



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
CURSO DE GEOLOGIA**

**RIVALDO VIEIRA SANTOS**

**APLICAÇÃO DO MÉTODO GPR (GROUND PENETRATING  
RADAR) NO ESTUDO DE VAZIOS EM ROCHAS  
CARBONÁTICAS**

**Salvador, BA  
2019**

**RIVALDO VIEIRA SANTOS**

**APLICAÇÃO DO MÉTODO GPR (GROUND PENETRATING  
RADAR) NO ESTUDO DE VAZIOS EM ROCHAS  
CARBONÁTICAS**

Monografia apresentada ao Curso de Geologia,  
Instituto de Geociências, Universidade Federal  
da Bahia como requisito parcial para obtenção  
do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio  
Barsottelli Botelho

**Salvador, BA  
2019**

FOLHA DE APROVAÇÃO

RIVALDO VIEIRA SANTOS

**APLICAÇÃO DO MÉTODO GPR (GROUND PENETRATING  
RADAR) NO ESTUDO DE VAZIOS EM ROCHAS  
CARBONÁTICAS**

Trabalho final de graduação aprovado como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia, Universidade Federal da Bahia, pela seguinte banca examinada:

---

1º Examinador – Prof. Dr. Marco Antonio Barsottelli Botelho – Orientador – IGEO\UFBA

---

2º Examinador – Prof<sup>ª</sup>. Msc. Mariana Lídia N. Oliveira Souza Schibelsky – IGEO\UFBA

---

3º Examinador – Msc. Marcy Argolo Borges – IGEO\UFBA

Salvador, 22 de novembro de 2019

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA),  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Santos, Rivaldo Vieira  
Aplicação do Método GPR (Ground Penetrating Radar)  
no Estudo de Vazios em Rochas Carbonáticas / Rivaldo  
Vieira Santos. -- Salvador, 2019.  
83 f. : il

Orientador: Marco Antonio Barsottelli Botelho.  
TCC (Graduação - Bacharelado em Geologia) --  
Universidade Federal da Bahia, IGEO - UFBA, 2019.

1. GPR. 2. Rocha Carbonática. 3. Bege Bahia. I.  
Barsottelli Botelho, Marco Antonio. II. Título.

*Dedico este trabalho aos meus pais, José Rivaldo e Maria Helena, a minha irmã, Ridalva, aos meus tios Maria de Lourdes e Luiz, minha vó, Teresa (in memoriam), a minha companheira, Hortência, e a todos os meus familiares e amigos que sempre me apoiaram e me fizeram chegar até este ponto.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelo dom da vida, pelos livramentos ao longo da vida e pela força para seguir em frente na busca pelos meus objetivos.

Agradeço especialmente ao meu orientador Prof. Dr. Marco Antonio Barsottelli Botelho pelas oportunidades e pela orientação para a realização deste trabalho.

Agradeço aos meus queridos pais, Maria Helena e José Rivaldo, por toda força, carinho, compreensão, e suporte que me foi dado (sem o qual eu não poderia seguir em frente). Agradeço pelos ensinamentos e por todo o esforço os quais realizaram para criar a mim e minha irmã.

Agradeço a minha irmã por sempre me ajudar nas horas mais difíceis, sendo amiga e pelo incentivo ao longo dos anos.

Agradeço aos meus familiares que apesar de distantes sempre foram presentes me dando apoio, principalmente minha avó Teresa (*in memoriam*), meu tio Luiz (Loi), minha tia Lourdes com a qual passei incontáveis férias em Cruz das Almas e ao seu esposo Glaubo.

Agradeço aos meus tios-avôs Nelson (*in memoriam*) e Tio Benedito por desempenharem o papel de avôs na minha vida, uma vez que a vida não permitiu que eu desfrutasse da companhia dos meus avôs.

Agradeço a Hortência Almeida Pires (My Sunshine) por todo amor, carinho, atenção e apoio ao longo dessa caminhada.

Agradeço as amigadas que esse curso me trouxe: Dário, Heverton (Risadinha), Thiaguinho (Oceano), Gilmar, Pablício (Geografia), Fabiane Natividade, Felipe (Doente), Lucas Fontes (Baldinho), Leandro (Mineiro), Matheus (Matuco), Pérola, Raissa, Michel Brum, Emílio, Edmilton (Bitão), Carlos (Motoca), Charles Quinto (Tio) e a todos que contribuíram direta ou indiretamente nessa caminhada.

Agradeço aos professores por me passarem seus conhecimentos e por terem me ajudado a chegar até aqui.

Agradeço aos Professores Danilo e Hailton Mello pela oportunidade de trabalhar com o ensino de geotecnologias. Aos Geólogos Emanuel Apolinário, Gildete Silva, Maria Angélica Barreto, Violeta Martins e Marcely Ferreira pelo aprendizado adquirido através dos estágios realizados.

Muito obrigado a todas as pessoas que contribuíram diretamente ou indiretamente para que eu completasse esse ciclo.

*“Nada cai do céu  
Nem cairá  
Tudo que é meu  
Eu fui buscar  
Aprendi viver  
E caminhar  
Entre bons e os maus  
E me guardar”*

*(Ivan Lins)*

## RESUMO

O presente trabalho utiliza da técnica de GPR (*Ground Penetrating Radar*) para detectar vazios em rochas carbonáticas no Município de Ourolândia-BA. O município tem como principal fonte de renda a extração de blocos comerciais do perfil calcrete, conhecido como “Mármore Bege Bahia”, ou ainda, Travertino da Bahia ou Marta Rocha. A região de estudo localiza-se na Bacia de Irecê, e nela existem sistemas de cavernas interconectadas sendo considerada um dos principais sítios espeleológicos do Brasil. A extração desta rocha ornamental, como já dito, se dá sobre a formação Caatinga que é constituída por calcários puros muito heterogêneos, o qual se apresenta tanto na forma pulverulenta como na maciça, e este pacote dificilmente supera os 20 metros de espessura. Na aquisição dos dados GPR, foi utilizada uma antena com frequência central de 200 MHz, biestática com configuração de afastamento constante. Foram adquiridos 8 perfis de radar e o processamento destes dados foi realizado utilizando o programa *Reflexw* (©Sandmeier) seguindo um fluxo básico de processamento de dados de radar, o qual inclui a correção do tempo zero, aplicação de ganhos, filtragem, conversão em profundidade, entre outros. Após o processamento dos dados, os radargramas foram interpretados, sendo possível identificar hipérboles de difração indicativas de irregularidades (ou vazios) e fortes reflexões (com alta amplitude) as quais são indicadores de fortes contatos de impedância (ex. contato rocha-ar ou contato rocha-material-argiloso) causadores da partição das ondas eletromagnéticas que penetram no interior do pacote de rochas. Este estudo é de grande relevância visto que possibilita implantar e planejar a lavra, de modo a evitar os locais com a presença de vazios e/ou fraturas, os quais depreciam, ou mesmo inviabilizam o aproveitamento econômico dos blocos lavrados.

Palavras-chave: GPR. Rochas carbonáticas. Bege Bahia.

## ABSTRACT

The present work uses the ground penetration radar (GPR) technique to detect voids in carbonate rocks in the city of Ourolândia-BA. The main source of income for the city is the extraction of commercial blocks of the calcrete profile, known as “Marmóre Bege Bahia” or Travertino da Bahia or Marta Rocha. The study region is located in the Irecê Basin, and there are interconnected cave systems, considered one of the main speleological sites in Brazil. The extraction of this ornamental rock, as already mentioned, takes place on the Caatinga formation, which is made up of very heterogeneous pure limestones, which are both powdery and massive, and this package hardly exceeds 20 meters in thickness. In the acquisition of GPR data, a 200 MHz center frequency antenna was used, with a common offset survey configuration. Eight radargrams were acquired and the processing of these data was performed using Reflexw software (© Sandmeier) following a basic radar data processing flow which includes time-zero correction, gain application, filtering, depth conversion, among others. After data processing, the radargrams were interpreted and it was possible to identify diffraction hyperboles indicating irregularities (or voids) and strong reflections (with high amplitude) which are indicators of strong impedance contacts (e.g. rock - air contact or contact rock-clay material) causing the partition of electromagnetic waves that penetrate into the rock package. The current study has great relevance as it makes possible to implement and plan the mining, in order to avoid the sites with the presence of voids and/or fractures, which depreciate, or even prevent the economic use of the mined blocks.

Keywords: GPR. Limestone. Bege Bahia.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de Localização do Município .....	17
Figura 2 - Localização das Bacias intracratônicas Neoproterozóicas (Una-Utinga, Irecê e São Francisco) e faixas móveis do Cráton do São Francisco.....	21
Figura 3 - Perfil estratigráfico do Grupo Una na Bacia de Irecê.....	22
Figura 4 - Mapa Geológico da Bacia de Irecê.....	23
Figura 5 - Mapa Geológico do município de Orolândia .....	24
Figura 6 - As associações de fácies palustre-calcrete e os seus aspectos petrográficos comuns os quais são mostrados nas figuras de 1 a 9 .....	25
Figura 7 - Diagrama esquemático das diferentes fases de evolução do perfil calcrete .....	28
Figura 8 - Modelo de um aquífero cárstico não confinado (livre) .....	30
Figura 9 - Tipos de Aquífero na Bacia do Rio Salitre e as vazões dos poços tubulares .....	32
Figura 10 - Classificação de brechas e sedimentos de preenchimento de cavernas. A área sombreada na porção inferior direita indica que nenhuma característica da caverna é encontrada .....	34
Figura 11 - Radargramas interpretados em profundidade do levantamento realizado na BA-046, para os perfis: a)P47, b)P49. As possíveis regiões de cavernas estão destacadas em vermelho, e indicadas por setas azuis. As setas amarelas indicam hipérboles de difração .....	35
Figura 12 - Assinatura de GPR da unidade fraturada e alterada (zonas de baixa amplitude) na pedreira estudada. Os retângulos indicam áreas onde há feições cársticas .....	35
Figura 13 - Elementos básicos de um sistema GPR.....	36
Figura 14 - Relação entre velocidade e frequência para diferentes condutividades.....	42
Figura 15 - Relação entre atenuação e frequência em diferentes condutividades .....	43
Figura 16 - Principais processos que influenciam na perda do sinal de radar.....	44
Figura 17 - Variação do skin depth em função da resistividade do meio, para $\epsilon r = 8$ e $40$ .....	46
Figura 18 - Velocidade da onda eletromagnética em função da porosidade para materiais granulares saturados com ar e água, onde $\epsilon m = 6$ .....	49
Figura 19 - Principais técnicas de aquisição de dados GPR: 1) Perfil de reflexão com afastamento constante; 2) Refração e reflexão de grande abertura angular (WARR); 3) Perfil de ponto médio comum (CMP); 4) Transiluminação ou tomografia .....	51
Figura 20 - Modos de orientação das antenas de radar .....	53
Figura 21 - Disposição espacial dos perfis realizados na área de estudo .....	54
Figura 22 - Radargrama Bruto linha 383 .....	59
Figura 23 - Esboço da geometria de uma configuração padrão transmissor-receptor e os possíveis caminhos dos eventos gerados .....	60
Figura 24 - Radargrama linha 383 após a correção de tempo zero. ....	60

Figura 25 - Efeito de componentes de baixas frequências WOW (A) e o dado obtido após o uso do filtro DEWOW (B).....	61
Figura 26 - Radargrama linha 383 após filtragem DEWOW .....	61
Figura 27 - Radargrama linha 383 após aplicação de Ganho AGC .....	62
Figura 28 - Radargrama linha 383 após a remoção de Background.....	63
Figura 29 - Esboço da configuração do filtro passa-banda trapezoidal.....	63
Figura 30 - Radargrama linha 383 após aplicação do filtro passa-banda.....	64
Figura 31 - Análise de Velocidade da linha 383 .....	64
Figura 32 - Conversão tempo em profundidade.....	65
Figura 33 - Radargrama do perfil 383 interpretado. As hipérboles de refração estão destacadas em vermelho.....	68
Figura 34 - Radargrama do perfil 384 interpretado. As hipérboles de refração estão destacadas em vermelho.....	69
Figura 35 - Radargrama do perfil 385 interpretado. As hipérboles de refração estão destacadas em vermelho.....	70
Figura 36 - Radargrama do perfil 386 interpretado. A hipérbole de refração está destacada em vermelho .....	71
Figura 37 - Radargrama do perfil 387 interpretado. As hipérboles de refração estão destacadas em vermelho.....	73
Figura 38 - Radargrama do perfil 388 interpretado. As hipérboles de refração estão destacada em vermelho.....	74
Figura 39 - Radargrama do perfil 389 interpretado. A hipérbole de refração está destacada em vermelho. ....	75
Figura 40 - Radargrama do perfil 390 interpretado. A hipérbole de refração está destacada em vermelho. ....	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Permissividade dielétrica relativa ( $\epsilon_r$ ) e condutividade elétrica ( $\sigma_0$ ) de alguns materiais ....	37
Tabela 2 -Valores de constante dielétrica ( $\epsilon r'$ ), condutividade elétrica ( $\sigma$ ), velocidade ( $v$ ) e atenuação ( $\alpha$ ) para alguns materiais geológicos a 100 MHz .....	42
Tabela 3 - Frequência central das antenas x profundidade média de penetração.....	46

## LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Vista parcial de uma frente de lavra da mineração Mármore da Bahia onde localizou-se uma pequena caverna .....	55
Fotografia 2 - Para evitar acidentes colocou-se alguns blocos descartados ao redor da cavidade .....	55
Fotografia 3 - Vista detalhada da entrada da caverna com antena de 200 MHz como referência de escala. De acordo com o diagrama da figura 7 (PENHA, 1994) o hardpan apresenta grandes vazios em sua parte superior.....	55
Fotografia 4 - Na área estudada existe um capeamento de solo com uma espessura média de 1,5 m (1,2 à 1,8 m) apresentando em sua base um nível de aproximadamente 0,4 m de espessura formado por pelotas de óxido de ferro seguido pelo topo da camada carbonática .....	56
Fotografia 5 - Bancada de extração de blocos no primeiro nível do calcrete. Onde podemos observar também o capeamento de solo e a faixa topograficamente irregular do topo do calcrete.....	57
Fotografia 6 - Vazios encontrados no primeiro nível de extração de blocos do Hardpan, os quais foram descritos por Penha (1994).....	57

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS .....</b>	<b>16</b>
1.1 INTRODUÇÃO .....	16
1.2 LOCALIZAÇÃO E ACESSO.....	16
1.3 OBJETIVOS .....	18
1.3.1 OBJETIVO GERAL.....	18
1.3.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	18
1.4 JUSTIFICATIVA.....	18
<b>CAPÍTULO 2 – GEOLOGIA REGIONAL .....</b>	<b>20</b>
2.1 BACIA DO IRECÊ .....	20
2.2 O CALCÁRIO CAATINGA.....	23
2.3 PERFIL CALCRETE.....	26
2.4 FORMAÇÃO DE CAVERNAS E OUTRAS ESTRUTURAS CÁRSTICAS.....	29
2.5 USO DO GPR EM ROCHAS CARBONÁTICAS .....	33
<b>CAPÍTULO 3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>36</b>
3.1 PRÍNCIPIOS DE FUNCIONAMENTO DO GPR .....	36
3.2 PROPAGAÇÃO DE ONDA ELETROMAGNÉTICAS .....	38
3.2.1 RELAÇÕES CONSTITUTIVAS.....	38
3.2.2 PARÂMETROS DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE ELETROMAGNÉTICAS.....	40
3.2.3 PERDA DE ENERGIA E ATENUAÇÃO .....	43
3.2.4 PROFUNDIDADE DE INVESTIGAÇÃO DO GPR .....	45
3.2.5 RESOLUÇÃO DO SISTEMA GPR .....	47
3.3 PROPRIEDADES DIELÉTRICAS DAS ROCHAS .....	47
3.4 AQUISIÇÃO DE DADOS DE GPR.....	50
3.4.1 TÉCNICAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	50
3.4.2 PARÂMETROS DE AQUISIÇÃO .....	52
<b>CAPÍTULO 4 - MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>54</b>
4.1 AQUISIÇÃO DE DADOS.....	54
4.2 PRÉ-PROCESSAMENTO .....	58
4.3 ETAPAS DO PROCESSAMENTO .....	58
<b>CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>66</b>
5.1 INTERPRETAÇÃO DOS DADOS .....	66

<b>CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES .....</b>	<b>77</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>79</b>

## CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

---

---

### 1.1 INTRODUÇÃO

A Geotecnia se utiliza de métodos para investigação do subsolo com o intuito de caracterizar as propriedades do solo sobre o qual haverá implantação de obras de engenharia. Na fase de investigação geotécnica é comum a utilização de métodos diretos, métodos no qual há acesso direto ao objeto de estudo por meio de perfurações, à exemplo de sondagens a percussão, a trado e rotativas. No entanto tais métodos são onerosos e não contínuos, de modo que nas últimas décadas tem crescido o uso de métodos indiretos, que se utilizam de propriedades físicas do solo, à exemplo do GPR (*Ground Penetrating Radar*), da sísmica rasa e da resistividade elétrica os quais são utilizados para a validação dos perfis de solo e rocha obtidos através de dois ou mais pontos de sondagem (DOS SANTOS, 2013; LAI; DÉROBERT; ANNAN, 2018).

O GPR destaca-se por ser um método de baixo custo, rápida execução e praticidade em transporte e manuseio e pode ser utilizado para detecção de vazios em rochas carbonáticas (DOS SANTOS; VILAS BOAS; BOTELHO, 2015).

A utilização do GPR na identificação de vazios nessas rochas tem função não só no planejamento da extração dos blocos de rochas como também atende às restrições ambientais vigentes na legislação. Outra utilidade deste estudo é a identificação de áreas sujeitas à formação de dolinas, sobre as quais não seriam adequadas as construções de vias de acesso ou edificações (FREIRE; BOTELHO, 2011).

O presente estudo vai utilizar do GPR para a detecção de vazios em rochas carbonáticas na Região de Ourolândia-BA. A área deste estudo está situada no município de Ourolândia e sua geologia é composta por rochas carbonáticas do Grupo Una da qual é extraída rochas ornamentais mais especificamente da Formação Caatinga (BELITARDO, 2010).

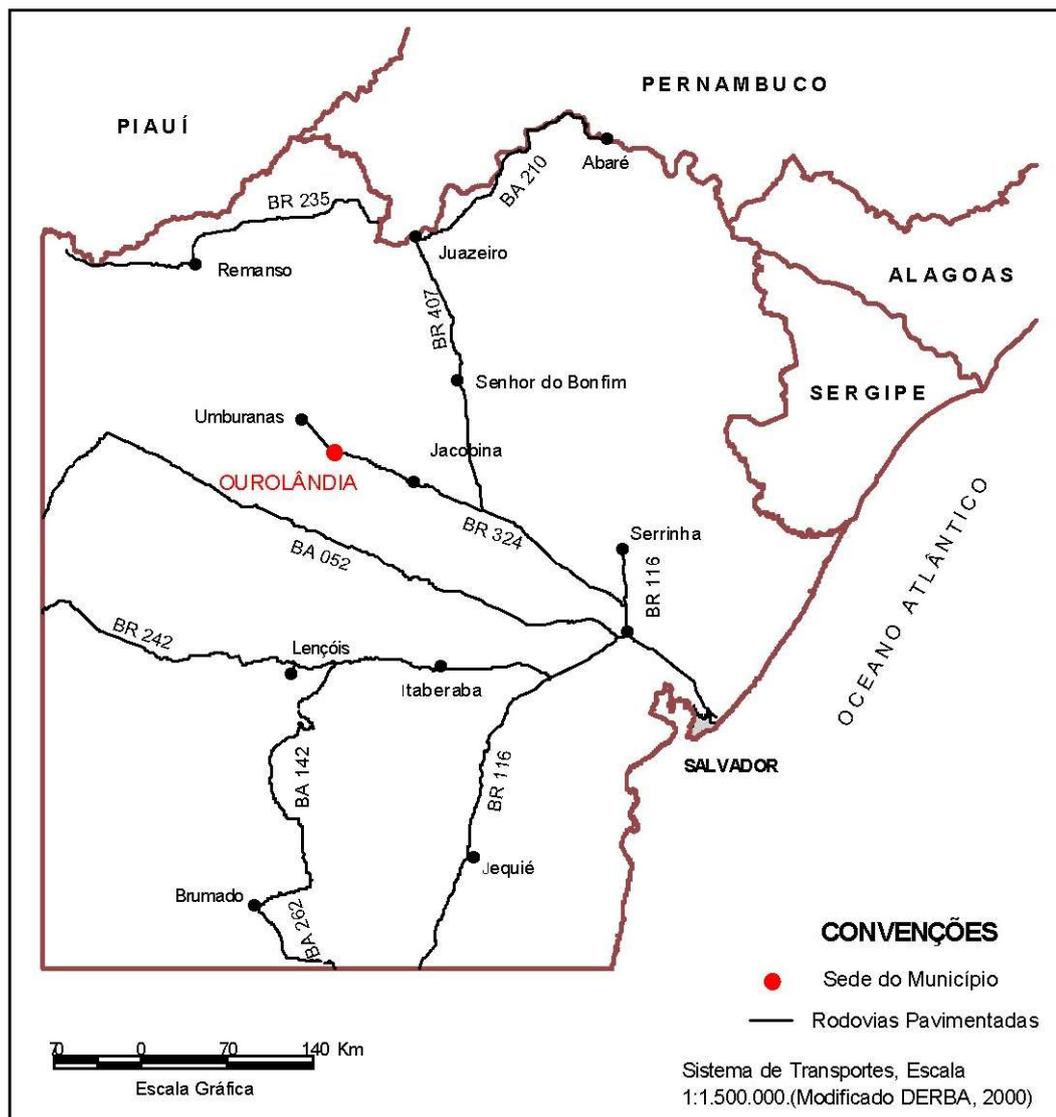
### 1.2 LOCALIZAÇÃO E ACESSO

A região de estudo se localiza no município de Ourolândia situado no território de Identidade do Piemonte da Diamantina do Estado da Bahia (SEPLAN, 2018). Tendo seu limite a leste com o Município de Jacobina, a oeste os municípios de Sento Sé e Umburanas, ao sul os municípios de Várzea Nova e Morro do Chapéu e ao norte o município de Mirangaba

(CPRM, 2005). Tendo área municipal de 1.333 Km<sup>2</sup> e pertencente as folhas cartográficas de Mirangaba (SC.24-Y-A-VI) e Umburanas (SC.24-Y-A-V) estas folhas estão na escala 1: 100.000 e foram produzidas pelo IBGE.

O acesso a partir de Salvador, capital do Estado, se dá através das rodovias federais BR-324 e BR-116 totalizando um percurso de 431 km (Figura 1).

**Figura 1 - Mapa de Localização do Município**



Fonte: Modificado de CPRM (2005).

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo a investigação de vazios dentro da camada de alteração do calcário Caatinga, denominada de *hardpan*, de onde se extrai blocos comerciais da rocha ornamental denominada Bege Bahia. Estes vazios variam em forma e dimensão sendo resultantes da dissolução das citadas rochas carbonáticas. A presença de vazios na camada produtiva diminui muito o seu valor comercial. Estudamos também o desempenho do método GPR na detecção destes vazios. Esta análise permite que se preserve o patrimônio espeleológico do Município de Ourolândia e evita que ocorra uma lavra predatória, posto que próximo a zona de cavernas também há muitos vazios centimétricos a milimétricos que inviabilizam o aproveitamento econômico do material.

### 1.3.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

O objetivo geral deste trabalho vai ser alcançado através dos seguintes objetivos específicos:

- (i) Levantar a bibliografia da Geologia na área de estudo;
- (ii) Adquirir dados de GPR em diferentes pedreiras;
- (iii) Processar os dados GPR obtidos;
- (iv) Interpretar os dados e melhor definir as cavidades através dos radargramas.

## 1.4 JUSTIFICATIVA

O município de Ourolândia tem como sua principal fonte de renda a indústria de extração e beneficiamento do calcário da Caatinga, que na verdade é um perfil de alteração do calcário, o qual é denominado de perfil calcrete (PENHA, 1994). O produto comercializado é conhecido comercialmente como mármore Bege Bahia, Travertino da Bahia ou ainda de Marta Rocha. Este material quando situado perto de cavernas exibe muitos espaços vazios (da ordem de decímetros a centímetros) que depreciam seu valor econômico. Portanto, o material extraído perto de zonas com cavernas é rejeitado pela indústria, causando a inútil retirada da vegetação nativa e a abertura de cavas que serão abandonadas. Vale acrescentar que a legislação ambiental sobre a forma do Decreto N° 6.640 de 2008 (BRASIL, 2008) atribui quatro classificações as

cavernas segundo sua importância: máximo, alto, médio e baixo. Dentre esta classificação somente as cavernas classificadas com nível de relevância máximo são integralmente protegidas. As de nível alto e médio podem ser exploradas sob compensação ambiental, por fim as cavernas de importância baixa não requerem nenhum tipo de compensação. O uso do método geofísico se mostra eficiente na detecção de vazios e cavernas além de ser um levantamento prático e de baixo custo possibilitando assim a avaliação da área que venha a ser possivelmente explorada.

## CAPÍTULO 2 – GEOLOGIA REGIONAL

---

---

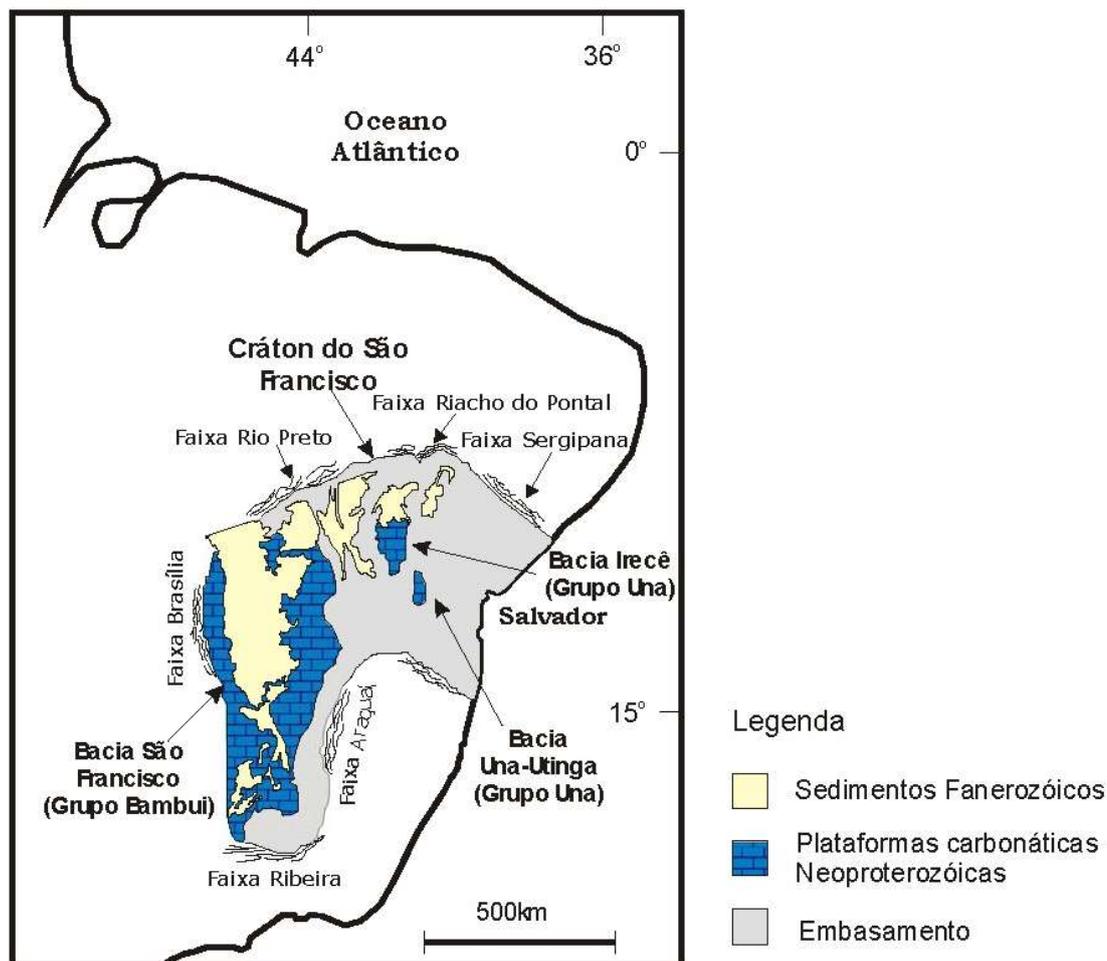
### 2.1 BACIA DO IRECÊ

Os levantamentos foram realizados na região do município de Ourolândia com o objetivo de encontrar vazios e cavernas que ocorram na rocha ornamental Bege Bahia, pois, como citado anteriormente, tais vazios depreciam o valor da rocha ornamental. Sendo este estudo fundamental para a definição da área a ser lavrada. O conhecimento da Geologia da região permite um melhor entendimento de como tais cavidades são formadas e como estas cavidades constituem sistemas de cavernas subterrâneas.

Os perfis de GPR foram realizados sobre a cobertura da Bacia do Irecê a qual se localiza na porção centro-oeste do estado da Bahia (Figura 2). Sendo esta bacia do tipo marinha epicontinental com idade entre 900 – 600 Ma (SOUZA et al. 1993). Tem como embasamento segundo Pedreira et al. (1975) rochas siliciclástica mesoproterozóicas do Grupo Chapada Diamantina as quais são quartizitos brancos a avermelhados, quartizitos arcossianos, metasiltitos, sericita-xisto e conglomerados oligomíticos da formação Morro do Chapéu que foram metamorfizados em face xisto verde.

A estratigrafia desta bacia tem como sedimentação inicial os sedimentos neoproterozóicos de origem glacial (diamictitos e tilitos) sobrepostos por uma espessa sequência de carbonatos (grainstone, lamito e dolomito) depositados em ambiente de planícies de maré (Figura 3). Segundo Pedreira et al. (1975) e Misi (1979) as rochas citadas constituem o Grupo Una. Este grupo é constituído pelas Formações Bebedouro e Formação Salitre, sendo a primeira uma sucessão glaciogênica neoproterozóica (diamictitos, tilitos, pelitos e arenitos) além disso são encontrados clastos de todas unidades litoestratigráficas do Grupo Chapada Diamantina em sua base (GUIMARÃES, 1996). A Formação Salitre segundo Misi e Veizer (1998) trata-se de uma plataforma carbonática depositada sobre uma discordância erosiva acima da Formação Bebedouro ou depositadas sobre os metassedimentos do embasamento. Entre tais rochas e o embasamento há discordâncias angulares e erosivas o que pode ser visto nos trabalhos de Kuchenbecker et al. (2011); Guimarães et al. (2011) e Brito Neves et al. (2012). Alguns autores subdividiram a Formação Salitre à exemplo de Pedreira et al., 1985 que cita 4 subdivisões, são elas: Irecê, Jussara, Nova América e Gabriel. Outra divisão foi feita por Misi e Veizer (1998), sendo subdivididas nas unidades C, B, B1, A e A1. Há consenso entre os autores citados que ocorreu dois ciclos transgressivos separados por um ciclo regressivo.

**Figura 2 - Localização das Bacias intracratônicas Neoproterozóicas (Una-Utinga, Irecê e São Francisco) e faixas móveis do Crátão do São Francisco**

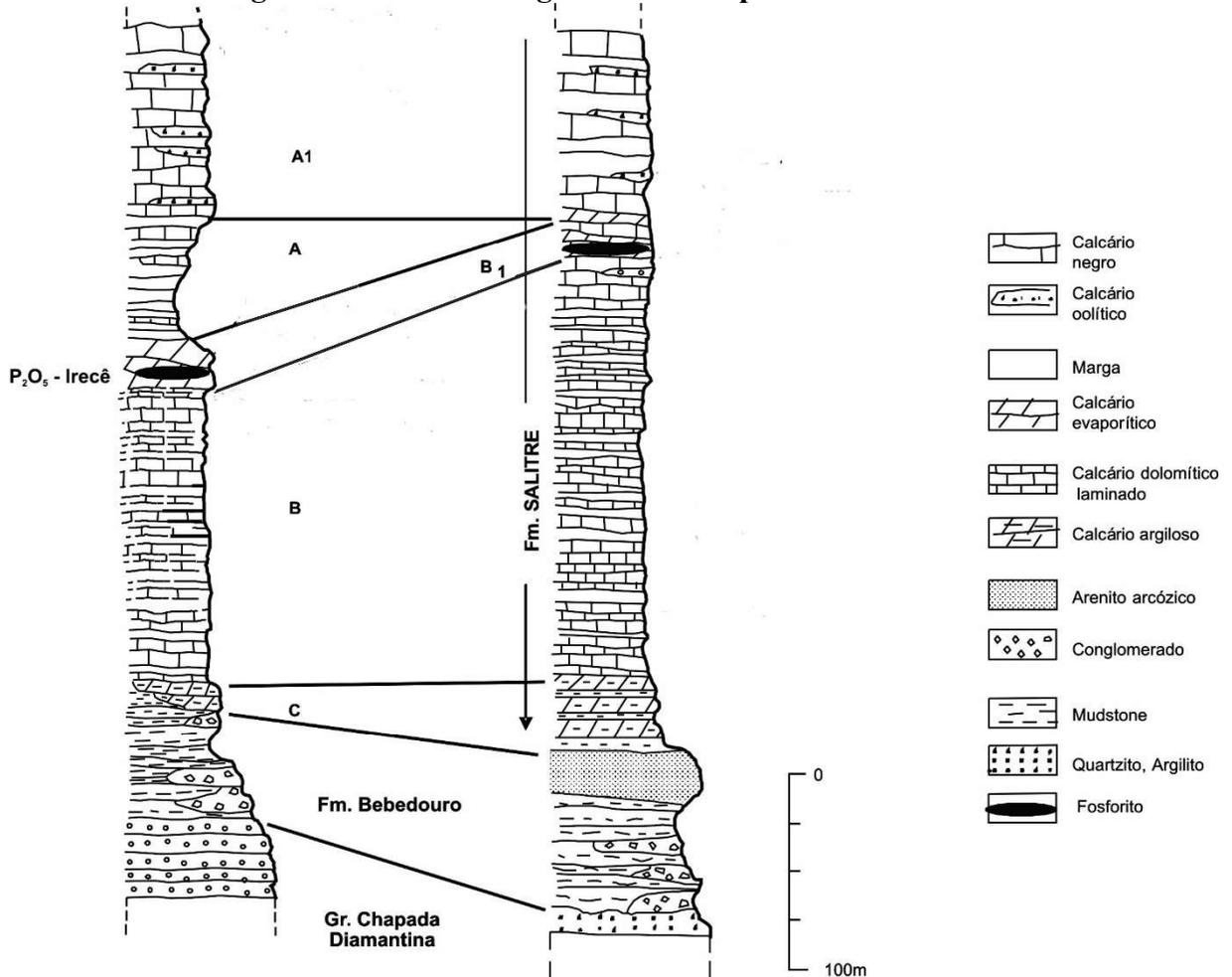


Fonte: Modificado de Misi e Kyle (1994 apud SANCHES 2012, p.09).

A Geologia estrutural da área está relacionada ao evento orogênico ocorrida na região que se trata do Ciclo Brasileiro-Pan Africano. Embora esteja no Cratón do São Francisco, a proximidade da bacia com os limites do Crátão e com a faixa Riacho do Pontal produziu um efeito pequeno deste ciclo orogênico na Bacia do Irecê durante a colisão das faixas móveis vizinhas e o crátão (ALMEIDA et al. 2000). A colisão gerou estruturas dúctil-rúpteis com orientação E-W com vergência para sul e baixo grau de metamorfismo na Bacia do Irecê como falhas de cavalgamento e dobras (KUCHENBECKER et al. 2011). O arcabouço estrutural pode ser visto na figura 4. As corbeturas pré-cambrianas da Chapada Diamantina estão relacionadas à dois sistemas deformacionais segundo Danderfer Filho (1990), Danderfer Filho et al. (1993) e Lagoeiro (1990). Sendo o primeiro um cinturão de dobramentos e empurrões regionais de caráter embrionário e de orientação preferencial NNW-SSE e com vergência ENE. O segundo sistema trata-se de grupamento de dobras e falhas de caráter *thin-skinned deformation*

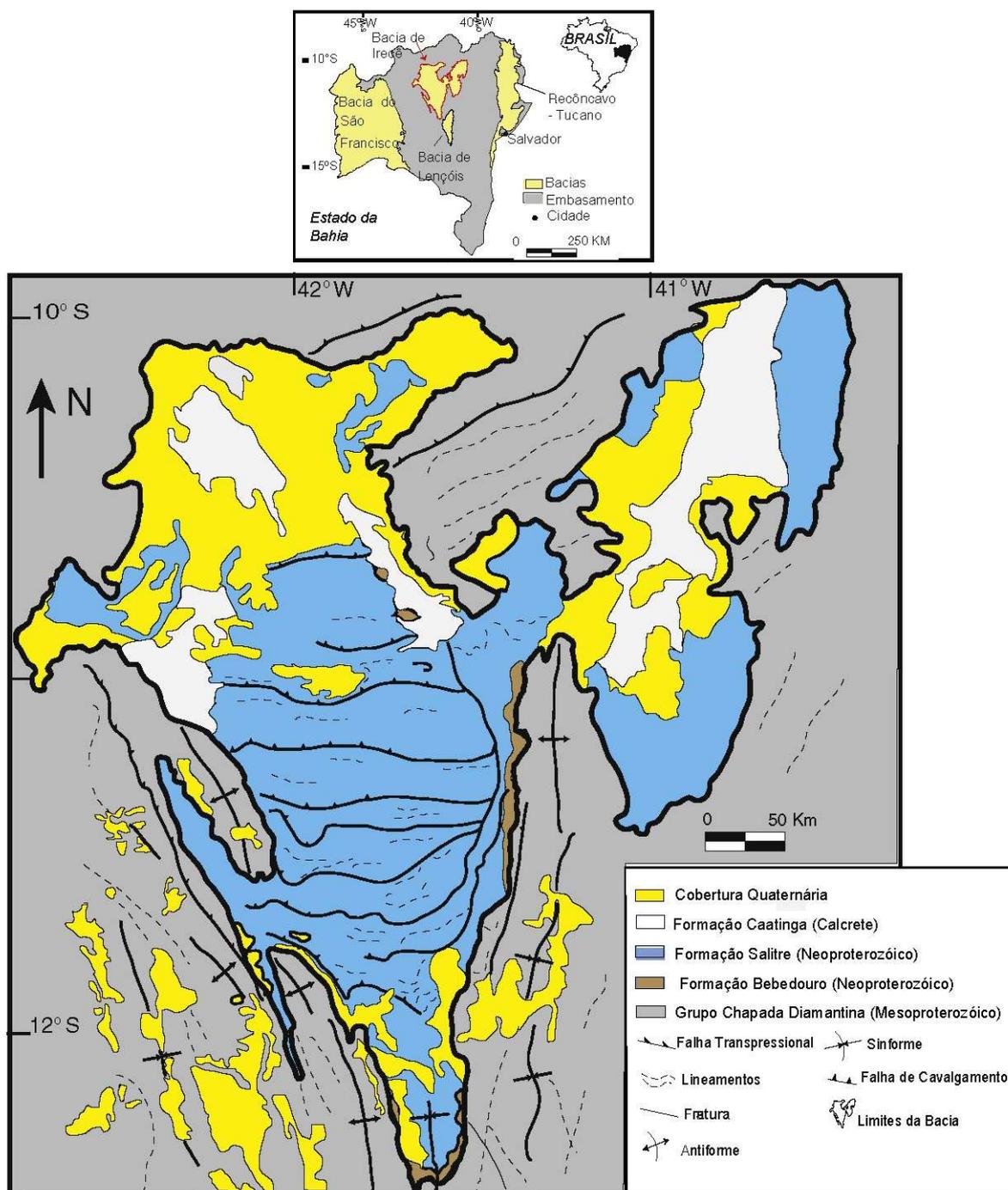
(epidérmico) o qual envolve os carbonatos do Grupo Una na porção Norte da Chapada Diamantina.

**Figura 3 - Perfil estratigráfico do Grupo Una na Bacia de Irecê**



Fonte: Modificado de Misie e Kyle (1994).

**Figura 4 - Mapa Geológico da Bacia de Irecê**

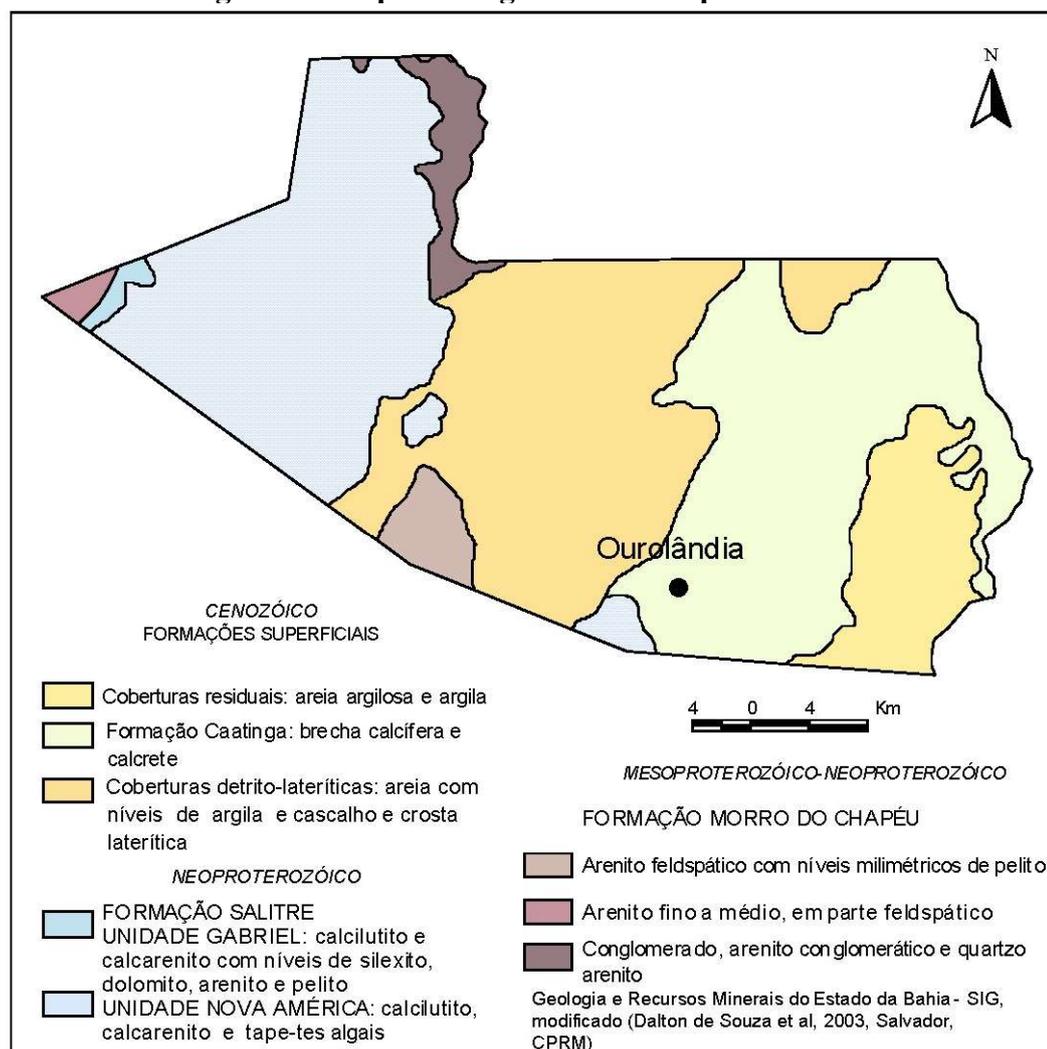


Fonte: Modificado de Borges et al. (2016).

## 2.2 O CALCÁRIO CAATINGA

O calcário Caatinga ocorre em uma vasta área geográfica no noroeste da Bahia, às margens dos rios Verde, Jacaré e Salitre. Este calcário ocorre no município de Orolândia como mostrado na figura 5 no qual é possível observar a extensão do Calcário Caatinga neste município.

**Figura 5 - Mapa Geológico do município de Ourolândia**

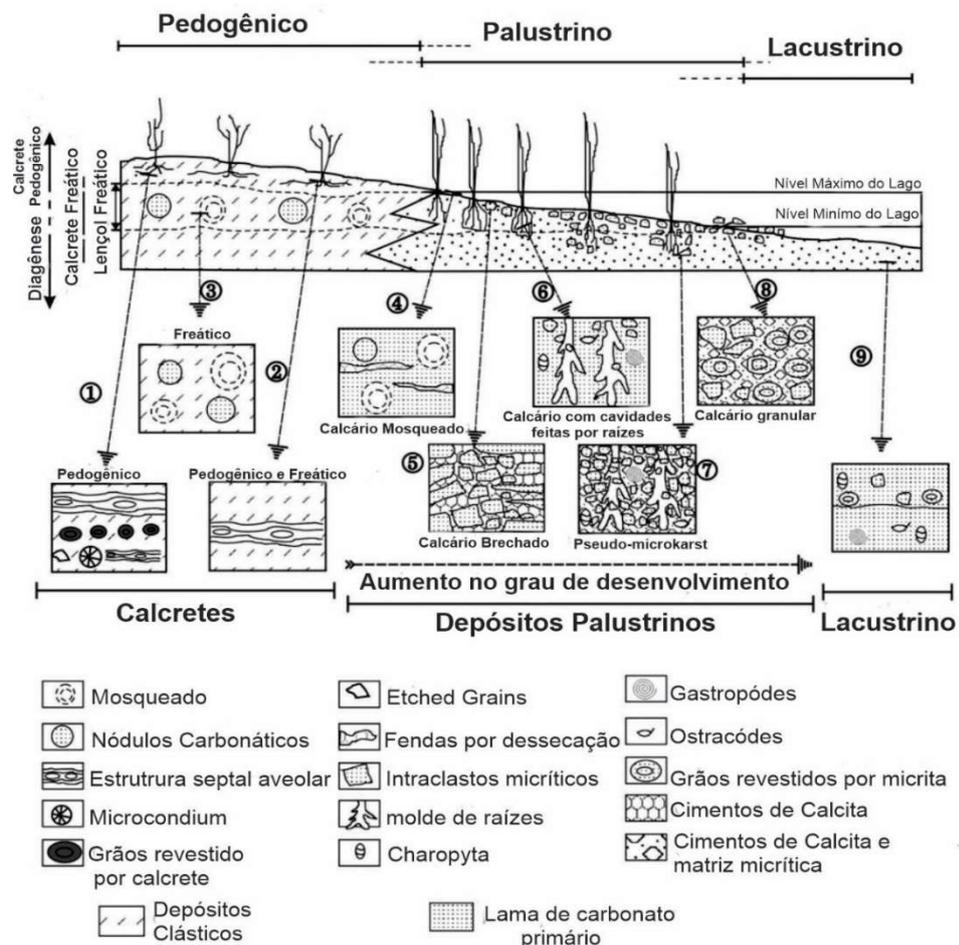


Fonte: Modificado de CPRM (2005).

O primeiro trabalho a caracterizar este calcrete e atribuir seu nome foi Branner (1911) que o caracterizou como sendo composto por calcários puros, massivos e pulverulentos. Este calcrete é resultado da dissolução e reprecipitação do calcário de origem na Formação Salitre (PEDREIRA, 1975). A disposição espacial dos afloramentos relacionados aos calcários Caatinga sugerem um episódio de barramento do Rio São Francisco, como proposto por Mabeoone et al. (1977). O uso de isótopos no trabalho de Suguio et al. (1980) sugere que a origem desses carbonatos é de água doce. Os estudos de Richie et al. (1982) delimitaram dois horizontes distintos resultado do intemperismo na região da Bacia sendo eles : A base (próxima ao contato com o embasamento) , trata-se de um horizonte de intemperismo isovolumétrico com duas subdivisões sendo uma friável e pulverulento e a segunda sendo uma crosta massiva a qual possui três sub-horizontes sendo eles friável, pouco quebradiço e crosta calcária. Os estudos de Pedreira et al. (1985) concluíram que há uma maior abundância do Calcário Caatinga

na porção nordeste da Bacia de Irecê, sendo a espessura variável de alguns centímetros a 5 metros que têm como característica a cor branca de modo geral, pulverulento e por vezes calcisiltitos e calcilitos. O trabalho de Penha (1994) no município de Ourulândia propôs que o perfil calcrete trata-se de um calcário poligenético o qual é constituído por um calcrete pedogênico no topo e um calcrete freático na base. Já segundo Auler (1999) trata-se de uma sequência de origem palustre na qual a oscilação do nível freático teria exposto estas rochas a ação de processo subaéreo. A vegetação tem papel preponderante neste tipo de carbonato modificando os depósitos e atribuindo a eles tanto feições de calcário pedogênico quanto de calcários lacustrinos. Na figura 6 é possível observar os ambientes nos quais se formam os tipos de calcrete pedogênico e o calcrete freático e as características petrográficas que as diferenciam.

**Figura 6 - As associações de fácies palustre-calcrete e os seus aspectos petrográficos comuns os quais são mostrados nas figuras de 1 a 9**



Fonte: modificado de Alonzo-Zarza (2003).

Auler et al. (2003) subdividiu o Calcário Caatinga em três unidades sendo elas: 1 – calcários esbranquiçados heterogêneos da Formação Caatinga; 2- tufo calcários fossilíferos e 3- areia carbonática no leito das drenagens. Os tufo calcários são classificados como um depósito do tipo “cascata” e estão associados a drenagens tributárias que atualmente estão secas e foram depositadas por águas saturadas em carbonato de cálcio. As areias carbonáticas são comuns ao longo do Rio Salitre são resultado da precipitação de calcita, principalmente por evaporação de águas saturadas em  $\text{CaCO}_3$  oriundo de formações carbonáticas mais antigas.

Borges et al. (2016) propõe uso do termo “Calcrete Caatinga” assim como Penha (1994) por ser um termo mais apropriado devido a sua gênese e o subdivide em calcrete pedogênico chamado de “Calcrete Caatinga” e outro de origem pedogenética e estruturalmente controlado denominado “calcrete com sistema de fraturas e acamadamento”.

### 2.3 PERFIL CALCRETE

O perfil calcrete tem sua origem na dissolução e reprecipitação do calcário de origem na Formação Salitre (PEDREIRA, 1975) de modo que o intemperismo físico e químico e a ação de organismos produzem um regolito em uma taxa proporcionalmente maior do que este é transportado. O presente trabalho baseia-se no estudo de Penha (1994) que cita os elementos necessários para a formação de um perfil calcrete sendo eles clima árido a semiárido, pluviosidade de 100 a 500 mm/ano, zona vadosa, subárea ou próxima a superfície, terreno plano horizontal ou quase horizontal, substrato estável e espesso, que permita o desenvolvimento de processos diagenéticos e tempo suficiente para permitir a ação de processos pedogenéticos.

O estudo de Penha (1994) realizado na região de Ouroândia caracterizou o perfil calcrete em horizontes segundo suas características (Figura 6). Os horizontes do topo para a base são:

- **Horizonte gredoso** – este horizonte corresponde ao solo formado por agentes do intemperismo físico, químico e biológico.
- **Horizonte Hardpan** – Apresenta um calcário duro, compacto e maciço os quais foram divididos em quatro tipos de acordo com os tipos de porosidade presentes nesses horizontes.
- **Horizonte Nodular** – Este horizonte tem sua espessura variável entre 0,30 m e 1,80 m. Apresenta um calcário com estrutura pseudobrechada e textura globular, cujos glóbulos possuem cores variadas do verde acizentado à oliva clara tem sua matriz micrítica parcialmente silicificada.

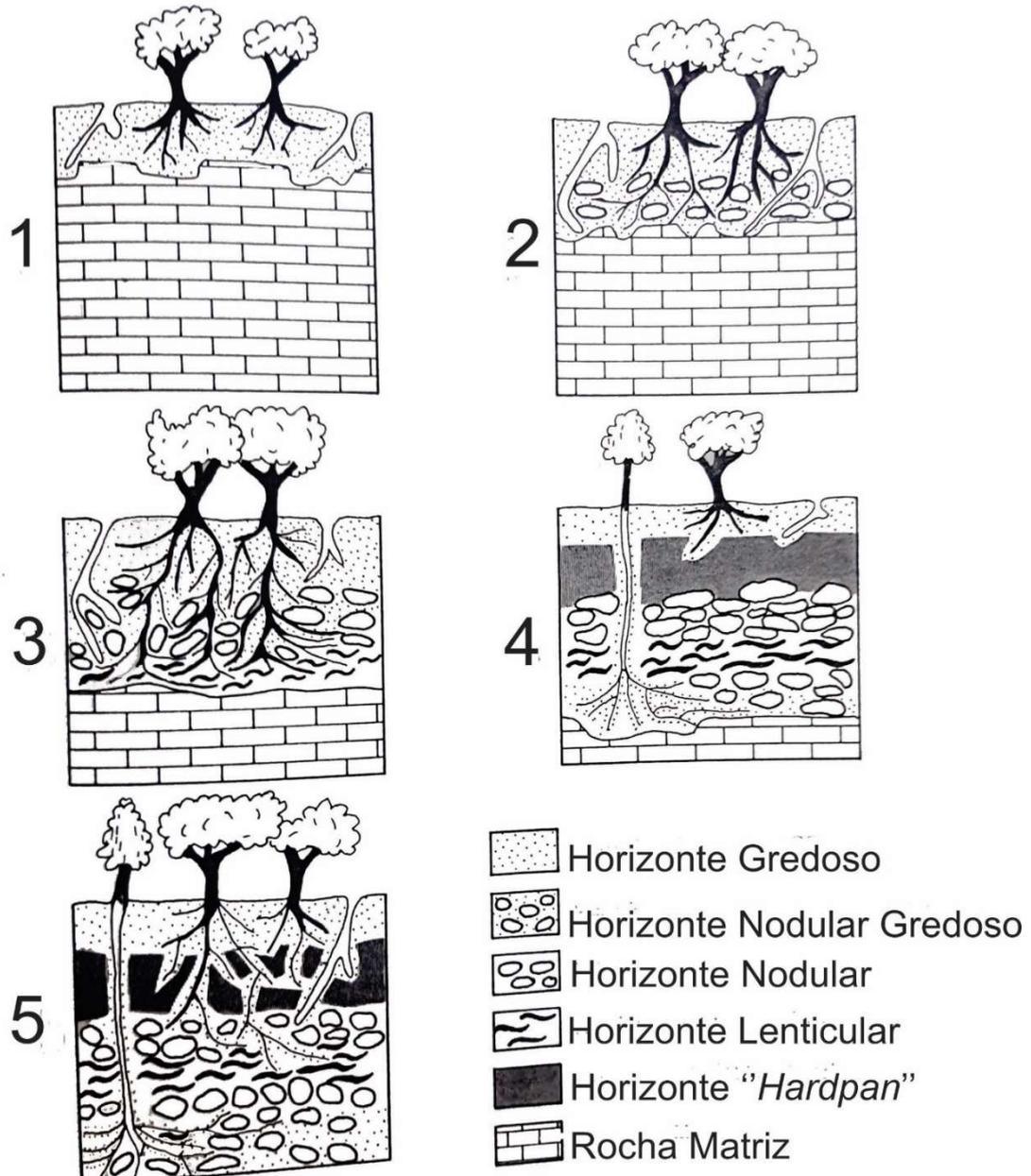
- **Horizonte lenticular** – O horizonte apresenta espessura variáveis entre 0,50 a 1,0 m. O qual possui estrutura lenticular sendo estas lentes sub-horizontais de intraclastos de textura grumosa ou microcristalinas (microespática a pseudoespática) e composição dolomítica.
- **Horizonte nodular gredoso** – tem espessura variável entre 0,2 a 1,80 m. Tem como característica sua consistência friável, aspecto pulverulento e também há raro glóbulos e intraclastos de granulometria areia a seixo. Os glóbulos (grumos e agregados) e intraclastos (calcítico e calcíticos-dolomíticos) ocorrem em uma textura flutuante dispersos numa matriz calcítica silicificada contendo até 30% de quartzo detrítico.

A formação do perfil Calcrete na região de Ourolândia foi descrita por Penha (1994) que a dividiu em 5 estágios como ilustrado na figura 7, são eles:

1. **Estágio 1- horizonte gredoso** - Nesta fase o intemperismo físico, químico e biológico atua sobre a rocha carbonática, o que leva ao faturamento do calcário e dissolução parcial do mesmo como consequência tanto da percolação de águas meteóricas quanto do movimento ascendente da água presente no lençol freático que se dá dentro dos poros da rocha. Observando a alta solubilidade das rochas de origem calcária para que se estabeleça um solo carbonático faz-se necessário que a taxa de formação seja superior à taxa de material transportado levando ao início da formação do horizonte gredoso.
2. **Estágio 2- horizonte nodular gredoso** - Sobre o solo formado na etapa anterior tem-se um aumento da biota sobre este solo com a proliferação dos vegetais e micro-organismo de modo que estes organismos contribuem para o aumento da percolação da água. Como consequência forma-se um material pulverulento e friável que apresenta seixos e matacões provenientes da rocha original. Forma-se dois horizontes o nodular gredoso e o gredoso que possuem como característica alta porosidade e permeabilidade.
3. **Estágio 3- nodular-gredoso-lenticular-** Os processos de dissolução e retrabalhamento da rocha carbonática são intensificados o que leva a reprecipitação e aumento na acumulação de carbonato de cálcio, espessando os horizontes gredoso e nodular gredoso formados anteriormente no Estágio 2. Os componentes da biota levam a uma ação mais intensa sobre o perfil formado isto ocorre no sentido horizontal e vertical como consequência da sua busca por água no lençol freático. O movimento lateral ajuda na formação do horizonte lenticular. Nessa fase é possível observar a presença de estruturas como micro-canais, cutans de poros e de grãos e

rizoides. Trata-se de um perfil mais amadurecido que no estágio anterior, que apresenta os horizontes: gredoso, nodular gredoso, nodular e lenticular.

**Figura 7 - Diagrama esquemático das diferentes fases de evolução do perfil calcrete**



Fonte: Penha (1994).

4. **Estágio 4 – gredoso-hardpan-nodular-lenticular**-Neste estágio há cimentação dos horizontes devido a ação contínua do processo de dissolução/reprecipitação e forma-se o horizonte *hardpan*. Este horizonte pode ser maciço quando sua origem é a litificação do nível gredoso, ou *hardpan* nodular se tem origem na cimentação dos horizontes nodular ou nodular gredoso.

5. **Estágio 5 – calcrete-** O perfil litificado trata-se então de um calcrete. Neste estágio há brechação e retrabalhamento *in situ*, ou seja, há uma volta ao estágio inicial. A atividade de líquens, algas, fungos e bactérias favorece ao surgimento de novas comunidades de plantas que iram agir mais uma vez sobre este novo substrato, esse retrabalhamento leva a formação de um horizonte *hardpan* conglomerático à pseudo brechado. Trata-se de um perfil composto uma vez que há repetição de horizontes devido ao retrabalhamento.

## 2.4 FORMAÇÃO DE CAVERNAS E OUTRAS ESTRUTURAS CÁRSTICAS

As estruturas cársticas são formadas pelo processo de dissolução das rochas pela água, sendo esta o agente mais importante na geração dos tipos distintos de modelado. Trata-se de terrenos nos quais a hidrologia e as diferentes morfologias são oriundas da combinação de rochas muito solúveis e de porosidade secundária bem desenvolvida (FORD e WILLIAMS, 1989; GUNN, 2003). As feições características das regiões cársticas segundo White (1988), são depressões fechadas de tamanho variável, drenagem superficial irregular, cavernas e sistemas de drenagem subterrâneo constituídos por um conjunto de condutos e fendas. São feições características desse tipo de relevo: algares, lapiás, dolinas, sumidouros, ressurgências, úvalas, poljes e cavernas.

De acordo com Gibert et al. (1994) o relevo pode ser definido com um complexo dinâmico, devido à ação da água que atua na formação, modelagem e deposição de inúmeras feições, sendo a gênese e evolução subordinadas ao padrão estrutural, grau de solubilidade da rocha e ação dos fluxos de água associadas a características ambientais os quais definem o funcionamento geológico e biológico de ambientes subterrâneos (PALMER, 1991).

A dissolução do carbonato de cálcio  $\text{CaCO}_3$  é basicamente o processo responsável pela formação das feições cársticas em regiões calcárias que pode ser representado pela equação química abaixo:



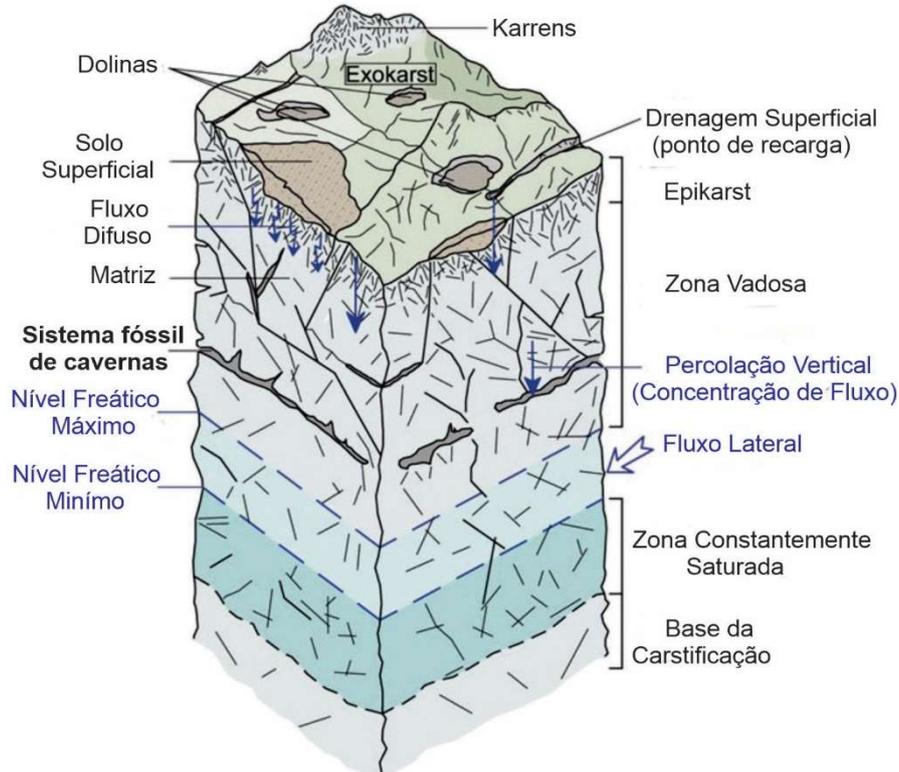
A água proveniente das chuvas ou dos corpos d'água absorve o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) na atmosfera e torna-se ácida devido à formação de ácido carbônico ( $\text{HCO}_3^-$ ). Ao percolar no solo a água absorve mais gás carbônico proveniente das raízes de plantas e do húmus aumentando assim a sua capacidade de dissolução da rocha e o alargamento das fraturas existentes na rocha. Sendo a dissolução o principal processo na formação do relevo cárstico é natural que com a evolução deste relevo haja um número maior de cavidades e que seu tamanho

também seja de maiores dimensões vindo a formar cavernas. Podendo assim ocorrer os colapsos de solo e rocha e também subsidências no modelado do relevo cárstico.

A evolução natural do sistema cárstico leva a formação das cavidades, no entanto não é o único fator responsável por tais vazios, sendo que a ação antrópica, ocupação urbana do solo, atividades agrícolas, captação de água subterrânea e a mineração, também podem levar a formação destas feições. Atividades desenvolvidas de forma desorganizada e predatória, sem a observância de critérios técnicos e onde não há planejamento acarretam um risco geológico o que pode levar a subsidências e colapsos de solo e rocha. Além disso tais fatores podem levar a degradação de áreas com valor espeleológico e a poluição de aquíferos cársticos (VESTENA et al. 2002).

Na região de estudo existe um aquífero que se desenvolveu sobre as rochas carbonáticas, o aquífero Salitre, que tem por característica ser um aquífero livre e heterogêneo, classificado como cárstico-fissural pois além do processo de dissolução há também a presença de fraturamentos (NOSSA et al. 2011).

**Figura 8 - Modelo de um aquífero cárstico não confinado (livre)**



Fonte: Modificado de Stevanovic (2016).

A necessidade de recursos hídricos na região principalmente para a cadeia produtiva da produção do mármore Bege Bahia levou a elaboração de um estudo para a caracterização dos

aquíferos cársticos e fissurais desta parte do semiárido baiano que compreende a bacia hidrográfica do Rio Salitre (SILVA, 2006). O resultado deste estudo foi a caracterização de três domínios aquíferos na região do rio Salitre: fissural, fissural metassedimentar e cárstico (Figura 9). Vale observar que a região de estudo deste trabalho (Ourolândia) se localiza sobre o domínio cárstico.

- **Aquífero fissural** – Tem por característica estar associado ao embasamento cristalino, apresentar menor área e os poços perfurados neste tipo de aquífero apresentaram em sua maioria vazões baixas ( $3\text{m}^3/\text{h}$  a  $25\text{m}^3/\text{h}$ ) tendo sua vazão média de  $8,5\text{ m}^3/\text{h}$  e águas de elevada salinidade. Sendo a maioria dos poços perfurados abandonados pois a água se apresenta imprópria ao consumo devido a salinidade.
- **Aquífero fissural-metassedimentar** – Este domínio está associado ao Grupo Chapada Diamantina o qual possui rochas aflorantes na borda da bacia as quais tem mergulho caindo para a parte central da bacia, na qual há sobreposição das rochas carbonáticas e pelíticas do Grupo. Há zonas de fraturas no Grupo Chapada Diamantina o qual tem aquíferos em sua maioria fissural-metassedimentar. Os poços sobre este tipo de aquífero possuem vazão média em torno de  $8\text{ m}^3/\text{h}$ , sendo que alguns casos atingem vazões superiores a  $30\text{ m}^3/\text{h}$ . As principais zonas de recarga estão associadas as rochas do Grupo Chapada Diamantina que possuem cotas elevadas, apresentam-se fraturadas e têm porosidade secundária alta. Observar que diferentes fácies e litologias existentes entre as formações do Grupo Chapada Diamantina, ou na região do contato com as rochas do Grupo Una, assim como desníveis na topografia geram condições favoráveis a retenção de águas subterrâneas.
- **Aquífero cárstico** – Distingui-se dois processos de carstificação, sendo um deles sobre a Formação Salitre, neoproterozóica, e outra sobre a formação Caatinga, pleistocênica, admite-se que os sistemas são penecontemporâneos. Os poços perfurados nesse sistema cárstico sobre as rochas do Grupo Uma possuem vazão média em torno de  $6,5\text{ m}^3/\text{h}$  alguns poços tem vazão superior à  $40\text{ m}^3/\text{h}$ . As fendas e canais de dissolução permitem o armazenamento e a circulação das águas. O carste da Formação Caatinga possui uma área de ocorrência menor que o carste desenvolvido sobre a Formação Salitre, além de ser raso estando associado ao leito do rio Salitre. Fatores como a pouca espessura, carstificação incipiente e ausência de condições estrutura favoráveis tornam o aquífero desenvolvido sobre a Formação Caatinga sem importância hidrogeológica. Por outro lado, a carstificação ocorrida sobre as rochas carbonáticas do grupo Uma o torna o principal aquífero da região do Salitre.



O estudo concluiu, a existência de reservas hídricas exploráveis do aquífero cárstico do Grupo Una com reservas estimadas em cerca de  $21 \times 10^9 \text{ m}^3$  (vinte um bilhões de metros cúbicos), sendo o maior potencial da bacia no trecho do alto rio Salitre. O estudo recomenda que a exploração do aquífero Una se dê através de poços tubulares de até 150 metros de profundidade. Observar que a importância do estudo não se restringe apenas a cadeia produtiva do Bege Bahia, ele também tem potencial de desenvolver atividades no campo da pecuária, agricultura irrigada e demais demandas da região.

## 2.5 USO DO GPR EM ROCHAS CARBONÁTICAS

O desempenho do método GPR, no que tange à penetração e a qualidade do sinal registrado é fortemente influenciado pelas propriedades elétricas e eletromagnéticas do meio investigado (constante dielétrica, condutividade elétrica e permeabilidade magnética). A condutividade elétrica é particularmente dependente da saturação de fluídos. Por isso é importante levar em consideração muitas características como porosidade e o tipo de fluido saturante, mais do que somente as propriedades dos minerais constituintes das rochas.

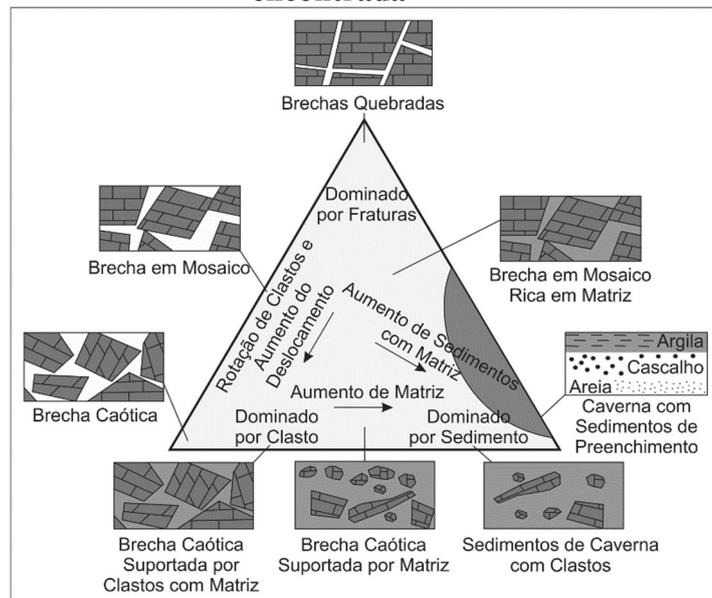
As rochas carbonáticas segundo Davis e Annan (1989) possuem os valores para a constante dielétrica entre 4 e 8, condutividade elétrica entre 0,5 e 2 mS/m, o que gera velocidades aproximadas de 0,12 m/ns. Vale observar que os valores acima citados constituem valores médios, podendo haver variações devido a presença de fluídos ou de diferentes teores de argila. A presença de vazios em rochas carbonáticas como microvazios, vazios centimétricos ou mesmo cavernas influenciam nos registros do GPR e, como já foi dito anteriormente, o material que preenche estes espaços também influenciam no resultado dos levantamentos realizados.

Os microvazios e os vazios centimétricos na área estudada são observados nas porções superficiais dos blocos extraídos, nas feições mais profundas são encontrados alguns vazios de dimensões métricas, sendo que alguns destes vazios chegam a formar cavernas.

Para uma interpretação mais realística dos dados faz-se necessário que o intérprete compreenda os tipos de depósitos sedimentares formados nas cavernas colapsadas e também das suas relações geométricas complexas (JESUS, 2012). Os sistemas de paleocavernas apresentam uma história complexa de formação e também apresentam uma heterogeneidade acentuada seja ela vertical ou horizontal, devido a múltiplas fases de carstificação e soterramento. Observa-se que o material que rodeia ou preenche cavernas colapsadas podem ter origens diversas a exemplo de fragmentos de rochas oriundos do teto ou parede colapsadas,

materiais precipitados em cachoeiras ou represas, calcário pulverulento (maior ocorrência) e uma mistura destes carbonatos. Foi proposta uma classificação por Loucks (1999) a qual engloba os preenchimentos mais frequentes de cavernas, trata-se de um digrama triangular (Figura 10).

**Figura 10 - Classificação de brechas e sedimentos de preenchimento de cavernas. A área sombreada na porção inferior direita indica que nenhuma característica da caverna é encontrada**

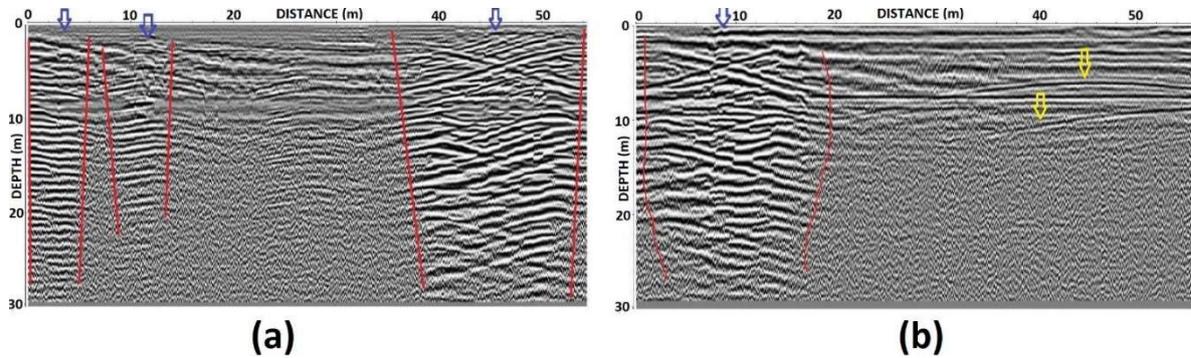


Fonte: Modificado de Loucks (1999).

O uso de GPR em rochas carbonáticas da Bacia de Irecê têm obtido bons resultados, são exemplos bem-sucedidos os trabalhos de Botelho e Araújo (1996); Botelho e Mufti (1998); Heimer (2010). Os trabalhos citados anteriormente tiveram como objetivo estudar a estrutura interna do maciço, reconhecimento de fraturas, a presença de canais de dissolução e a existência de vazios. Freire e Botelho (2011) utilizaram o método para o estudo de vazios no calcete caatinga na região de Ourulândia-Bahia.

O estudo de Santos et al. (2015) utilizou o GPR para o estudo de vazios formados próximo às rodovias baianas na Bacia de Irecê, mais uma vez o método provou ser útil na identificação de vazios (Figura 11).

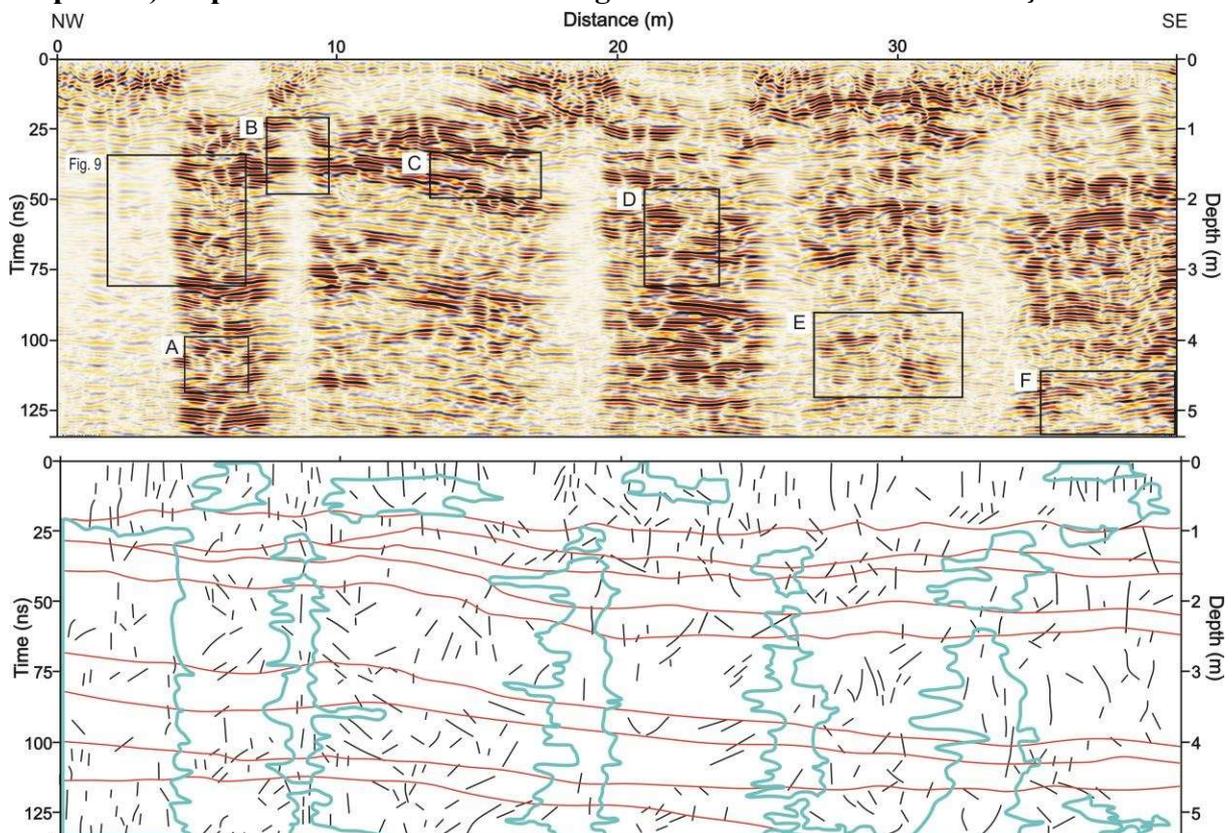
**Figura 11 - Radargramas interpretados em profundidade do levantamento realizado na BA-04 6, para os perfis: a) P47, b) P49. As possíveis regiões de cavernas estão destacadas em vermelho, e indicadas por setas azuis. As setas amarelas indicam hipérboles de difração**



Fonte: Santos et al., (2015).

Conti (2018) utilizou atributos de GPR na caracterização da distribuição de porosidade estimada em rochas carbonáticas fraturadas e carstificadas da Formação Salitre na Bacia de Irecê. Zonas de baixa amplitude no radargrama estão associados a rochas carbonáticas alteradas ao redor de fraturas sub-verticais (Figura 13).

**Figura 12 - Assinatura de GPR da unidade fraturada e alterada (zonas de baixa amplitude) na pedra estudada. Os retângulos indicam áreas onde há feições cársticas**



Fonte: Conti (2018).

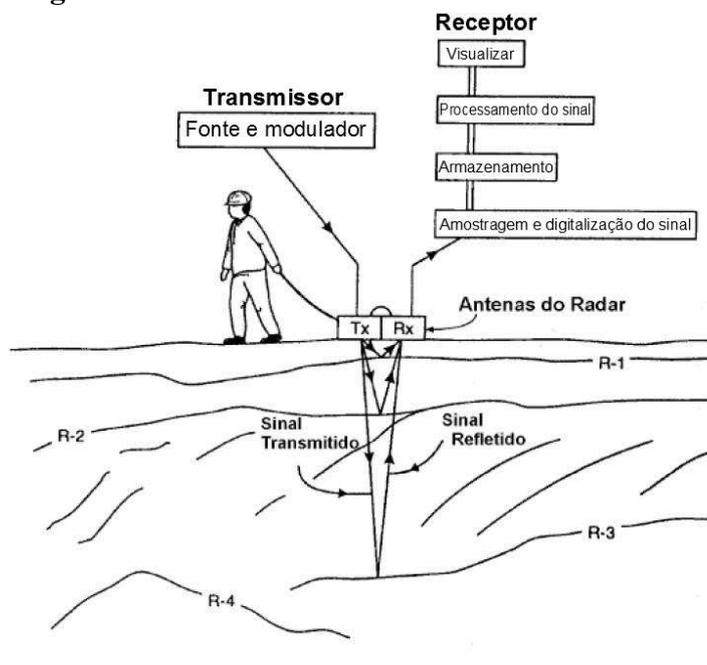
## CAPÍTULO 3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 3.1 PRÍNCIPIOS DE FUNCIONAMENTO DO GPR

O GPR (*Ground Penetrating Radar*) refere-se a uma técnica utilizada na emissão e detecção de ondas eletromagnéticas com intervalos de frequência variando entre 1,0 e 2500 MHz, na faixa de frequência das ondas de rádios, correspondendo no espectro eletromagnético às ondas de alta frequência. O método se assemelha ao método sísmico de reflexão. No entanto diferem-se quanto ao tipo da onda uma vez que o método GPR se baseia na propagação de ondas eletromagnéticas e o método sísmico nas ondas mecânicas (PESTANA e BOTELHO, 1997).

A técnica tem inúmeras aplicações: na Geologia, localizar e mapear feições na subsuperfícies e estruturas geológicas, na prospecção de petróleo e minerais, solos, água subterrânea, áreas de contaminação; na engenharia geotécnica auxilia na determinação de estruturas e patologia das construções dentre outros.

**Figura 13 - Elementos básicos de um sistema GPR**



Fonte: Reynolds (1997).

O sistema de GPR é constituído basicamente por uma fonte que gera pulsos elétricos de alta frequência, uma antena transmissora, uma antena receptora e uma unidade de controle

digital que tem por função armazenar os dados. Esta unidade de controle além de armazenar os dados, permite a realização de um pré-processamento e visualização dos dados no momento da aquisição.

O mecanismo básico de funcionamento do GPR consiste na geração de um pulso de curta duração e alta voltagem pela fonte, que é transmitido na antena transmissora. Ao passar pelo subsolo parte dessa onda é refletida quando há contraste de propriedades elétricas, são elas a condutividade elétrica e a permissividade dielétrica, o que leva a reflexão de parte da energia de volta a superfície, enquanto outra parte da energia é refratada no meio (Figura 13). As variações das propriedades elétricas estão associadas as variações do tipo de rocha assim como

**Tabela 1 - Permissividade dielétrica relativa ( $\epsilon_r$ ) e condutividade elétrica ( $\sigma_0$ ) de alguns materiais**

<b>Materiais Secos</b>	$\epsilon_r$	$\sigma_0$ (mS/m)	<b>Materiais Saturados</b>	$\epsilon_r$	$\sigma_0$ (mS/m)
Ar	1	0	Água destilada	81	0,01
Areia de cascalho	2 – 6	0,01	Água fresca	81	0,5
Argila	5	2	Água do mar	81	3000
Folhelho e Silte	5	1	Areia	20 - 30	0,1-1
Calcário	4	0,5	Silte	10	1 – 10
Solo arenoso	2,6	0,14	Argila	40	1000
Solo argiloso	2,4	0,27	Solo arenoso	25	6,9
Sal	5 – 6	0,01 – 1	Solo argiloso	15	50
Granito	5	0,01	Arenito	20 – 30	40
Basalto	6	1	Siltito	30	100
Diabásio	7	10	Folhelho	7	100
Ferro	1	109	Calcário	8	2
PVC	8	0	Granito	7	1
Asfalto	3 – 5	0	Basalto	8	10
Concreto	5,5	0	Diabásio	8	100
			Concreto	12,5	0

Fonte: Davis e Annan (1989).

a presença de fluídos na rocha ou presença de argila (Tabela 1). A onda refletida é captada pela antena receptora sendo esse sinal amostrado, digitalizado e armazenado. O armazenamento do

sinal se dá em função do seu tempo duplo de trânsito, que nada mais é do que o tempo que a onda eletromagnética leva para sair da antena transmissora para a interface na qual há reflexão e depois ser captada pela antena receptora. Observar que esse tempo é expresso em nanossegundos.

Há duas possibilidades de configuração das antenas: monoestático e biestático. Na configuração monoestática as antenas transmissora e receptora estão no mesmo módulo, já no modo biestático as antenas estão em módulos separados. Para o presente estudo foi utilizada uma antena no modo biestático.

### 3.2 PROPAGAÇÃO DE ONDA ELETROMAGNÉTICAS

Os fundamentos teóricos para o método GPR são as equações de Maxwell, as quais descrevem os princípios do comportamento dos diferentes materiais submetidos a campos eletromagnéticos, eletrostáticos ou dinâmicos. Para meios magnéticos e/ ou polarizáveis as equações de Maxwell são:

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

Sendo  $\vec{E}$  o vetor campo elétrico (V/m);  $\vec{B}$  é o vetor indução magnética (T);  $\vec{J}$  é o vetor densidade de corrente elétrica (A/m<sup>2</sup>);  $\vec{D}$  é o vetor deslocamento elétrico (C/m<sup>2</sup>);  $\vec{H}$  é o vetor campo magnético (A/m);  $\rho$  é a densidade de carga elétrica (C/m<sup>3</sup>); e  $t$  é o tempo (s);

#### 3.2.1 RELAÇÕES CONSTITUTIVAS

As relações constitutivas descrevem as propriedades eletromagnéticas de um determinado meio macroscopicamente, ou seja, define o comportamento médio dos constituintes da matéria quando as ondas eletromagnéticas se propagam nesses meios. Sendo três relações constitutivas:

1. Relação entre densidade de corrente elétrica e condutividade:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (5)$$

Esta relação trata-se da lei de Ohm e descreve o fluxo de cargas livres em um material com condutividade  $\sigma$  que está sobre a influência de um campo elétrico. Sendo a condutividade elétrica expressa por S/m e representa a capacidade de um material conduzir corrente elétrica.

2. Relação entre permissividade dielétrica e campo elétrico:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (6)$$

As cargas ligadas na estrutura de um material quando submetidos a um campo elétrico tem seu deslocamento caracterizado pela permissividade dielétrica  $\epsilon$ . Um material submetido a um campo elétrico tem suas cargas deslocadas o que resulta em um armazenamento de energia no material. Ao cessar a ação do campo elétrico, as cargas retornam a suas posições de equilíbrio, liberando energia. A permissividade relativa ou constante dielétrica é definida como:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (7)$$

Na qual  $\epsilon_0$  é a permissividade dielétrica do vácuo, que possui valor de  $\epsilon_0 = 8,89 \times 10^{-12} \frac{F}{m}$ .

3. Relação entre indução magnética e campo magnético:

A permeabilidade magnética  $\mu$  como o momento magnético dos átomos e das moléculas responde a um campo magnético.

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (8)$$

Para o uso do GPR os meios são considerados como homogêneos isotrópicos e lineares de modo que as propriedades condutividade elétrica, a permissividade dielétrica e a permeabilidade magnética são tratadas como quantidades escalares independentes do campo eletromagnético aplicado no material.

### 3.2.2 PARÂMETROS DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE ELETROMAGNÉTICAS

Os parâmetros que regem a propagação das ondas de GPR são a velocidade de propagação e a atenuação. Estas duas propriedades dependem das propriedades elétricas do meio (constante dielétrica e condutividade).

Na faixa de operação do GPR 10 a 1000 MHz, as propriedades de polarização sobrepõem as propriedades condutivas para a maioria dos materiais geológicos, por isso a constante dielétrica é utilizada para descrever a propagação de ondas de radar. Sendo a função dielétrica complexa (permissividade relativa) segundo Davis e Annan (1989):

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' + i\epsilon_r'' \quad (9)$$

na qual  $\epsilon_r'$  é a parte real e  $\epsilon_r''$  é a parte imaginária da função dielétrica. A parte imaginária da função dielétrica está relacionada com as perdas de energia durante a propagação da onda eletromagnética.

Separando  $\epsilon_r''$  em seus componentes de alta frequência e condutividade de corrente contínua. Pode-se escrever a equação 9 como:

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' + i \left[ \epsilon_r'' + \frac{\sigma_{dc}}{\omega \epsilon_0} \right] \quad (10)$$

na qual  $\sigma_{dc}$  é a condutividade (S/m),  $\omega$  é a frequência angular ( $2\pi f$ ),  $\epsilon_0$  é a permissividade dielétrica no vácuo ( $8,89 \times 10^{-12}$  F/m) e  $\epsilon_r''$  é um termo que depende da frequência e está associado com as perdas associadas ao fenômeno de relaxação.

Segundo Reynold (1997) a velocidade da onda eletromagnética em um meio é dada pela equação:

$$v = \frac{c}{\left[ \frac{\mu_r \epsilon_r}{2} (\sqrt{1+P^2}+1) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (11)$$

na qual  $c$  é a velocidade da luz no vácuo ( $c = 3 \times 10^8$  m/s),  $\mu_r$  é a permeabilidade magnética relativa,  $\epsilon_r$  é a permissividade dielétrica relativa e  $P$  é o fator de perda expresso por:

$$P = \frac{\sigma}{\omega \epsilon} \quad (12)$$

na qual  $\sigma$  é a condutividade elétrica,  $\omega$  é a frequência angular e  $\epsilon$  é a permissividade dielétrica. Para materiais resistivos como matérias geológicas não magnético e com baixa perda, tem-se que  $\mu_r \approx 1$ ,  $P \approx 0$  e  $\epsilon_r = \epsilon'_r$ , simplificando a equação da velocidade da onda eletromagnética que fica na sua forma reduzida:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon'_r}} \quad (13)$$

na qual  $\epsilon'_r$  é a parte real da constante dielétrica.

Segundo Davis e Annan (1989), em um meio com baixo fator de perda a atenuação da onda de radar é expressa por:

$$\alpha = \frac{1,69 \times 10^3}{\sqrt{\epsilon'_r}} \text{ dB/m} \quad (14)$$

Na qual  $\sigma = \sigma_{ac} + \omega \epsilon''_r \epsilon_0$  se relaciona com as perdas devido a condutividade de corrente contínua e com perdas dielétricas.

Observa-se na tabela que a constante dielétrica da água é 80 enquanto a maior parte dos materiais geológicos secos possuem valores entre 4 e 8. Devido a essa diferença a velocidade do sinal de radar depende muito do seu conteúdo de água na formação geológica.

A relação entre a velocidade da onda eletromagnética e a frequência para diferentes condutividades foi representada por Davis e Annan (1989) (Figura 14). Observa-se que a velocidade se apresenta constante para as condutividades menores que 100 mS/m e frequência entre 10 e 1000 MHz, como citado anteriormente esta é a faixa de frequência de operação do GPR. Há um aumento de velocidade para frequências superiores a 1000 MHz devido a

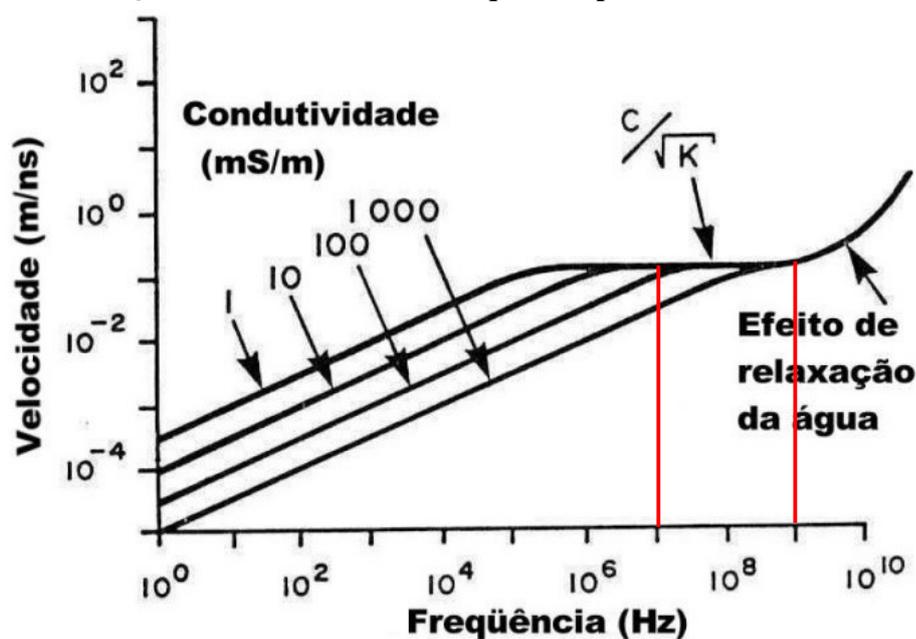
relaxação da molécula de água. Observar que devido ao valor constante da velocidade para a faixa de frequência do método GPR não há dispersão do sinal pela relação velocidade com a frequência.

**Tabela 2 - Valores de constante dielétrica ( $\epsilon'_r$ ), condutividade elétrica ( $\sigma$ ), velocidade ( $v$ ) e atenuação ( $\alpha$ ) para alguns materiais geológicos a 100 MHz**

Material	$\epsilon'_r$	$\sigma$ (mS/m)	$v$ (m/ns)	$\alpha$ (dB/m)
Ar	1	0	0,3	0
Água destilada	80	0,01	0,033	$2 \times 10^{-3}$
Água doce	80	0,5	0,033	0,1
Água do mar	80	$3 \times 10^4$	0,01	$10^3$
Areia seca	3 - 5	0,01	0,15	0,01
Areia saturada	20 - 30	0,1 - 1,0	0,06	0,03 - 0,3
Calcário	4 - 8	0,5 - 2	0,12	0,4 - 1
Folhelho	5 - 15	1 - 100	0,09	1 - 100
Silte	5 - 30	1 - 100	0,07	1 - 100
Argila	5 - 40	2 - 1000	0,06	1 - 300
Granito	4 - 6	0,01 - 1	0,13	0,01 - 1
Sal seco	5 - 6	0,01 - 1	0,13	0,01 - 1
Glelo	3 - 4	0,01	0,16	0,01

Fonte: Davis e Annan (1989).

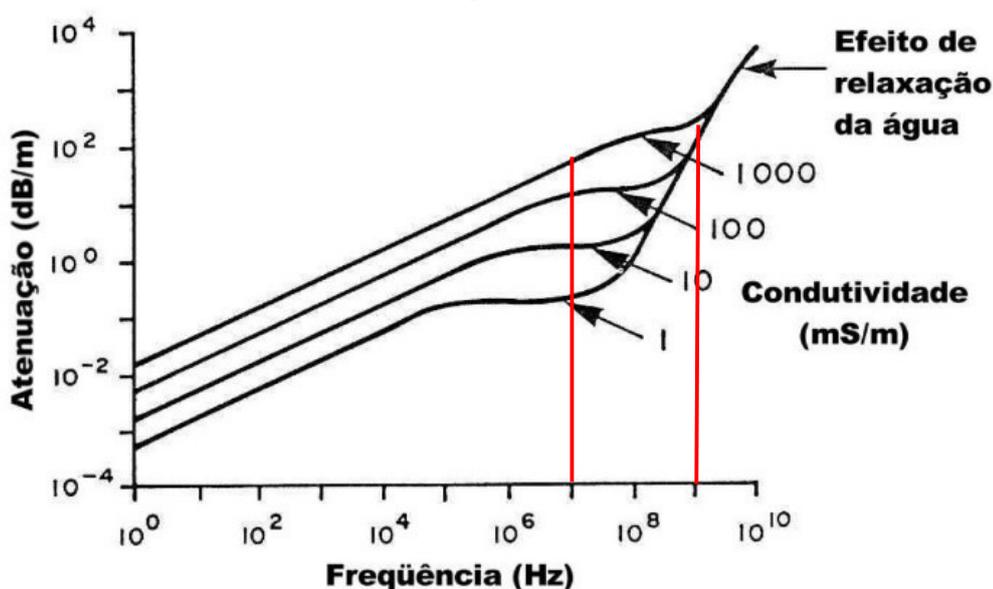
**Figura 14 - Relação entre velocidade e frequência para diferentes condutividades**



Fonte: Modificado de Davis e Annan (1989).

A relação entre atenuação e frequência para materiais com diferentes condutividades com constante dielétrica igual a 4 é mostrado na figura 15. Na faixa de frequência do GPR (10 a 1000 MHz) tem-se que a atenuação permanece basicamente constante para diferentes condutividades. Acima de 1000 MHz pode ser observado no gráfico que a atenuação cresce abruptamente devido ao efeito de relaxação da água. Este efeito consiste na absorção de energia da onda eletromagnética pela molécula de água e torna-se mais pronunciado com o aumento da frequência até o valor de relaxação, observando na figura este valor é  $10^{10}$  Hertz ou seja 10 GHz.

**Figura 15 - Relação entre atenuação e frequência em diferentes condutividades**



Fonte: Davis e Annan (1989).

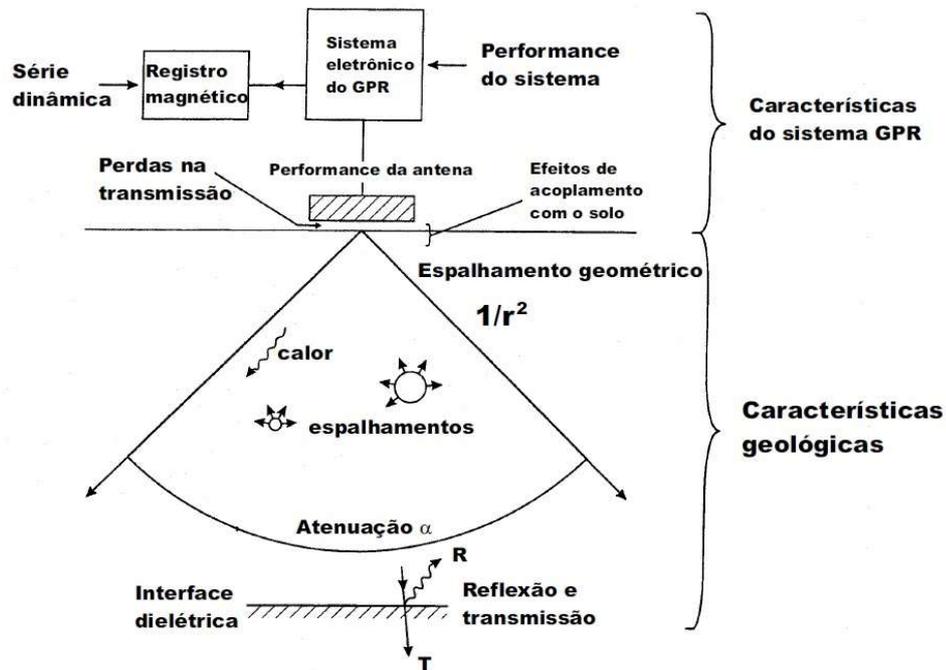
### 3.2.3 PERDA DE ENERGIA E ATENUAÇÃO

A profundidade de penetração do GPR é influenciada diretamente pela perda de energia, então faz-se necessário o entendimento dos fatores que causam tal perda de modo que se obtenha bons resultados na aquisição (Figura 16). Um dos principais fatores de perda de energia é a atenuação da onda de radar a qual depende da frequência do sinal de radar, da condutividade, da constante dielétrica e da permeabilidade magnética do meio.

Outro fator que leva a perda de energia é o espalhamento geométrico, devido ao sinal de GPR ser emitido na forma de feixes com abertura angular em forma de cone. A energia é espalhada causando uma diminuição da energia por unidade de área a uma taxa proporcional à  $1/r^2$  na qual  $r$  é o caminho percorrido pelo sinal a partir da fonte. A difração também é

responsável por perda de energia, ela ocorre quando há corpos com dimensão menor ou igual ao comprimento de onda de modo que ocorre um espalhamento de energia de forma aleatória.

**Figura 16 - Principais processos que influenciam na perda do sinal de radar**



Fonte: Reynolds (1997).

Uma redução da amplitude no sinal de radar ocorre quando este incide em interfaces que possuem contraste de constante dielétrica o que leva a reflexão e transmissão do sinal de GPR. O coeficiente de reflexão para uma interface plana com o sinal incidente normal a interface é expresso por:

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon'_{r1}} - \sqrt{\epsilon'_{r2}}}{\sqrt{\epsilon'_{r1}} + \sqrt{\epsilon'_{r2}}} \quad (15)$$

na qual R é o coeficiente de reflexão,  $\epsilon'_{r1}$  é a constante dielétrica do meio 1 e  $\epsilon'_{r2}$  é a constante dielétrica do meio 2. A quantidade de energia refletida será maior se houver um grande contraste de constante dielétrica entre as interfaces. Por outro lado, se o contraste de constante dielétrica entre as camadas for extremamente baixo não será capaz a detecção da reflexão do sinal de GPR pois a energia refletida será muito pequena.

### 3.2.4 PROFUNDIDADE DE INVESTIGAÇÃO DO GPR

A profundidade de penetração é afetada pelos fenômenos da atenuação e os fatores de perda de energia do Sinal. Segundo Davis e Annan (1989) os fatores de maior relevância que afetam o sinal são a performance do sistema, atenuação do sinal e as propriedades de reflexão nas interfaces nas quais as propriedades elétricas variam. O alcance do sinal pode ser definido pela expressão:

$$Q = \frac{\xi_T \xi_R G_T G_R g \sigma_c e^{-4\alpha L}}{64 \cdot 3 f^2 L^4} \quad (16)$$

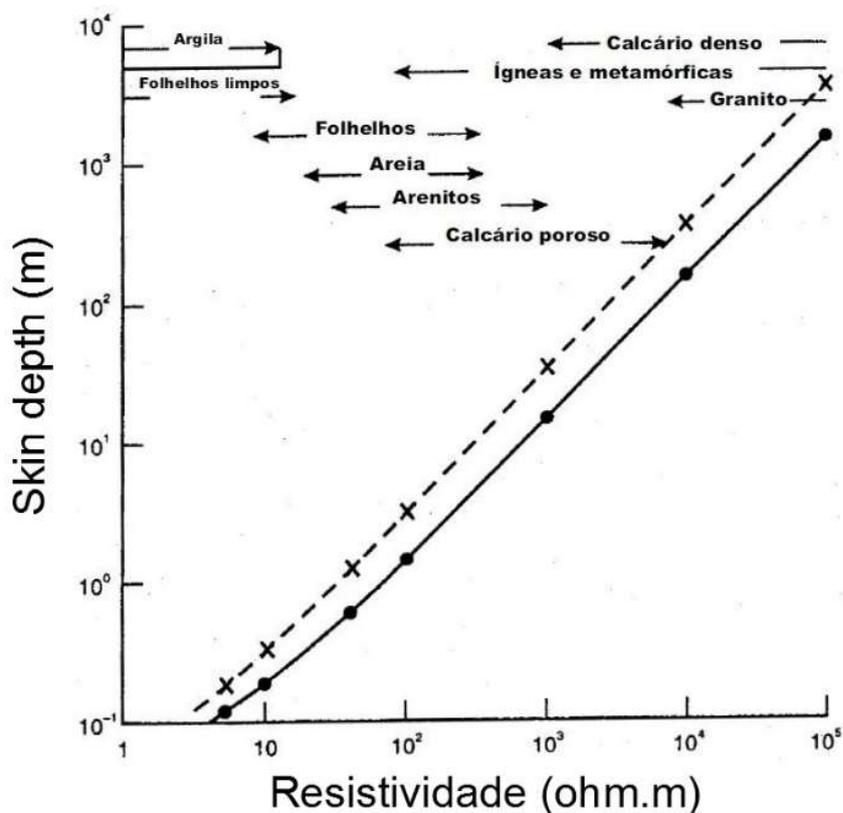
na qual  $Q$  trata-se da performance do sistema ou razão entre a amplitude do sinal transmitido e a mínima sensibilidade registrada,  $\xi_T$  é a eficiência da antena transmissora,  $\xi_R$  é a eficiência da antena receptora,  $G_T$  é o ganho na antena transmissora,  $G_R$  é o ganho na antena receptora,  $L$  é a distância do alvo,  $\alpha$  é a atenuação do meio,  $f$  é a frequência,  $g$  é o ganho do retro-espalhamento no alvo, e  $\sigma_c$  é a área da seção transversal do espalhamento no alvo. A performance do sistema é própria de cada equipamento e tem influência na profundidade de investigação, sendo assim sistema com maior performance ( $Q$ ) possuem maior profundidade máxima de investigação.

Há uma profundidade na qual se verifica uma redução de  $1/e$  ou 37% do valor da amplitude inicial do sinal, ela é conhecida como *skin depth*, esta é o inverso da atenuação ( $\delta = 1/\alpha$ ). Sendo a expressão para materiais com baixo fator de perda:

$$\delta = 5,31 \frac{\sqrt{\varepsilon_r}}{\sigma} \quad (17)$$

na qual  $\varepsilon_r$  é a constante dielétrica do meio e  $\sigma$  é a condutividade elétrica do meio. O *skin depth* aumenta com o aumento da resistividade elétrica do meio (figura 17).

Figura 17 - Variação do *skin depth* em função da resistividade do meio, para  $\epsilon_r = 8$  e 40



A frequência central da antena é um fator limitante na penetração da onda eletromagnética, em subsuperfície. O aumento da frequência da onda transmitida tem como resultado uma maior resolução e uma menor profundidade de penetração. Outros fatores influenciam na profundidade de penetração como as propriedades elétricas dos materiais geológicos por exemplo condutividade elétrica e constante dielétrica.

Tabela 3 - Frequência central das antenas x profundidade máxima de penetração

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

Fonte: Modificado de ANNAN (2001).

Segundo Annan (2001) os valores da Tabela 3 são baseados em dados empíricos. Observar que cada área a ser investigada tem características próprias de modo que os valores devem ser utilizados apenas como uma referência rápida não substituindo um levantamento cuidadosamente planejado.

### 3.2.5 RESOLUÇÃO DO SISTEMA GPR

O termo resolução refere-se à capacidade do sistema em identificar dois eventos próximos um do outro. A resolução é uma composição de dois elementos os quais são a resolução vertical e a resolução horizontal. Sendo a resolução vertical a competência do sistema em distinguir dois sinais advindos de refletores próximos entre si. A resolução vertical pode ser calculada como  $\lambda/4$ , na qual  $\lambda$  é o comprimento de onda do sinal expresso por:

$$\lambda = \frac{v}{f_c} \quad (18)$$

na qual  $v$  é a velocidade do meio e  $f_c$  é a frequência central da antena de GPR. Em termos práticos a resolução obtida fica entre  $\lambda/3$  a  $\lambda/2$ . Utilizando o valor da velocidade de propagação no calcário da tabela 2, 0,12 m/ns, e a frequência central da antena de GPR 200 MHz estima-se uma resolução vertical de 20 a 30 cm.

A resolução horizontal trata-se da capacidade do sistema em diferir sinais que têm origem em alvos situados um ao lado do outro. A resolução horizontal é menor com o aumento de profundidade do alvo.

Há um aumento da resolução do radar com o aumento da frequência. Sendo assim equipamentos de baixa frequência apresentam um alcance maior e uma resolução baixa, ao passo que equipamentos com alta frequência apresentam alcance menor e alta resolução. Para a aquisição é importante observar qual característica irá atender ao seu objetivo.

### 3.3 PROPRIEDADES DIELÉTRICAS DAS ROCHAS

Como visto anteriormente as variações da constante dielétrica e condutividade das rochas são importantes, ao passo que as variações na permeabilidade magnética dificilmente são levadas em consideração.

Segundo a tabela 2, tem-se que a constante dielétrica  $\epsilon'_{r1}$  possui valores entre 1 até 80, os quais são as constantes dielétricas do ar e da água. Os materiais geológicos em sua maioria possuem constantes dielétricas variando entre 3 e 30 e velocidade de propagação do GPR variando entre 0,07 a 0,15 m/ns. A atenuação  $\alpha$  para materias de baixa perda fica entre 0,01 a 0,1 dB/m enquanto para materiais de alta perda o valor varia de 10 a 100 dB/m (UTSI, 2017).

Devido as rochas possuírem as mais diversas composições têm-se propriedades elétricas distintas e que são próprias a cada tipo de material. A existência de poros os quais podem estar preenchidos por fluídos (ar ou água) influência nas suas propriedades elétricas também. Devido ao fato de a água ter constante dielétrica de maior valor dentre os materias tem-se que mesmo pequenas quantidades dela podem influenciar a constante dielétrica.

Para a determinação da permissividade elétrica de uma mistura foram criados vários modelos. Dentre eles tem-se a expressão de CRIM (*Complex refractive index model*) o qual é utilizado para meios dispostos em camada, ele é efetivo para meios nos quais a granulação do material é de média a grossa os quais estão relacionados a materiais granulares simples e fluídos de baixa a média viscosidade. A expressão de CRIM é dada por (UTSI, 2017):

$$\epsilon_{mix} = \left( \sum_{i=1}^n f_i \sqrt{\epsilon_i} \right)^2 \quad (19)$$

Na qual  $\epsilon_{mix}$  é a permissividade elétrica da mistura,  $f_i$  é a fração do volume do i-ésimo componente e  $\epsilon_i$  é a permissividade elétrica do i-ésimo componente. Para uma mistura que possui uma matriz granular, ar e água, tem-se:

$$\epsilon_{mix} = \left[ \phi \sqrt{\epsilon_f} + (1 - \phi) \sqrt{\epsilon_m} \right]^2 \quad (20)$$

na qual  $\phi$  é a porosidade,  $\epsilon_f$  e  $\epsilon_m$  são as constantes dielétricas do fluído dos poros e da matriz de rocha, respectivamente.

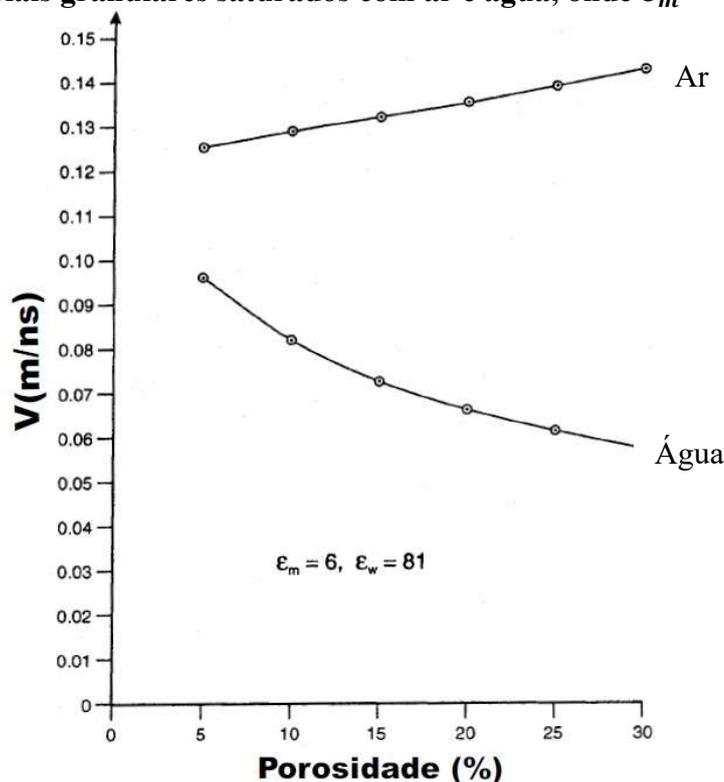
Levando em consideração que a rocha é uma mistura, a velocidade de propagação da onda de radar é expressa por:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{mix}}} \quad (21)$$

Partindo do pressuposto de que a rocha é composta por uma matriz e um espaço poroso completamente preenchido por fluídos e que a velocidade da onda na rocha e as constantes dielétricas da matriz e fluídos são conhecidas, pode-se calcular a porosidade da rocha utilizando as formulas 19, 20 e 21.

A figura 18 mostra a relação entre velocidade da onda e a porosidade da rocha para materiais saturados com ar e água. Pode ser observado que há diminuição da velocidade da onda com o aumento da porosidade para meios saturados em água, por outro lado para meios saturados em ar há um aumento de velocidade.

**Figura 18 - Velocidade da onda eletromagnética em função da porosidade para materiais granulares saturados com ar e água, onde  $\epsilon_m = 6$**



Fonte: Reynolds (1997).

Os materiais que apresentam maior atenuação da onda geralmente são aqueles que possuem alta condutividade. Por consequência os solos ricos em argila, silte ou saturados com água salgada ou contaminantes com alta condutividade tem a penetração de radar muito baixa.

Devido à pouca quantidade de materiais ferromagnéticos na maior parte das rochas (inferior a 2%) considera-se a permeabilidade magnética do espaço livre ( $\mu_o = 1,26 \times 10^{-6} H/m$ ). A presença de minerais magnéticos na rocha em grande quantidade como magnetita, maghemita e hematita em algumas rochas ígneas, areias ferruginosas e alguns solos. Aumenta

a permeabilidade magnética da rocha o que leva a uma diminuição na velocidade de propagação e um aumento na atenuação do sinal.

### 3.4 AQUISIÇÃO DE DADOS DE GPR

Para que a aquisição dos dados de GPR seja satisfatória deve ser levado em consideração a profundidade de investigação do alvo, a geologia local, o contraste existente entre as propriedades elétricas dos materiais, a atenuação do sinal, logística e as possíveis fontes de ruídos que podem ter origem em cabos elétricos, estruturas metálicas ou cercas.

#### 3.4.1 TÉCNICAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Há quatro formas de aquisição de dados de radar os quais são: perfil de reflexão com afastamento constante, WARR - *wide angle reflection and refraction* (refração e reflexão de grande abertura angular), CMP- *common midpoint* (ponto médio comum) e transiluminação ou tomografia.

- **Perfil de reflexão com afastamento constante**

A forma mais utilizada para a realização de medidas de GPR. As antenas transmissora e receptora são mantidas separadas a uma distância fixa e são movidas na superfície. Tem como resultado um perfil no qual o eixo vertical mostra o tempo duplo de viagem das ondas refletidas e o eixo horizontal mostra as posições da antena no terreno. Sendo a distância de separação das antenas bastante pequenas se considera as seções como *zero-offset*.

- **Refração e reflexão de grande abertura angular (WARR)**

Nesse tipo de levantamento uma das antenas tem uma posição fixa e a outra antena é afastada lateralmente. Observar que para a realização deste tipo de levantamento deve existir refletores planos e horizontais ou com inclinação pequena. Trata-se de um tipo de aquisição útil para a estimação da variação de velocidade do sinal com a profundidade.

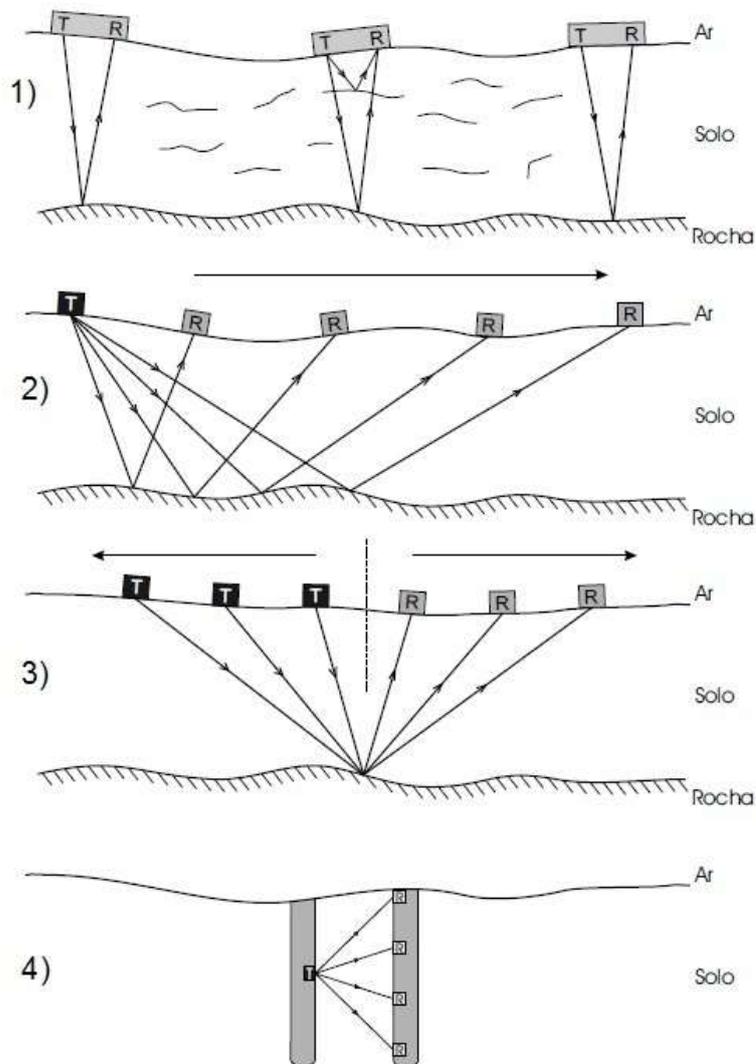
- **Perfil de ponto médio comum (CMP)**

O levantamento tem as antenas transmissora e receptora afastadas simultaneamente de modo que o ponto médio entre elas permanece fixo. Essa forma de aquisição permite estimar como a velocidade de propagação do sinal varia com a profundidade. Tem como vantagem realizar uma análise de velocidade com uma maior precisão.

- **Transiluminação ou tomografia**

O uso desta técnica ocorre em poços, cavernas, construção civil dentre outras aplicações. Posiciona-se as antenas transmissora e receptora em lados opostos do meio a ser investigado. Comumente uma das antenas é fixada em um lado de um pilar ou um poço e a outra antena é movida no outro lado. Com esta técnica é possível obter a velocidade do sinal no meio e se for possível medir a amplitude do sinal é possível estabelecer a atenuação do meio.

**Figura 19 - Principais técnicas de aquisição de dados GPR: 1) Perfil de reflexão com afastamento constante; 2) Refração e reflexão de grande abertura angular (WARR); 3) Perfil de ponto médio comum (CMP); 4) Transiluminação ou tomografia**



Fonte: Pinto (2007).

### 3.4.2 PARÂMETROS DE AQUISIÇÃO

Tendo em vista os objetivos do trabalho define-se então os parâmetros de aquisição sendo os principais parâmetros:

- 1- Frequência da antena: A sua escolha depende da profundidade que se almeja alcançar e a resolução requerida. Para alvos rasos uma antena de maior frequência e maior resolução pode ser utilizada.
- 2- Abertura temporal ( $T_w$ ): Trata-se do intervalo de tempo em que a janela de tempo deve ficar aberta para que o sinal seja transmitido, refletido e captado pela antena receptora. Está relacionada a frequência de Nyquist:

$$T_w = \frac{N_a}{f_a} \times 1000 \text{ (ns)} \quad (22)$$

na qual  $N_a$  é o número de amostras.

- 3- Intervalo de amostragem temporal ( $\Delta t$ ): Representa o intervalo entre pontos de amostragem do sinal gravado. De modo a não ocorrer falsa amostragem do sinal, deve ser obedecido o critério de amostragem de Nyquist, expresso por:

$$\Delta t = \frac{1}{2f_N} \quad (23)$$

no qual  $\Delta t$  é o intervalo de amostragem e  $f_N$  é a frequência de Nyquist, a frequência mais alta que será gravada. Para o radar é apropriado utilizar ao intervalo de amostragem (ANNAN, 2001);

$$\Delta t = \frac{1}{6f_c} \quad (24)$$

na qual  $f_c$  é a frequência central da antena.

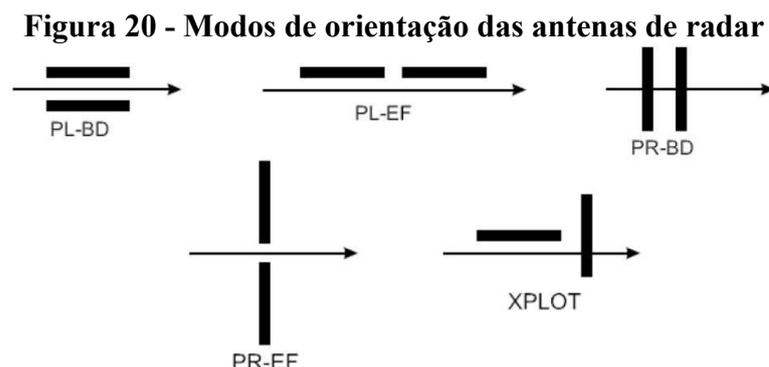
- 4- Amostragem espacial ( $\Delta_x$ ): Trata-se do intervalo espacial entre as estações, ou seja, o espaçamento entre traços da seção do radar. De modo a evitar uma falsa amostragem

o intervalo de amostragem espacial não deve ser superior ao intervalo de amostragem de Nyquist (um quarto do comprimento de onda do meio). Segundo Annan (2001) o intervalo de amostragem de Nyquist é expresso por:

$$\Delta_x = \frac{c}{4f_c\sqrt{K}} \quad (25)$$

na qual  $c$  é a velocidade da luz no vácuo,  $f_c$  é a frequência central da antena e  $K$  é a constante dielétrica do meio. Havendo espaçamento entre as estações superior ao intervalo de amostragem de Nyquist, não será possível definir adequadamente refletores inclinados ou hipérbolos de difração.

- 5- Espaçamento entre as antenas: A maioria dos sistemas utilizam as antenas transmissora e receptora com separação fixa. Há sistemas de GPR que as antenas transmissora e receptoras estão separadas e com isso pode ser mudado o espaçamento entre elas o que permite os levantamentos do tipo CMP e WARR.
- 6- Orientação do perfil: De modo geral os perfis tem sua orientação perpendicular as estruturas em subsuperfície que se deseja estudar.
- 7- Orientação das antenas: As orientações das antenas podem ser vistas na figura 20. De modo geral é utilizada a configuração PR-BD, na qual as antenas são orientadas perpendicularmente à direção do perfil. Se o objetivo for detecção de objetos enterrados a configuração PL-BD é a mais apropriada, pois possui uma maior área de imageamento fora do plano do perfil, aumentando assim a probabilidade de atingir o alvo.



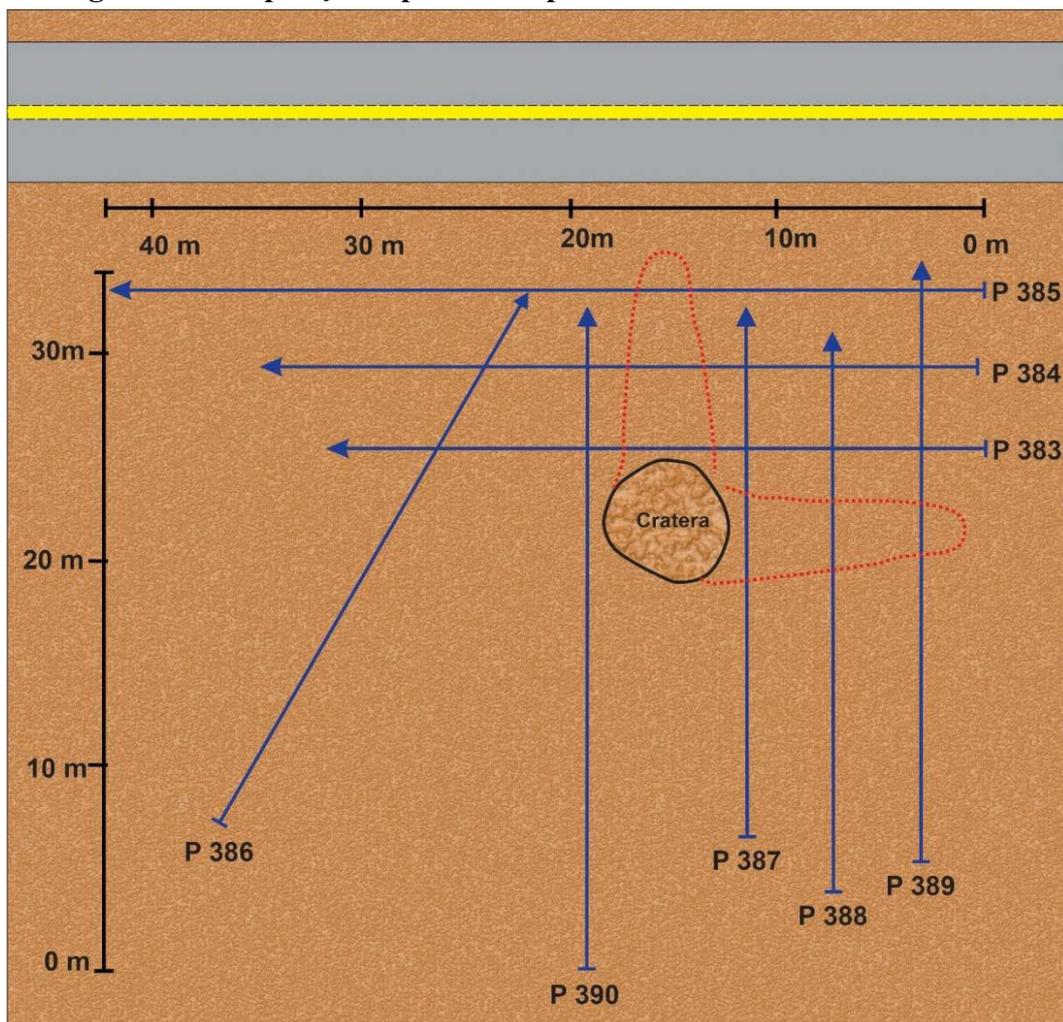
Fonte: Annan e Cosway (1992).

## CAPÍTULO 4 - MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 AQUISIÇÃO DE DADOS

Os dados foram adquiridos através do levantamento realizado com os equipamentos fabricados pela empresa GSSI, modelos SIR-2000 e SIR-20, com a utilização de antenas de frequência central de 200 MHz. Foram levantados 8 perfis na área de estudo com a disposição espacial mostrada na figura 5. Estes perfis tem sua configuração como perfis contínuos e se utiliza de antenas em modo biestático com espaçamento variável (Figura 21). Durante o levantamento é possível um pré-processamento dos dados o que permite avaliar a qualidade dos dados adquiridos. Nas fotos a seguir pode ser visualizada a área de estudo (fotografias 1, 2, 3, 4, 5, 6).

**Figura 21 - Disposição espacial dos perfis realizados na área de estudo**



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Fotografia 1 - Vista parcial de uma frente de lavra da mineração Mármore da Bahia onde localizou-se uma pequena caverna**



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Fotografia 2 - Para evitar acidentes colocou-se alguns blocos descartados ao redor da cavidade**



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Fotografia 3 - Vista detalhada da entrada da caverna com antena de 200 MHz como referência de escala. De acordo com o diagrama da figura 7 (PENHA, 1994) o hardpan apresenta grandes vazios em sua parte superior**



**Fonte: Elaborado pelo autor.**

**Fotografia 4 - Na área estudada existe um capeamento de solo com uma espessura média de 1,5 m (1,2 à 1,8 m) apresentando em sua base um nível de aproximadamente 0,4 m de espessura formado por pelotas de óxido de ferro seguido pelo topo da camada carbonática**



**Fonte: Elaborado pelo autor.**

**Fotografia 5 - Bancada de extração de blocos no primeiro nível do calcrete. Onde podemos observar também o capeamento de solo e a faixa topograficamente irregular do topo do calcrete**



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Fotografia 6 - Vazios encontrados no primeiro nível de extração de blocos do Hardpan, os quais foram descritos por Penha (1994)**



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4.2 PRÉ-PROCESSAMENTO

Os dados brutos obtidos pelo equipamento de GPR são afetados por diferentes tipos de ruídos e até possíveis instabilidades do equipamento. Sendo assim, com o objetivo de se observar os dados que estão sendo adquiridos em campo, se realiza um tratamento temporário, que não afetará os dados registrados, mas permitirá a observação destes dados com maior clareza possível, aumentando a relação sinal/ruído, com o objetivo de se assegurar que estamos obtendo dados com o conteúdo das informações necessárias à pesquisa.

Este pré-processamento da etapa de aquisição consiste em filtragens verticais e horizontais e aplicação de ganhos para melhorar a qualidade dos dados. Com a aplicação de ganhos há um realce das amplitudes dos refletores e com a aplicação dos filtros há diminuição do ruído.

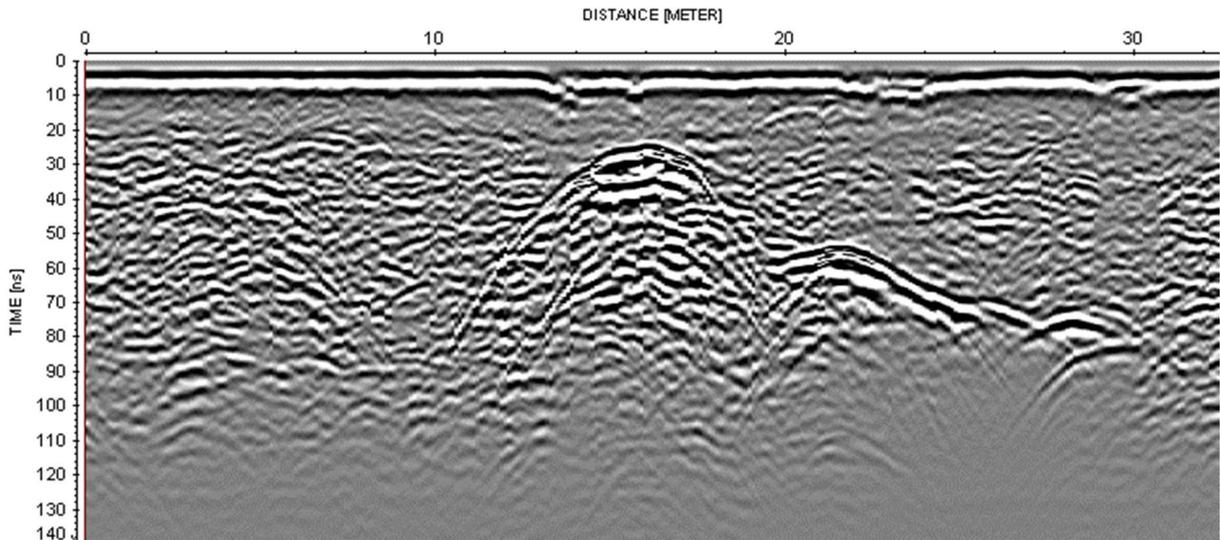
## 4.3 ETAPAS DO PROCESSAMENTO

O processamento dos dados tem como objetivo gerar uma imagem na qual seja possível a distinção de estruturas geológicas, um realce das feições de interesse ou obtenção de parâmetros físicos (PAIXÃO, 2005). As técnicas de radar e sísmica de reflexão possuem grande similaridade cinemática, quando o meio é resistivo, por isso muitas etapas de processamento de dados sísmicos têm sido utilizadas no processamento de dados de radar. Isto pode ser visto nos trabalhos de Fisher et al. (1992a, b); Neves et al. (1995) e Pestana e Botelho (1997).

No processamento dos dados do presente estudo foi utilizado o programa *Reflex-Win*, versão 7.5.9 (SANDMEIER, 2015), trata-se de pacote de programas no qual é possível a importação de uma gama de diferentes tipos de dados e formatos. Este pacote vem sendo desenvolvido por K.J Sandmeier para o processamento e interpretação de dados de reflexão para aplicação em GPR, como também reflexão e refração de dados de sísmica e de ultrassom.

O radargrama bruto sem processamento é mostrado na figura 22 abaixo:

**Figura 22 - Radargrama Bruto linha 383**

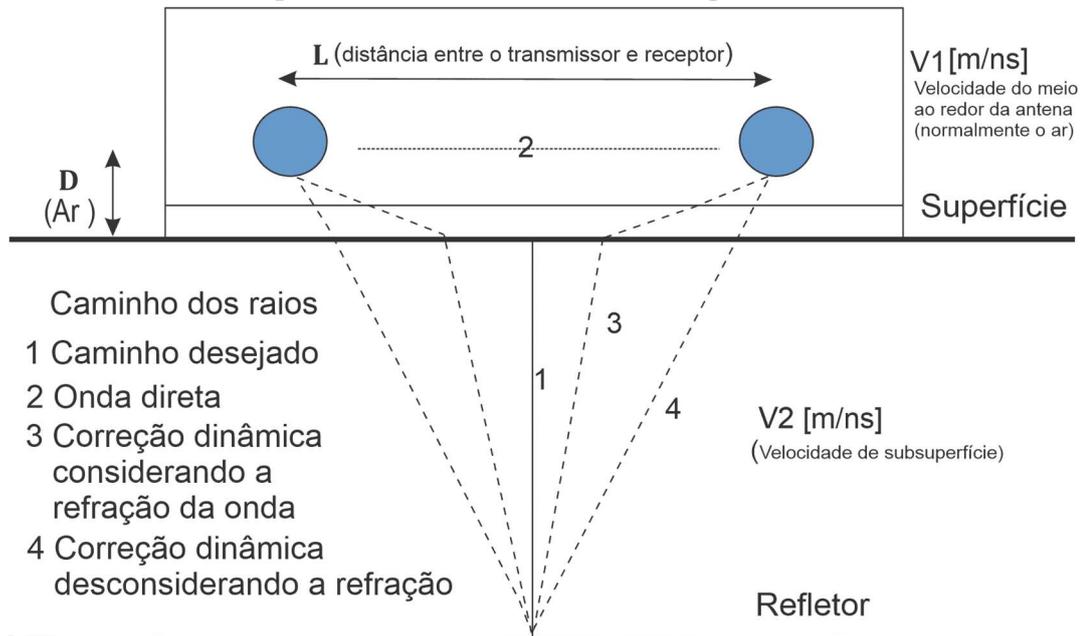


**Fonte: Elaborado pelo autor.**

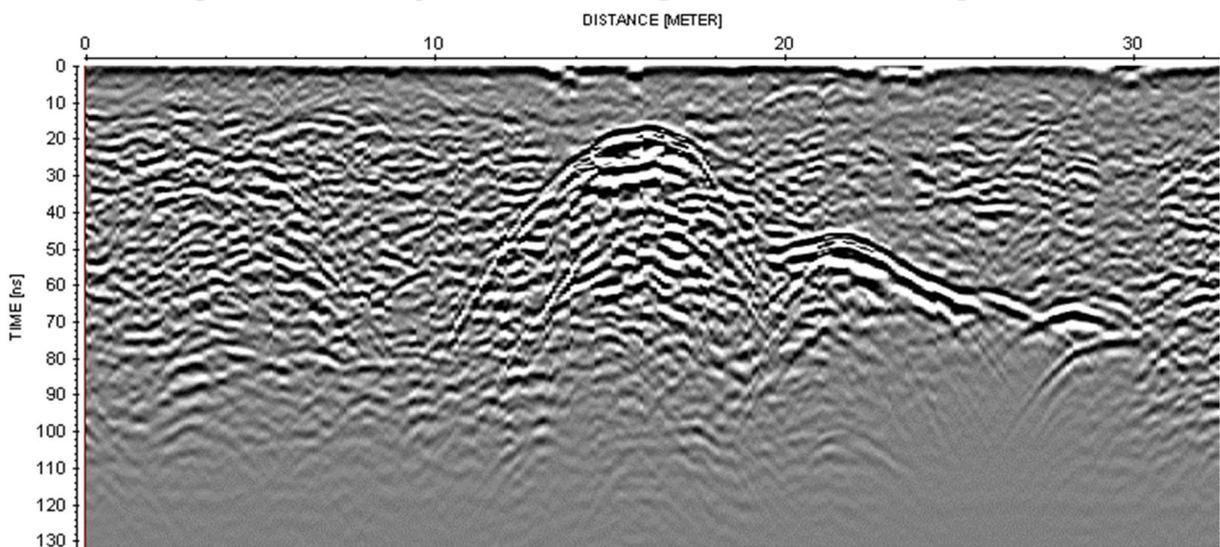
Sendo as etapas de processamento listadas abaixo:

- **Ajuste do tempo zero** - Trata-se de um ajuste da posição em tempo do sinal, através dele é possível determinar corretamente a posição vertical, ou profundidade, de qualquer refletor ou difrator. Sendo a janela do tempo o período que o pulso de radar deixa a antena emissora, entra na subsuperfície, onde é refletido, transmitido ou difratado, retornando à superfície para ser captada pela antena receptora. O “tempo zero” que constitui o instante inicial da propagação do pulso de radar tem que ser definido. Este tipo de correção é necessário para ajustar todos os traços em relação a um mesmo referencial no tempo, o que costuma ser feito com base no tipo de antena utilizada e a onda direta captada (Figura 23 e 24). Neste exemplo, a entrada do valor de tempo zero na janela *move time* do programa *Reflexw* foi de - 8 ns.

**Figura 23 - Esboço da geometria de uma configuração padrão transmissor-receptor e os possíveis caminhos dos eventos gerados**

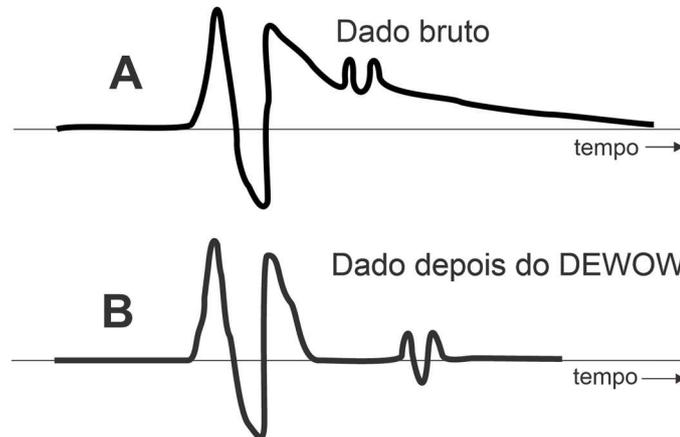


**Figura 24 - Radargrama linha 383 após a correção de tempo zero**



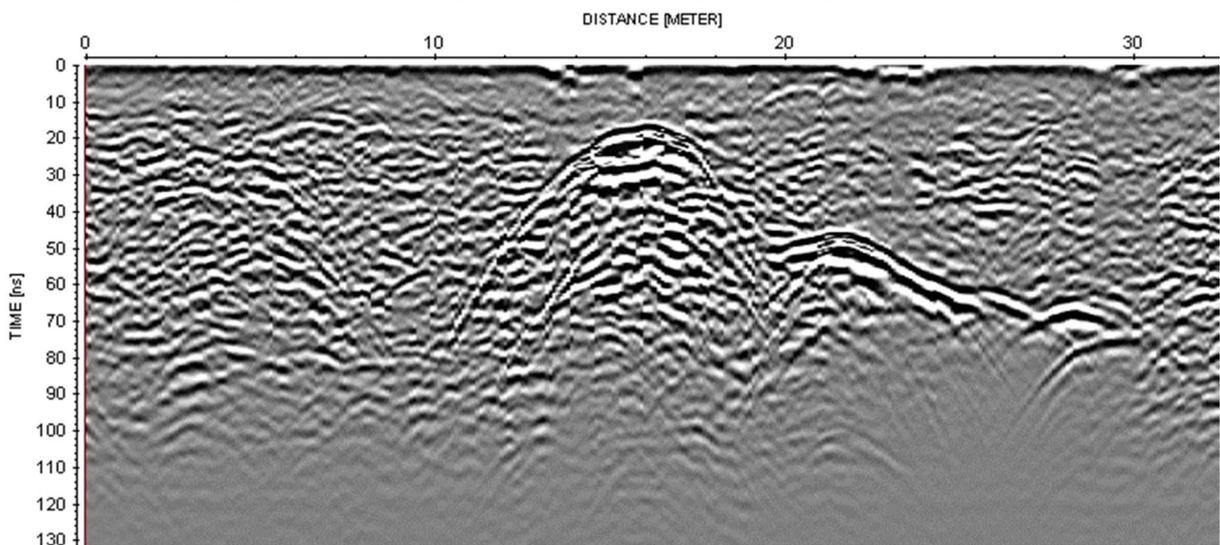
- **Filtragem DC (dewowing)** - Este tipo de filtro é aplicado para a remoção do “wow” que se trata de um ruído de baixa frequência que tem sua origem na saturação eletrônica do receptor a qual se deve aos pulsos de alta energia associados as ondas aéreas e terrestre. A correta separação entre as antenas emissora e receptora evita, ou pelo menos atenua, a ocorrência desta citada saturação eletrônica, tornando muitas vezes desnecessária a aplicação desta etapa de processamento. Foi utilizado o valor de 90 ns como parâmetro *timewindow* no programa *Reflexw* para esta correção (Figura 25 e 26).

**Figura 25 - Efeito de componentes de baixas frequências WOW (A) e o dado obtido após o uso do filtro DEWOW (B)**



Fonte: Modificado de Sensor & Software (2018).

**Figura 26 - Radargrama linha 383 após filtragem DEWOW**

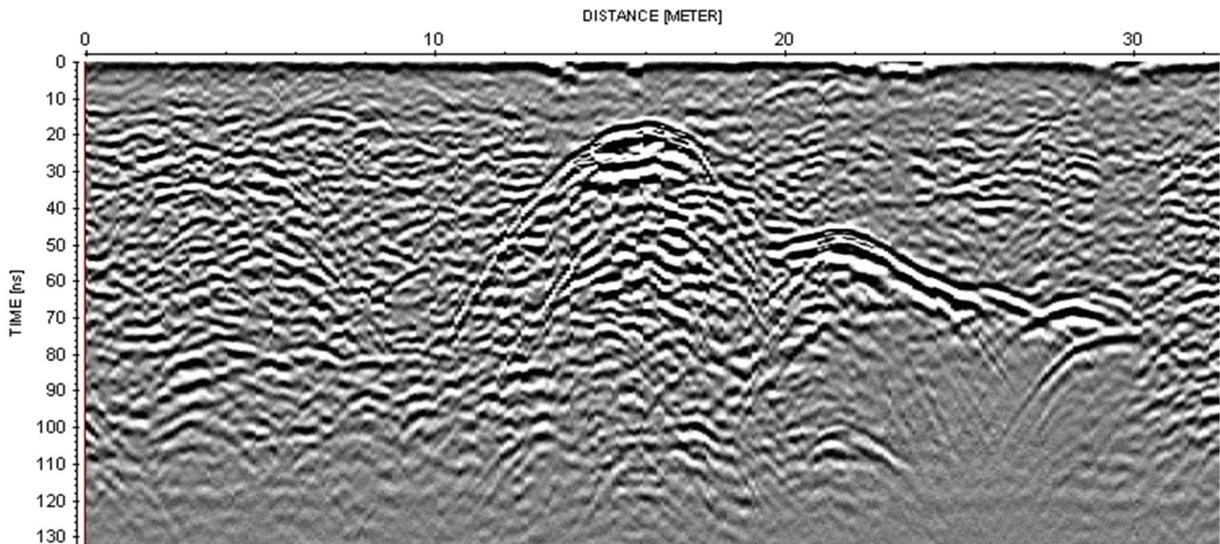


Fonte: Elaborado pelo autor.

- **Aplicação de Ganho AGC (*Automatic Gain Control*)** - O sinal de GPR é rapidamente atenuado durante sua propagação em subsuperfície isso se deve à diferentes fenômenos (espalhamento geométrico, absorção, partição de energia nas reflexões, etc.). A amplitude do sinal oriundo das maiores profundidades é muito pequena se comparada a de sinais provenientes de regiões mais superficiais. Para poder se visualizar todos estes sinais é necessário que amplitudes dos diferentes sinais sejam compensadas, aplicando uma função de ganho através da compensação das perdas na propagação à grandes profundidades de modo que há uma melhora na visualização de objetos profundos

(Figura 27). Os parâmetros utilizados no programa *Reflexw* foram: *window lenght* = 70, *scaling value* = 0,8 e *max. gain* = 5.

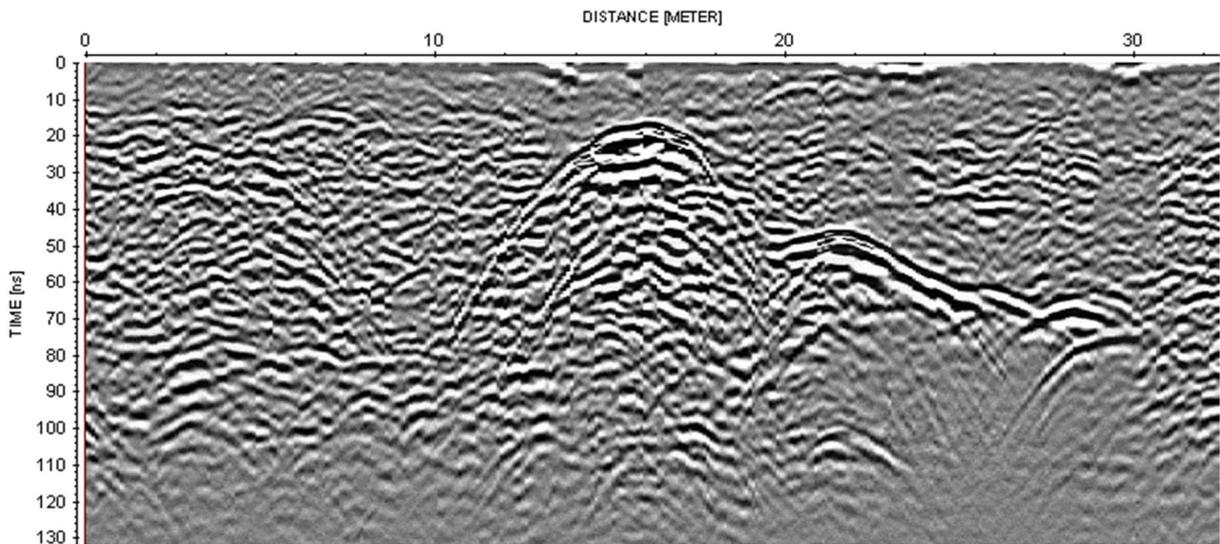
**Figura 27 - Radargrama linha 383 após aplicação de Ganho AGC**



Fonte: Elaborado pelo autor.

- **Bi-direcional (*Background Removal*)** – Há um efeito de indução entre as antenas de modo que há propagação de uma onda eletromagnética direta pelo ar, essa onda é pouco atenuada se comparada ao sinal vindo de subsuperfície. Sendo que esta indução se dá simultaneamente com as reflexões advindas da subsuperfície que são registradas na antena receptora. Como resultado há uma superposição dos sinais na qual a saturação de alta amplitude mascara as reflexões de mais baixa amplitude, principalmente as que estão associadas a refletores mais rasos. O *background removal* é utilizado para a correção do efeito de indução entre as antenas (Figura 28). Os valores inseridos no programa *Reflexw* foram: selecionado *whole line* e o *start time* = 0 e o *end time* = 131,59.

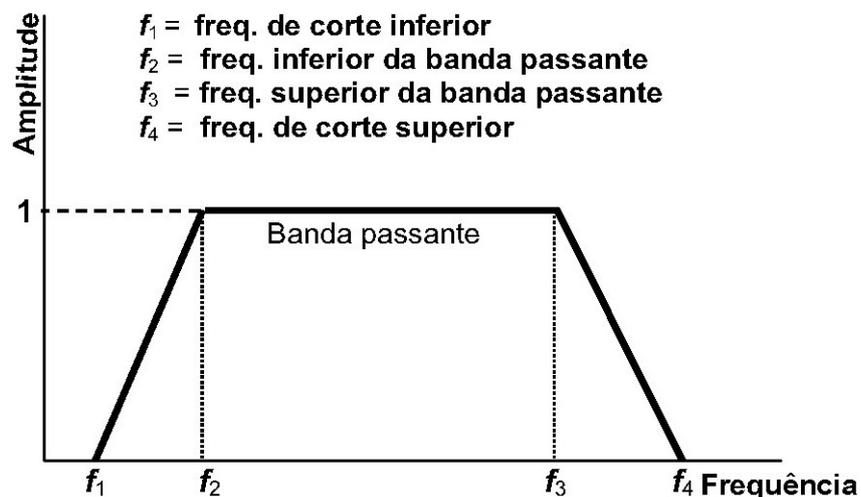
**Figura 28 - Radargrama linha 383 após a remoção de Background**



Fonte: Elaborado pelo autor.

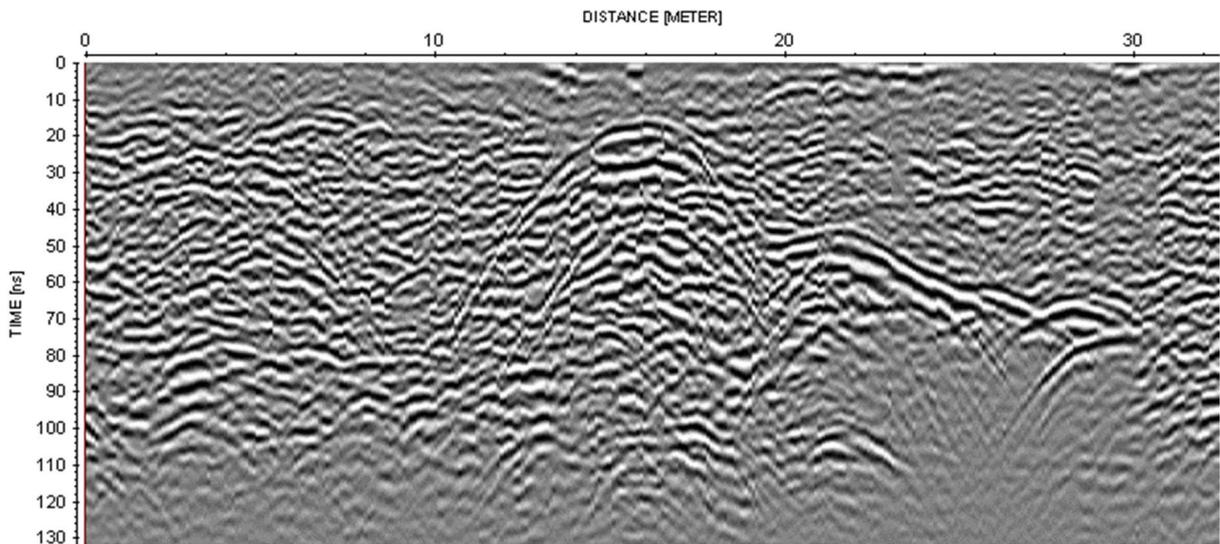
- Filtro Uni- direcional (*Bandpass frequency*)** – O objetivo principal desse tipo de filtro é “limpar” do radargrama as frequências que não integrem a geração do sinal de interesse, o qual corresponde a uma faixa de frequências em torno do pico central de frequência da antena fonte. Este filtro é definido no domínio da frequência, e pode ser um filtro trapezoidal no qual são definidos valores das frequências: frequência de corte inferior, frequência inferior da banda passante, frequência superior da banda passante e frequência de corte superior (Figura 29 e 30). Os valores definidos no programa *Reflexw* foram *lower cutoff* = 67, *lower plateau* = 96,07, *upper plateau* = 314 e *upper cutoff* = 382.

**Figura 29 - Esboço da configuração do filtro passa-banda trapezoidal**



Fonte: Modificado de Xavier Neto (2006).

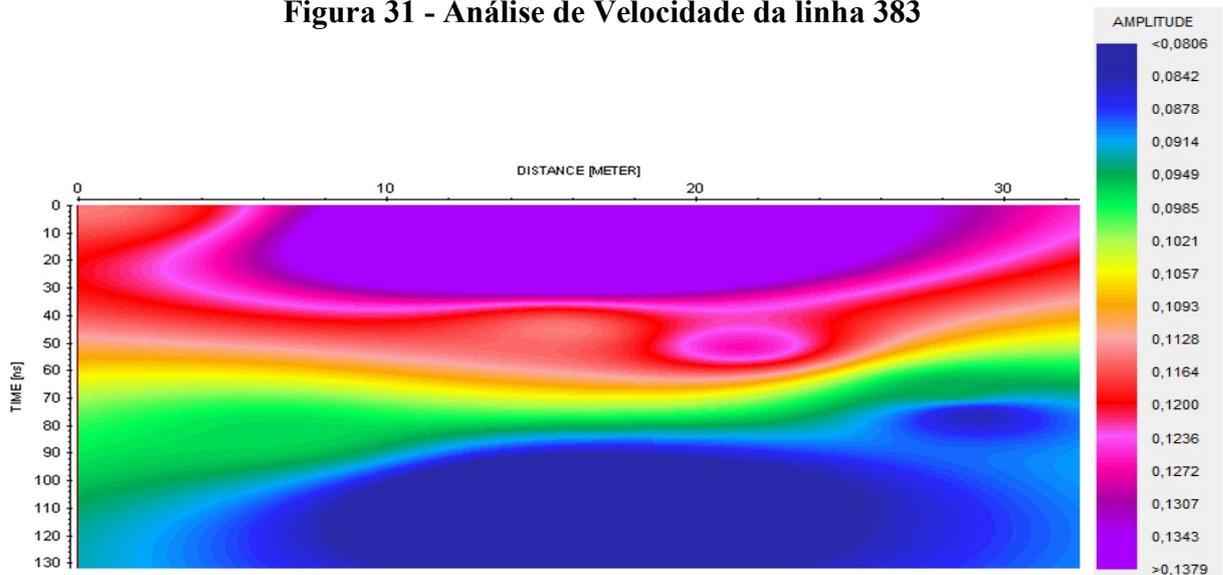
**Figura 30 - Radargrama linha 383 após aplicação do filtro passa-banda**



Fonte: Elaborado pelo autor.

- **Análise de Velocidade** – Esta etapa do processamento ajuda na definição das variações da velocidade do pulso eletromagnético em subsuperfície, podendo gerar um modelo 2D ou 3D da distribuição da velocidade na área de estudo, permitindo converter em profundidade os radargramas. Para efetuar esta análise faz-se necessário o ajuste de hipérbolas de difração que é feito visualmente, observar que há erros inerentes a essa determinação de velocidade, no entanto devido a sua praticidade é relevante o seu uso visto que se estima a velocidade sem a necessidade de uma aquisição do tipo CMP (Figura 31).

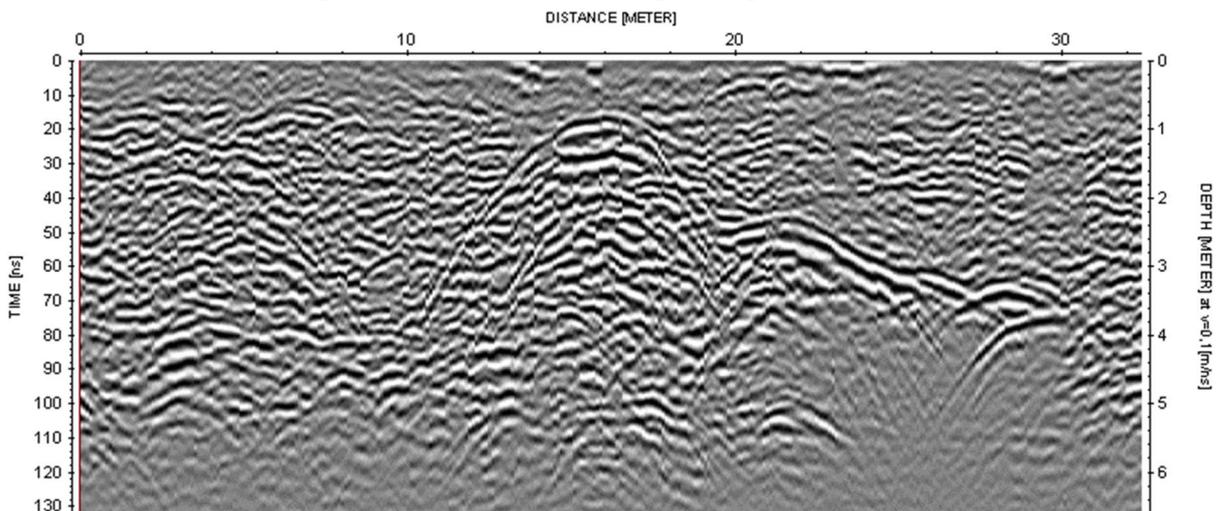
**Figura 31 - Análise de Velocidade da linha 383**



Fonte: Elaborado pelo autor.

- **Conversão tempo em profundidade** – O objetivo desta conversão é posicionar os diferentes refletores do radargrama, que está no domínio do tempo duplo de reflexão, nas suas profundidades reais, de modo que a seção convertida represente melhor a subsuperfície. Este tratamento, tal como a própria migração, requer uma boa análise de velocidade, como realizado no passo anterior. Quanto mais precisa for a estimativa da velocidade de propagação da onda no meio estudado, mais eficiente irá ser a conversão tempo duplo de trânsito em profundidade (Figura 32). A velocidade utilizada para a conversão tempo em profundidade foi variável, pois foi utilizado o campo de velocidades obtido anteriormente (Figura 31).

**Figura 32 - Conversão tempo em profundidade**



Fonte: Elaborado pelo autor.

## CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

---

---

### 5.1 INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

Esta parte do trabalho tem por objetivo o reconhecimento das feições cársticas como vazios centimétricos à métricos. Os radargramas gerados após o processamento dos dados são analisados com o objetivo de localizar feições geológicas tais como vazios, fraturas ou, em alguns casos, cavernas subterrâneas. Oito (8) radargramas foram gerados e serão analisados individualmente no decorrer deste capítulo.

De modo geral, observa-se que não há o registro de vazios abaixo dos 4,5 m de profundidade. As estruturas como cavernas podem ser identificadas pelos fortes refletores situados no topo das mesmas, devido ao contraste existente entre a rocha encaixante e o material sedimentar que preenche o vazio, ou mesmo, o próprio vazio; e também estão comumente associadas à fortes difrações geradas devido às irregularidades na topografia da superfície do topo das cavernas.

No radargrama do perfil 383 (Figura 33) é possível observar um padrão com fortes amplitudes abaixo da difração associada ao forte refletor interpretado como o topo da caverna, o qual parece ser uma reverberação do pulso eletromagnético dentro de uma zona com a presença de vazios. A maior feição observada neste radargrama situa-se na posição entre 12-20 metros, possuindo 8 metros de distância, com uma profundidade em torno de 1,2 metros, sugerindo a presença de um complexo de vazios ou caverna. Observa-se uma continuidade lateral do refletor correspondente ao topo, sempre associado à presença de outras hipérboles de difração menores entre as posições 20-30 metros.

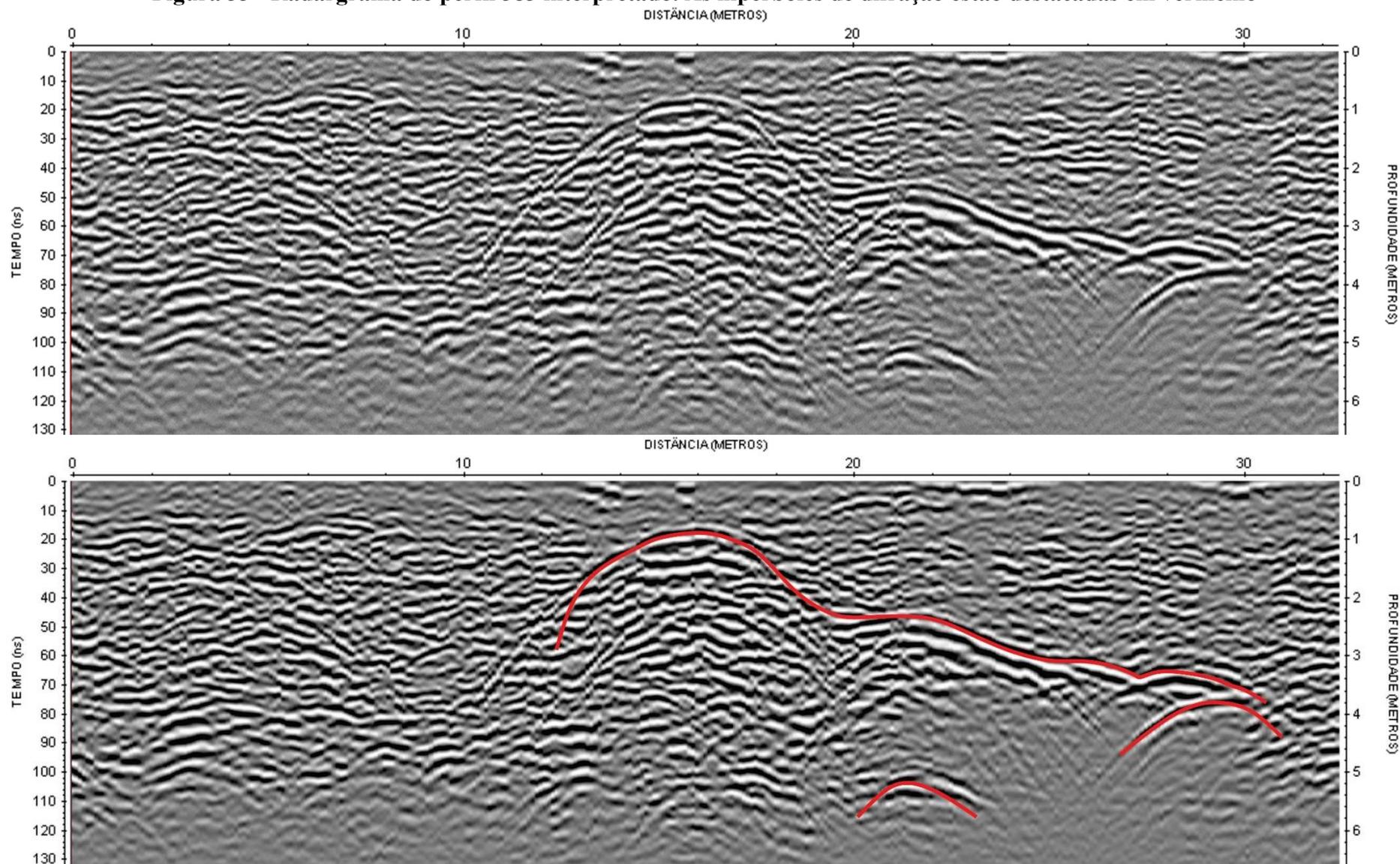
No radargrama do perfil 384, também se observa um padrão com fortes amplitudes abaixo da difração relacionada ao forte refletor interpretado como topo da caverna. Feições correspondentes às reverberações do pulso eletromagnético causadas por essa feição de dimensões métricas reforçando a ideia de que se trata de uma caverna. A maior feição situa-se na distância entre 12-16 m e possui 4 metros de distância por 2 metros de profundidade. Assim como o radargrama anterior (383) tem-se uma continuidade lateral devido a canais de dissolução, com hipérboles de difração menores entre a distância 18-34 metros.

No radargrama do perfil 385 que é paralelo aos perfis 383 e 384, pode ser visto na figura 21, tem-se mais uma vez a presença de feições marcadas por fortes refletores situadas no topo da caverna associadas a fortes difrações que possuem origem na irregularidade da topografia

da mesma, interpretada como sendo causada por uma feição de dimensões métrica, validando a interpretação de que trata-se de uma caverna . A feição de maior dimensão situa-se na posição e 12-15 e possui 3 metros de distância por 2,4 metros de profundidade. A continuidade lateral está presente com hipérboles de menor dimensão. Observando a variação de largura e profundidade dos três perfis sugere-se que a caverna vai se estreitando, aumentando assim sua dimensão, no sentido partindo do perfil 383 em direção ao perfil 385. Este fato está representado na figura 21 pela linha composta por traços em vermelho.

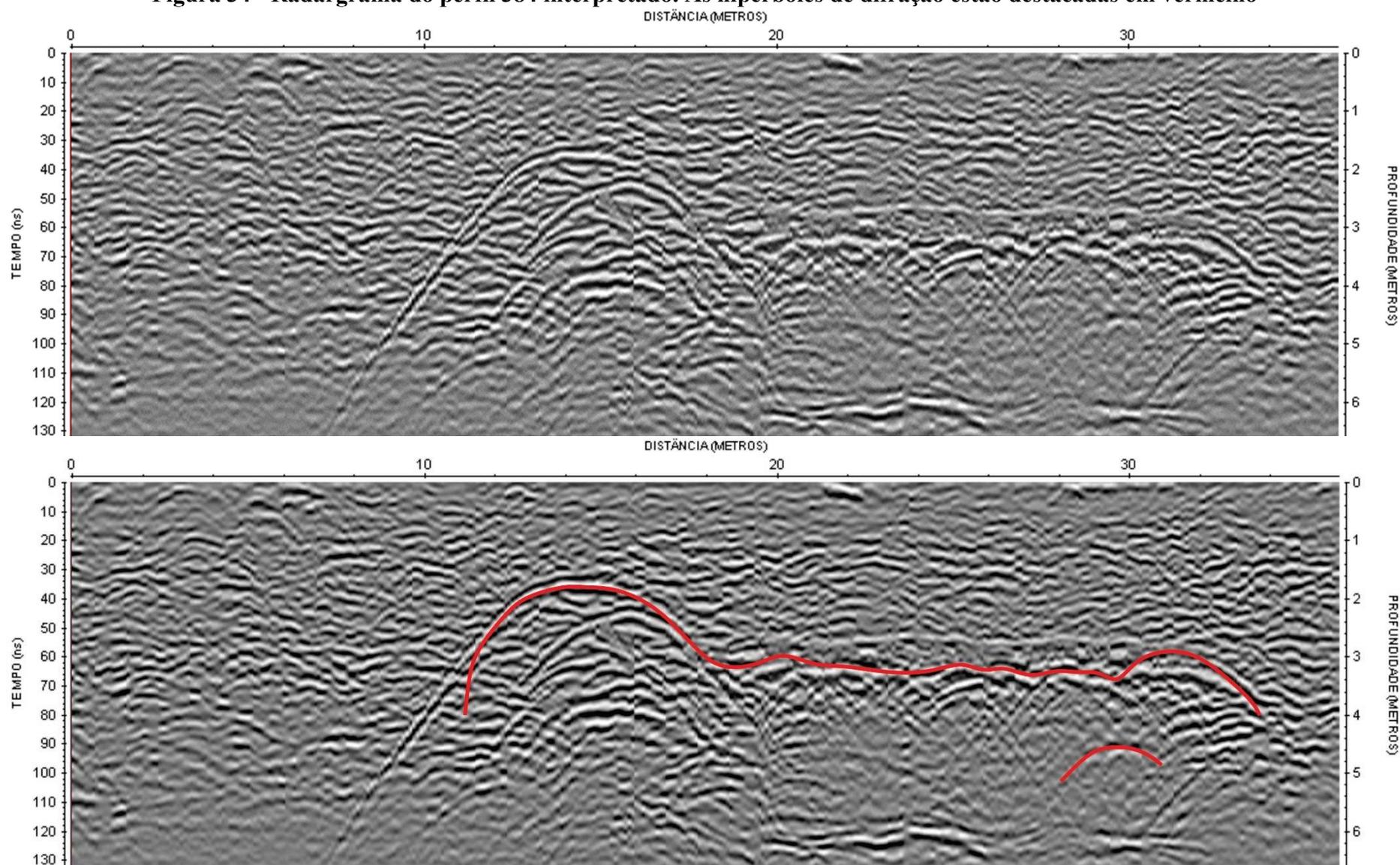
O perfil 386 foi feito na diagonal à cratera como visto na figura 21, o radargrama possui feições de alta amplitude abaixo da difração associada a um forte refletor possivelmente trata-se de outra cavidade com menores dimensões em relação aos perfis 383,384 e 385. Destacando-se a feição que ocorre à distância de 14 – 18, possuindo 4 metros de distância por 2,6 de profundidade. Não há continuidade lateral.

Figura 33 - Radargrama do perfil 383 interpretado. As hipérboles de difração estão destacadas em vermelho



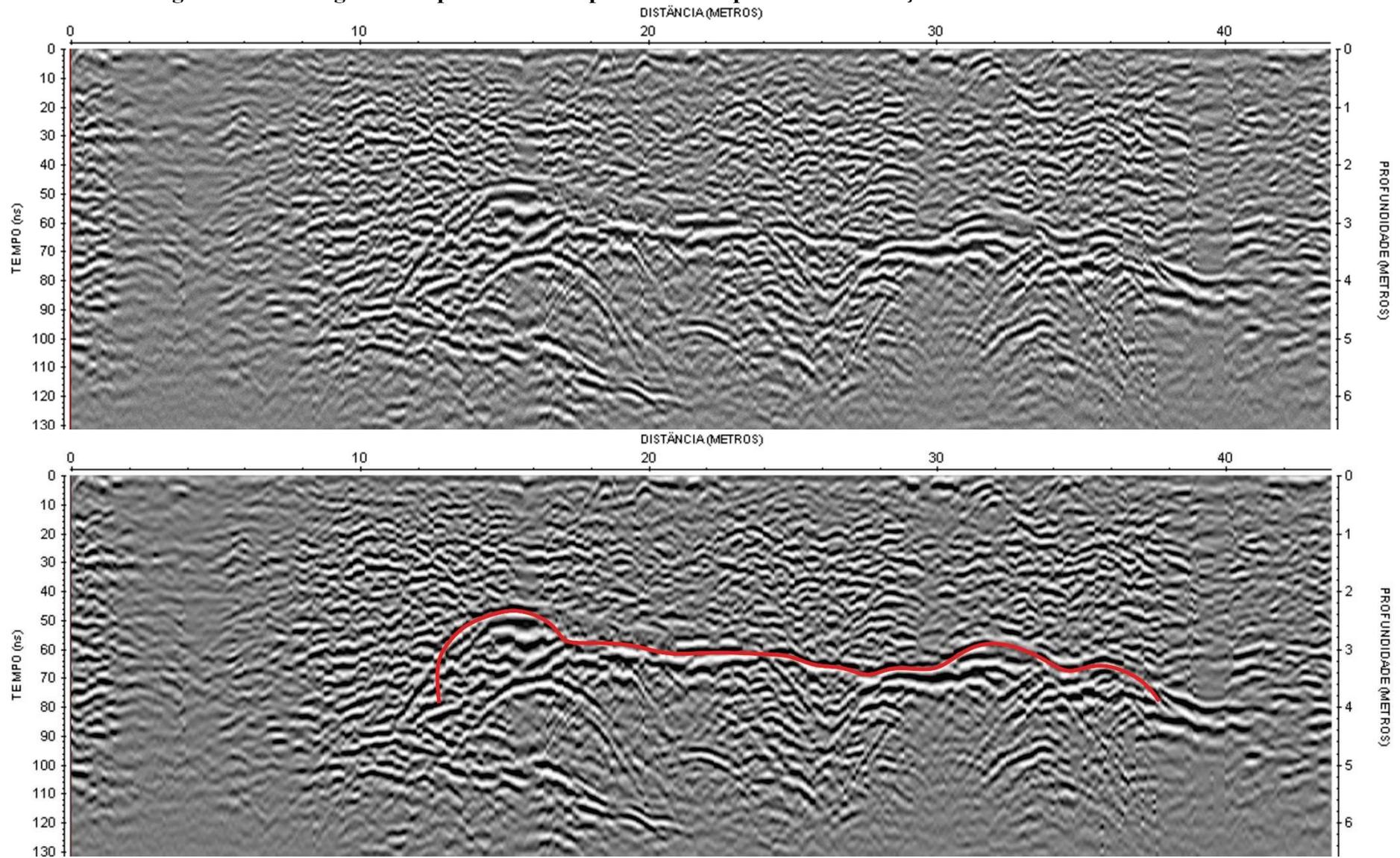
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 34 - Radargrama do perfil 384 interpretado. As hipérboles de difração estão destacadas em vermelho



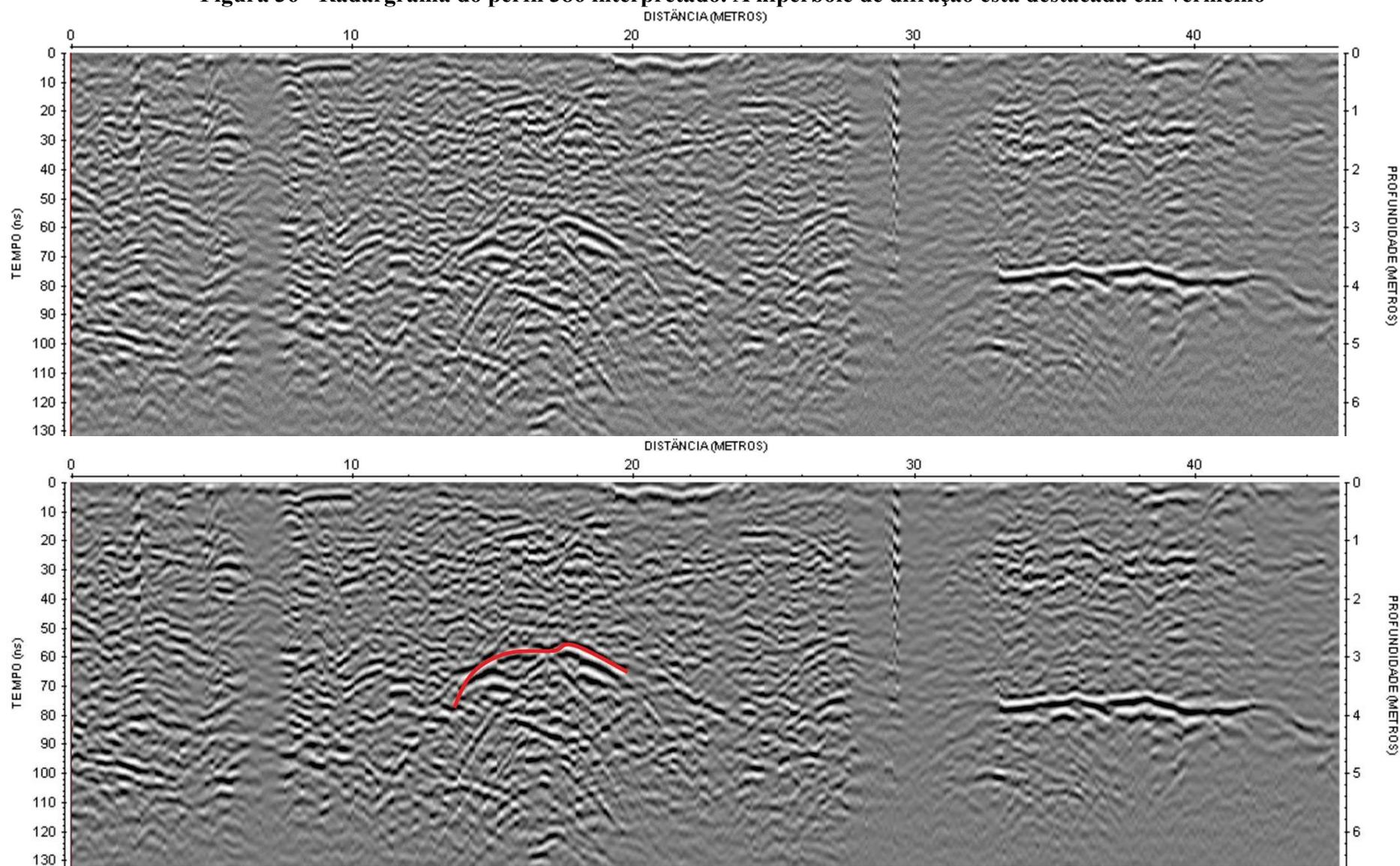
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 35 - Radargrama do perfil 385 interpretado. As hipérboles de difração estão destacadas em vermelho



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 36 - Radargrama do perfil 386 interpretado. A hipérbole de difração está destacada em vermelho



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os perfis 387, 388, 389 e 390 foram feitos perpendicularmente aos perfis 383, 384 e 385 conforme figura 21.

No radargrama do perfil 387, observa-se a presença de uma difração associada ao forte refletor interpretado como topo da caverna e logo abaixo é possível observar um padrão de forte amplitudes, causadas por uma feição de dimensões métricas possivelmente uma caverna a se confirmar com a análise dos perfis 388, 389. A feição que se destaca no radargrama situa-se entre a posição 14-20 e possui 6 metros de distância por 2,4 metros de profundidade.

No radargrama do perfil 388, também pode ser observado a existência de uma difração relacionada um forte refletor interpretado como topo da caverna e logo abaixo a presença de fortes amplitudes causadas possivelmente por uma caverna. A feição é observada já no final do radargrama estando entre a posição 15-20 metros com largura de 5 metros por 2,6 metros de profundidade. No mesmo radargrama é possível observar uma pequena hipérbole de refração paralela a hipérbole citada anteriormente.

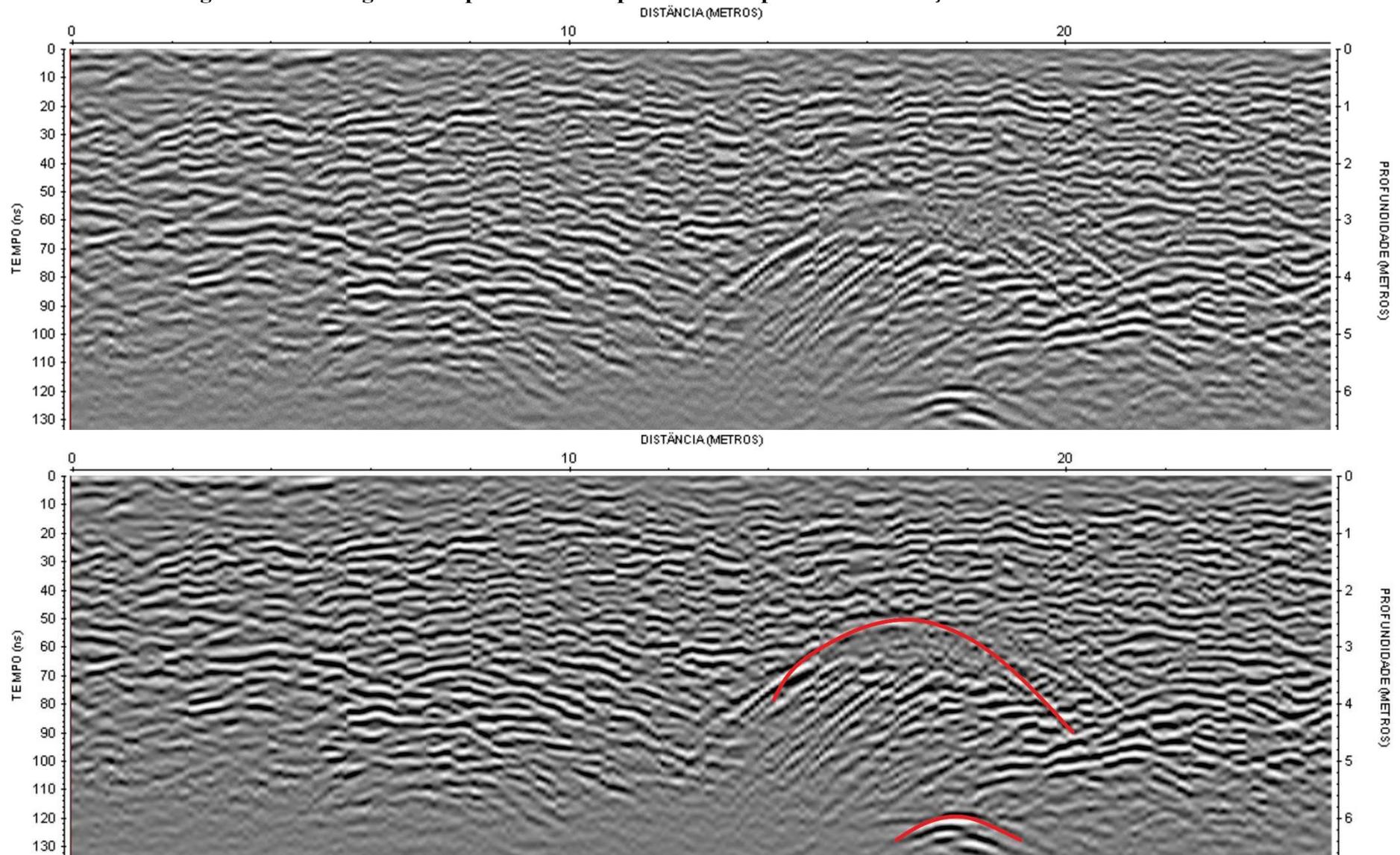
O perfil 389 apresenta hipérbolas de difração com uma continuidade lateral, no entanto com profundidade inferior se comparado aos outros perfis paralelos a ele 387 e 388. A feição detectada situa-se na posição entre 16-21 metros com largura de 5 metros por 3,2 metros de profundidade.

Assim como ocorreu anteriormente com os perfis 383, 384 e 385, verifica-se que há uma caverna que aparece nos perfis 387, 388 e 389 sendo que esta aumenta sua profundidade no sentido partindo do perfil 387 em direção ao perfil 389 como representado pela linha tracejadas em vermelho na figura 21.

O perfil 390 apresenta hipérbole de difração na posição 20-26 metros de dimensões métricas, possuindo 6 metros de largura por 3,6 de profundidade. Partindo do critério utilizado na análise dos outros radargramas, pode-se observar que este apresenta um forte refletor com um padrão de fortes amplitudes abaixo da difração associado ao mesmo sendo assim pode ser interpretada como a presença de uma caverna neste perfil.

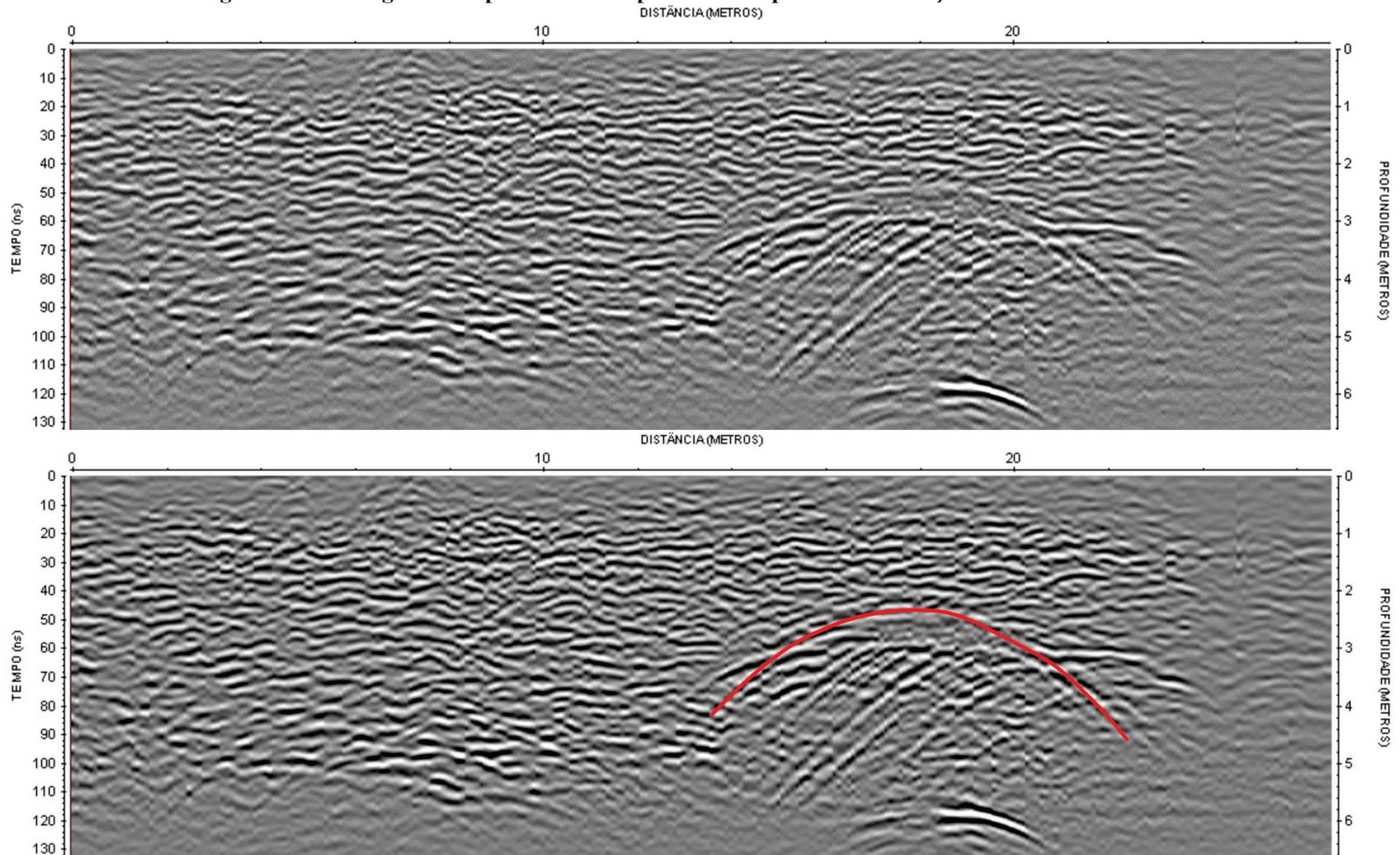
Através dos resultados obtidos foi possível inferir a zona de influência das cavernas que foi delineada com uma linha vermelha tracejada (Figura 21). Observa-se que as regiões de maior proximidade à cratera apresentam a maior parte das feições de vazios e cavernas.

**Figura 37 - Radargrama do perfil 387 interpretado. As hipérboles de difração estão destacadas em vermelho**



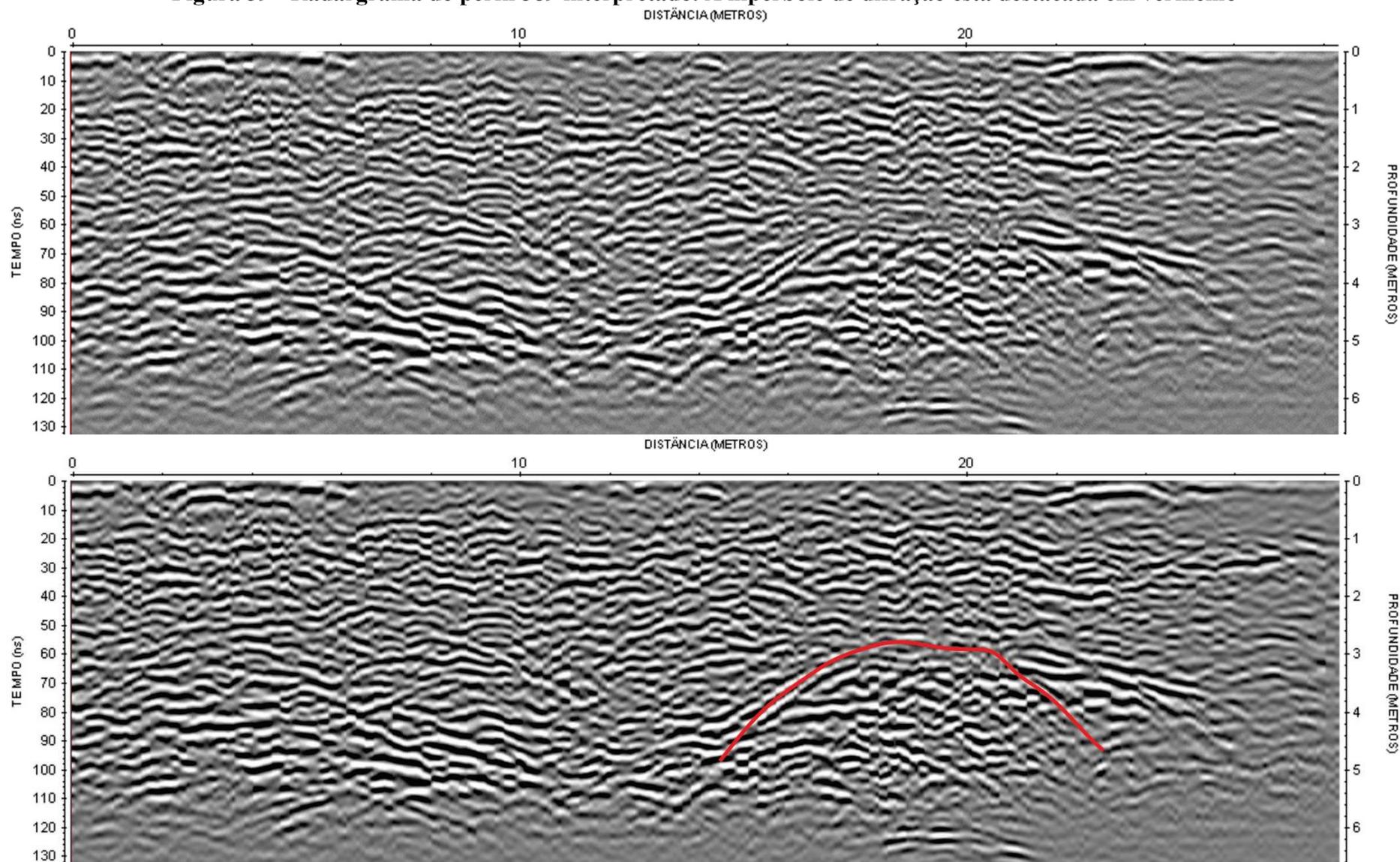
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 38 - Radargrama do perfil 388 interpretado. A hipérbole de difração está destacada em vermelho



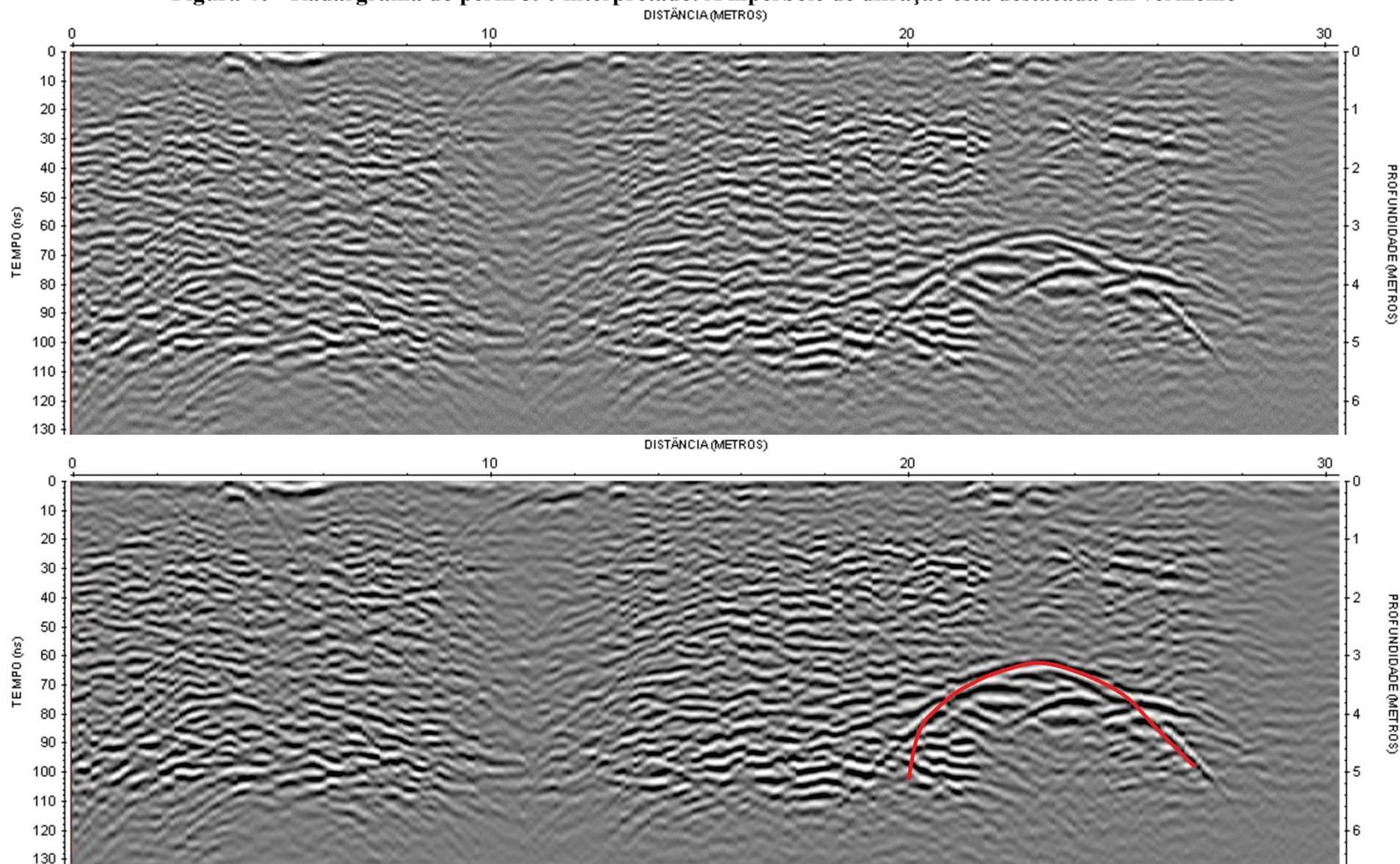
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 39 - Radargrama do perfil 389 interpretado. A hipérbole de difração está destacada em vermelho



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 40 - Radargrama do perfil 390 interpretado. A hipérbole de difração está destacada em vermelho



Fonte: Elaborado pelo autor.

## CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES

---

---

A análise dos resultados obtidos baliza o método GPR como sendo adequado ao imageamento de feições em subsuperfície presentes em rochas carbonáticas. O método se destaca dentre outros métodos de geofísica rasa por ter a melhor resolução, ser portátil, ter um custo inferior à maioria dos equipamentos de outras metodologias, e requerer um processamento simples e rápido dos dados.

Observou-se altas amplitudes nas reflexões associadas ao topo das cavernas, devido ao contraste das constantes dielétricas existentes entre as camadas carbonáticas hospedeiras com  $\epsilon_r = 8,3$  e o preenchimento dessas cavernas; o material interno das cavernas pode ser o ar, que possui constante dielétrica igual a 1 ou argila que tem constante dielétrica entre 5 e 40, a depender da humidade. A presença de vazios no interior da rocha carbonática podem ter diâmetros centimétricos a métricos, chegando até a dimensões de cavernas. Estes vazios geram difrações nas seções de radar, as quais auxiliam na interpretação sobre a integridade da rocha e seu aproveitamento comercial, bem como obter um modelo da distribuição e forma das grandes cavidades.

A aquisição de GPR na pedreira estudada revelou a presença de vazios na rocha cársticas que atingem dimensões métricas. Através da análise dos radargrama pode-se concluir a existência de duas cavernas, sendo a primeira no sentido partindo do perfil 383 até o perfil 385. Observa-se diminuição da largura e aumento da profundidade desta caverna nesse sentido. No perfil 383 ela aparece com largura de 8 metros e com profundidade 1,2 metros, já no perfil 384 ela possui 4 metros de largura por 2 metros de profundidade e em seguida no perfil 385 as dimensões dessa caverna diminuem para 3 metros de largura por 2,4 metros de profundidade. A segunda caverna foi observada no sentido partindo do perfil 387 até o perfil 389. Assim como a primeira caverna há uma diminuição na sua largura e aumento na profundidade, saindo de 6 metros de largura por 2,4 metros de profundidade no perfil 387, para 5 metros de largura por 2,6 metros de profundidade no perfil 388 até alcançar 5 metros de largura por 3,2 metros de profundidade no perfil 389.

Como observado, as cavernas constituem um prolongamento da cratera e vão se afunilando conforme se distancia da cratera. Observar que o método provou ser útil para o planejamento de lavra da rocha ornamental Bege Bahia, uma vez que a detecção de vazios permiti um melhor planejamento da frente de lavra evitando assim a futura lavra de blocos que seriam considerados impróprios para a venda devido a presença de vazios. O método então tem

relevância para o estudo de áreas de pedreiras diminuindo assim o custo da extração e maximizando o retorno financeiro.

## REFERÊNCIAS

---

---

- ALMEIDA, F.F.M.; BRITO NEVES, B.B.; CARNEIRO, C.D.R.. **The origin and evolution of the South America Platform**. Earth-Science Reviews, v. 50, p. 77-111, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(99\)00072-0](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(99)00072-0). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012825299000720>. Acesso em: 11 novembro 2019.
- ALONSO-ZARZA, A.M.. **Palaeoenvironmental significance of palustrine carbonates and calcretes in the geological record**. Earth-Science Reviews, v. 60, n. 3-4, p. 261-298, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(02\)00106-X](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(02)00106-X). Disponível em: <https://eprints.ucm.es/25254/>. Acesso em: 11 novembro 2019.
- ANNAN, A. P.; COSWAY, S. W.. **Simplified gpr beam model for survey design**. SEG Technical Program Expanded Abstracts, p. 356-359, 1992. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1822088>. Disponível em: <https://library.seg.org/doi/abs/10.1190/1.1822088>. Acesso em: 11 novembro 2019.
- ANNAN, A.P.. **Ground Penetrating Radar Workshop Notes**. Sensors & Software, Mississauga, Canada, 2001.
- AULER, A.S. **Karst Evolution and Palaeoclimate in Eastern Brazil**. Doctoral Thesis (Doctor of Philosophy) - University of Bristol, England, 1999. Disponível em: [https://research-information.bristol.ac.uk/en/theses/karst-evolution-and-paleoclimate-of-eastern-brazil\(0efa53d1-8d53-46aa-9873-cc7f0ef35a99\).html](https://research-information.bristol.ac.uk/en/theses/karst-evolution-and-paleoclimate-of-eastern-brazil(0efa53d1-8d53-46aa-9873-cc7f0ef35a99).html). Acesso em: 11 novembro 2019.
- AULER, A.S.; SMART, P.L.; WANG, X.; CRISTALLI, P.S.; EDWARDS, R.L. **O calcário Caatinga e os Carbonatos secundários Superficiais do Norte da Bahia: Geocronologia e Significado Paleoambiental**. *In*: Anais IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, Recife. 2003.
- BELITARDO, A.S. **Análise estrutural, hidrogeológica e hidroquímica do manancial subterrâneo Poço Verde, Município de Orolândia, Bahia**. 2010. Trabalho de Graduação (Bacharelado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia. Bahia, 2010.
- BORGES, S.V.F; BALSAMO, F.; VIEIRA, M.M.; IACUMIN; P.; SRIVASTAVA; N.K, STORTI, F.; BEZERRA, F.H.R. **Pedogenic calcretes within fracture systems and beddings in Neoproterozoic limestones of the Irecê Basin, northeastern Brazil**. Sedimentary Geology, v.341, p. 119-133, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2016.05.012>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0037073816300847>. Acesso em: 11 novembro 2019.
- BOTELHO, M. A. B.; MUFTI, I. R.. **Exploitation of Limestone Quarries in Brazil with Depth Migrated Ground-Penetrating Radar Data**. *In*: Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, v.1, p. 536-539., 1997, São Paulo.

BOTELHO, M.A.B.; ARAÚJO, F.F.. **Detecção de Cavernas e Estruturas de Dissolução em Rochas Carbonáticas usando Radar (GPR)**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, v.2, p. 388-390, 1996.

BRANNER, J. C.. **Aggraded limestone plains of the interior of Bahia and the climatic changes suggested by them**. GSA Bulletin, v. 22, n. 1, p. 187-206, 1911. DOI: <https://doi.org/10.1130/GSAB-22-187>. Disponível em: <https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/gsabulletin/article-abstract/22/1/187/2656>. Acesso em : 11 novembro 2019.

BRASIL. **Decreto nº 6640, de 7 de fevereiro de 2008**. Dá nova redação aos arts. 1º, 2º, 3º, 4º e acrescenta os arts. 5-A e 5-B ao Decreto nº 99,556, de 1º de outubro de 1990, que dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. Brasília, DF: Presidência da República, [2008]. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2008/Decreto/D6640.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2008/Decreto/D6640.htm). Acesso em: 12 novembro 2019.

BRITO NEVES, B.B.; CAMPANHA, G.A.; SANTOS, R.A.. **A discordância angular e erosiva entre os grupos Chapada Diamantina e Bambuí (Una) na folha Mirangaba-Bahia**. Geologia USP. Série Científica, v.12, 99–114, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.5327/Z1519-874X2012000200007>. Disponível em: <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/GUSPSC/article/view/3260>. Acesso em: 11 novembro 2019.

CONTI, I. M. M.. **Imageamento GPR e medidas petrofísicas de rochas carbonáticas carstificadas da formação salitre, norte da Bahia**. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/25800>. Acesso em: 11 novembro 2019.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea. Diagnóstico do Município de Ouro-lândia – Bahia**. 2005. Disponível em: [http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/item/17508/Rel\\_Umburamas.pdf?sequence=1](http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/item/17508/Rel_Umburamas.pdf?sequence=1). Acesso em: 11 novembro 2019.

DANDERFER FILHO A., LAGOEIRO L. E. & ALKMIM F. F.. **O Sistema de dobramentos e empurrões da Chapada Diamantina (BA): Registro da inversão do Aulacógeno do Espinhaço no decorrer do Evento Brasileiro**. In: SBG, II Simpósio sobre o Cráton São Francisco - Evolução Tectônica e Metalogenética, Anais, p. 197-199, 1990.

DANDERFER FILHO A.. **Análise Estrutural Descritiva e Cinemática do Supergrupo Espinhaço na Região da Chapada Diamantina, Bahia, Brasil**. 1990. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Geologia) - UFOP, Ouro Preto, 1990.

DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P.. **Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy**. Geophysical Prospecting, v.37, p.531-551, 1989. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1989.tb02221.x>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2478.1989.tb02221.x>. Acesso em: 11 novembro 2019.

FISHER, E., MCMECHAN, G. A. & ANNAN, A. P. **Acquisition and processing of wide-aperture ground-penetrating radar data**. *Geophysics*, v.57, p. 495-504, 1992a

FISHER, E., MCMECHAN, G. A., ANNAN, A. P. & COSWAY, S. W. **Examples of reverse-time migration of single-channel, ground-penetrating radar profiles**. *Geophysics*, v.57, p.577-586, 1992b

FORD, D. C.; WILLIAMS, P. W. **Karst Geomorphology and Hydrology**. London: Chapman and Hall, 1989.

FREIRE, A. L. C.; BOTELHO, M. A. B.. **Aplicações do método GPR na implantação e orientação de Lavras da Rocha Ornamental Mármore Bege - BA, Ourolândia (BA)**. 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 15-18 August 2011. DOI: 10.1190/sbgf2011-269. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/269053095\\_Aplicacoes\\_do\\_metodo\\_GPR\\_na\\_implantacao\\_e\\_orientacao\\_de\\_Lavras\\_da\\_Rocha\\_Ornamental\\_Marmore\\_Bege\\_-\\_Bahia\\_Ourolandia\\_BA](https://www.researchgate.net/publication/269053095_Aplicacoes_do_metodo_GPR_na_implantacao_e_orientacao_de_Lavras_da_Rocha_Ornamental_Marmore_Bege_-_Bahia_Ourolandia_BA). Acesso em: 11 novembro 2019.

GILBERT, J.; DANIELPOL, D. L.; STANFORD, J. A.. **Groundwater ecology**. New York: Academic, 1994.

GUIMARÃES, J. T.. **A Formação Bebedouro no Estado da Bahia; faciologia, estratigrafia e ambientes de sedimentação**. 1996. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, 1996.

GUIMARÃES, J.T.; MISI, A.; PEDREIRA, A.J.; DOMINGUES, J.M.L.. **The Bebedouro Formation, Una Group, Bahia (Brazil)**. *Geological Society of London's Memoirs* 36, p.503–508, November 2011.

GUNN, J. **Encyclopedia of Caves and Karst Science**. 1<sup>st</sup> edition. New York: Routledge, 2003.

HEIMER, M.. **Modelagem Numérica 2D e 3D de levantamentos de GeoRadar em Rochas Ornamentais**, 2010,88p. Tese (Doutorado em Geofísica) - Instituto de Geociências. Universidade Federal da Bahia, Bahia, 2010.

JESUS, T. E. S.; REIS JR, J. A.; CASTRO, D. L.; LIMA-FILHO, F. P.. **Imageamento digital de paleocavernas colapsadas com ground penetrating radar**. *Geol. USP, Sér. cient.*, São Paulo, v. 12, n. 3, p. 1-84, Dezembro 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.5327/Z1519-874X2012000300005>. Disponível em: <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/GUSPSC/article/view/3268>. Acesso em: 11 novembro 2019.

KUCHENBECKER, M.H.; REIS, L.S.; FRAGOSO, D.G.C.. **Caracterização estrutural e considerações sobre a evolução tectônica da Formação Salitre na porção central da Bacia de Irecê, norte do Cráton do São Francisco (BA)**. *Geonomos*, v.19, n.2, p.42–49, 8 fevereiro 2011. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/revistageonomos/article/view/11760>. Acesso em: 11 novembro 2019.

LAGOIRO L.E. **Estudo da deformação nas sequências carbonáticas do Grupo Una, na região de Irecê, Bahia.** Dissertação (Mestrado em Geologia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 1990.

LAI, W.W.; DÉROBERT, X.; ANNAN, P.. **A review of Ground Penetrating Radar application in civil engineering: A 30-year journey from Locating and Testing to Imaging and Diagnosis.** NDT&E International, v. 96, p. 58-78, June 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2017.04.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963869517300178?via%3Dihub>. Acesso em: 11 novembro 2019.

LOUCKS, R. G.. **Paleocave carbonate reservoirs: origins burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implications.** AAPG Bull. v. 83, n. 11, p. 1795-1834, 1999.

MABESOONE, J.M.; ROLIM, J.L.; CASTRO, C.. **Late Cretaceous and Cenozoic history of Northeastern Brazil.** Geologie en Mijnbouw, v. 56: p.129-139. 1977.

MCCANN, D. M.; JACKSON, P. D.; FENNING, P.. **Comparison of the seismic and ground probing radar methods in geological surveying.** IEEE Proceedings, v. 135, p. 380-391, August 1988. DOI: 10.1049/ip-f-1.1988.0045. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4647488>. Acesso em: 11 novembro 2019.

MISI, A.. **O Grupo Bambuí no Estado da Bahia.** In: Inda, H.V. (Ed.), Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia 1. Textos Básicos, SME/CPM, Salvador, p. 120–154, 1979, Salvador.

MISI, A.; KYLE J.R.. **Upper Proterozoic carbonate stratigraphy, diagenesis, and stromatolitic phosphorite formation, Irece Basin, Bahia, Brazil.** Journal of Sedimentary Research, v.64, n.2a, p. 299-310, April 1994. DOI: <https://doi.org/10.1306/D4267D84-2B26-11D7-8648000102C1865D>. Disponível em: <https://pubs.geoscienceworld.org/sepm/jsedres/article-abstract/64/2a/299/98574>. Acesso em: 20 novembro 2019.

MISI, A.; VEIZER, J.. **Neoproterozoic carbonate sequences of the Una Group, Irecê Basin, Brasil: chemostratigraphy, age and correlations.** Precambrian Research, v. 89, p. 87-100, May 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(97\)00073-9](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(97)00073-9). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301926897000739>. Acesso em: 11 novembro 2019.

NEVES, F. A., ROULSTON, M. S. & MILLER, J. A. **Signature deconvolution of ground penetrating radar data.** Revista Brasileira de Geofísica, v.13(2), p.143-153, 1995

NOSSA, T.C.B; LEAL, L.R.B.; ZUCHI, M.R.. **Hidroquímica e índices de saturação dos minerais do sistema aquífero cárstico salitre na região de Irecê-Lapão, Bahia, Brasil.** In: Anais II Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo, São Paulo, suplemento, 2011.

PALMER, A. N.. **Origin and morphology of limestone caves.** Geological Society of America Bulletin, New York, v. 103, n. 1, p. 1-21, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1130/0016->

7606(1991)103<0001:OAMOLC>2.3.CO;2. Disponível em:  
[https://www.researchgate.net/publication/283464724\\_Origin\\_and\\_morphology\\_of\\_limestone\\_caves](https://www.researchgate.net/publication/283464724_Origin_and_morphology_of_limestone_caves). Acesso em: 11 novembro 2019.

PEDREIRA, A.J.; ARCANJO, B.A.; PEDROZA, C.J.; Oliveira, J.E.; Silva, B.C.. **Projeto Bahia —Geologia da Chapada Diamantina. CPRM.** Ministério Das Minas e Energia. República Federativa do Brasil, Brasília — DF, 1975.

PEDREIRA, A.J.; ROCHA, A.J.D.; GUIMARÃES, J.T.; MORAIS FILHO, J.; BONFIM, L.F.C., TESCH, N.. **Folha SC. 24-Y-C-Irecê. Carta geológica 1:100.000.** Projeto Bacia de Irecê-CPRM CBPM, Salvador -BA. 1985.

PENHA, A. E. P. P.. **O Calcário Caatinga de Ouroilândia, Bahia: feições diagnósticas, gênese e evolução de um perfil calcrete.** 1994. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia. Bahia, 1994.

PESTANA, R. C; BOTELHO, M. A. B.. **Migração de dados de radar (GPR) com correção topográfica simultânea.** Rev. Bras. Geof., vol.15, n.1, p.3-10, 1997. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X1997000100001>. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-261X1997000100001&lng=en&nrm=iso&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-261X1997000100001&lng=en&nrm=iso&tlng=pt). Acesso em: 11 novembro 2019.

PINTO, M. V.. **Imageamento de depósitos sedimentares análogos a reservatórios de hidrocarbonetos da Bacia do Recôncavo utilizando o GPR,** Trabalho Final de graduação, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2007.

REYNOLDS, J.M.. **An introduction to applied and environmental geophysics.** England: John Wiley and Sons, 1997.

RICHE, G.; RAMBAUD, D., RIERA, M.. **Étude Morphologique d'un encroûtement Calcaire Région d'Irecê, Bahia, Brésil.** Cahiers ORSTM, Série Pédologie. v.19, n. 3, p. 257–270, 1982. Disponível em: <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:03199>. Acesso em: 11 novembro 2019.

SANCHES, A.L.. **Fosforitos Neoproterozóicos dos Grupos Vazante (MG) E Una (BA): origem, idades e correlações.** 2012. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia. Bahia, 2012.

SANDMEIER: **Reflex-Win.** Version 7.5.9 themes. [S.I]: Sandmeier geophysical research, 2015. Disponível em: <https://www.sandmeier-geo.de/download.html>. Acesso em: 11 novembro 2019.

SANTOS, R.S.V. **Deteção de vazios em rochas carbonáticas utilizando o método GPR (Ground Penetrating Radar).** 2013. Trabalho de Graduação (Bacharelado em Geofísica) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia. Bahia, 2013.

SANTOS, R.S.V.; VILAS BOAS, D.B.R.; BOTELHO, M.A.B.. **Deteção de Vazios em Rochas Carbonáticas Utilizando o Método GPR.** 14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, p. 533-538, 3-6 August 2015. DOI: 10.1190/sbgf2015-106. Disponível em:

[https://www.researchgate.net/publication/301433127\\_Deteccao\\_de\\_Vazios\\_em\\_Rochas\\_Carbonaticas\\_Utilizando\\_o\\_Metodo\\_GPR](https://www.researchgate.net/publication/301433127_Deteccao_de_Vazios_em_Rochas_Carbonaticas_Utilizando_o_Metodo_GPR). Acesso em: 11 novembro 2019.

SEPLAN. Secretaria do Planejamento. **Territórios de Identidade**. 2018. Disponível em: <http://www.seplan.ba.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=17>. Disponível em: 11 novembro 2019. Acesso em: 11 novembro 2019.

SILVA, A. B.. **Recursos hídricos subterrâneos da bacia do rio Salitre, Bahia: uso sustentável na indústria do mármore Bege Bahia**. 2006. – (Série Arquivos Abertos; 24). Organização e síntese por: Luiz Luna Freire de Miranda e Luiz Rogério Bastos Leal.

SOUZA, S.L.; BRITO, P.C.R.; SILVA, R.W.S.. **Estratigrafia, Sedimentologia e Recursos Minerais da Formação Salitre na Bacia de Irecê, Bahia**. Série Arquivos Abertos 17, p. 56, 1993, Salvador.

STEVANOVIC, Z.. **Karst Aquifers - Characterization and Engineering**. 1st Edition. Switzerland: Springer International Publishing AG, 2016.

SUGUIO, K.; BARCELOS, J.H.; MATSUI, E.. **Significados paleoclimáticos e paleoambientais das rochas calcárias da Formação Caatinga (BA) e do Grupo Bauru (MG/SP)**. In: Anais XXXI Congresso Brasileiro de Geologia, Balneário de Camboriú, Santa Catarina, v.1, p. 607–617, 1980.

UTSI, E.C.. **Ground Penetrating Radar**. 1st Edition. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2017.

VESTENA, L.R.; KOBAYAMA, M.; SANTO, L.J.C.. **Consideração sobre gestão ambiental em áreas cársticas**. RAEGA- O Espaço Geográfico em Análise, v.6, 2002. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v6i0.18518>. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/18518>. Acesso em: 11 novembro 2019.

WHITE, W. B.. **Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains**. Oxford: Oxford University Press, 1988.

XAVIER NETO, Pedro. **Processamento e interpretação de dados 2D e 3D de GPR :aplicações no imageamento de feições cársticas e estruturas de dissolução no campo de petróleo de Fazenda Belém-CE**. 2006. 191 f. Tese (Doutorado em Geodinâmica; Geofísica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.