizada no eixo do tempo e aplicar esta curva de ganho nos dados. Os valores escolhidos de entrada foram 20 db até o tempo 35 ns. Após aplicação desse filtro é possível observar um realce nos refletores (Figura 49).

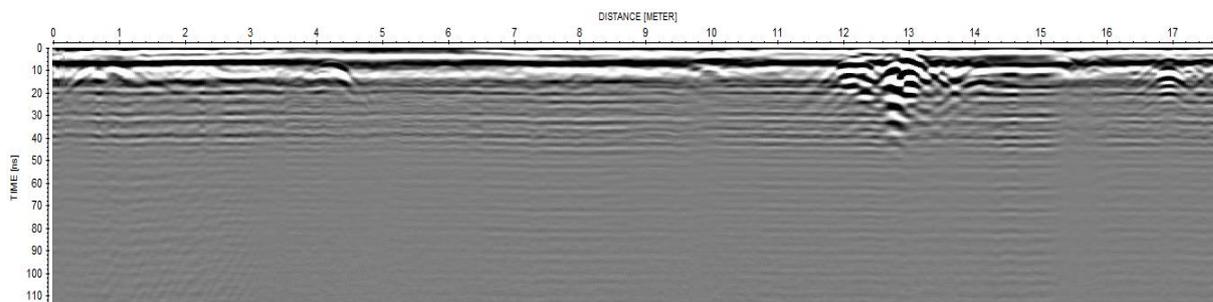
Figura 49- Seção radargrama após aplicação do ganho manual



Fonte: O Autor

**Ganho linear e exponencial** o filtro atua em cada traço de maneira independente, multiplicando os pontos de dados por uma determinada função linear e exponencial, a fim de compensar possíveis perdas por amortecimento ou espalhamento geométrico (SANDAIMER, 2011). Os valores inseridos auxiliaram melhor na visualização, atribuiu-se o valor de 1 para a função e de 0,5 para função exponencial. Realçando melhor os refletores do início e final do perfil como pode-se observar na figura 50.

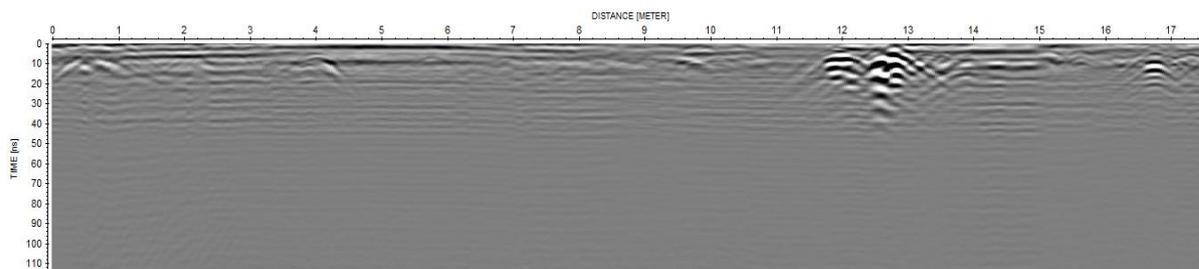
Figura 50 - Seção radargrama após aplicação dos ganhos linear e exponencial.



Fonte: O autor

**Remoção do background**, afim de remover ruídos expostos lateralmente exaltando as anomalias verticais como pode-se observar na figura 51, onde as hipérboles estão mais destacadas.

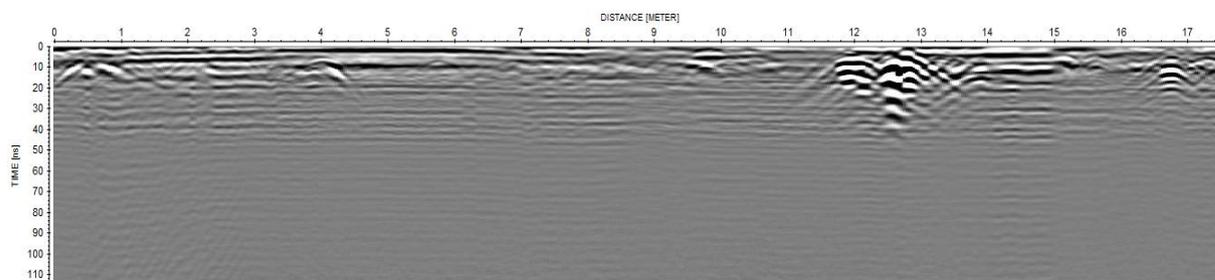
Figura 51- Seção radargrama após remoção do background.



Fonte: O Autor

**Deconvolução** este é um filtro 1D que possibilita a redução de pulso do radar afim de eliminar ruídos associado a interferência de objetos com a onda eletromagnética. Para realizar esse processo o programa realiza o cálculo da autocorrelação de amostras por meio do Método Wiener-Filter (SANDAIMER, 2011). Essa foi aplicada para recuperar o pulso original do GPR em seções que foi registrada a interferência de meios condutivos, a filtragem resultou em dados de melhor resolução como pode observar-se na figura 52.

Figura 52 - Seção radargrama após aplicação do filtro de deconvolução

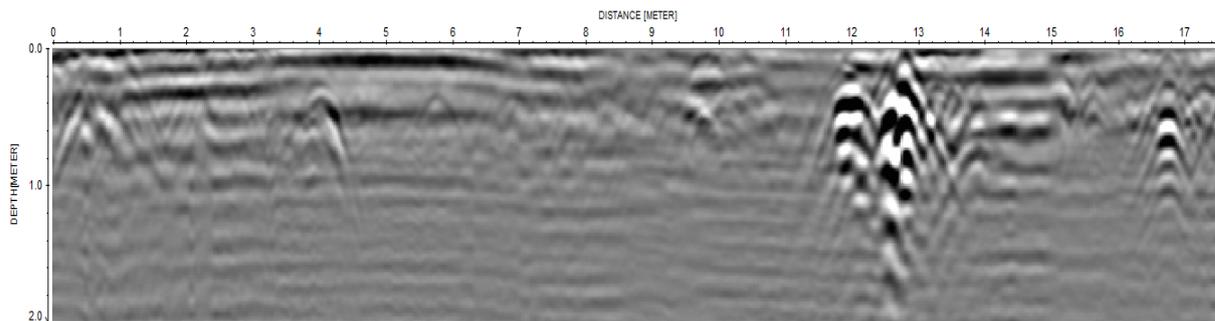


Fonte: O Autor

**Conversão de Tempo em profundidade** nessa etapa utilizou-se da opção de adaptação de velocidade, a qual permite a adaptação interativa entre hipérboles de reflexão ou difração, o software, *Reflex Win*, então calcula as velocidades dessas, assim é gerado um modelo das velocidades obtidas que pode ser armazenado como um arquivo e posteriormente importado. As velocidades são combinadas em um modelo 2D usando interpolação especial, com isso, a distribuição de velocidade 2D pode ser utilizada para a conversão de tempo em profundidade (SANDAIMER, pág. 460, 2016). Obteve-se o valor de 0,107 m/ns.

A conversão das seções em escala de tempo para escala de profundidade, teve como objetivo auxiliar em uma interpretação mais efetiva dos refletores, identificando os de interesse, em uma profundidade inferior a 2 m, como é observado figura 53, os refletores estão mais evidentes o que facilita a interpretação e estimativa da localização do alvo em profundidade.

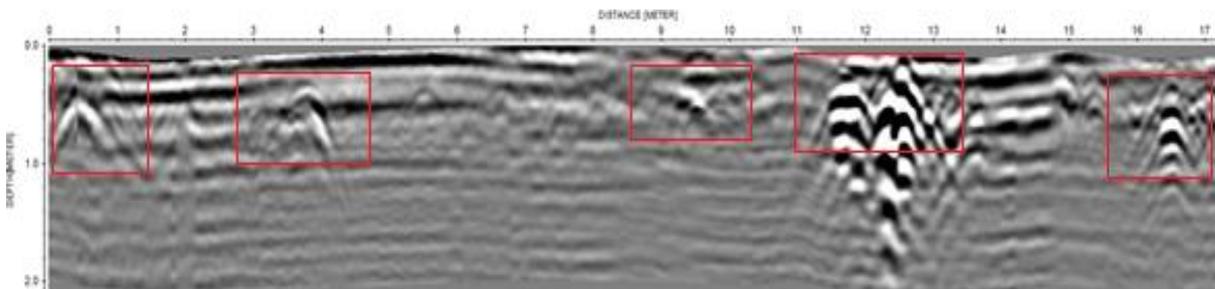
Figura 53 - Seção Radargrama após migração do tempo para profundidade



Fonte: O Autor

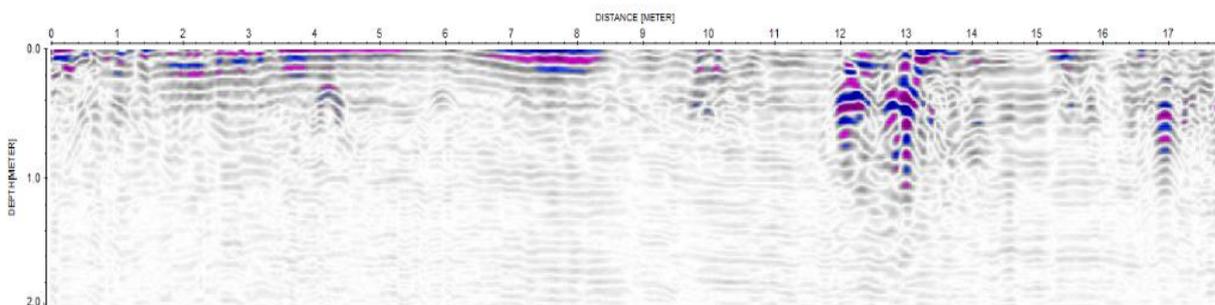
Após todo procedimento fez-se a correção topográfica (detalhada no tópico 6.1.1), por meio dos valores obtidos pelo GPS durante o levantamento de campo, no perfil em questão não se observou significativas mudanças nos padrões dos refletores (Figura 54). Por fim gerou-se a seção final (Figura 54 e 55) servindo para identificar os refletores que possam estar associados a materiais de interesse arqueológico. Observa-se que os refletores observados nos dados brutos aparecem novamente no radargrama processado, porém mais evidentes.

Figura 54 - Seção radargrama final após correção topográfica com retângulos vermelhos indicando as zonas anômalas utilizando a paleta de cor *gray 1*.



Fonte: O Autor

Figura 55- Seção radargrama final utilizando a paleta de cores bluegrayred.



Fonte: O Autor

Ressalta-se que para as demais seções radargramas, expostas no decorrer desse trabalho, fora aplicado o mesmo procedimento detalhado acima. Os equipamentos utilizados são, em sua totalidade, de propriedade da Universidade Federal do Pampa e encontram-se sob jurisdição do laboratório de geofísica da instituição.

Após a interpretação dos dados processados, os resultados foram expostos na forma mapas e seções, as informações obtidas nesses produtos encontram-se descritas junto a cada técnica. Por fim foi realizada análise da contribuição científica, avaliação final dos dados e definição dos alvos mais promissores.

## 8 RESULTADOS

Os levantamentos geofísicos ocorreram sob a orientação do Prof. Dr. Ezequiel Galvão de Souza. Auxiliaram durante as atividades de campo os membros da equipe técnica do Instituto de Memória e Patrimônio: A técnica de arqueologia Rafaela Nunes Ramos, o técnico em geoprocessamento e auxiliar de campo Cláudio Puccineli Pickersgill Filho e o auxiliar de campo Wiliam Coelho, esses tinham conhecimento avançado sobre a área.

Não há muitas especificações sobre como era a arquitetura original da sede da fazenda, logo o auxílio da equipe técnica do IMP foi crucial para estabelecer os locais mais propícios para os levantamentos, os mesmos especificaram os objetos e os locais onde estes foram identificados, além de auxiliarem na preparação da área.

Com as informações cedidas pelos profissionais, interpretou-se individualmente cada anomalia identificada. Baseando-se, unicamente, no contexto arqueológico local e os padrões anômalos foi possível elaborar suposições sobre os materiais e/ou eventos correlatos a essas respostas.

### 8.1 Magnetometria

O método magnético pode trazer ambiguidades na interpretação, logo é preciso ser minucioso durante sua análise. Para indicar as principais anomalias utilizou-se o mapa analítico (Figura 57) visto que essas ficam melhor delineadas em comparação do mapa do campo magnético total (Figura 56). No mapa analítico o autor utilizou letras para evidenciar as principais anomalias:

Anomalias **(A)**, **(B)** e **(C)** presentes ao longo do perfil 1 observa-se um comportamento linear dessas anomalias apresentando picos de baixo contraste com uma amplitude magnética que varia entre 2 e 4 nT. Anomalia **(D)** está no final do perfil 1 apresenta médio/alto contraste positivo, com amplitude magnética entre 5 e 9 nT

Anomalias **(E)** e **(F)** estão no decorrer do perfil 2 apresentam alto contraste positivo, com amplitudes magnéticas entre 6 e 10 nT.

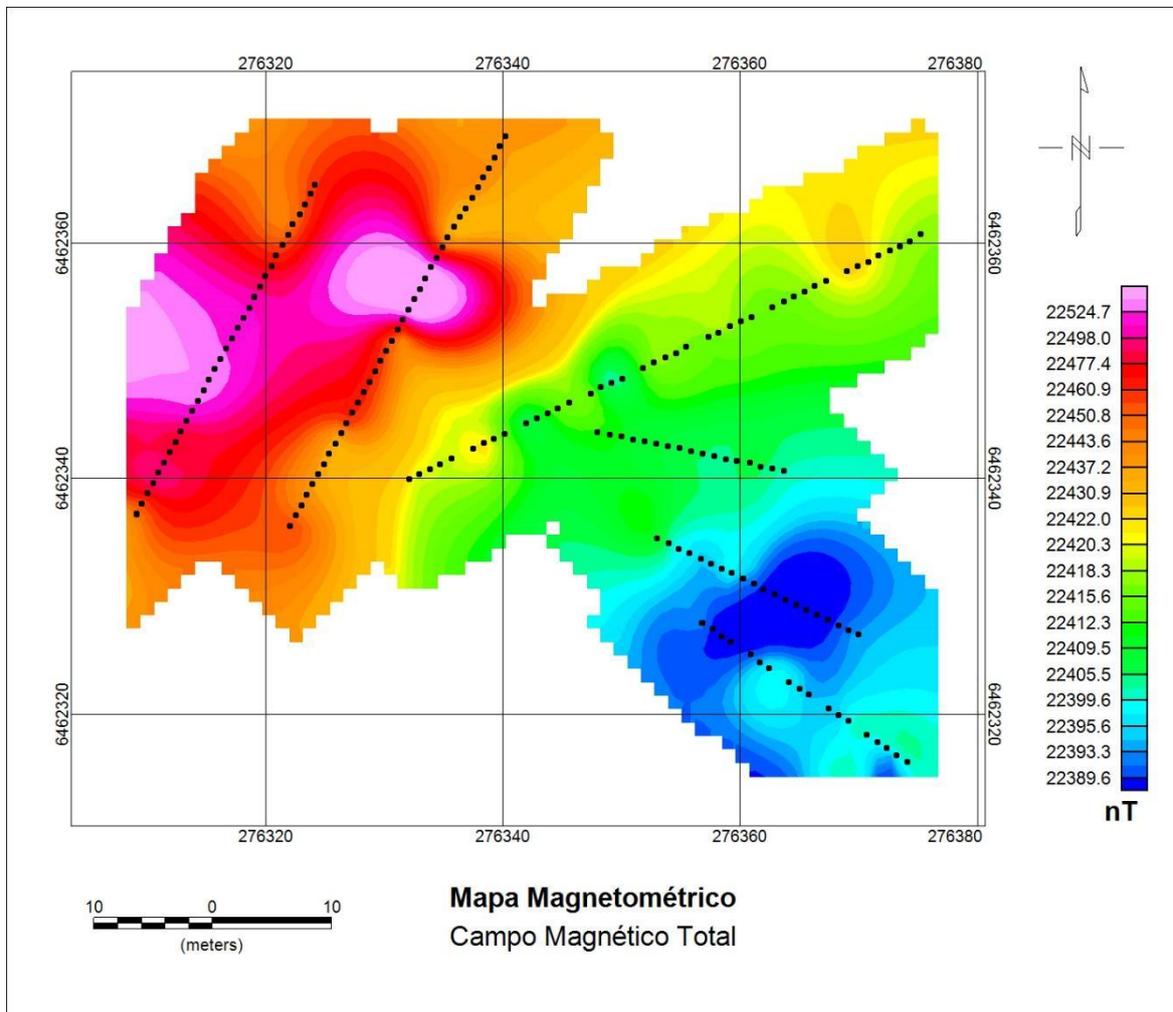
Anomalia **(G)** ao longo do perfil 3 apresentado picos de baixo contraste com uma amplitude magnética que varia entre 2 e 4 nT

Anomalias **(H)** e **(I)** estão no decorrer perfil 4 apresentam alto contraste positivo, com amplitudes magnética entre 8 e 14 nT. Anomalias **(J)** e **(K)** ao longo do quarto perfil apresentam picos de baixo contraste com uma amplitude magnética que varia entre 2 e 4 nT Anomalias **(L)**, **(M)** e **(N)** estão no decorrer do perfil 5 apresentam alto contraste positivo, com amplitude

magnética entre 9 e 14 nT. Anomalia **(O)** está entre o perfil 5 e o perfil 6 apresenta contraste positivo, com amplitude magnética entre 4 e 7 nT.

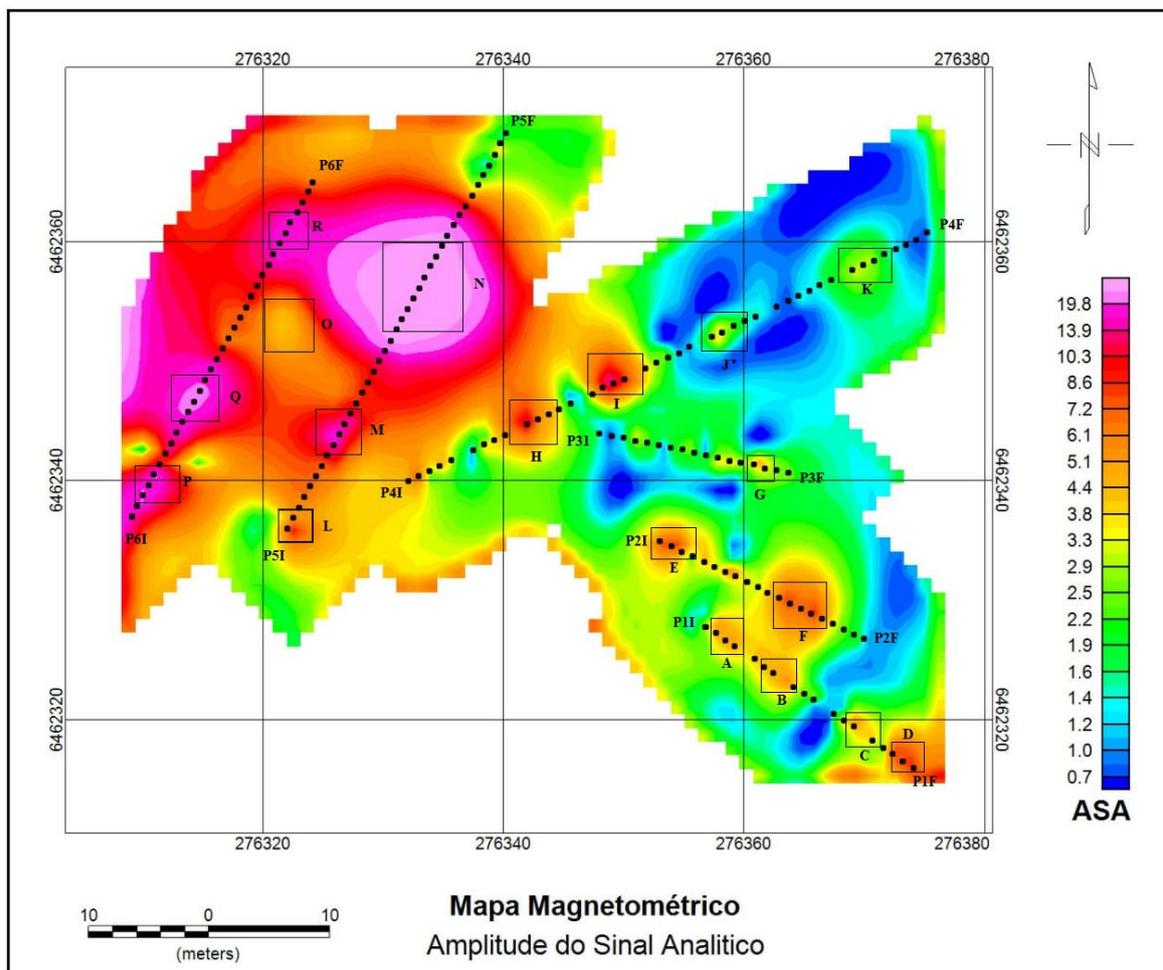
Anomalias **(P)**, **(Q)** e **(R)**, estão no decorrer do perfil 5 apresentam alto contraste positivo, com amplitude magnética entre 11,8 e 19 nT.

Figura 56 - Mapa magnetométrico do campo magnético total.



Fonte: O autor

Figura 57 - Mapa magnetométrico de amplitude do sinal analítico



Fonte: O autor

### 8.1.1 Interpretação

Durante a interpretação dos dados magnéticos é nítida a importância de uma varredura prévia do local, por mais que objetos metálicos situados em superfície tenham sido retirados, há a hipótese de regiões anômalas, indicadas no mapa de sinal analítico (figura 57), serem originadas por materiais imersos no subsolo como latas e materiais metálicos modernos.

Considerando que anomalias magnéticas de interesse arqueológicos geralmente não apresentam respostas com valores muito elevados, imagina-se que a anomalia (N) esteja relacionada a algum objeto metálico soterrado ou não identificado durante o levantamento perante a densa vegetação do local.

Nos perfis 2, 4, 5 e 6 foram identificadas respostas de alta amplitude que podem estar relacionadas com estruturas remanescentes da fazenda, tendo em vista que durante o período histórico alguns alicerces foram compostos por materiais rochosos. De acordo com a literatura, habitantes que povoaram a região de Herval, em cenários caóticos como a revolução farroupilha

possuíam *armas brancas* e *armas de fogo* como mecanismo de defesa, logo, é plausível a hipótese das altas anomalias estarem relacionadas a esses materiais os quais podem ter ficados submersos com decorrer dos anos ou, ainda, a combustão do solo devido a fogueiras utilizadas para iluminação, aquecimento e a queima de plantações.

Partindo do conceito que as anomalias magnéticas que possuem entre médias e altas amplitudes podem estar relacionadas a fragmentos rochosos, os perfis 1, 2 e 3 expõem pontos que podem ser de interesse arqueológico, a possibilidade da presença desses materiais também leva em consideração que nas extremidades do sítio há um muro de pedra composto por rochas básicas, esse material, em subsuperfície, pode gerar anomalias com esse contraste, historicamente outras estruturas podem ter sido construídas com esse mesmo material.

Considerando as anomalias **(H)**, **(I)**, **(L)**, **(M)**, **(N)**, **(P)**, **(Q)** e **(C)** essas apresentam uma alta amplitude magnética, consideradas como de interesse arqueológico. Visto que suas respostas podem estar relacionadas à alicerces feitos com material rochoso, fragmentos de rocha, lixos metálicos e ações que ocasionaram a queima de argila.

As anomalias **(A)**, **(B)**, **(C)**, **(D)**, **(E)**, **(F)**, **(G)** e **(O)** apresentam uma amplitude magnética média, podendo estar associadas a trilhas, fogueiras, fragmentos rochosos e materiais contrutivos.

## **8.2 GPR**

Nesse subtópico serão apresentados e discutidos os resultados obtidos durante o levantamento eletromagnético praticado no Sítio Histórico São José II. As medições foram realizadas em sobreposição às linhas de execução do levantamento magnético, visto que entre os objetivos principais do trabalho um é expor a importância da correlação entre os dois métodos na prospecção arqueológica.

Os radargramas, expostos ao longo deste documento são reflexos bidimensionais de subsuperfície e ao longo do texto ficará explícito que o autor buscou padrões de reflexões hiperbólicos, tipo vale, contínuos e descontínuos que possam ser associados a materiais de interesse arqueológico.

Será observado que alguns perfis de GPR sofreram atenuações devido a raízes de árvores, materiais condutivos e/ou desatenção do operador. Os principais refletores de cada seção estão indicados por setas vermelhas ordenadas numericamente e as regiões anômalas estão envoltas por figuras geométricas para melhor compreensão do leitor.

Ressalta-se que todos alvos indicados nos radargramas e sequencialmente descritos tratam-se, única e exclusivamente, de suposições do autor, visto que as anomalias apontadas

podem estar associadas a quaisquer elementos ou fenômenos que não se inserem no contexto arqueológico.

***Perfil 1:***

Possuí 16, 25m de extensão e foram identificadas as seguintes anomalias:

**Anomalia 1** (Figura 58), encontra-se a uma profundidade entre 0,20 e 0,30 m, a uma distância de aproximadamente 1,5 metros do início do perfil, trata-se de uma reflexão do tipo hiperbole, no entanto suave, o que pode ser relacionado a frequência da antena.

**Anomalias 2** (Figura 58): Localiza-se a cerca de 0,40 m da superfície e a 4 m do início do perfil, trata-se de um refletor bem marcado, exposto horizontalmente, esse tipo de anomalia é característica da presença de algo construído, também, de materiais de composição distinta ao solo em estudo, como barro cozido ou matéria orgânica, um exemplo semelhante pode ser encontrado em Conyers (2016, pag. 38).

**Anomalia 3** (figura 58): Encontra-se a uma profundidade entre 0,10 e 0,40 m, a uma distância aproximada de 8,40 m do início do perfil, trata-se de uma reflexão hiperbólica, situada relativamente próxima à superfície.

**Anomalia 4:** Destacada na figura 59, a uma profundidade entre 0,20 e 0,40 m, a uma distância entre 12 e 14 m de onde começou o perfil, observa-se uma anomalia do tipo vale bem marcada. Ressalta-se que essa anomalia está posicionada bem próxima a área, onde é, possivelmente, a lixeira local.

***Perfil 2:***

Possuí 20m de extensão e foram identificadas as seguintes anomalias:

**Anomalia 1** (Figura 60): Encontra-se a uma profundidade entre 0,20 metros e 0,30 e a uma distância de aproximadamente 2 metros do início do perfil. Trata-se de uma reflexão bem demarcada, descontinua seguida por sutis ondulações.

**Anomalias 2** (figura 60): Encontram-se a uma profundidade de entre 0,10 e 0,30 metros, a uma distância aproximada de 6 e 9,20 do início do perfil, no retângulo indicado as hiperboles são seguidas por uma descontinuidade. Essas reflexões encontram-se próximas ao local onde foram encontrados tijolos dispersos em superfície.

**Anomalia 3** (figura 61): Encontra-se a uma profundidade entre 0,10 e 0,40 m e a uma distância entre de 18 e 20 m do início do perfil Trata-se de uma anomalia hiperbólica bem nítida.

### ***Perfil 3:***

Possui 17,65m de extensão e foram identificadas as seguintes anomalias:

**Anomalias 1, 2** (figura 62) e **5** (figura 63): Encontram-se a uma profundidade entre 0,40 e 0,55m, 0,40 e 0,50m e 0,50 e 0,65m respectivamente; a **anomalia 1** situa-se a uma distância entre 1 e 2 m; a **anomalia 2** entre 3,5 e 4,2m; e a **anomalia 5** entre 16 e 17 m do início do perfil. Tratam-se de refletores hiperbólicos, bem evidentes.

**Anomalia 3:** Destacada na figura 62, encontra-se a uma profundidade entre 0,20 e 0,40 metros e a uma distância entre 9 e 10,5 metros do início do perfil. Observa-se um refletor descontínuo.

**Anomalia 4** (figura 63): Encontra-se a uma profundidade entre 0,15 e 0,35 metros, a uma distância entre 11,75 e 12,5 m do início do perfil. Trata-se de uma anomalia hiperbólica bem demarcada no radargrama.

### ***Perfil 4:***

Possui 45,5m de extensão e foram identificadas as seguintes anomalias:

**Anomalia 1** (figura 64): Encontra-se a uma profundidade entre 0,25 e 0,80m a uma distância que se estende de 2 a 3m do início do perfil. É possível observar um padrão de descontinuidade no radargrama.

**Anomalias 4, 7, 8** (figura 64), **10 e 11** (figura 65): Apresentam um padrão semelhante, são refletores hiperbólicos com uma geometria em vale em sua maior porção seguido por leve ondulações e descontinuidades, é melhor evidenciado na anomalia 4, a profundidade desses refletores estão entre 0,05 e 1 m, e as suas respectivas localizações distribuem-se da seguinte maneira **refletor 1:** encontra-se a uma distância entre 5,8 e 8,5 m; **refletor 2:** encontra-se a uma distância entre 8,8 e 11m; **refletor 3:** encontra-se a uma distância entre 15,4 e 16,8m; **refletor 4:** encontra-se a uma distância entre 21,10 e 23,60m; **refletor 5:** encontra-se a uma distância entre 24,75 e 27 m do início do perfil.

**Anomalias 2, 3** (figura 64), **12** (figura 65) e **13** (figura 66): Apresentam padrões hiperbólicos mais suaves, encontram-se a uma profundidade de entre 0,1 e 0,80m, com as respectivas localizações **refletor 1:** encontra-se a uma distância de 3m e **refletor 2:** encontra-

se a uma distância entre 5,15m **refletor 3**: encontra-se a uma distância de 32m e **refletor 4**: encontra-se a uma distância entre 41,75 e 42,15m do início do perfil.

### ***Perfil 5:***

Possui 38,25m de extensão e foram identificadas as seguintes anomalias:

Esse perfil apresenta uma grande atenuação, essa, pode estar relacionada a aspectos topográficos, a raízes de árvores bem próximas ao perfil e/ou desatenção do condutor. Ressalta-se, ainda, que essa foi a linha de mais difícil percurso com aparelho.

**Anomalias 1 e 2** (figura 66): Apresentam um padrão sequencial hiperbólico, a uma profundidade entre 0,20 e 0,40 metros, que se estendem ao longo de todo perfil.

Levando em conta as respostas no radargrama gerado, mesmo com a constante atenuação, não se pode desconsiderar essa sequência de refletores hiperbólicos, ainda, a aproximadamente 0,20m de profundidade entre 22 e 23 m do início do perfil, identifica-se uma suave descontinuidade.

### ***Perfil 6:***

Possui 32m de extensão e foram identificadas as seguintes anomalias:

**Anomalia 1**: Encontra-se a uma profundidade entre 0,10 e 0,40m a uma distância que se estende de 6 a 12m do início do perfil. É possível observar um padrão de continuidade no radargrama.

**Anomalias 2 e 3**: Apresentam um padrão de reflexão semelhantes, a profundidade desses refletores encontram-se entre 0,10 e 0,8 m, e as suas respectivas localizações distribuem-se da seguinte maneira **refletor 2**: encontra-se a uma distância entre 18 e 19 m; **refletor 3**: encontra-se a uma distância entre 21 e 22,5 m do início do perfil.

**Anomalia 4**: Encontra-se a uma distância entre 27 e 28,60 do início do perfil a uma profundidade entre 0,20 e 0,30m. Trata-se de um refletor hiperbólico.

**A anomalia 5**: Situa-se ao final do perfil alongando-se entre os 28 e 33m, a uma profundidade entre 0,10 a 0,30 m, é visível uma “*linha*” contínua bem demarcada, que assim como a anomalia 1.

### 8.2.1 Interpretação

Dentre os métodos geofísicos, o GPR talvez seja o método mais utilizado na prospecção arqueológica, se compreendido o contexto em que as reflexões estão inseridas, é possível identificar contrastes pontuais dos alvos em estudo. Os refletores serão visíveis com um processamento correto, no entanto deve haver muita atenção durante sua interpretação, é fundamental ao operador conhecer as propriedades do solo e dos materiais em estudo, o contexto geológico local entre outros fatores, para mitigar ao máximo interpretações incoerentes.

Ressalta-se que esse estudo não pode contar com análises estratigráficas, logo não se tem precisas informações sobre o meio em que os materiais estão inseridos, o que dificulta muito a interpretação.

Baseando-se nos estudos de Schmidt et al. (2015) o GPR tem bons resultados na investigação de estruturas arquitetônicas, na identificação de objetos ocultos, cavidades em paredes, remanescentes de construção, fundações e muros.

Ainda, devido às suas propriedades condutivas, materiais modernos como tubos metálicos, drenos e condutos revestidos podem ser facilmente identificados pelo georadar (SCHIMIDT et al., 2015) (ANEXO C). No entanto, essas feições são mais evidentes em antenas de frequências superiores a 400 Mhz.

Na interpretação dos dados foi possível identificar suaves refletores hiperbólicos nas seções 1 (anomalia 1), 3 (anomalias 1 e 3), seção 4 (anomalia 2) e seção 6 (anomalia 1) no contexto arqueológico, anomalias com essas feições podem encontrar-se relacionadas a materiais ceramistas, pequenos objetos soterrados e de fragmentos de rocha, no entanto por serem muito sutis podem ser confundidas com outras anomalias. Os refletores hiperbólicos bem demarcados podem tratar-se de materiais de interesse arqueológico, principalmente os mais próximos à superfície como os refletores seção 1 (anomalia 3), seção 2 (anomalia 3), seção 3 (anomalias 2, 4 e 5), seção 4 (anomalias 3, 4, 5, 8, 10, 11 e 12) e seção 6 (anomalia 7), nas seções 1 e 2 observam-se hipérboles abertas, esses refletores podem estar associados a vasilhas, manilhas de cerâmica, telhas, tijolos e outros materiais de construção que podem estar relacionados aos objetos já observados em superfície. Na seção 3 há fortes reflexões hiperbólicas que podem relacionar-se a alicerces, materiais de construção e utensílios da casa. Na seção 4 há um forte padrão hiperbólico ao longo de todo radargrama com os refletores alongados e mais fechados são na sua maior parte sequenciados por ondulações, continuidades ou descontinuidades, a sua forma pode estar associada a alicerces da sede, tubulações,

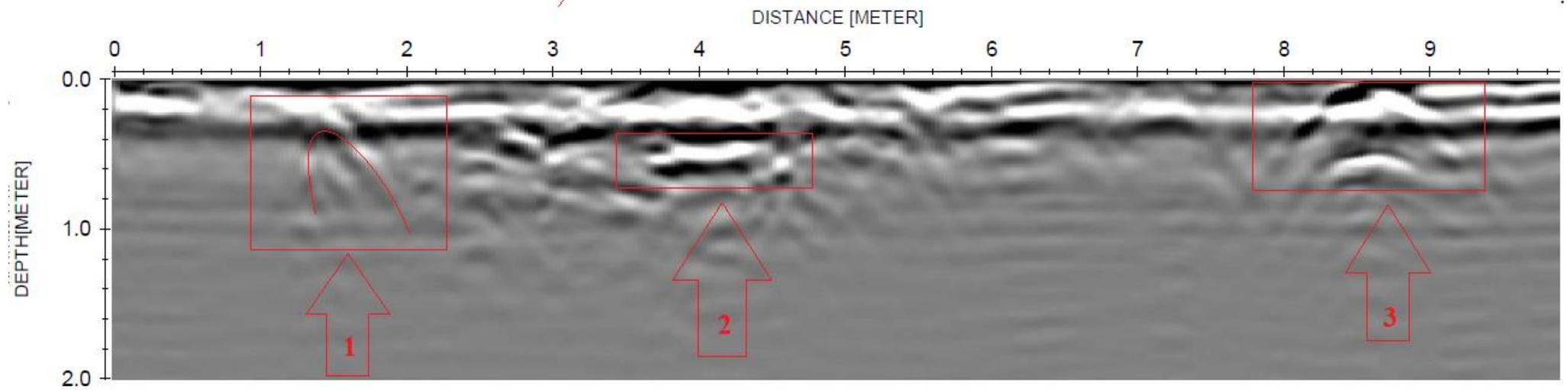
edificações e materiais composto por rochas. Na seção 6 a hipérbole é associada a algum material composto por rocha, muros ou manilhas de barro.

Há a presença de continuidades e descontinuidades interessantes para o contexto arqueológico destacadas ao longo das seções. Observa-se na primeira seção uma anomalia que pode estar relacionada a materiais presentes na sede que foram submersos com o passar dos anos e estabilizaram-se próximos à superfície, também na seção 1 observa-se um refletor posicionado horizontalmente essa feição pode estar relacionada a material orgânico, barro cozido ou a algo ali construído. As feições de continuidade e descontinuidade indicadas na seção 2 já são mais demarcadas, devido a sua profundidade e extensão, podem estar associadas a alicerces que foram soterrados ou partes de muro. No início do perfil 4 observa-se uma forte descontinuidade em vale que pode tratar-se de uma cavidade preenchida, também no perfil 4 encontram-se linhas que podem estar associadas a mudança de solo ou a tubulações visto que diversas manilhas foram identificadas em superfície algumas dessas continuidades seguidas por anomalias em vale e ondulações, há fortes descontinuidades no perfil indicado como anomalias 5, 6, e 10 que podem tratar-se de algum alicerce composto por material rochoso. No perfil 6 há uma descontinuidade que chama atenção, ela se posiciona próximo à superfície e sua forma leva a pensar que se trata do soterramento de algum material proveniente da fazenda. As continuidades plano paralelas geralmente se associam a objetos construídos.

Utilizou-se como base para interpretação, apenas o contexto arqueológico, dito isso e baseando-se em algumas bibliografias, interpreta-se que as continuidades e linhas plano-paralelas podem estar associadas a construções; as hipérboles associadas a materiais bidimensionais; as descontinuidades relacionadas a elementos soterrados e; as anomalias em vale a cavidades preenchidas. No entanto, essa é uma interpretação totalmente hipotética.

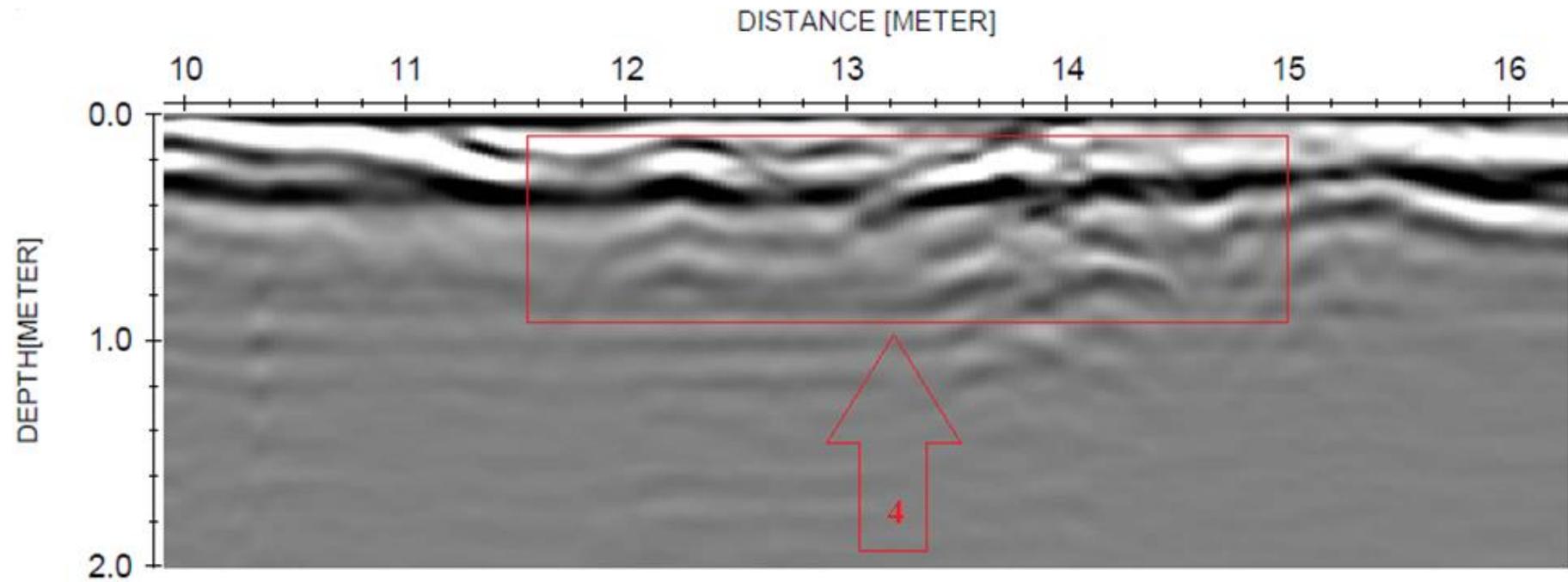
Tendo em vista o contexto arqueológico da região junto aos materiais identificados em superfície, as anomalias indicadas nesses perfis podem estar associadas não só aos remanescentes arquitetônicos da casa, mas também a utensílios culturais presentes na sede. Ressalta-se que um dos aspectos auxiliaram na suposição de edificações composta por rochas foi a presença do muro de pedra na extremidade do sítio, como não há registros sobre o cotidiano das pessoas que os construíram trata-se apenas de uma especulação.

**Figura 58 - Perfil 1a**



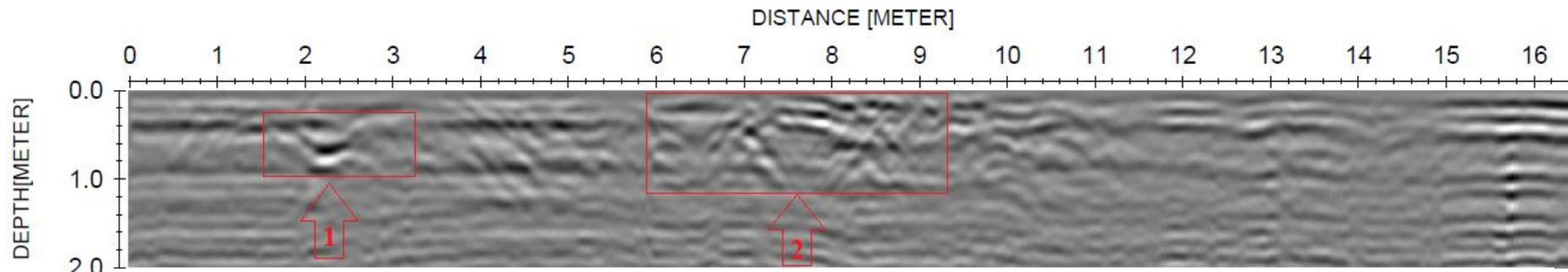
Fonte: O autor

**Figura 59 - Perfil 1b**



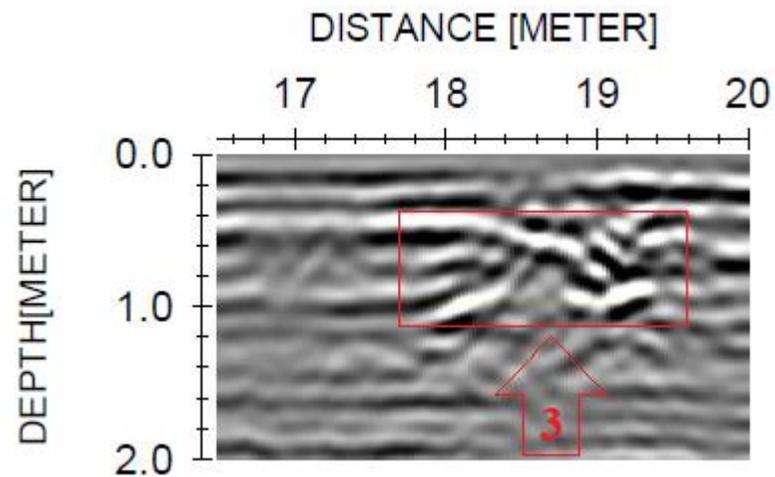
Fonte: O autor

**Figura 60 - Perfil 2a**



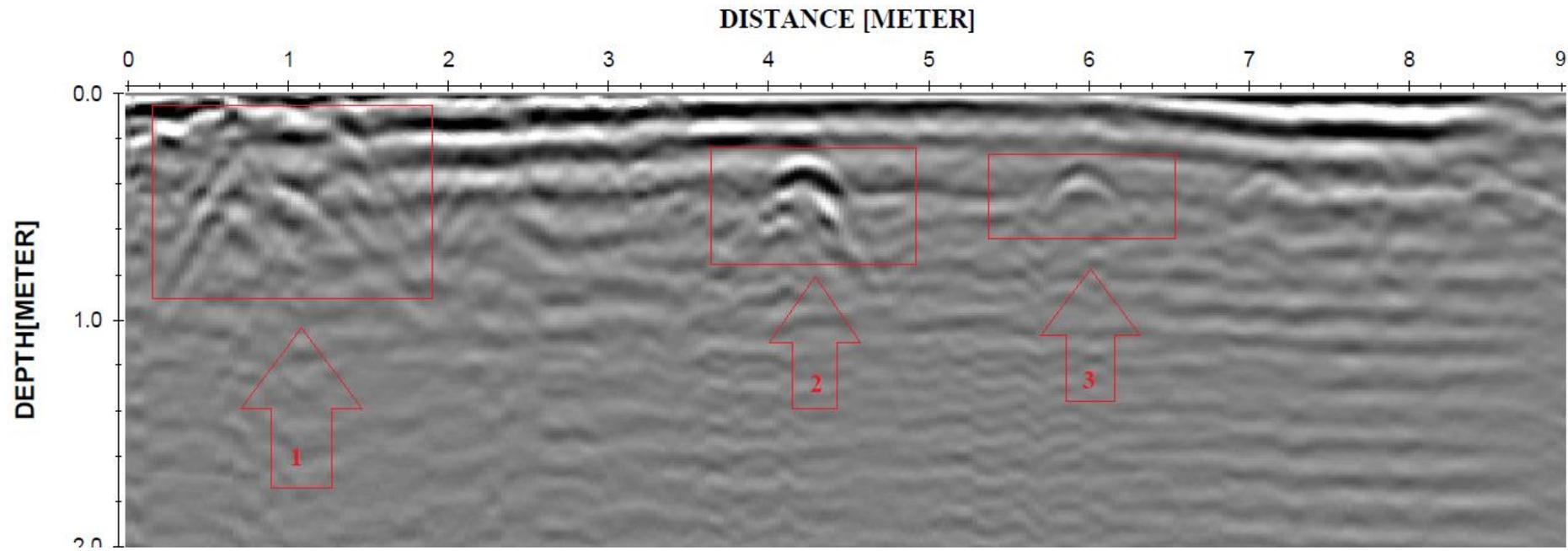
Fonte: O autor

**Figura 61 - Perfil 2b**



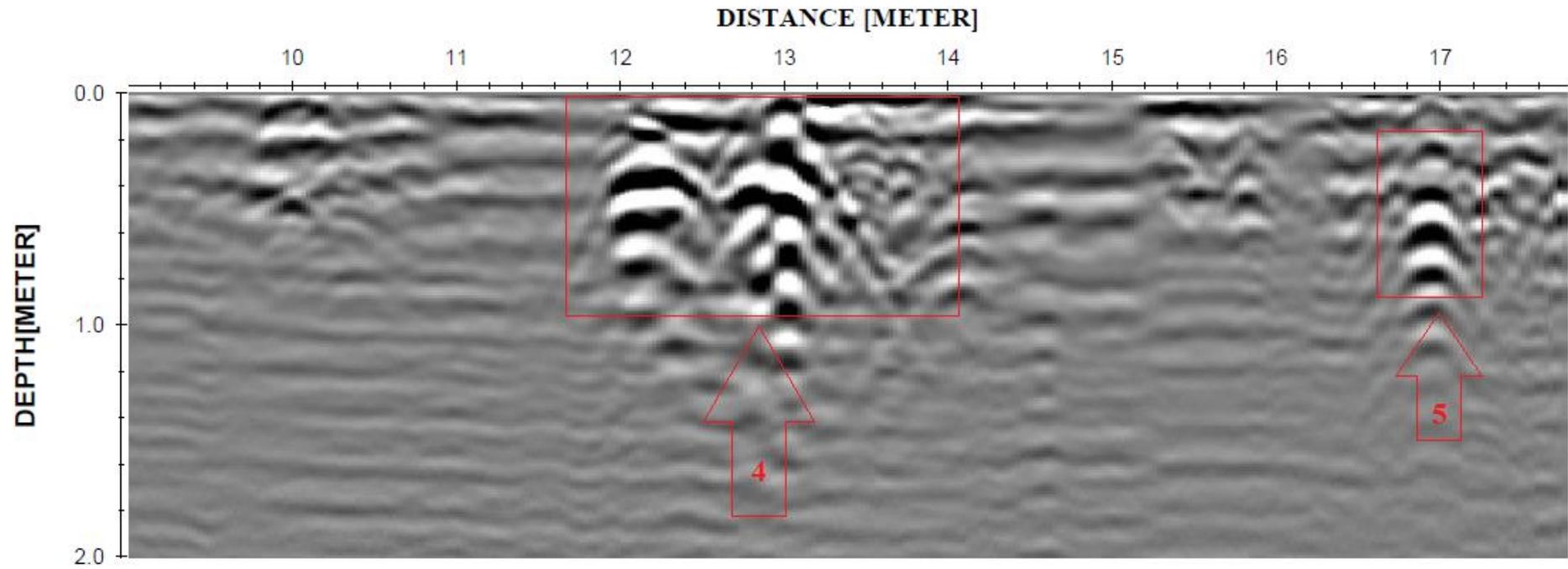
Fonte: O autor

**Figura 62 - Perfil 3a**



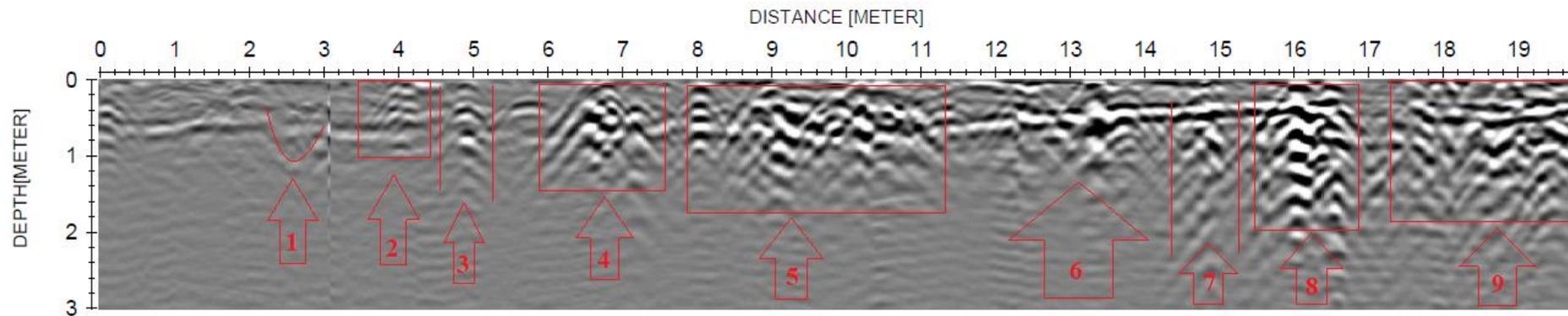
**Fonte:** O autor

**Figura 63 - Perfil 3b**



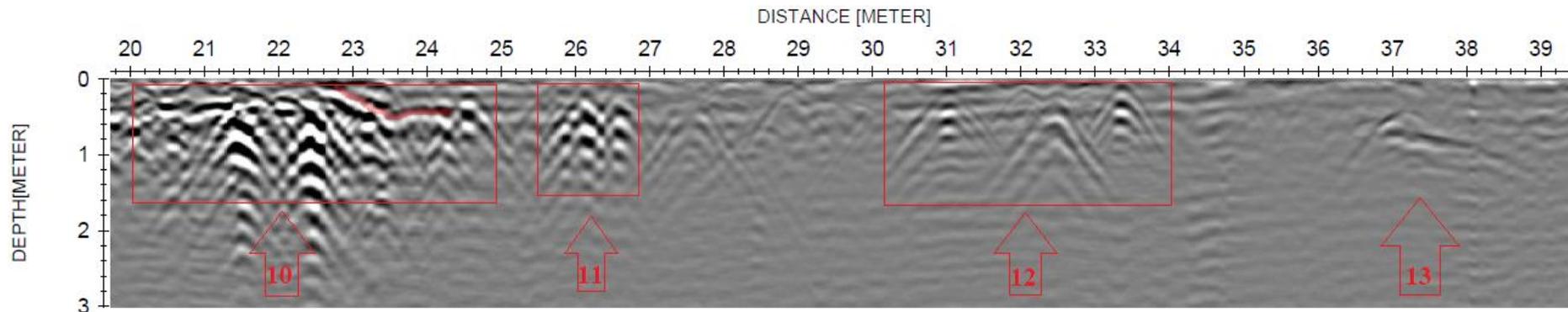
**Fonte:** O autor

**Figura 64 - Perfil 4a**



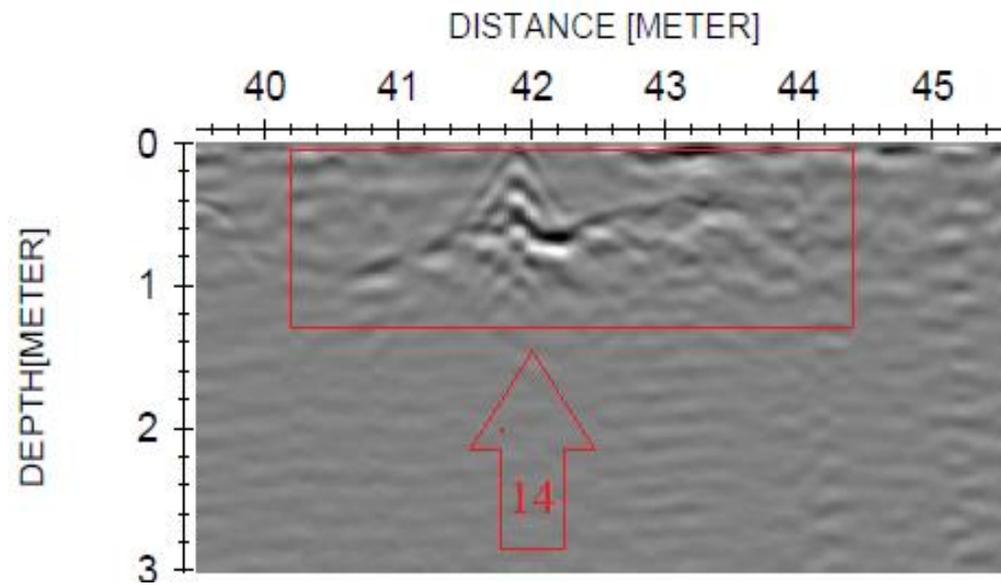
Fonte: O autor

**Figura 65 - Perfil 4b**



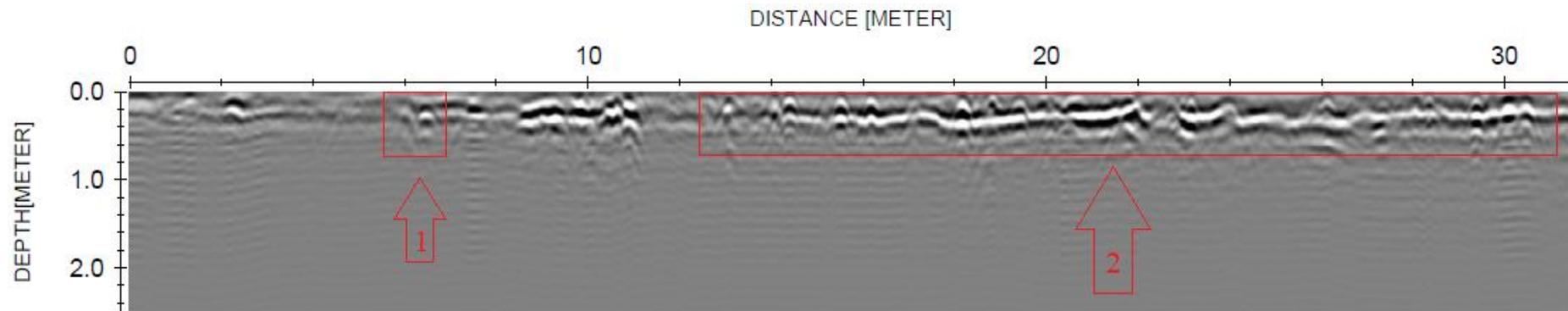
Fonte: O autor

**Figura 66 - Perfil 4c**



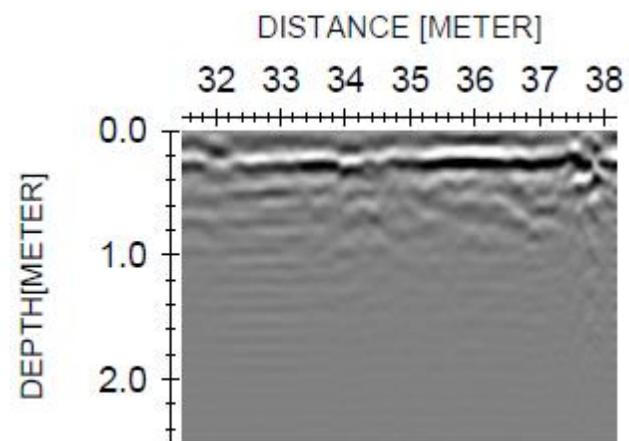
**Fonte:** O autor

**Figura 67 - Perfil 5a**



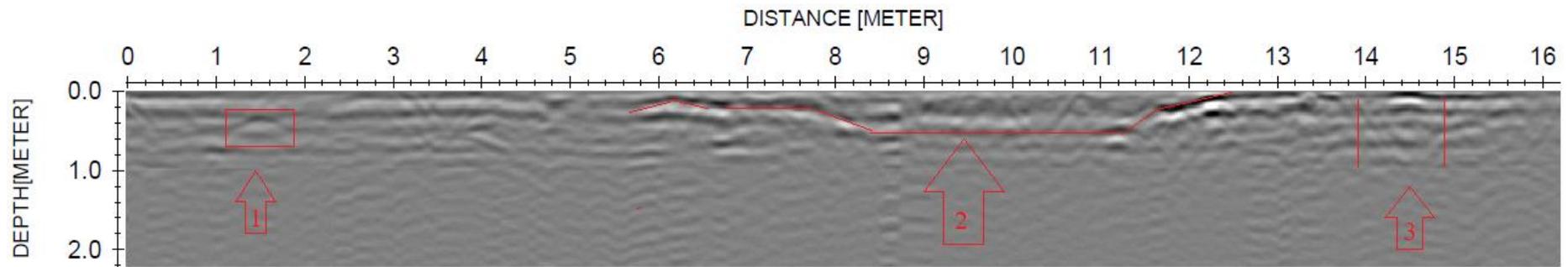
Fonte: O autor

**Figura 68 - Perfil 5b**



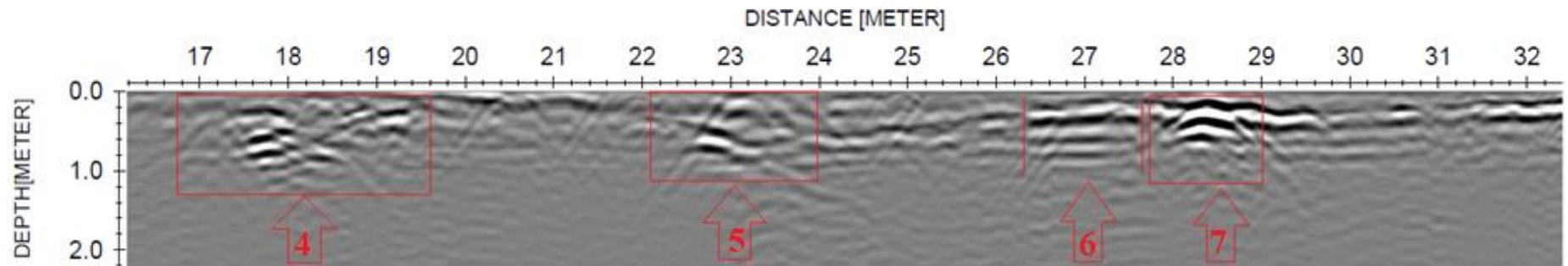
Fonte: O autor

**Figura 69 - Perfil 6a**



Fonte: O autor

**Figura 70 - Perfil 6b**



Fonte: O autor

### 8.3 Áreas de Interesse para Escavação

Os resultados obtidos por meio da integração dos métodos magnético e eletromagnético foram satisfatórios no âmbito interpretativo. O trabalho concentrou-se nas principais respostas do ponto de vista do autor. No entanto, é importante frisar que as demais anomalias magnéticas e os refletores indicados são tão importantes quanto esses, como sugerem suas interpretações. Os pontos indicados podem, ainda, estar relacionados a qualquer material que não seja de importância arqueológica.

Os métodos utilizados não são de fácil interpretação, visto que no método magnético as zonas anômalas distribuídas no mapa podem estar respondendo a diversos materiais, principalmente os metálicos que não foram identificados durante o levantamento. O mesmo acontece com o GPR, nesse os refletores que se encontram dispersos nos radargramas não tem uma interpretação correta e única. Por isso, em ambos casos, deve haver muita atenção para não acarretar na visualização de imagens inexistentes e interpretações que não condizem com a realidade, principalmente ao realizar a correlação entre os métodos.

Do método eletromagnético tentou-se reduzir ao máximo o número de refletores, sendo descartadas reflexões com muitos ruídos, as anomalias situadas a profundidades superiores 0,80m foram desconsideradas visto que de acordo com os colaboradores os remanescentes encontram-se preferencialmente próximos à superfície.

As raízes de árvores, assim como a vegetação interferiram de forma negativa nas respostas obtidas e no percurso do aparelho. No método magnético foram identificadas 17 anomalias dessas, descartaram-se 6 que dificilmente estariam relacionadas a áreas de interesse arqueológico.

Em 4 perfis observou-se anomalias coincidentes entre os métodos, por mais que essas possam estar relacionadas a raízes de árvores ou materiais geológicos foram apontadas no mapa de interesse, dando ênfase às indicadas nas seções 1,4, 6 que em acordo com as suas descrições podem ser de grande interesse histórico. No entanto, por não se ter informações da casa/sede e levando em conta que a mesma pode ter sido tanto uma construção refinada com tubulações modernas, com estruturas greco-romanas (típicas nos séculos XVII e XVIII) de grandes fazendeiros, quanto ser de posse de pequenos proprietários que abandonaram suas terras na busca de melhores condições em um meio urbano. Caso essas anomalias relacionam-se com estruturas relevantes, evidenciando nítidos padrões arquitetônicos, pode futuramente, com uma compilação de informações, interpretar-se não só a planta original da residência, mas também a notoriedade de a quem ela pertenceu e as suas funções.

Com todos dados em mãos elaborou-se um mapa de pontos a serem escavados (figura 71) e para melhor compreensão do leitor foi incluso sobre a área o mapa de sinal analítico para demonstrar como se distribuem os valores magnéticos em relação aos locais de interesse, utilizou-se uma opacidade de 50% para o leitor identificar onde se encontram as regiões anômalas no sítio. O início e o final dos perfis estão marcados com círculos pretos, as áreas de interesse estão indicadas por símbolos representativos. Nos pontos de interesse obtidos pelo método magnético os símbolos de indicação estão envolvidos por retângulos amarelos, nos pontos de interesse obtidos pelo método eletromagnético os símbolos de indicação estão envolvidos por retângulos azuis e nos pontos de interesse designados pelas coincidências anômalas entre os dois métodos os símbolos de indicação estão envolvidos por retângulos vermelhos.

Ressalta-se que estudando as respostas obtidas os perfis 1, 3, 4 e 6 aparentam ser os mais promissores logo devem ser estudados em melhor detalhe. Outro ponto a ser destacado é a posição geográfica dos pontos visto que o aparelho GPS utilizado pode apresentar coordenadas vagamente imprecisas.



## 9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo tinha como objetivo elaborar um mapa com pontos de interesse para escavações, radargramas e mapas de amplitudes fazendo uso dos métodos geofísicos magnetometria e GPR, logo o autor se encontra satisfeito com os resultados, pois conseguiu cumprir sua proposta inicial de projeto. Os resultados obtidos junto às constatações do Instituto da Memória e Patrimônio, configuram um local com potencial arqueológico. O trabalho não exerceu escavações, devido ao Decreto-lei nº 3.924, de 26 de julho de 1961 (ANEXO C).

No método magnético observou-se anomalias de baixa amplitude e alta amplitude e todas hipóteses levantadas foram feitas supondo um contexto totalmente arqueológico, porém sabe-se que as respostas obtidas possam estar relacionadas a aspectos geológicos e materiais de alta susceptibilidade magnética que não possuem nenhuma relevância histórica. No método eletromagnético observou-se anomalias em vale que podem estar associadas a cavidades preenchidas, continuidades e descontinuidades que podem estar relacionadas a porções soterradas da sede e padrões hiperbólicos que podem estar relacionados a objetos bidimensionais situados em subsuperfície. O autor tem a consciência que essas anomalias podem estar relacionadas às características do solo, a raízes de árvores presentes, dentre outros fatores por isso é explícito no decorrer do documento que as interpretações apontadas são apenas hipóteses.

O estudo conseguiu detectar a coincidência entre as anomalias dos dois métodos, o que talvez seja muito relevante do ponto de vista arqueológico, caso haja remanescentes inseridos nessas regiões pode ser de grande valia para a interpretação da planta original da casa.

Muitas anomalias evidentes no método magnético e eletromagnético relacionam-se a fenômenos não antrópicos, raízes de árvores e maciços rochosos que não possuem relevância arqueológica. Nesse âmbito para melhor compreensão e interpretação dos resultados foi imprescindível a cooperação de arqueólogos e historiadores do IMP que possuíam conhecimento aprofundado sobre a área de aplicação do método, com informações precisas sobre as propriedades dos materiais inseridos no local, o contexto arqueológico, assim como a evolução histórica regional. A relação mútua entre geocientista e profissionais arqueológicos evitou tendenciosidade na análise dos resultados.

Deve salientar-se que em relação aos resultados do método eletromagnético deveria de haver um levantamento topográfico preciso o que auxiliaria na interpretação do relevo acarretando na identificação mais exata da profundidade da anomalia. O estudo das

propriedades do solo também é fundamental e, por mais minucioso e cuidadoso que tenha sido o levantamento e o processamento, deveria ter sido aplicado visando interpretações mais condizentes, no entanto, devido a janela de tempo o autor não pode exercer esses e outros processos, pois limitou-se a apenas um levantamento de campo, entretanto traz-se ao final desse texto recomendações que mitigariam os equívocos desse estudo e complementariam de forma significativa o produto dessa pesquisa.

Em acordo com parágrafo anterior, propõe-se que baseado nos resultados dessa obra, sejam feitas pesquisas mais detalhadas na área, com o intuito de aprimorar o estudo. Para isso recomenda-se o seguinte procedimento:

1. Limpeza minuciosa do local;
2. Utilização de GPR com antenas de frequência superiores a 200 Mhz, para capturar anomalias de elementos arqueológicos imperceptíveis nessa antena;
3. Estudo estratigráfico do local;
4. Levantamentos pós-períodos de seca e pós períodos de chuva para fins de comparação das velocidades;
5. Aplicação de outro método complementar geofísico, recomenda-se a eletrorrestividade;
6. Simulação em softwares de modelamento, para obter um modelo sintético das possíveis respostas;
7. Estudo prévio com objetos enterrados a uma profundidade definida pelo autor para obter respostas de um alvo já conhecido e posteriormente realizar comparações;
8. Levantamentos em grade com espaçamento de 0,5 a 1m entre as linhas, sobreposto as anomalias aqui indicadas para a geração de modelos tridimensionais;
9. E junto ao Instituto de Memória e Patrimônio e em compromisso com Decreto-lei nº 3.924, de 26 de julho de 1961 acompanhem as possíveis escavações locais.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, Júlio Cesar Mascarenhas. **Radar de Penetração no Solo (GPR): Aspectos Geofísicos e Geodésicos, Processamento e Análise em Pavimento Flexível**. 2005. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco
- ALLEN, Scott Joseph; PORSANI, Jorge Luis; POLUHA, Bruno. Geofísica arqueológica no ambiente da Arqueologia Urbana. **Revista de Arqueologia**, v. 30, n. 1, p. 235-254, 2017.
- ALMEIDA, Roberta Rarumy Ribeiro de. Estudo das propriedades dielétricas de fluidos isotrópicos e anisotrópicos. 2015
- ALVES, José Jerônimo de Alencar *et al.* Métodos geofísicos aplicados à arqueologia no estado do Pará. 1979.
- ANGELUCCI, D. E. A partir da Terra: A Contribuição da Geoarqueologia-Laboratório de Geoarqueologia. **Revista do Centro de História da Universidade de Lisboa**, v. 2, p. 35-113, 2003.
- ANNAN, P. Ground penetrating radar principles, procedures and applications. **Sensors and software**, v. 278, 2003.
- ARAGÃO, Rigler da Costa; LUIZ, José Gouvêa; LOPES, Paulo Roberto do Canto. Metodologia geofísica aplicada ao estudo arqueológico dos sítios Bittencourt e Jambuaçu, Estado do Pará. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 28, n. 2, p. 249-263, 2010.
- ARAUJO, Ives Solano; VEIT, Eliane Angela; MOREIRA, Marco Antonio. Simulações computacionais na aprendizagem da Lei de Gauss para a eletricidade da Lei de Ampère em nível de física geral. **Revista eletrônica de enseñanza de las ciencias. Vigo, España. Vol. 6, n. 3 (2007), p. 601-629**, 2007.
- BARBOSA, Fidélis Dalcin. **História do Rio Grande do Sul**. Projeto Passo Fundo, 2013.
- BENTO, Claudio Moreira. Brigadeiro Rafael Pinto Bandeira (1740-1795). **A Defesa Nacional**, v. 82, n. 773, 1996.
- BRITO SCHIMMEL, Paula et al. Aplicação de métodos geofísicos em arqueologia: primeiros resultados obtidos no sambaqui fluvial capelinha, Cajati-SP, Brasil. **Revista do Museu de Arqueologia e Etnologia**, n. 12, p. 43-54, 2002.
- CARLI, Jean Carlos Andrade de. **Aplicação de GPR para estimar espessura e disposição lateral de horizontes do solo e do embasamento granítico a sudeste do Campus 2 da Unipampa**. Campus Caçapava do Sul. 2016.
- CASTRO, Adler Homero Fonseca de. Casa Forte. In: GRIECO, Bettina; TEIXEIRA, Luciano; THOMPSON, Analucia (Orgs.). **Dicionário IPHAN de Patrimônio Cultural**. 2. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro, Brasília: IPHAN/DAF/Copedoc, 2016. (verbete). ISBN 978-85-7334-299-4.

CHEMALE JR, Farid. Evolução geológica do Escudo Sul-rio-grandense. **Geologia do Rio Grande do Sul**, p. 13-52, 2000. **Cinquenta anos de Geologia Instituto de Geociências**. Editora Comunicação e Identidade. Porto Alegre, 2007.

CLARK, John E. *Lithics: Macroscopic Approaches to Analysis*. 1999.

CONYERS, Lawrence B. **Ground-penetrating radar and magnetometry for buried landscape analysis**. Springer, 2017.

COPÉ, S.M. 1986. Aspectos da ocupação pré-colonial no vale do Rio Jaguarão. (Dissertação de Mestrado). São Paulo: USP, 270 páginas

CORREIA, Karolina Almeida et al. A utilização do Ground Penetrating Radar (GPR) na definição de penetração de cunha salina e no monitoramento do nível freático em praia estuarina amazônica. **Águas Subterrâneas**, v. 33, n. 1, p. 87-101, 2019.

COUTO, Mateus de Oliveira et al. A pia e a cruz: a demografia dos trabalhadores escravizados em Herval e Pelotas (1840-59). 2010.

CREMASCHI, Mauro. **Manuale di geoarcheologia**. Laterza, 2000

DA SILVA, Karina Moreira Ribeiro et al. A execução do tratado de Santo Ildefonso e as atuações indígenas na fronteira platina. **Revista Brasileira de História & Ciências Sociais**, v. 10, n. 19, p. 169-187, 2018.

DA SILVA, Ruam Adelmo Macedo et al. LEI DE SNELL-DESCARTES-ÍNDICE DE REFRAÇÃO DO ACRÍLICO COM VARIAÇÃO DOS ÂNGULOS DE INCIDÊNCIA.

DIONISIO, Paulo Henrique. A força eletromotriz de movimento e os fundamentos da teoria eletromagnética clássica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 32, n. 4, p. 4302-1-4302-13, 2010.

DOURADO, João C. et al. Detecção de cavidades em arenitos utilizando gravimetria, eletrorresistividade e GPR. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 19, n. 1, p. 19-32, 2001.

ERNESTO, Marcia *et al.* **Investigando o interior da Terra**. USP Oficina de Textos, v. 4, p. 63-82, 2000.

EVERETT, Mark E. **Near-surface applied geophysics**. Cambridge University Press, 2013.

FERNANDES, José Pedro Teixeira. Da Geopolítica clássica à Geopolítica pós-moderna: entre a ruptura e a continuidade. **Política Internacional**, v. 26, n. 2, p. 161-186, 2002.

FRACALOSSO, F. G. *et al.* O registro em subsuperfície da barreira pleistocênica entre Osório e Tramandaí (RS). **Gravel**, v. 8, n. 1, p. 21-31, 2010.

FRANCO, L. S.; TRAVASSOS, J. M.; MENEZES, P. T. L. Levantamento GPR em rochas carbonáticas na Bacia Sergipe-Alagoas. **Trabalho de Iniciação Científica. Observatório Nacional, RJ**, 2004.

FRANCO, Liliane Souza. Levantamento GPR em rochas carbonáticas na Bacia Sergipe-Alagoas. 2004.

Gandolfô, Otavio & Souza, Tiago & Birelli, Carlos & Galli, Vicente & Hemsí, Paulo & Aoki, Paulo Cezar. (2017). A UTILIZAÇÃO DA PERFILAGEM MAGNÉTICA PARA DETERMINAÇÃO DO COMPRIMENTO DE UMA ESTACA. *Revista Fundações e Obras Geotécnicas*. 50-57.

GARCIA-GARCIA, Ekhine *et al.* Geoarchaeological Core Prospection as a Tool to Validate Archaeological Interpretation Based on Geophysical Data at the Roman Settlement of Auritz/Burguete and Aurizberri/Espinal (Navarre). *Geosciences*, v. 7, n. 4, p. 104, 2017.

GIDUSKO, Kevin; SCHULTZ, John J. **Ground Penetrating Radar: Overview and Applications in Archaeology and Forensic Science with a Focus on Florida**. 2014.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentals of physics**. John Wiley & Sons, 2013.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física: Óptica E Física Moderna. Vol. 4** . Grupo Gen-LTC, 2000.

HARTMANN, L. A.; CHEMALE JR, Farid; PHILIPP, R. P. Evolução geotectônica do Rio Grande do Sul no pré-cambriano. *Ianuzzi R. & Frantz JC.(Org.)*, v. 50, p. 97-123, 2007.

Instituto de Memória e Patrimônio. **Projeto: Programa de gestão do patrimônio arqueológico em áreas de silvicultura da empresa CMPC Celulose Riograndense LTDA – Região Sul do Rio Grande do Sul – Fazenda Santa Heloísa**. Relatório Final elaborado por Jorge Luiz de Oliveira e Viana Luciana da Silva Peixoto. Pelotas – RS, 2020.

Instituto de Memória e Patrimônio. Relatório de vistoria técnica do sítio arqueológico São José II. Pelotas: IMP, 2016. 12 pág. (Sequência de vistorias técnicas).

LEITE, Luís Osvaldo. Discurso de Posse-Presença Jesuítica IHRGS. **Revista do Instituto Histórico e Geográfico do Rio Grande do Sul**, n. 148.

LENZ, Guilherme Henrique. **Estudos geofísicos em aterro controlado, Caçapava do Sul–RS**. 2016.

LINFORD, Neil. The application of geophysical methods to archaeological prospection. **Reports on progress in physics**, v. 69, n. 7, p. 2205, 2006.

MELO, Marina S. **Geofísica aplicada à arqueologia: Investigação no sítio histórico engenho Murucutu**. Belém, Pará, v. 100, 2007.

NEAL, Adrian. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. **Earth-science reviews**, v. 66, n. 3-4, p. 261-330, 2004.

Neves, S., *et al.* "Magnetometria e georadar aplicados à arqueologia—o caso da Horta da torre." Resumo do IV Congresso Jovens Investigadores em Geociências, Estremoz, Portugal, 2014.

ORTIZ, Nilce. **Estudo da Utilização de Magnetita como Material Adsorvedor dos Metais Cu<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup> e Cd<sup>2+</sup>, em Solução**. 2000. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

OSELLA, Ana; BONOMO, Néstor; RATTO, Norma. Prospección geofísica en la localidad arqueológica de Palo Blanco y alrededores (Departamento Tinogasta, Catamarca). **N. Ratto**

(comp.), **Entrelazando Ciencias: Sociedad y ambiente antes de la conquista española**, p. 67-98, 2009.

PAIXÃO, Manuelle Santos Góis. **Análise da acurácia das estimativas de posicionamento do nível freático e dos teores de umidade do solo com o emprego dos métodos de sísmica de refração rasa e georadar a partir de um estudo no campus da USP, São Paulo/SP**. 2005. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PEIXOTO, Luciana da Silva; CERQUEIRA, Fábio Vergara. Salvamento arqueológico do Centro histórico de Pelotas, RS, Brasil. **Anais do V encontro do Núcleo Regional Sul da Sociedade de Arqueologia Brasileira SAB/Sul**, v. 20, 2006.

PESTANA, R.; BOTELHO, Marco Antonio Barsottelli. Migração de dados de radar (GPR) com correção topográfica simultânea. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 15, n. 1, p. 3-10, 1997.

PORTELLA, Márcio Oliveira; RIBEIRO, José Cláudio Junqueira. Aterros sanitários: aspectos gerais e destino final dos resíduos. **Revista Direito Ambiental e Sociedade**, v. 4, n. 1, 2014.

RAMOS, Yoly Souza *et al.* UTILIZAÇÃO GROUND PENETRATING RADAR (GRP) PARA MAPEAMENTO DE ANOMALIAS ASSOCIADAS A ESTRUTURAS ARQUEOLÓGICAS NA SUBESTAÇÃO DE PILÕES/PB. **Águas Subterrâneas**, 2013.

RAPP, George Robert; HILL, Christopher L.; HILL, MR Christopher L. **Geoarchaeology: the earth-science approach to archaeological interpretation**. Yale University Press, 2006.

RIOS, Rodrigo de Freitas Valois : **Deteção de dutos enterrados empregando os métodos GPR e eletromagnético indutivo**. Salvador – BA, 2011.

REYNOLDS, John M. **An introduction to applied and environmental geophysics**. John Wiley & Sons, 2011.

RODRIGUES, Selma Isabel. **Contribuições dos métodos GPR e Eletromagnético Indutivo em estudos de sítios arqueológicos de sambaquis costeiros no Estado de Santa Catarina**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2009.

SALA, Roger *et al.* Archaeological geophysics—from basics to new perspectives. **Archaeology, New Approaches in Theory and Techniques**, p. 133-166, 2012.

SANDMEIER, K. J. ReflexW version 6.0. **User manual, Software Manual, Karlsruhe, Germany**, 2011.

SCHMIDT, Armin R. *et al.* EAC Guidelines for the use of Geophysics in Archaeology: Questions to Ask and Points to Consider. 2015.

# ANEXOS

## ANEXO A

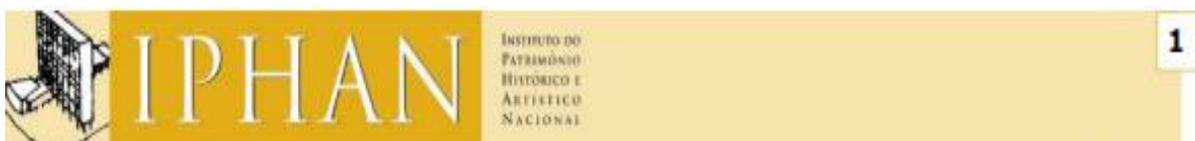
<b>RESUMO DAS RESPOSTAS ESPERADAS POR GPR EM VÁRIOS TIPOS DE SÍTIOS</b>		
Características do Tipo de Sítio	Resposta Esperada	Comentários
Restos de construção, fundações e paredes	Bom	Geralmente bons resultados; A pesquisa pode indicar contrastes suficientes de condutividade.
Obras	Bom	Obras modernas, principalmente tubos de metal, podem ser facilmente identificados. Serviços de plástico de pequeno diâmetro podem ser mais difícil a obtenção da imagem. Mas drenos e condutos revestidos de pedra, também apresentam resultado muito satisfatórios.
Estratigrafia do site	Moderado	Proporcionou contraste físico adequado entre camadas e recursos existentes, a estratigrafia pode ser resolvida dentro dos limites da resolução espacial da antena
Vazios e cavidades	Bom	O contraste entre vazios com ar e solo circundante produz uma forte reflexão. Reversões de polaridade distintas da forma de onda incidente também pode ser discernida. Parcialmente cheio vazios contendo entulho ou água também podem ser resolvidos.
Estruturas de pé, construção histórica	Bom	Questões arquitetônicas específicas, como a presença de objetos ocultos espaços vazios dentro de uma parede, podem ser resolvidos. Alta frequência. As antenas são muitas vezes necessárias e são eficazes para localizar características metálicas.
Zonas úmidas	Moderado/Bom	A resposta pode ser altamente dependente do local e influenciada por a presença de argilas de alta condutividade. O sucesso foi relatado para alvos de imagem em turfa e abaixo de água doce
Geomorfologia	Moderado/Bom	Antena de baixa frequência pode ser necessária na presença de argilas aluviais, mas paleocanais e outras características de grande escala ainda pode ser localizado. A profundidade da sobrecarga também pode ser mapeado.
Poços, valas, buracos-preenchidos	Moderado	Pesquisas muito dependentes do site, mas bem-sucedidas demonstrou a adequação do GPR para esses tipos de recursos. O contraste físico e o tamanho do recurso podem limitar a detecção.
Sepulturas	Pobre/Moderado	Depende da profundidade do elemento; caixões de pedra geralmente fornecem um refletor forte

Fonte: Adaptado de SCHMIDT *et al.* 2015

## ANEXO B

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

Fonte: Extraído de MELO, 2007



## Lei nº 3.924 de 26 de julho de 1961.

DISPÕE SOBRE OS MONUMENTOS ARQUEOLÓGICOS E PRÉ-HISTÓRICOS.

O Presidente da República:

Faço saber que o Congresso Nacional decreta e eu sanciono a seguinte lei:

**Artigo 1º** - Os monumentos arqueológicos ou pré-históricos de qualquer natureza existentes no território nacional e todos os elementos que neles se encontram ficam sob a guarda e proteção do Poder Público, de acordo com o que estabelece o art. 180 da Constituição Federal.

**Parágrafo único** - A propriedade da superfície, regida pelo direito comum, não inclui a das jazidas arqueológicas ou pré-históricas, nem a dos objetos nela incorporados na forma do art. 161 da mesma Constituição.

**Artigo 2º** - Consideram-se monumentos arqueológicos ou pré-históricos:

- a) as jazidas de qualquer natureza, origem ou finalidade, que representem testemunhos da cultura dos paleoameríndios do Brasil, tais como sambaquis, montes artificiais ou tesos, poços sepulcrais, jazigos, aterrados, estearias e quaisquer outras não especificadas aqui, mas de significado idêntico, a juízo da autoridade competente;
- b) os sítios nos quais se encontram vestígios positivos de ocupação pelos paleoameríndios, tais como grutas, lapas e abrigos sob rocha;
- c) os sítios identificados como cemitérios, sepulturas ou locais de pouso prolongado ou de aldeamento "estações" e "cerâmios", nos quais se encontram vestígios humanos de interesse arqueológico ou paleoetnográfico;
- d) as inscrições rupestres ou locais como sulcos de polimentos de utensílios e outros vestígios de atividade de paleoameríndios.

**Artigo 3º** - São proibidos em todo território nacional o aproveitamento econômico, a destruição ou mutilação, para qualquer fim, das jazidas arqueológicas ou pré-históricas conhecidas como sambaquis, casqueiros, concheiros, birbigueiras ou sernambis, e bem assim dos sítios, inscrições e objetos enumerados nas alíneas b, c e d do artigo anterior, antes de serem devidamente pesquisados, respeitadas as concessões anteriores e não caducas.



**Artigo 4º** - Toda pessoa, natural ou jurídica, que, na data da publicação desta Lei, já estiver procedendo, para fins econômicos ou outros, à exploração de jazidas arqueológicas ou pré-históricas, deverá comunicar à Diretoria do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, dentro de sessenta (60) dias, sob pena de multa de Cr\$ 10.000,00 a Cr\$ 50.000,00 (dez mil a cinquenta mil cruzeiros), o exercício dessa atividade, para efeito de exame, registro, fiscalização e salvaguarda do interesse da ciência.

**Artigo 5º** - Qualquer ato que importe na destruição ou mutilação dos monumentos a que se refere o art. 2º desta Lei será considerado crime contra o Patrimônio Nacional e, como tal, punível de acordo com o disposto nas leis penais.

**Artigo 6º** - As jazidas conhecidas como sambaquis, manifestadas ao governo da União, por intermédio da Diretoria do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, de acordo com o art. 4º e registradas na forma do artigo 27 desta Lei, terão precedência para estudo e eventual aproveitamento, em conformidade com o Código de Minas.

**Artigo 7º** - As jazidas arqueológicas ou pré-históricas de qualquer natureza, não manifestadas e registradas na forma dos arts. 4º e 6º desta Lei, são consideradas, para todos os efeitos, bens patrimoniais da União.

## CAPÍTULO II

### Das Escavações Arqueológicas realizadas por particulares

**Artigo 8º** - O direito de realizar escavações para fins arqueológicos, em terras de domínio público ou particular, constitui-se mediante permissão do Governo da União, através da Diretoria do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, ficando obrigado a respeitá-lo o proprietário ou possuidor do solo.

**Artigo 9º** - O pedido de permissão deve ser dirigido à Diretoria do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, acompanhado de indicação exata do local, do vulto e da duração aproximada dos trabalhos a serem executados, da prova de idoneidade técnico-científica e financeira do requerente e do nome do responsável pela realização dos trabalhos.

**Parágrafo único** - Estando em condomínio a área em que se localiza a jazida, somente poderá requerer a permissão o administrador ou cabecel, eleito na forma do Código Civil.

**Artigo 10** - A permissão terá por título uma portaria do Ministro da Educação e Cultura, que será transcrita em livro próprio da Diretoria do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional e na qual ficarão estabelecidas as condições a serem observadas ao desenvolvimento das escavações e estudos.



**Artigo 11** - Desde que as escavações e estudos devam ser realizados em terreno que não pertença ao requerente, deverá ser anexado ao seu pedido o consentimento escrito do proprietário do terreno ou de quem esteja em uso e gozo desse direito.

**Parágrafo 1º** - As escavações devem ser necessariamente executadas sob orientação do permissionário, que responderá civil, penal e administrativamente pelos prejuízos que causar ao Patrimônio Nacional ou a terceiros.

**Parágrafo 2º** - As escavações devem ser realizadas de acordo com as condições estipuladas no instrumento de permissão, não podendo o responsável, sob nenhum pretexto, impedir a inspeção dos trabalhos por delegado especialmente designado pela Diretoria do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, quando for julgado conveniente.

**Parágrafo 3º** - O permissionário fica obrigado a informar à Diretoria do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, trimestralmente, sobre o andamento das escavações, salvo a ocorrência de fato excepcional, cuja notificação deverá ser feita imediatamente, para as providências cabíveis.

**Artigo 12** - O Ministério da Educação e Cultura poderá cassar a permissão concedida, uma vez que:

- a) não sejam cumpridas as prescrições da presente Lei e do instrumento de concessão da licença;
- b) sejam suspensos os trabalhos de campo por prazo superior a doze (12) meses, salvo motivo de força maior, devidamente comprovado;
- c) no caso de não cumprimento do parágrafo 3º do artigo anterior.

**Parágrafo único** - Em qualquer dos casos acima enumerados, o permissionário não terá direito a indenização alguma pela despesas que tiver efetuado.

### CAPÍTULO III

Das Escavações Arqueológicas realizadas por Instituições Científicas Especializadas da União, dos Estados e dos Municípios

**Artigo 13** - A União, bem como os Estados e Municípios mediante autorização federal, poderão proceder a escavações e pesquisas, no interesse da Arqueologia e da Pré-história em terrenos de propriedade particular, com exceção das áreas muradas que envolvam construções domiciliares.

**Parágrafo único** - À falta de acordo amigável com o proprietário da área onde se situar a jazida, será esta declarada de utilidade pública e autorizada a sua ocupação pelo período

necessário à execução dos estudos, nos termos do art. 36 do Decreto-lei nº 3.365, de 21 de junho de 1941.

**Artigo 14** - No caso de ocupação temporária do terreno, para realização de escavações nas jazidas declaradas de utilidade pública, deverá ser lavrado um auto, antes do início dos estudos, no qual se descreva o aspecto exato do local.

**Parágrafo 1º** - Terminados os estudos, o local deverá ser restabelecido, sempre que possível, na sua feição primitiva.

**Parágrafo 2º** - Em caso de as escavações produzirem a destruição de um relevo qualquer, essa obrigação só terá cabimento quando se comprovar que, desse aspecto particular do terreno, resultavam incontestáveis vantagens para o proprietário.

**Artigo 15** - Em casos especiais e em face do significado arqueológico excepcional das jazidas, poderá ser promovida a desapropriação do imóvel, ou parte dele, por utilidade pública, com fundamento no art. 5º, alíneas K e L do Decreto-lei nº 3.365, de 21 de junho de 1941.

**Artigo 16** - Nenhum órgão da administração federal, dos Estados ou dos Municípios, mesmo no caso do art. 28 desta Lei, poderá realizar escavações arqueológicas ou pré-históricas, sem prévia comunicação à Diretoria do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, para fins de registro no cadastro de jazidas arqueológicas.

**Parágrafo único** - Dessa comunicação deve constar, obrigatoriamente o local, o tipo ou a designação da jazida, o nome do especialista encarregado das escavações, os indícios que determinaram a escolha do local e, posteriormente, uma súmula dos resultados obtidos e do destino do material coletado.

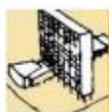
## CAPÍTULO IV

### Das Descobertas Fortuitas

**Artigo 17** - A posse e a salvaguarda dos bens de natureza arqueológica ou pré-histórica constituem, em princípio, direito imanente ao Estado.

**Artigo 18** - A descoberta fortuita de quaisquer elementos de interesse arqueológico ou pré-histórico, artístico ou numismático deverá ser imediatamente comunicada à Diretoria do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, ou aos órgãos oficiais autorizados, pelo autor do achado ou pelo proprietário do local onde tiver ocorrido.

**Parágrafo único** - O proprietário ou ocupante do imóvel onde se tiver verificado o achado é responsável pela conservação provisória da coisa descoberta, até o pronunciamento e deliberação da Diretoria do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional.



**Artigo 19** - A infringência da obrigação imposta no artigo anterior implicará na apreensão sumária do achado, sem prejuízo da responsabilidade do inventor pelos danos que vier a causar ao Patrimônio Nacional, em decorrência da omissão.

## CAPÍTULO V

### Da remessa, para o exterior, de objetos de interesse Arqueológico ou Pré- histórico, Histórico, Numismático ou Artístico.

**Artigo 20** - Nenhum objeto que apresente interesse arqueológico ou pré-histórico, numismático ou artístico poderá ser transferido para o exterior, sem licença expressa da Diretoria do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, constante de uma "guia" de liberação na qual serão devidamente especificados os objetos a serem transferidos.

**Artigo 21** - A inobservância da prescrição do artigo anterior implicará na apreensão sumária do objeto a ser transferido, sem prejuízo das demais cominações legais a que estiver sujeito o responsável.

**Parágrafo único** - O objeto apreendido, razão deste artigo, será entregue à Diretoria do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional.

## CAPÍTULO VI

### Disposições Gerais

**Artigo 22** - O aproveitamento econômico das jazidas, objeto desta Lei, poderá ser realizado na forma e nas condições prescritas pelo Código de Minas, uma vez concluída a sua exploração científica, mediante parecer favorável da Diretoria do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional ou do órgão oficial autorizado.

**Parágrafo único** - De todas as jazidas será preservada, sempre que possível ou conveniente, uma parte significativa, a ser protegida pelos meios convenientes, como blocos testemunhos.

**Artigo 23** - O Conselho de Fiscalização das Expedições Artísticas e Científicas encaminhará Diretoria do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional qualquer pedido de cientista estrangeiro, para realizar escavações arqueológicas ou pré-históricas no país.

**Artigo 24** - Nenhuma autorização de pesquisa ou de lavra para jazidas de calcário de concha, que possua as características de monumentos arqueológicos ou pré-históricos, poderá ser concedida sem audiência prévia da Diretoria do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional.

**Artigo 25** - A realização de escavações arqueológicas ou pré-históricas, com infringência de qualquer dos dispositivos desta Lei, dará lugar à multa de Cr\$ 5.000,00 (cinco mil cruzeiros) a Cr\$

50.000,00 (cinquenta mil cruzeiros), sem prejuízo de sumária apreensão e conseqüente perda, para o Patrimônio Nacional, de todo o material e equipamento existente no local.

**Artigo 26** - Para melhor execução da presente Lei, a Diretoria do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional poderá solicitar a colaboração de órgãos federais, estaduais, municipais, bem como de instituições que tenham entre seus objetivos específicos o estudo e a defesa dos monumentos arqueológicos e pré-históricos.

**Artigo 27** - A Diretoria do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional manterá um Cadastro dos monumentos arqueológicos do Brasil, no qual serão registrados todas as jazidas manifestadas, de acordo com o disposto nesta Lei, bem como das que se tornarem conhecidas por qualquer via.

**Artigo 28** - As atribuições conferidas ao Ministério da Educação e Cultura, para o cumprimento desta Lei, poderão ser delegadas a qualquer unidade da Federação, que disponha de serviços técnico-administrativos especialmente organizados para a guarda, preservação e estudo das jazidas arqueológicas e pré-históricas, bem como de recursos suficientes para o custeio e bom andamento dos trabalhos.

**Parágrafo único** - No caso deste artigo, o produto das multas aplicadas e apreensões de material legalmente feitas reverterá em benefício do serviço estadual, organizado para a preservação e estudo desses monumentos.

**Artigo 29** - Aos infratores desta Lei serão aplicadas as sanções dos artigos 163 a 167 do Código Penal, conforme o caso, sem prejuízo de outras penalidades cabíveis.

**Artigo 30** - O poder Executivo baixará, no prazo de 120 dias, a partir da vigência desta Lei, a regulamentação que for julgada necessária à sua fiel execução.

**Artigo 31** - Esta lei entrará em vigor na data de sua publicação, revogadas as disposições em contrário.

Brasília, em 26 de julho de 1961;

140º da Independência e 73º da República.

Jânio Quadros

Brigido Tinoco

Oscar Pedroso Horta

Clemente Mariani

João Agripino