



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

JOÃO VICTOR DE MEDEIROS BARBOSA

**MODELAGEM 3D UTILIZANDO VANT E GPR EM UM AFLORAMENTO DA
FORMAÇÃO JANDAÍRA NO MUNICÍPIO DE BARAÚNA/RN**

MONOGRAFIA

NATAL

2023

JOÃO VICTOR DE MEDEIROS BARBOSA

**MODELAGEM 3D UTILIZANDO VANT E GPR EM UM AFLORAMENTO DA
FORMAÇÃO JANDAÍRA NO MUNICÍPIO DE BARAÚNA/RN**

Trabalho de conclusão de curso de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, apresentado como requisito à obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Professor Dr. Francisco Pinheiro Lima Filho

Coorientador: Dr. Yoe Alain Reyes Pérez

NATAL

2023

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI

Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Setorial Prof. Ronaldo Xavier de Arruda - CCET

Barbosa, João Victor de Medeiros.

Modelagem 3D utilizando VANT e GPR em um afloramento da formação Jandaíra no município de Baraúna/RN / João Victor de Medeiros Barbosa. - 2023.

100 f.: il.

Monografia (graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Departamento de Geologia, Curso de Geologia. Natal, RN, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Francisco Pinheiro Lima Filho.

Coorientação: Dr. Yoe Alain Reyes Pérez.

1. Geologia - Monografia. 2. GPR - Monografia. 3. VANT - Monografia. 4. Modelagem 3D - Monografia. I. Lima Filho, Francisco Pinheiro. II. Pérez, Yoe Alain Reyes. III. Título.

RN/UF/CCET

CDU 551.1/.4

JOÃO VICTOR DE MEDEIROS BARBOSA

**MODELAGEM 3D UTILIZANDO VANT E GPR EM UM AFLORAMENTO DA
FORMAÇÃO JANDAÍRA NO MUNICÍPIO DE BARAÚNA/RN**

Trabalho de conclusão de curso de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, apresentado como requisito à obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

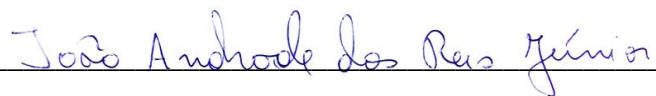
Banca Examinadora



Prof. Dr. Francisco Pinheiro Lima Filho (Orientador)
Departamento de Geologia (UFRN)



Dr. Yoe Alain Reyes Pérez (Coorientador)
Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG/UFRN)



Prof. Dr. João Andrade Reis Júnior (Membro Externo)
Universidade Federal Rural do Amazonas (UFRA)

NATAL

2023

Dedico este trabalho à toda minha família.
Em especial, minha bisa Severina (*in memorian*).

AGRADECIMENTOS

Reservo este espaço para agradecer cada um que esteve comigo nessa que foi a mais desafiante jornada que tracei.

Começo agradecendo a Deus pela força que meu deu de seguir em frente, segurando a minha mão até nos momentos que eu mesmo me achei incapaz.

Agradeço à minha avó, Sueni, que virou noites em sua máquina de costura abdicando de muito da vida para dar dignidade aos meus dias, junto da minha mãe, Kaliny, que se dividiu em várias, trabalhando duro para me dar tudo que precisei pra chegar até aqui. As duas mulheres fortes que muito contribuíram para a formação do meu caráter.

Ao meu tio, Andreeison, por ter depositado em mim fé, me acompanhando e me dando suporte na minha caminhada além de todo seu carinho e afeto mesmo vivendo por anos longe de mim em decorrência do trabalho.

Agradeço ao meu primo Caio, que junto do meu tio me impulsionou a entrar no mundo da Geologia e são desde sempre exemplos de profissionais para mim. Obrigado pelos ensinamentos e oportunidades, foram imprescindíveis na formação do profissional que sou hoje.

Agradeço a minha namorada, Maria, por toda compreensão em cada final de semana abdicado. Obrigado por ter sido a melhor companheira que alguém poderia ter, estando ao meu lado em dias de tempestade, trazendo sua luz.

Agradeço ao meu orientador, o Professor Doutor Francisco Pinheiro Lima Filho, por ter me acolhido no laboratório se tornando mais que um orientador para mim, um amigo para as horas descontraídas, para o café da tarde, e um pai na hora de puxar a orelha, buscando sempre extrair o melhor de cada um de seu time, assim como um grande líder faz. É uma honra trabalhar ao seu lado.

Ao meu coorientador, Doutor Yoe Alain Reyes Pérez, por ter acreditado em mim e por ter sido um paizão, assim como é conhecido por aqueles que tem o prazer de trabalhar ao seu lado. Não esquecerei quando carinhosamente com sua cara de mal olhou para mim enquanto éramos colegas de empresa e disse: “- Flipper, vai em busca do seu diploma, sem ele somos nada”. Serei sempre grato pelo apoio, ensinamentos e todo suporte para que essa fase da minha vida se concretizasse.

Agradeço a todos os amigos que a Geologia me deu, a todos da minha turma os que seguiram ou trilharam novos caminhos, todos ajudaram de alguma forma com que eu me tornasse o profissional que sou hoje.

Agradeço ao meu amigo e irmão que a vida me presenteou, o qual tenho profunda admiração pelo grande pesquisador que é, Paulo Victor, por sua generosidade e todo apoio dado ao longo da graduação se mostrando sempre solícito nas horas difíceis até o encerramento deste ciclo.

Agradeço a Pauletti que transcendeu os laços de amizade se tornando como uma grande irmã me dando um empurrãozinho nessa fase final trazendo a motivação e apoio que desencadearam na construção deste trabalho.

Por fim, mas não menos importante, agradeço ao Laboratório de Análises Estratigráficas (LAE) do qual me orgulho de fazer parte pela família que ele me deu, pessoas ímpares, profissionais incríveis. Todos são importantes nessa conquista por todo suporte que tive ao longo dessa jornada.

“São as nossas escolhas que revelam o que realmente somos, muito mais do que as nossas qualidades.”

A. Dumbledore

RESUMO

Na indústria do petróleo, diminuir a incerteza de conhecimento existente a nível de reservatórios de hidrocarbonetos é de grande relevância para a economia. As rochas carbonáticas de reservatórios petrolíferos podem apresentar diferentes tipos de heterogeneidade, podendo funcionar como barreiras de fluxo ou como dutos. Neste último caso com boa porosidade e permeabilidade associada ao seu sistema de fraturas e dissolução cárstica. Este trabalho tem o objetivo de elaborar um modelo virtual 3D, da geometria interna e externa de um afloramento de rochas carbonáticas, análogas a reservatórios petrolíferos, com o uso de um método geofísico raso (o método de Georadar ou *Ground Penetrating Radar - GPR*) e de um VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado). O estudo foi realizado em um afloramento de rochas carbonáticas da Formação Jandaíra, Bacia Potiguar, situado no município de Baraúna, no estado do Rio Grande do Norte, distante cerca de 322 km de Natal. As rochas carbonáticas, de idade mesozoica, que pertencente ao Grupo Apodi, apresentam-se fraturadas e carstificadas. Para o imageamento em subsuperfície foi utilizado o método de GPR que permite o imageamento das camadas em subsuperfície rasa, a partir da injeção de pulsos eletromagnéticos. Foi utilizado também uma aeronave remotamente controlada para aquisição de imagens de alta resolução, georreferenciada com GPS geodésico, com o objetivo de gerar um modelo 3D de superfície. Este modelo de alta resolução possibilitou a identificação dos sistemas de fraturas que ocorrem na área de trabalho. Foi então elaborado um modelo virtual 3D, com base nas informações de superfície e de subsuperfície, usando o software Petrel, onde foram representadas as camadas sedimentares, as superfícies deposicionais e superfícies de dissolução. A metodologia utilizada neste trabalho poderá ser replicada em outros estudos que visem a caracterização e o imageamento 3D de afloramentos análogos a reservatórios.

Palavras-chave: GPR, VANT, Modelagem 3D.

ABSTRACT

Reducing the uncertainty of existing knowledge at the level of hydrocarbon reservoirs is of great importance for the economy of the oil industry. The karst landforms behave as a relevant heterogeneity of oil reservoirs due to its good permeability related to its fracture system and relative porosity. This work intends to contribute to the knowledge of this context and, from the use of a shallow geophysical method and UAV images, generate models that can be used to image outcrops analogous to reservoirs. The study was carried out in a carbonate rock outcrop of the Jandaíra Formation. The area is inserted in the Potiguar basin and located in the municipality of Baraúna, in the state of Rio Grande do Norte. In the area, there are Mesozoic rock outcrops from the Jandaíra Formation that belongs to the Apodi Group. These outcrops are represented by fractured carbonate rocks that can undergo dissolution processes in the presence of acid water, providing the formation of a karst landform. Using the Georadar (Ground Penetrating Radar - GPR) for imaging the subsurface allowed to identify subsurface layers from the injection of electromagnetic pulses and to differentiate the subsurface strata based on the dielectric difference between the layers. In addition to the GPR method, a remotely controlled aircraft was used to acquire high-resolution images and 3D surface modeling. Besides, it was used a GPS-RTK receiver that enabled the acquisition of more accurate altimetric data and the identification of fracture systems. As the result of the work accomplished, it was generated a 3D virtual model using the Petrel software, representing the sedimentary layers, their depositional and resistance surfaces. The methodology used in this work can be replicated in other studies that aim the characterization and 3D imaging of outcrops analogous to reservoirs.

Key words: GPR, VANT, 3D Modeling.

Lista de Figuras

Figura 1 - Mapa de Localização da área de estudo, delimitada por uma linha vermelha.	4
Figura 2 - Mapa geológico regional evidenciando a compartimentação tectônica do estado do Rio Grande do Norte. Fonte: Autor, 2023.....	6
Figura 3 - Carta estratigráfica da Bacia Potiguar. Fonte: Pessoa Neto, 2007.....	8
Figura 4 - Mapa da Área de estudo delimitada em vermelho.	14
Figura 5 - Representação das fases de dissolução do calcário. Fonte: Adaptado de Auler & Zogbi, 2005.....	15
Figura 6 - (A): Bloco diagrama ilustrando os quatro sistemas de fraturas e suas direções; (B): Bloco diagrama ilustrando a relação dos elipsóides de tensão e a formação dos estilólitos. Fonte: Adaptado de Letouzey & Cramez, 1986.....	16
Figura 7 - Imagem ilustrativa de parte do afloramento, em amarelo demarcando camada mais suscetível a dissolução, em vermelho estilólitos sub-paralelos e paralelos a camada. Fonte: Autor, 2022.	16
Figura 8 - Imagem ilustrando as gretas de contração em linha vermelha com formas hexagonais. Fonte: Autor, 2022.	17
Figura 9 - Fluxograma dos procedimentos metodológicos adotados neste trabalho. Fonte: Autor, 2023.....	19
Figura 10 - Equações de Maxwell e as relações dos campos eletromagnéticos. Fonte: adaptado de JOL, 2009.	22
Figura 11 - Relação do campo eletromagnético formado por campo elétrico indicado pelas setas vermelhas e magnético indicado pelas setas azuis ortogonais entre si e perpendiculares a uma direção de propagação.....	23
Figura 12 - Arranjo de levantamento WARR. Fonte: Adaptado de Pinto, 2007.....	27
Figura 13 - Arranjo do tipo CMP. Fonte: Adaptado de Pinto, 2007.	27
Figura 14 - Representação do sistema de funcionamento do GPR onde (Tx) - Antena Transmissora, (Rx) - Antena Receptora, (A) Unidade de controle. Fonte: Autor, 2023, baseado em Annan, 1991.	28
Figura 15 - Realização de amostragem de perfil GPR na área de estudo. Fonte: Autor, 2022... 29	29
Figura 16 - Levantamento de perfil GPR atrelado ao receptor de GPS RTK para georreferenciamento do perfil. Fonte: Autor, 2022.	29
Figura 17 - Fluxograma das etapas realizadas para o processamento dos dados de GPR. Fonte: Autor: 2023.	30

Figura 18 - Exemplificação da escolha da altitude de voo considerando todos os obstáculos dentro da área de levantamento de modo a garantir a segurança da atividade no local. Fonte: Autor, 2023	34
Figura 19 - VANT Phantom 4 Pro V2, pertencente ao LAE-UFRN, utilizado para o levantamento aerofotogramétrico neste estudo. Fonte: Autor, 2023.	36
Figura 20 - Aplicativo Pix4Dcapture utilizado para execução do plano de voo (A); Aplicativo DJI GO 4 utilizado para calibrar a bússola do equipamento, testar conexão, definir homepoint e voos autônomos testes (B).	37
Figura 21 - Representação gráfica dos planos cartesianos considerados na aquisição do aerolevantamento contendo as posições geográficas em X e Y e altitude no plano Z. Fonte: Autor, 2023.	37
Figura 22 - Alvo branco com fitas vermelhas (A); Alvo preto com fitas amarelas (B). Fonte: Autor, 2023.....	38
Figura 23 - Fluxograma das etapas do processamento das imagens adquiridas com levantamento aéreo realizado com VANT na área de estudo. Fonte: Autor, 2023.	39
Figura 24 - Equipamento GPS RTK R8S Trimble, pertencente ao LAE-UFRN, utilizado neste trabalho. Fonte: Autor, 2022.....	40
Figura 25 - Apresentação da organização dos dados dos pontos de controle em .txt, como devem ser importados no software. Fonte: Autor, 2023.	41
Figura 26 - Pontos de controle antes do ajuste fora do centro do alvo demarcado (A); Pontos de controle ajustados com seus respectivos alvos centralizados para correção ortométrica das imagens (B). Fonte: Autor, 2023.	42
Figura 27 - Distribuição dos alvos ao longo da área de estudo com detalhe para os alvos 16 e 17 delimitados pelo retângulo vermelho. Fonte: Autor, 2023.	44
Figura 28 - Tie Points com 1.204.766 pontos (A); Resultado após construção da Dense Cloud com 91.425.382 pontos (B). Fonte: Autor, 2023.	47
Figura 29 - Comparativo da Dense Cloud com a Malha (Mesh) com textura aplicada. Fonte: Autor, 2023.	48
Figura 30 - Comparativo entre os produtos MDS e MDT. Em (A) o MDS considerando todas as feições para gerar o modelo de elevação com destaque para uma área com presença de construção (1), veículo (2) e vegetação (3) e abaixo o recorte dessa área. Em (B) o MDT desconsiderando os objetos acima do nível do solo com o mesmo recorte do retângulo vermelho para fins comparativos.....	49
Figura 31 – Ortomosaico produzido a partir das ortofotos adquiridas com o aerolevantamento. Fonte: Autor, 2023.	50

Figura 32 - (A) Curvas de nível geradas a partir do MDS considerando qualquer feição ou objeto acima do solo; (B) Curvas de nível geradas a partir do MDT desconsiderando feições e objetos que estejam acima do solo como veículos, construções e vegetação. Fonte: Autor, 2023.	51
Figura 33 - (A) MDT sem aplicação do filtro hillshade; (B) MDT com aplicação da técnica hillshade com iluminação na direção N-S; (C) MDT com aplicação da técnica hillshade com iluminação na direção NE-SW; (D) MDT com aplicação da técnica hillshade com iluminação na direção SE-NW; (E) MDT com aplicação da técnica hillshade com iluminação na direção E-W. Fonte: Autor, 2023.	52
.....	52
Figura 34 - Diagrama de roseta demonstrando o trend preferencial NW-SE dos lineamentos traçados dentro dos limites da área de estudo. Fonte: Autor, 2023.	52
Figura 35 - Padrões de reflexão. Fonte: Adaptado de Mitchum et. al., 1977.	55
Figura 36 - Propriedades das reflexões. Fonte: Adaptado de Veeken, 2007.	55
Figura 37 - Mapa de localização demonstrando a disposição dos onze perfis GPR realizados enfatizando suas direções e sentidos de caminhamento. Fonte: Autor, 2023.	56
Figura 38 – Disposição espacial dos perfis GPR realizados neste trabalho, conforme Figura 26, aqui dispostos sobre o ortomosaico adquirido com o aerolevantamento. Fonte: Autor, 2023.	57
Figura 39 - Recorte do perfil GPR 1 (retângulo azul), exemplificando as radarfácies R1, R2 e R3 com suas características. Fonte: Autor, 2023.	58
Figura 40 - Princípios de migração por difração. (a) Caminhos de reflexão de um ponto refletor. (b) Migração de eventos de reflexão individuais para cada ponto com distância horizontal diferente. (c) Frente de onda e curva de convexidade máxima para um evento específico de reflexão. Fonte: Kearey et. al., 2002.	59
Figura 41 - Perfil de GPR 1 sem interpretação (A); Perfil de GPR 1 com interpretação (B); Interpretação do perfil de reflexão de GPR 1, com fraturas verticalizadas (linhas pretas verticais), refletores paralelos a subparalelos (linhas pretas horizontais), refletores divisores das radarfácies (amarelo e laranja) e cavidades (em vermelho).	60
Figura 42 - Perfil de GPR 2 sem interpretação (A); Perfil de GPR 2 com interpretação (B); Interpretação do perfil de reflexão de GPR 2, com fraturas verticalizadas (linhas pretas verticais), refletores paralelos a subparalelos (linhas pretas horizontais), refletores divisores das radarfácies (amarelo e laranja) e cavidades (em vermelho).	61
Figura 43 - Perfil de GPR 3 sem interpretação (A); Perfil de GPR 3 com interpretação (B); Interpretação do perfil de reflexão de GPR 3, com fraturas verticalizadas (linhas pretas verticais), refletores paralelos a subparalelos (linhas pretas horizontais), refletores divisores das radarfácies (amarelo e laranja) e cavidades (em vermelho).	62

Figura 44 - Perfil de GPR 4 sem interpretação (A); Perfil de GPR 4 com interpretação (B); Interpretação do perfil de reflexão de GPR 4, com fraturas verticalizadas (linhas pretas verticais), refletores paralelos a subparalelos (linhas pretas horizontais), refletores divisores das radarfácies (amarelo e laranja) e cavidades (em vermelho).....	63
Figura 45 - Perfil de GPR 5 sem interpretação (A); Perfil de GPR 5 com interpretação (B); Interpretação do perfil de reflexão de GPR 5, com fraturas verticalizadas (linhas pretas verticais), refletores paralelos a subparalelos (linhas pretas horizontais), refletores divisores das radarfácies (amarelo e laranja) e cavidades (em vermelho).....	64
Figura 46 - Perfil de GPR 6 sem interpretação (A); Interpretação do Perfil de GPR 6 com fraturas verticalizadas (linhas pretas verticais), interface de R1/R2/R3 (linha amarela e laranja), padrão de reflexão (linhas pretas horizontais, recorte (linha azul) (B); Imagem retratando superfícies de dissolução evidenciadas em campo na área de estudo (C). Fonte: Autor, 2023.	65
Figura 47 - Perfil de GPR 7 sem interpretação (A); Perfil de GPR 7 com interpretação (B); Interpretação do perfil de reflexão de GPR 7, com fraturas verticalizadas (linhas pretas verticais), refletores paralelos a subparalelos e contorcidos (linhas pretas horizontais), interface das radarfácies (amarelo e laranja), cavidades e superfícies de dissolução (em vermelho).....	66
Figura 48 - Perfil de GPR 9 sem interpretação (A); Apenas a interpretação do perfil de reflexão de GPR 9 realizado, com fraturas verticalizadas (linhas pretas verticais), refletores paralelos a subparalelos e contorcidos (linhas pretas horizontais), interface das radarfácies (amarelo e laranja), cavidades e superfícies de dissolução (em vermelho) (B); Imagem de campo ilustrando o recorte do perfil com as superfícies de dissolução encontradas apontadas pelas setas rosas (C). Fonte: Autor, 2023.	68
Figura 49 - Perfil de GPR 10 sem interpretação (A); Perfil de GPR 10 com interpretação (B); Apenas a interpretação do perfil de reflexão de GPR 10 realizado, com fraturas verticalizadas (linhas pretas verticais), refletores paralelos a subparalelos e contorcidos (linhas pretas horizontais), interface das radarfácies (amarelo e laranja) e cavidades (em vermelho).....	69
Figura 50 - Perfil de GPR 11 sem interpretação (A); Perfil de GPR 11 com interpretação (B); Apenas a interpretação do perfil de reflexão de GPR 11 realizado, com fraturas verticalizadas (linhas pretas verticais), refletores paralelos a subparalelos e contorcidos (linhas pretas horizontais), interface das radarfácies (amarelo e laranja) e cavidades (em vermelho).....	70
Figura 51 - Perfil de GPR 8 sem interpretação (A); Interpretação do Perfil de GPR 8 com fraturas verticalizadas (linhas pretas verticais), interface de R1/R2/R3 (linha amarela e laranja), padrão de reflexão (linhas pretas horizontais), recorte (linha azul) (B); Ênfase do recorte do perfil evidenciando as reflexões hiperbólicas correlatas as zonas de fraturas verticalizadas (C). Fonte: Autor, 2023.	71

Figura 52 – Visualização tridimensional dos 11 perfis de reflexão realizados, com seta verde indicando o Norte. Fonte: Autor, 2023.....	72
Figura 53 - Aplicação das interpretações realizadas com os perfis de reflexão obtidos em perspectiva 3D, com seta verde indicando o Norte e radarfácies separadas por linhas vermelhas. Fonte: Autor, 2023.....	73
Figura 54 - MVA gerado a partir da integração dos dados de VANT e GPR obtidos com camada bege indicando radarfácies R1 e a posterior indicando R2, com seta verde indicando o norte. Fonte: Autor, 2023.....	73
Figura 55 - MVA criado a partir da integração dos dados de altimetria de alta precisão adquirida com VANT e de interpretação dos perfis de reflexão realizados com GPR, com seta indicando posição do norte. Fonte: Autor, 2023.....	74

Lista de tabelas

Tabela 1 - Diferentes constantes dielétricas para materiais diversos. Fonte: adaptado de Davis & Annan (1989) e Daniels (1996).....	21
Tabela 2 - Posição e altimetria dos alvos utilizados na correção dos dados do VANT. Fonte: Autor, 2023.....	44
Tabela 3 - Pontos de controle e os erros atribuídos após correção durante processamento. Fonte: Autor, 2023.....	45
Tabela 4 - Comprimento, Direção e Sentido de caminhamento dos onze perfis de GPR realizados ao longo da área de estudo	53

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Objetivos.....	2
1.1.1.	Objetivos Gerais	2
1.1.2.	Objetivos Específicos	2
2.	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA.....	3
3.	CONTEXTO GEOLÓGICO.....	5
3.1.	Geologia Regional	5
3.1.1.	Província Borborema	5
3.1.1.1.	Domínio São José do Campestre.....	7
3.1.1.2.	Domínio Rio Piranhas Seridó.....	7
3.1.1.3.	Domínio Jaguaribeano.....	7
3.1.2.	Bacia Potiguar	7
3.1.2.1.	Grupo Areia Branca	9
3.1.2.2.	Grupo Apodi.....	9
3.1.2.3.	Grupo Agulha.....	10
3.1.2.4.	Grupo Barreiras	11
3.2.	Geologia Local.....	12
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	17
4.1.	Etapa Pré Campo	20
4.2.	Etapa de Campo	20
4.3.	Etapa Pós Campo	20
4.4.	Método GPR	20
4.4.1.	Parâmetros de aquisição	24
4.4.2.	Métodos de aquisição GPR.....	26
4.4.2.1.	Refração e Reflexão de Grandes Aberturas Angulares (WARR)	27
4.4.2.2.	Ponto Médio Comum (CMP)	27

4.4.2.3. Perfil de Reflexão com Afastamento Constante	28
4.4.3. Processamento dos Dados	29
4.5. Método VANT.....	31
4.5.1. Parâmetros de Aquisição	32
4.5.2. Método de Aquisição.....	35
4.5.3. Processamento dos Dados	39
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
5.1. Produtos do aerolevantamento (VANT)	43
5.2. Interpretação dos perfis GPR	53
5.2.1. Perfil GPR 1, 2, 3, 4, 5.	59
5.2.2. Perfil GPR 6, 7, 9, 10 e 11.....	65
5.2.3. Perfil GPR 8	71
5.3. Modelo Virtual de Afloramento – MVA (3D).....	72
6. CONCLUSÕES.....	75
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77

1. INTRODUÇÃO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) do discente João Victor de Medeiros Barbosa é um dos pré-requisitos para a conclusão da graduação no Curso de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. A pesquisa que abrange este trabalho de conclusão foi financiada pelo projeto FurnaDOM – “Modelo Digital 3D da Furna Feia, Bacia Potiguar”, ANP/Petrobras. O referido projeto foi desenvolvido dentro do Laboratório de Análises Estratigráficas (LAE) do Departamento de Geologia da UFRN coordenado pelo Professor Doutor Francisco Pinheiro Lima Filho, orientador deste TCC, com a bolsa e recurso do Projeto FurnaDOM, financiado pela ANP/Petrobras.

O principal objetivo deste trabalho é elaborar um modelo 3D de superfície e subsuperfície de uma região na Bacia Potiguar, localizado no alto oeste, no município de Baraúna, no estado do Rio Grande do Norte onde afloram rochas carbonáticas fraturadas e carstificadas da Formação Jandaíra. Os dados de subsuperfície foram obtidos com a metodologia do Radar Terrestre de Penetração (*Ground Penetrating Radar – GPR*) que se baseia na emissão e recepção de ondas eletromagnéticas. A frequência das antenas utilizadas neste método varia entre 10 MHz e 2,6 GHz (ARAÚJO, 2013). Além do GPR, foi feito uso de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) para realizar o imageamento aéreo em conjunto com o receptor de GPS RTK, o que possibilitou a aquisição de ortofotos de alta resolução, georreferenciadas, permitindo a elaboração do Modelo Digital do Terreno (MDT) com isolinhas topográficas de alta precisão. A partir do trabalho realizado será possível obter um maior conhecimento sobre o comportamento dielétrico desses tipos de rocha na região estudada, além de servir como base para estudos realizados em áreas análogas contribuindo para o conhecimento da geologia da Bacia Potiguar.

Obter o conhecimento sobre sistema cárstico é de suma importância econômica, cultural e socioambiental, em face a isto o GPR se tornou uma ferramenta vastamente utilizada quando o objetivo é o de investigação rasa, tendo sua principal limitação a profundidade de investigação podendo chegar até setenta metros (SMITH & JOL, 1995).

O processo construtivo da pesquisa foi dividido em três etapas. A primeira etapa, ou etapa de pré-campo, foi a de revisão bibliográfica principalmente das temáticas associadas à área de estudo, métodos a ser aplicados, fundamentos da modelagem 3D e integração de dados geofísicos e geológicos. Esta etapa serviu também para o planejamento do campo. A segunda etapa, ou a de campo, consistiu na execução do plano

de trabalho definido na primeira etapa para coleta dos dados na área de estudo. A terceira e última etapa foi destinada a organização, análise, processamento e interpretação dos dados coletados em campo e elaboração deste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC).

O relatório foi dividido em seis capítulos, sendo eles: Introdução, Localização da Área de Trabalho, Geologia Regional e Local, Materiais e Métodos, Resultados e Discussões e Conclusões. A Introdução consistirá numa breve apresentação acerca dos objetivos do trabalho e a sua justificativa. Será apresentada a área de trabalho, sua localização e vias de acesso, como também os materiais e métodos onde será feita uma explanação de como foram realizados os processos de coleta, processamento e interpretação dos dados utilizados. Serão apresentados os resultados e uma discussão sobre os produtos gerados. Por fim, a conclusão do trabalho produzido abordando a motivação supracitada na introdução justificando-a com os resultados obtidos.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivos Gerais

O presente trabalho tem como objetivo geral a modelagem 3D de um afloramento de rochas carbonáticas situado no município de Baraúna, Rio Grande do Norte. O trabalho realizado pode servir de sugestão para estudos realizados em afloramentos análogos a reservatórios.

1.1.2. Objetivos Específicos

Usar o método geofísico *Ground Penetrating Radar* (GPR) para estudo de subsuperfície identificando a porosidade secundária geradas a partir da dissolução em um afloramento de rochas carbonáticas da Bacia Potiguar. Utilizar o método de aquisição de fotografias aéreas com um VANT para obtenção de produtos planialtimétricos de alta precisão e resolução para identificação das fraturas superficiais. Unir os métodos de geofísica rasa e o de aerofotogrametria para elaborar o modelo 3D do afloramento em estudo envolvendo atividades como:

- Adquirir e processar dados de GPS RTK, GPR e imageamento aéreo com VANT;
- Estudo da porosidade secundária correlacionada a fraturas, cavidades e superfícies de dissolução;
- Gerar ortofoto de alta resolução para o afloramento;
- Modelagem 3D de superfície e subsuperfície a partir do uso do Petrel.

2. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

A área de estudo é um afloramento de rochas carbonáticas situado no município de Baraúna, Rio Grande do Norte. O lajedo possui cerca de 7,2 hectares e fica distante aproximadamente 322 km da capital potiguar, (Figura 1). O acesso até a área de estudo partindo de Natal se dá pela BR 304 até o município de Mossoró, em seguida o acesso continua pela RN 015 que liga Mossoró a Baraúna até chegar em uma estrada carroçável, antes do centro da cidade, que dá acesso ao afloramento.

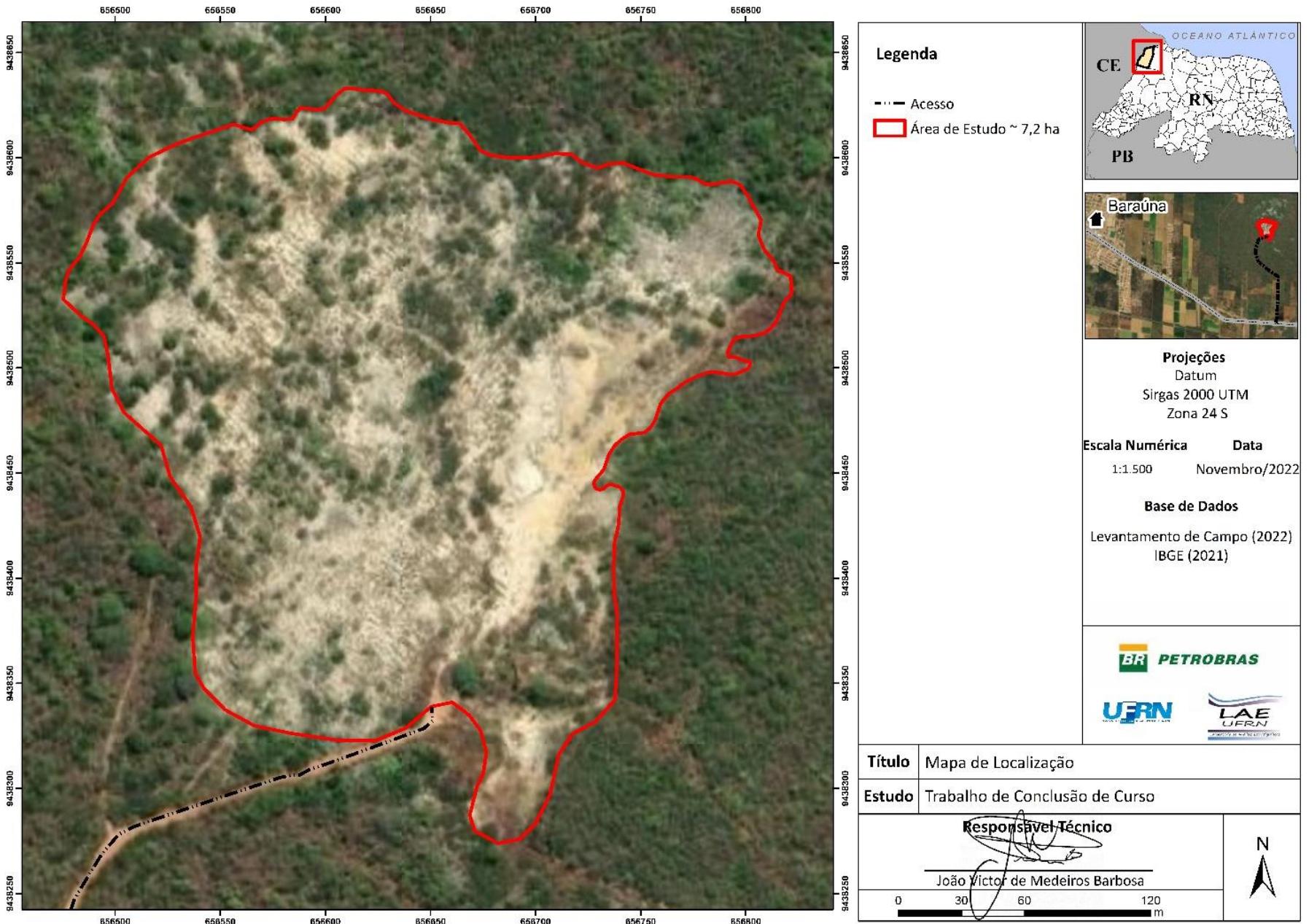


Figura 1 - Mapa de Localização da área de estudo, delimitada por uma linha vermelha.

3. CONTEXTO GEOLÓGICO

3.1. Geologia Regional

O embasamento da área de estudo corresponde a unidade geotectônica da província da Borborema, correspondendo às rochas pré-cambrianas pertencentes a três importantes domínios, o Domínio São José do Campestre a leste, o Domínio Rio Piranhas Seridó mais interiorizado e o Domínio Jaguaribeano no extremo oeste do RN (ANGELIM *et. al.* 2006).

A área de estudos é recoberta por rochas sedimentares do Cenozoico, compreendida pela Bacia Potiguar (ANGELIM *et. al.* 2006) e as rochas da Formação Barreiras; o Grupo Agulha; o Grupo Apodi e Grupo Areia Branca que serão suscintamente descritos no decorrer deste capítulo.

3.1.1. Província Borborema

Corresponde a uma região complexa dobrada tendo sido afetada por eventos tectônicos, magmáticos e termais datados do Neoproterozoico, associados à Orogênese Brasiliiana, (ALMEIDA *et. al.*, 1977). A área abrangida por essa província é superior aos 450.000 km², situada na região nordeste da Plataforma Sulamericana apresentando continuações litoestratigráficas no continente Africano (BRITO NEVES, 2000). Limita-se ao sul pelo Cráton de São Francisco-Congo e ao norte pelo Cráton de São Luís – oeste Africano. Ocorrem ainda rochas metassedimentares e metavulcânicas datadas do Mesoproterozoico ao Neoproterozoico e o embasamento é representado por rochas mais antigas do Paleoproterozoico, (ANGELIM *et. al.*, 2006).

Segundo Brito Neves (2000), a Província da Borborema é dividida em cinco domínios, sendo eles: Domínio Médio Coreaú, Domínio Ceará Central, Domínio Rio Grande do Norte, Domínio Central ou Zona Transversal e Domínio Sul. A área de estudo está geologicamente sobre o Domínio Rio Grande do Norte, este subdividido em três subdomínios, sendo eles o Domínio Jaguaribeano, Domínio Rio Piranhas e Domínio São José do Campestre em concordância com a compartimentação proposta por Angelim *et. al.* (2006), (Figura 2).

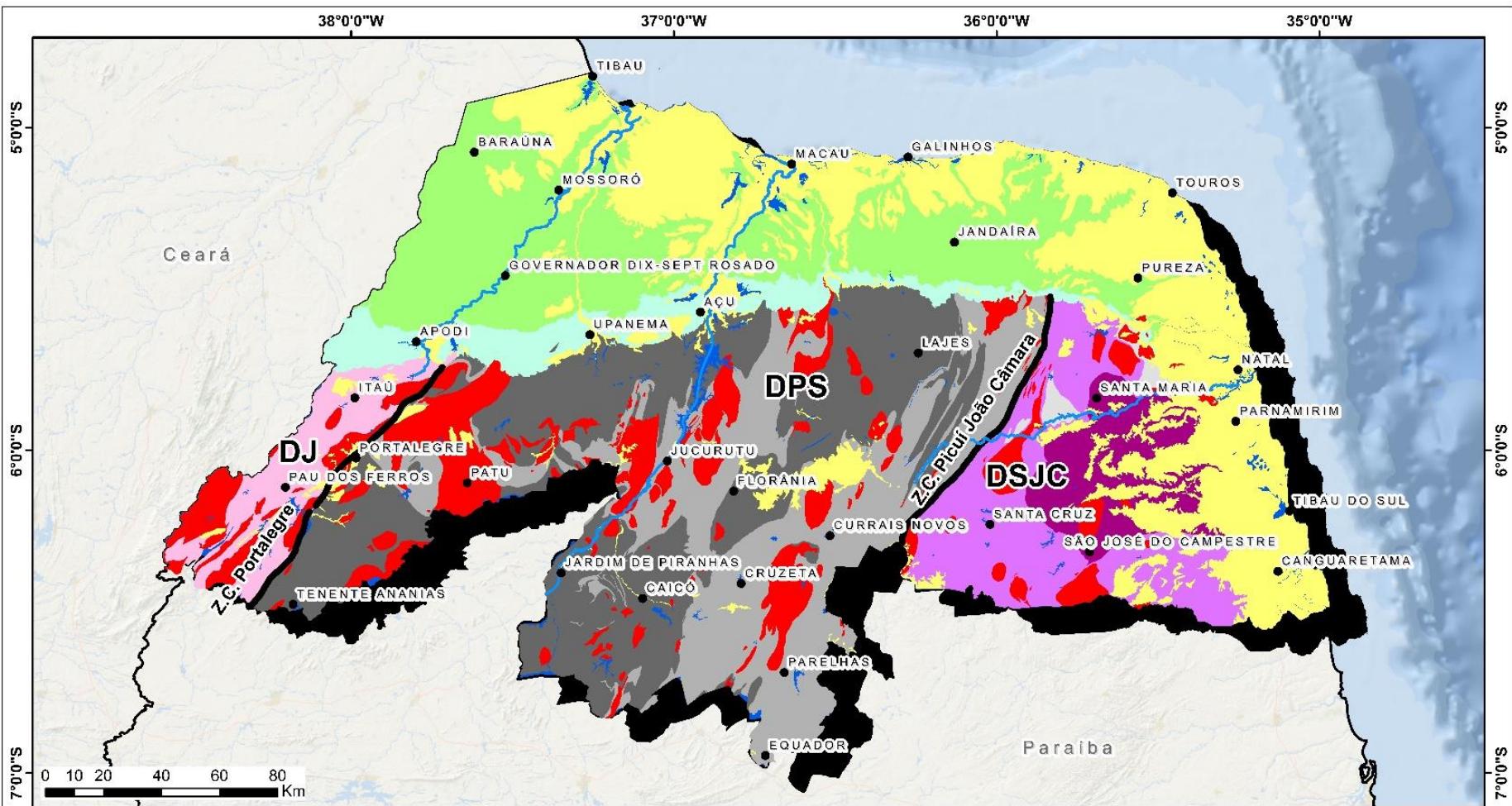


Figura 2 - Mapa geológico regional evidenciando a compartimentação tectônica do estado do Rio Grande do Norte. Fonte: Autor, 2023.

3.1.1.1. Domínio São José do Campestre

Situa-se na porção mais leste do estado limitando-se a norte pelas coberturas sedimentares fanerozóicas, a oeste pela Zona de Cisalhamento Picuí-João Câmara que o separa do Domínio Rio Piranhas Seridó e a sul pela Zona de Cisalhamento Patos. A litologia do Domínio São José do Campestre (DSJC) é caracterizada por rochas datadas do Arqueano, Paleoproterozoico e porções supracrustais do Neoproterozoico, (ANGELIM *et. al.* 2006).

3.1.1.2. Domínio Rio Piranhas Seridó

Localiza-se na porção central do estado limitando-se a leste pela Zona de Cisalhamento Picuí-João Câmara que o separa do DSJC e a oeste pela Zona de Cisalhamento Portalegre que o separa do Domínio Jaguaribeano (DJ). Sua litologia é representada por rochas de idade paleoproterozoica metaplutônicas e metavulcanossedimentares além de possíveis segmentos Arqueanos representados pelos augens-gnaisses graníticos da Suíte Poço da Cruz, (ANGELIM *et. al.*, 2006).

3.1.1.3. Domínio Jaguaribeano

Situado na porção mais oeste do estado, estende-se como uma faixa de direção NE-SW concordante com a Zona de Cisalhamento Portalegre que o separa do Domínio Rio Piranhas Seridó (DPS). Tem sua litologia representada por rochas de idade paleoproterozoica representadas pelos ortognaisses do Complexo Jaguaretama sobrepostas pelo Grupo Serra de São José com uma sequência metavulcanossedimentar, presentes ainda as rochas da Suíte Serra do Deserto representada por ortognaisses (ANGELIM *et. al.*, 2006).

3.1.2. Bacia Potiguar

Esta bacia tem grande relevância econômica para o estado do Rio Grande do Norte tendo em vista que nela há a ocorrência de hidrocarbonetos (PFALTZGRAFF & TORRES, 2010). A seguir serão descritas as principais unidades estratigráficas, da base para o topo, presentes na carta estratigráfica proposta por Pessoa Neto (2007), (Figura 3).

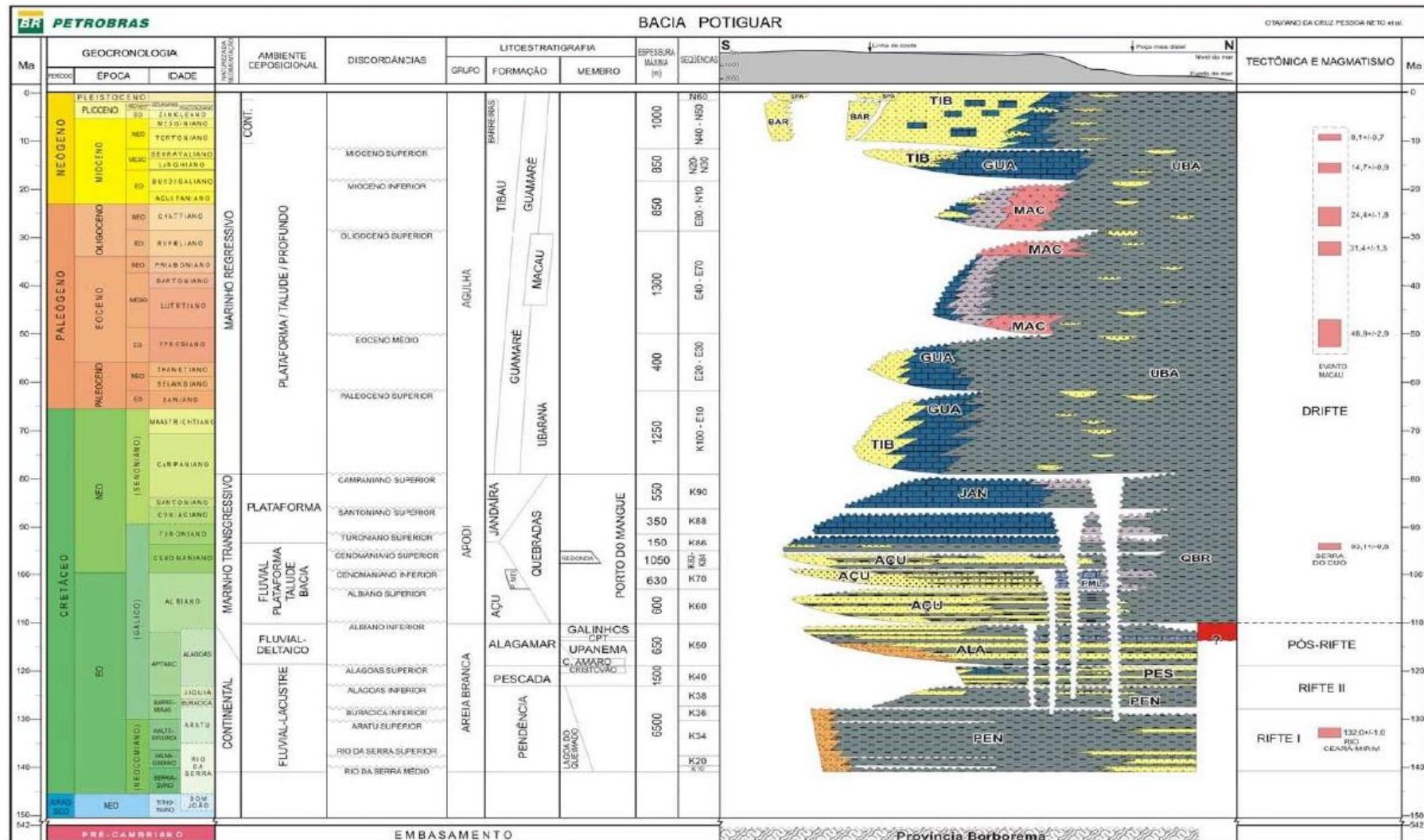


Figura 3 - Carta estratigráfica da Bacia Potiguar. Fonte: Pessoa Neto, 2007.

3.1.2.1. Grupo Areia Branca

Formado por rochas siliciclásticas que constituem a Formação Alagamar, Formação Pescada e Formação Pendência separadas por discordâncias, principalmente por arenitos finos a grossos intercalados por camadas pelíticas (SOUSA, 2003).

As rochas da Formação Pendência correspondem a arenitos que variam de finos a grossos e até conglomeráticos. Ocorrem também, folhelhos e siltitos (SOUSA, 2003). Estas rochas foram interpretadas como resultantes de um sistema deposicional fluvio-deltaico-lacustrino, em discordância angular com as rochas do embasamento cristalino.

As rochas da Formação Pescada são representadas por arenitos de granulometria variando de fino a médio intercalados com rochas pelíticas (folhelhos e siltitos). Esses litótipos fazem parte de sequências clásticas tectônicas interpretados como sistemas deposicionais de leques aluviais (SOUSA, 2003).

Por fim, a Formação Alagamar que corresponde a porção superior do grupo, é constituída por dois membros. O membro Upanema, formado por rochas siliciclásticas depositadas em sistema fluvio-deltáico, cuja textura varia de finos a grossos. O membro Galinhos é constituído essencialmente por rochas pelíticas ricas em matéria orgânica, cujo sistema deposicional foi interpretado como ambiente transicional. As rochas destes dois membros são separadas por uma sequência carbonática e pelítica constituída por calcarenitos, calcilutitos e folhelhos (SOUSA, 2003).

3.1.2.2. Grupo Apodi

As rochas deste grupo são constituídas por arenitos finos a grossos, constituídos por calcilutitos, calcarenitos, arenitos e lamitos. Segundo a ordem do topo para a base, foram propostas quatro unidades litoestratigráficas, sendo elas, a Formação Jandaíra, a Formação Açu, a Formação Ponta do Mel e a Formação Quebradas (GALINDO *et. a.*, 2016).

A Formação Jandaíra é caracterizada por uma variedade de rochas carbonáticas do tipo calcilutitos, calcarenitos, calcarenitos bioclásticos com presença marcante de fósseis foraminíferos bentônicos e algas verdes, micritos e dolomitos. Estas rochas correspondem a depósitos interpretados como sistemas deposicionais de planície de maré, laguna rasa, plataforma rasa e depósitos de mar aberto (SAMPAIO & CHALLER, 1968). Apesar de ser formada essencialmente por rochas calcárias, é possível encontrar também

dolomitos sendo recoberta pelas rochas sedimentares do Grupo Agulha e Formação Barreiras.

A rochas da Formação Açu correspondem a argilitos, siltitos, arenitos e conglomerados sobrepostos as rochas do embasamento, interpretados como sistemas fluvial e estuarino (PESSOA NETO, 2003). As rochas desta unidade são conhecidas por possuir boa porosidade e permeabilidade, sendo consideradas como bons reservatórios de recursos hídricos e petrolíferos. A alta porosidade caracteriza esta unidade como o principal reservatório aquífero da bacia. Além de ser um importante reservatório petrolífero (PESSOA NETO, 2003).

A Formação Ponta do Mel que é formada por calcarenitos, doloesparítico, calcilutito e pelitos formada por folhelhos recobrindo concordantemente e interdigitada à Formação Açu sendo recoberta discordantemente a Formação Quebradas. Seus litotipos são depositados em ambiente de plataforma rasa. Os carbonatos ocorrem geralmente na zona de pós-praia e são de idade albiana-cenomaniana (TIBANA & TERRA, 1981).

Por fim, tem-se na base do Grupo Apodi, a Formação Quebradas que é constituída por uma sequência arenosa siliciclástica e pelítica. É dividida em dois membros sendo eles o Membro Redonda composto por intercalações de arenitos finos, folhelhos e siltitos, e o Membro Porto do Mangue composto por folhelhos e arenitos subordinados (ALVES, 2001).

3.1.2.3. Grupo Agulha

Posicionado estratigraficamente acima do Grupo Apodi e abaixo do Grupo Barreiras, é constituído por rochas sedimentares correlacionadas à fase Drifte, representadas por arenitos de granulometria variando de finos a grossos podendo chegar a conglomerados. Além da presença de camadas de rochas carbonáticas e rochas pelíticas. Esta unidade é formada por três formações: Tibau, Guamaré e Formação Ubarana (PESSOA NETO, 2003).

As rochas da Formação Ubarana são descritas como uma sequência pelítica-carbonática-arenosa formada por folhelhos, argilitos, calcilutitos, siltitos e arenitos subordinados de granulometria que varia de muito fino a grosso, intercalando com camadas de folhelhos e argilitos (SOUSA, 2003; PESSOA NETO, 2003).

As rochas da Formação Ubarana foram depositadas sobre as rochas da Formação Guamaré, e está representada por calcarenitos, calcilutitos, arenitos e folhelhos interpretados como sistema deposicional de plataforma e talude (COSTA & FEITOSA,

2007). A deposição dos sedimentos é considerada como Terciário, representando um ciclo regressivo do estágio Campaniano até o Holoceno dando origem a um sistema caracterizado como costeiro-plataforma-talude-bacia (PESSOA NETO, 2003).

Na base do Grupo Agulha ocorrem as rochas da Formação Tibau que por sua vez são caracterizadas por arenitos grossos dispostos sobre as rochas da Formação Guamaré (CAMPOS & SILVA, 1966). As rochas destas unidades estão interdigitadas lateralmente com as rochas da Formação Guamaré e do Grupo Barreiras. Este último interpretado como sistema deposicional de leques costeiros. As rochas da Formação Tibau ocorrem próximas ao município de Macau na porção mais setentrional do estado do Rio Grande do Norte (ARARIPE & FEIJÓ, 1994).

3.1.2.4. Grupo Barreiras

É constituído por conglomerados, arenitos e lamitos que se estendem por quase todo o litoral brasileiro desde o estado do Rio de Janeiro até o Estado do Amapá. As rochas do Grupo Barreiras afloram em falésias ao longo da costa próximo à zona de praia (JARDIM DE SÁ, 1998). As rochas apresentam-se esbranquiçadas a avermelhadas, predominando a cor avermelhada em virtude da oxidação dos minerais ferruginosos na matriz areno-argilosa (MOURA LIMA *et. al.*, 2010).

Mabesoone *et. al.* (1972) dividiu o Grupo Barreiras em Formação Serra dos Martins, Formação Macaíba e Formação Guararapes, esta já situada em território paraibano. A Formação Serra dos Martins se caracteriza pelos seus sedimentos arenosos e argilosos situados nas Serras de Portalegre, Serra de Martins, Serra de Cuité, Serra de Santana e Serra João do Vale o que caracteriza um relevo com altitudes podendo chegar até 700 metros (MABESOONE, 1966).

3.2. Geologia Local

A área de estudo está inserida no contexto das rochas da Formação Jandaíra (Figura 4), na porção oeste da Bacia Potiguar. Como descrito na seção 3.1.2.2 deste relatório, a Formação Jandaíra é caracterizada por sua grande variedade de rochas carbonáticas (CÓRDOBA, 2001). Este tipo de rocha é responsável pela formação da maior parte das cavernas do estado, sua solubilidade é aumentada pela presença do dióxido de carbono que em contato com a água torna o meio mais ácido contribuindo com o processo de dissolução (PENHA, 2022).

A dissolução da rocha carbonática se dá em três passos essenciais, (Figura 5). O primeiro é a dissolução do CO₂ na água da chuva tornando-a ácida a partir da produção do ácido carbônico H₂CO₃ que ao cair na superfície rochosa penetra nas fraturas frequentes nas rochas carbonáticas dissolvendo-as e posteriormente precipitando o carbonato de cálcio a partir da reação inversa CaCO₃ + H₂O + CO₂ (MOURA *et al.*, 2018).

Durante o processo de dissolução, as fraturas se comportam como importantes facilitadoras da formação do relevo cárstico, é através delas que os fluidos percolam, tal comportamento hidráulico classifica o carste em dois tipos, epigênico e hipogênico (RODRIGUES, 2020; MARTINI, 1979). No caso do carste epigênico, ocorre quando o fluxo se dá a partir da superfície, por exemplo, quando águas pluviométricas ácidas devido a presença de dióxido de carbono (CO₂) percolam e penetram pela superfície dissolvendo a rocha no processo anteriormente descrito (RODRIGUES, 2020; KLIMCHOUCK, 2015). Para o relevo cárstico hipogênico, a formação se dá a partir do hidrotermalismo onde a água com características corrosivas devido a presença de outros gases ascende e percola as fraturas lateralmente e verticalmente dissolvendo a rocha e imprimindo as características do carste nela, alargando fraturas já existentes ou dissolvendo camadas mais solúveis (RODRIGUES, 2020; PALMER, 2000; DREW, 1985). Na área de estudo o relevo cárstico epigênico é evidenciado a partir do grande número de fraturas superficiais que dão acesso as águas pluviométricas como também indícios de carste hipogênico pela presença de grandes planos de dissolução percorrendo ao longo de todo o afloramento.

Apesar de já ter funcionado uma pedreira no local de estudo e que as explosões realizadas para extração do calcário tenham influenciado no fraturamento da rocha, na área foram identificados quatro sistemas de fraturas com *trend* preferencial NW-SE, NE-

SW, E-W e N-S, que corroboram com a direção de lineamento regional característico da Bacia potiguar com dois *trends* de mais relevância, o NW-SE e NE-SW, assim como na área de estudo, conforme visto no mapa geológico local (Figura 4).

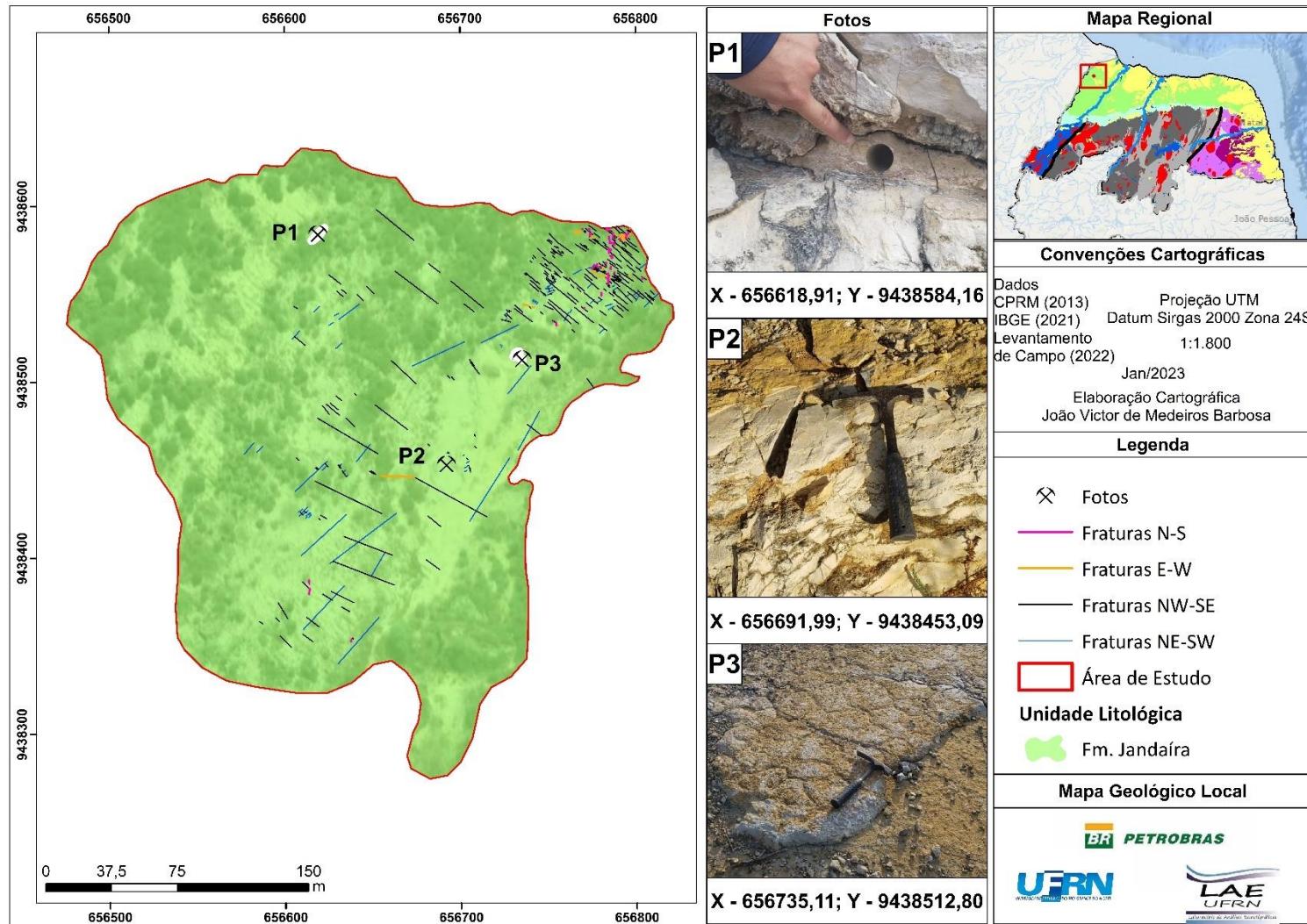


Figura 4 - Mapa da Área de estudo delimitada em vermelho.

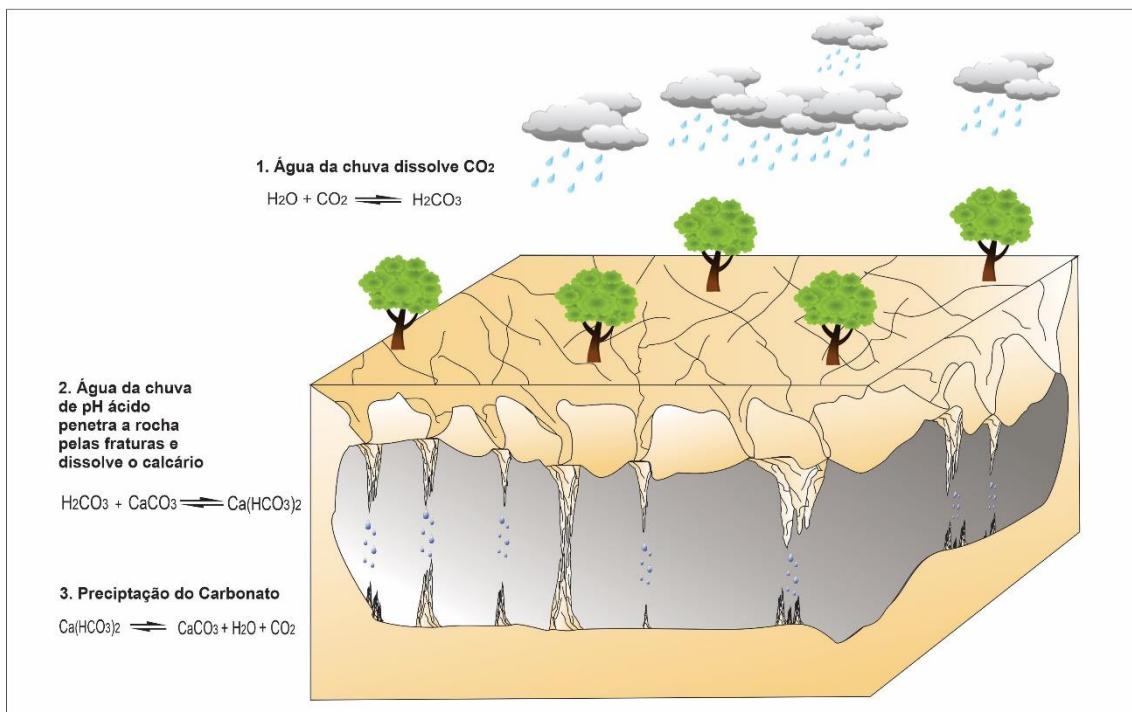


Figura 5 - Representação das fases de dissolução do calcário. Fonte: Adaptado de Auler & Zogbi, 2005.

No afloramento da área de estudo observa-se uma camada específica horizontalizada em que a dissolução ocorre de forma mais intensa (Figura 7), onde ao longo de todo o afloramento essa camada segue com material dissolvido por ação do intemperismo químico a partir da ação da água que percola pelas fraturas da rocha.

Além das estruturas tectônicas (fraturas), observa-se também a presença de juntas estiliolíticas e estruturas sedimentares secundárias (gretas de contração). Os estilólitos se apresentam como juntas com aspecto serrilhado que são geradas a partir da pressão nos minerais de calcita ao longo da rocha (Figura 6), neste lajedo eles ocorrem de maneira paralela a camada em pequenos segmentos serrilhados (Figura 7). As gretas de contração (Figura 8), apresentam-se como estruturas hexagonais geradas pela evaporação da água nos intertícios dos sedimentos carbonáticos argilosos (*mudstones*) (SUGUIO *et. al.*, 1974).

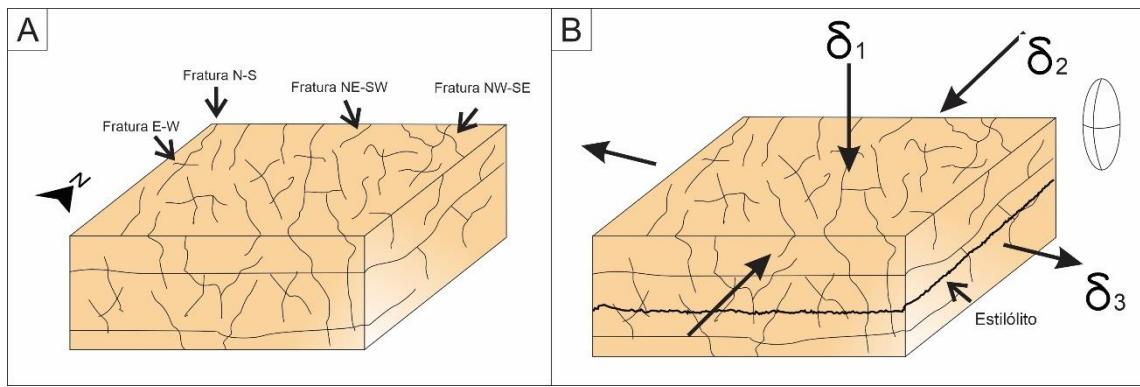


Figura 6 - (A): Bloco diagrama ilustrando os quatro sistemas de fraturas e suas direções; (B): Bloco diagrama ilustrando a relação dos elipsoides de tensão e a formação dos estilólitos. Fonte: Adaptado de Letouzey & Cramez, 1986.

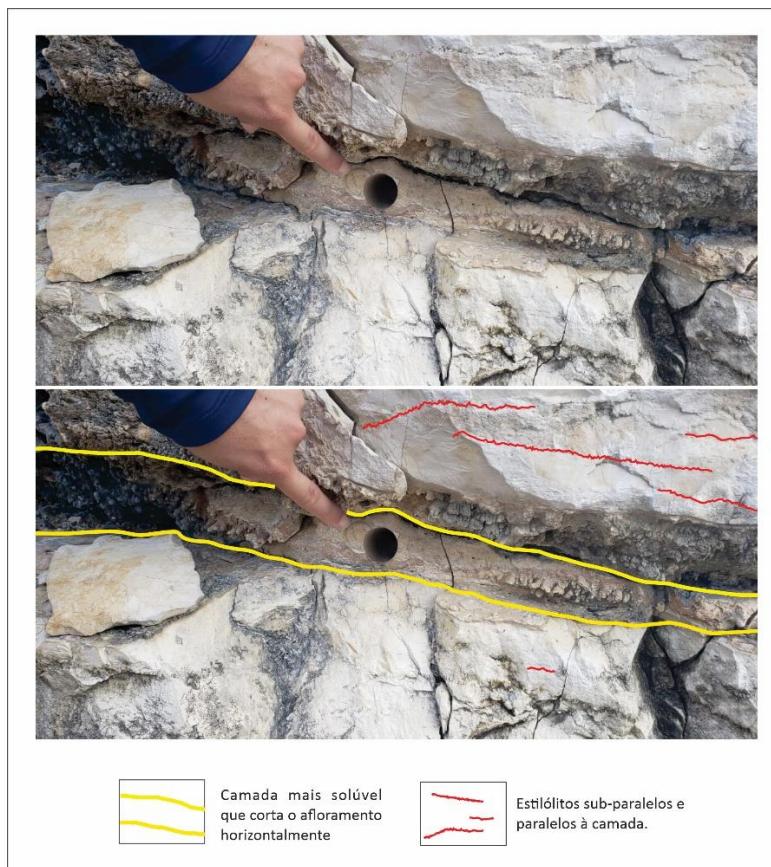


Figura 7 - Imagem ilustrativa de parte do afloramento, em amarelo demarcando camada mais susceptível a dissolução, em vermelho estilólitos sub-paralelos e paralelos a camada. Fonte: Autor, 2022.

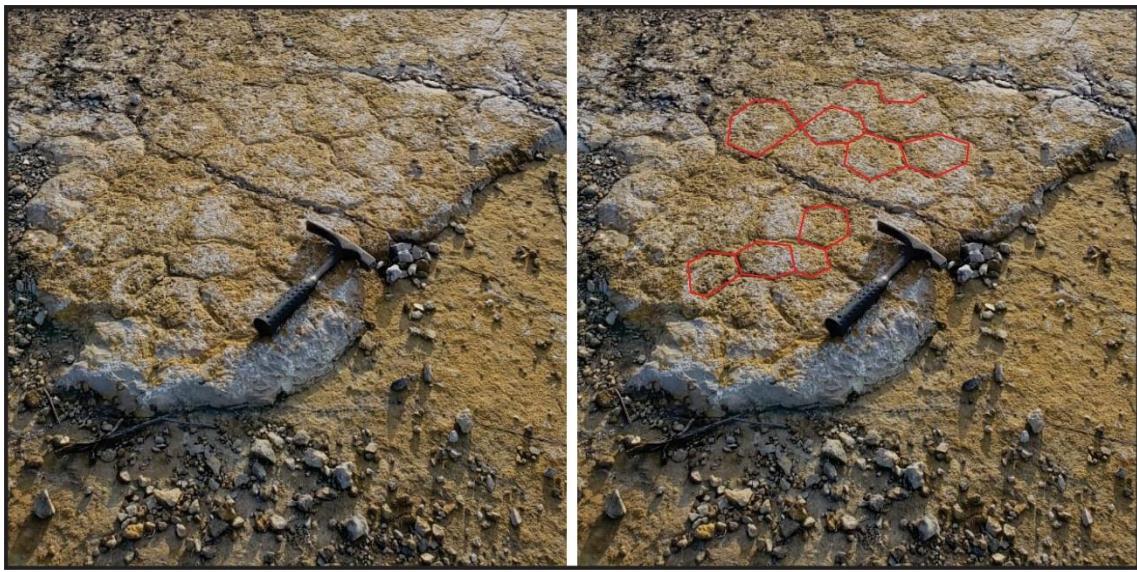


Figura 8 - Imagem ilustrando as gretas de contração em linha vermelha com formas hexagonais. Fonte: Autor, 2022.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos adotados para a aquisição, análise, processamento e interpretação dos dados utilizados neste trabalho, os quais também permitiram a geração de um modelo 3D do afloramento de rochas carbonáticas selecionado. O trabalho foi dividido em três etapas, denominadas de pré-campo, campo e pós campo.

Para imageamento de subsuperfície foi utilizado o método geofísico raso, GPR (*Ground Penetrating Radar*) ou radar de penetração terrestre. Esta técnica é resultado de uma série de estudos no contexto do eletromagnetismo, desde o surgimento da teoria moderna do eletromagnetismo com as equações propostas por Maxwell no século XIX para as ondas eletromagnéticas até chegar no sistema GPR atual. O primeiro conhecimento que se tem do uso de ondas eletromagnéticas (EM) para investigação de objetos é do início do século XX com equipamento construído por Hulsmeyer em 1904 para identificação de navios (BESL, 1988). Já a primeira evidência que se tem do uso de ondas EM para identificação de objetos enterrados é do ano de 1910 a partir dos estudos de Leimbach e Lowy (DANIELS, 1996).

O uso de frequência de ondas EM para identificação de objetos foi empregada posteriormente para diversas áreas como em calotas polares para fins de monitoramento, ou na Segunda Guerra Mundial com a identificação de submarinos a partir do uso de radares aéreos (AGUIAR, 2005). O GPR tal qual conhecemos hoje foi lançado no mercado em 1971 pela empresa *Geophysical Survey System Inc.* (GSSI) (ANNAN, 2002).

Desde então, seu uso foi se diversificando ao longo dos últimos anos em que os estudos foram aprimorados e a tecnologia passou a ser usada para investigações no subsolo, hoje podendo ser utilizado em materiais como madeira, asfalto e concreto, tendo sido mais comumente utilizado para identificação de materiais geológicos (JOL, 2009). A técnica se difundiu devido a seu baixo custo e baixa interferência no meio por se tratar de um método de investigação indireta sendo vastamente utilizado para identificação de objetos enterrados, tubulações, cavidades, dentre outras diversas aplicações nas áreas da construção civil, geologia, geotecnica, polícia forense, ambiental, se destacando no trabalho de diversos autores como (DAVIS & ANNAN, 1989; ARANHA, 2006; JANOCHE, 2021; SOUZA, 2008; BRISTOW & JOL, 2003; RODRIGUES, 2020; COIMBRA *et. al.*, 2022; AGUIAR, 2005; JOL, 2009).

Para imageamento da superfície o método utilizado foi o VANT associado ao receptor de GPS RTK que possibilitou a correção dos dados altimétricos otimizando o trabalho, melhorando a acurácia, resultando em erros de escala centimétrica. A Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) define drone como termo popular para se referir a qualquer VANT classificando em dois tipos, os aeromodelos que são as aeronaves não tripuladas com a finalidade de recreação e lazer e as RPA (*Remotely Piloted Aircraft*) ou ARP (Aeronave Pilotada Remotamente) para aquelas que possuem cunho experimental, científico ou institucional (ANAC, 2017). Como a maioria das grandes tecnologias o VANT deu seus primeiros passos na indústria bélica. No Brasil seu primeiro aparecimento é datado da década de 80 quando o Centro Tecnológico Aeroespacial (CTA) apresentou o projeto Acauã que possuía fins militares (SOUZA, 2020).

A técnica de aerofotogrametria está intimamente correlacionada ao sensoriamento remoto (NASCIMENTO & DENADAI, 2021). Este pode ser entendido como a obtenção de dados acerca de um alvo que esteja distante do sensor utilizado (MENESES & ALMEIDA, 2012). O VANT pode ser combinado com o uso de sensores de diversos tipos para as mais variadas necessidades, com a obtenção, além das imagens de superfície e vídeo, também de dados físicos e químicos gerando produtos para fins recreativos, de marketing, dentro da construção civil, para monitoramento, científico, dentre outros que podem ser destacados (PRUDKIN & BREUNIG, 2019). Os procedimentos metodológicos deste trabalho seguiram em 3 etapas, conforme o fluxograma abaixo (Figura 9).

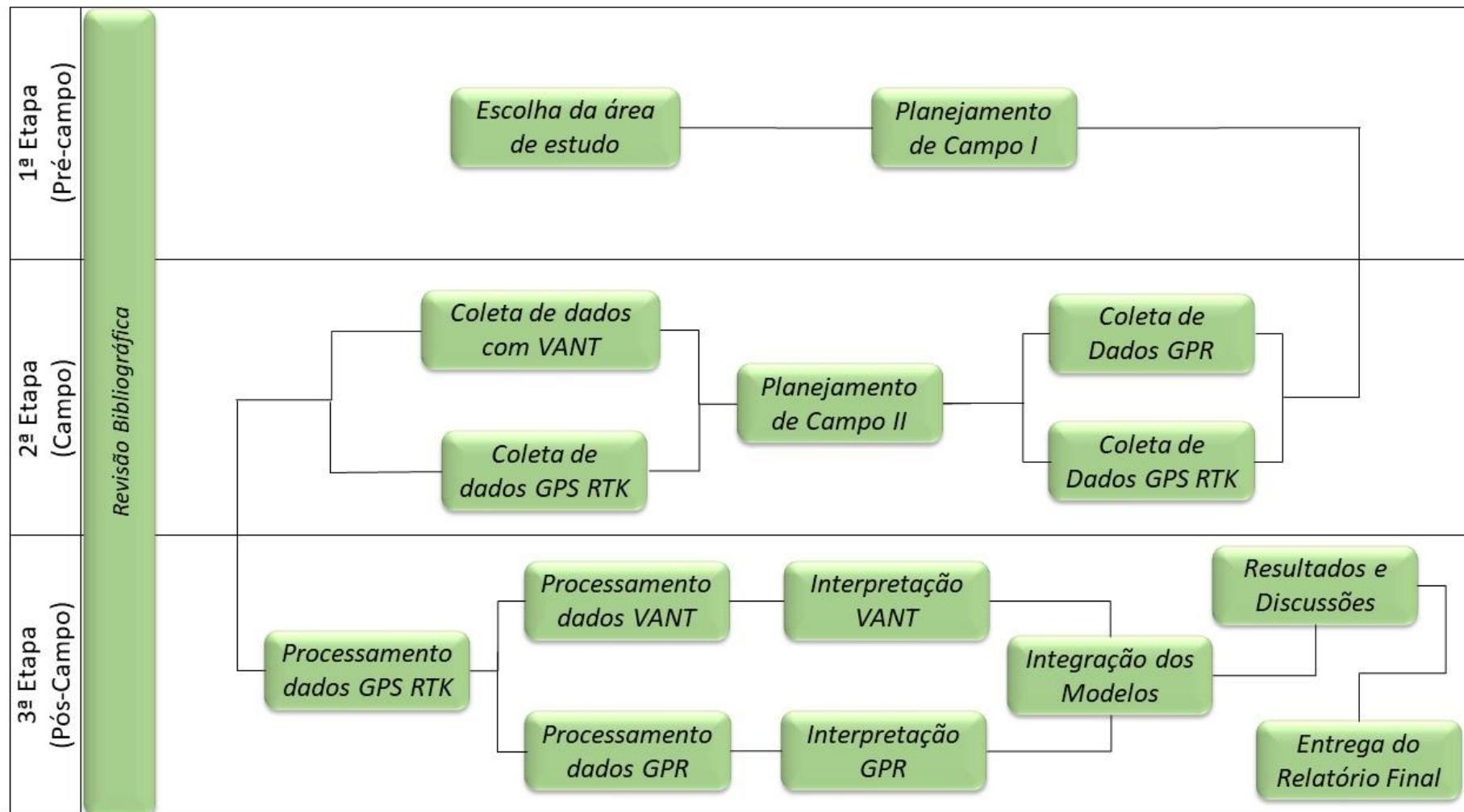


Figura 9 - Fluxograma dos procedimentos metodológicos adotados neste trabalho. Fonte: Autor, 2023.

4.1. Etapa Pré Campo

Nesta etapa foi selecionada a área de estudo e realizado o levantamento bibliográfico acerca da área de trabalho e sobre o conhecimento necessário para a modelagem 3D do afloramento de rochas carbonáticas, utilizando os métodos GPR e aerofotogrametria com o uso de VANT. Foi aqui também que ocorreu o planejamento para a etapa posterior, a de campo.

4.2. Etapa de Campo

Esta etapa foi reservada para as atividades de campo com o objetivo de obter os dados geofísicos e aerofotogramétricos necessários para a confecção deste trabalho. A etapa de campo foi dividida em duas atividades, a primeira destinada a coleta de dados de subsuperfície com GPR e a segunda para obtenção dos dados de superfície planimétricos e altimétricos com a utilização do VANT associado ao levantamento com o método GPS geodésico (*Real Time Kinematic – RTK*) de alta precisão.

4.3. Etapa Pós Campo

Esta etapa foi reservada para a organização, análise, validação, processamento e interpretação dos dados coletados na etapa anterior.

Tudo isso possibilitou a geração de imagens, gráficos, tabelas que subsidiaram a confecção do modelo 3D do afloramento escolhido validando os métodos adotados neste trabalho.

4.4. Método GPR

Em síntese, o GPR faz uso de pulsos eletromagnéticos para diferenciar camadas em subsuperfície, baseando-se no tempo de reflexão da onda emitida que varia de acordo com as propriedades físicas do meio estudado (ANNAN, 2001). O equipamento possui uma antena transmissora e uma receptora, ambas posicionadas na superfície emitindo e recebendo o sinal sendo deslocadas seguindo em uma direção estabelecida na superfície de estudo. O método GPR possui similaridade a sísmica de reflexão, diferenciando-se por utilizar ondas eletromagnéticas, enquanto na sísmica de reflexão se baseia nas ondas acústicas (ANNAN, 2003; PORSCANI, 1999).

O GPR está intimamente correlacionado com as propriedades elétricas do meio, principalmente com a condutividade elétrica, permeabilidade magnética e permissividade elétrica (constante dielétrica) (ULABY, 2004). A condutividade elétrica está associada à característica de um meio transportar elétrons sob influência de um campo elétrico externo, o meio pode ser classificado com base na sua condutividade em condutor, quando o material possui boa condução ou em isolante quando ocorre o inverso (GRAY, 1731; ELLIOT, 1988). Já a permeabilidade magnética é correlata a susceptibilidade de um material permitir a passagem do fluxo magnético produzido por um campo magnético externo (LANDGRAF, 2002). A permissividade elétrica ou constante dielétrica está associada a capacidade do meio em adensar/reforçar um fluxo elétrico sob influência de um campo elétrico externo, ou seja, a capacidade de armazenamento de energia do meio (CALLISTER & RETHWISCH, 2009).

Os perfis GPR realizados quando dispostos lado a lado fornecem o produto gráfico denominado de radargrama. A qualidade desses radargramas está associada ao contraste das propriedades físicas dos meios estudados (Tabela 1), assim como a escolha de frequência da antena que deve ser específica para necessidade de cada trabalho uma vez que esta está associada a resolução vertical do dado, profundidades maiores são alcançadas com frequências menores (ANNAN, 1992).

Tabela 1 - Diferentes constantes dielétricas para materiais diversos. Fonte: adaptado de Davis & Annan (1989) e Daniels (1996).

Material	Constante dielétrica (ϵ_r)	
	Davis & Annan (1989)	Daniels (1996)
Água destilada	80	
Água do mar	80	
Água fresca	80	
Ar	1	
Areia seca	3-5	
Areia úmida	20-30	
Arenito seco		2-3
Arenito úmido		5 - 10
Argila seca		2-6
Argila úmida		15-40
Argilas	5 -40	
Calcário	4-8	
Calcário seco		7
Calcário úmido		8
Concreto		4 - 10

Granito	4-6	
Granito úmido		7
Granito seco		5
Metal		300
PVC		3,3
Sal seco	5-6	
Siltes	5 - 30	
Solo seco arenoso		4-6
Solo seco argiloso		4-6
Solo úmido arenoso		15- 30
Solo úmido argiloso		JO- 15

Essas propriedades são regidas pelas leis do eletromagnetismo da física moderna clássica propostas pelas equações de Maxwell (Figura 10), homenagem ao físico e matemático James Clerk Maxwell que propôs suas equações baseando-se em estudos precursores dos físicos Faraday (lei de indução), Gauss (lei do fluxo elétrico e magnético) e Ampère (indução do campo magnético) descritos em quatro equações (HALLIDAY *et. al.*, 2016).

	$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}$	(1)
	$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}$	(2)
	$\nabla \cdot \bar{D} = q$	(3)
	$\nabla \cdot \bar{B} = 0$	(4)

\bar{E} = Campo Elétrico (V/m)
 q = Densidade da carga elétrica (C/m³)
 \bar{J} = Densidade da corrente elétrica (A/m²)
 \bar{B} = Densidade do Fluxo magnético (T)
 t = Tempo (s)
 \bar{D} = Campo de deslocamento elétrico (C/m³)
 \bar{H} = Intensidade do campo magnético (A/m)

Figura 10 - Equações de Maxwell e as relações dos campos eletromagnéticos. Fonte: adaptado de JOL, 2009.

Na equação 1, a Lei de indução de Faraday, tem-se a geração de um campo elétrico induzido a partir da variação do campo magnético no tempo. A equação 2 se refere a Lei de Ampère, onde a variação do campo de deslocamento elétrico no tempo, somada a densidade da corrente elétrica está correlacionada à intensidade do campo magnético, ou seja, ambos tem relação diretamente proporcional, quanto

maior for a corrente maior será o campo magnético induzido, estando o sentido do campo magnético dependente do deslocamento da corrente elétrica, como exemplo a agulha de uma bússola próximo a uma corrente elétrica que sofre interferência na sua polaridade. Por último, as equações 3 e 4 são baseadas nas leis de Gauss para eletricidade e magnetismo, onde ambas não dependem da variação do tempo, apenas das cargas elétricas e magnéticas envolvidas, respectivamente. Conforme representado na Figura 11, no campo eletromagnético os campos elétricos e magnéticos são ortogonais entre si e ambos são perpendiculares a uma direção de propagação (PASSOS, 2019).

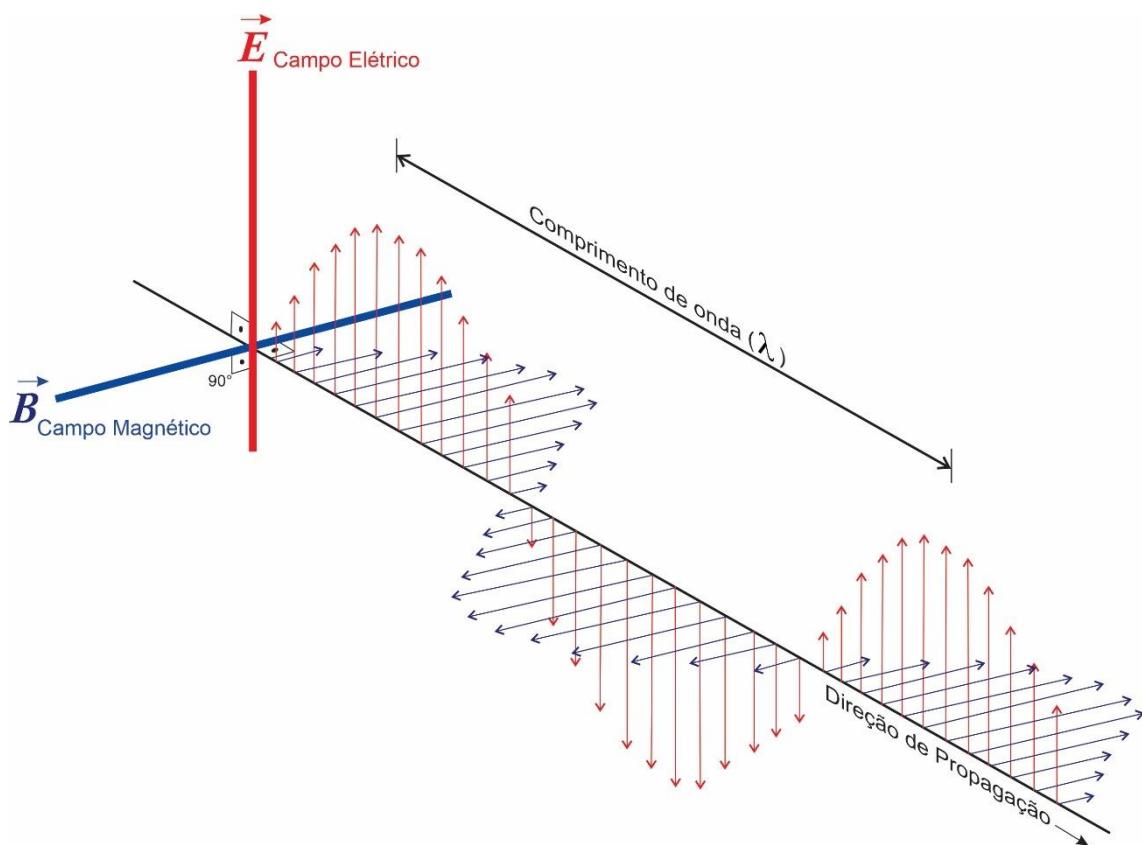


Figura 11 - Relação do campo eletromagnético formado por campo elétrico indicado pelas setas vermelhas e magnético indicado pelas setas azuis ortogonais entre si e perpendiculares a uma direção de propagação.

Em condições de um cenário perfeito, as ondas eletromagnéticas que chegassem à antena receptora deveriam ter as mesmas características das ondas emitidas (ANNAN, 2003). No entanto, são as diferenças entre as propriedades eletromagnéticas dos meios que permitem que a onda eletromagnética percole o subsolo de maneiras distintas sendo atenuadas e oferecendo diferentes respostas temporais de retorno que permite inferir e mapear as descontinuidades entre as camadas em subsuperfície (DAVIS & ANNAN, 1989).

Para Jol & Smith (1992), a atenuação das ondas EM é uma consequência das propriedades físicas do meio, descritas anteriormente, que varia devido a heterogeneidade dos materiais estudados. A atenuação do sinal GPR está intimamente ligada à frequência e condutividade elétrica do meio estudado, de modo que quanto maior for a condutividade elétrica, maior será a atenuação das ondas EM como ocorre em meios saturados em água. Já a relação com a frequência ocorre de forma inversamente proporcional, tendo em vista que baixas frequências tem maior poder de penetração no meio alcançando profundidades maiores (BRISTOW & JOL, 2003).

Conforme Lorenzo (1994), a resolução vertical está atrelada ao conhecimento da espessura da camada, ou seja, na profundidade de penetração das ondas EM que pode ser descrita pela equação (5).

$$R_v = \frac{v}{\Delta f} = \frac{v\Delta t}{2} \quad (5)$$

Observa-se que a escolha da frequência é importante para qual profundidade pretende-se investigar. A partir da equação 5 em que a resolução vertical (R_v), a velocidade da onda no meio (v), a frequência (f) e o tempo (t), é possível identificar que R_v é inversamente proporcional a frequência da antena escolhida. Nesse caso, quanto maior a frequência da antena escolhida menor vai ser a profundidade de investigação, apesar de gerar maior definição dos refletores mais rasos, do contrário, quanto menor a frequência da antena, maiores profundidades podem ser alcançadas no levantamento feito por GPR (HANNINEN, 1992).

Outros fatores podem influenciar na qualidade da resolução vertical e horizontal, como a saturação em fluidos como a água que aumentam significativamente a condutividade devido a presença de íons no meio, atenuando as ondas EM e gerando zonas com baixas amplitudes ou mesmo ausência de sinal nos radargramas (DAVIS & ANNAN, 1989).

4.4.1. Parâmetros de aquisição

Vale ressaltar que alguns parâmetros devem ser levados em conta para a aquisição dos dados, são eles: frequência da antena, amostragem espacial, intervalo de amostragem temporal, janela temporal e espaçamento das antenas (ANNAN, 2001). Tais parâmetros foram avaliados na etapa de pré-campo em que o planejamento da campanha de campo ocorreu.

A frequência das antenas deve ser levada em conta de acordo com a profundidade e resolução almejadas, uma vez que estão correlacionadas, como visto na equação (5) da resolução vertical, ambas inversamente proporcionais, ou seja, para alvos rasos as antenas de maior frequência devem ser utilizadas, do contrário, menores frequências devem ser utilizadas para se atingir profundidades maiores.

Outro parâmetro importante na etapa pré-campo é a amostragem espacial, a qual é definida como a distância entre os perfis amostrados, este parâmetro é definido pela equação proposta pelo engenheiro eletricista Harry Nyquist (Equação 6). O intervalo de amostragem temporal refere-se ao tempo decorrido entre as medições realizadas e foi também expresso por Nyquist conforme a equação 7 (ANNAN, 2001).

$$\Delta_x = \frac{c}{4fc\sqrt{k}} \quad (6)$$

$$\Delta t = \frac{1}{2fN} \quad (7)$$

A equação 6 expressa o a velocidade da luz no vácuo (c), a frequência central da antena (fc), e a constante dielétrica do meio (k). Segundo Annan (2001), para que haja uma boa resolução dos refletores o indicado é que a amostragem espacial (Δ_x) não seja superior a um quarto do comprimento de onda do meio. A equação 7 expressa o intervalo do tempo de amostragem baseado na frequência de Nyquist (ANNAN, 1992). Por último, a janela temporal é o intervalo de tempo em que deve haver a abertura na antena receptora para que haja a transmissão, reflexão e captação do sinal (PORSANI, 1999). As antenas podem se apresentar de maneira em que seu espaçamento seja fixo, como ocorre na maioria dos sistemas atualmente utilizados, ou separadas que possibilitem a mudança do espaçamento dando viabilidade para aquisição nos métodos de levantamento *Common Mid Point* (CMP) e *Wide Angle Reflection and Refraction* (WARR).

4.4.2. Métodos de aquisição GPR

O sistema GPR pode ser monoestático, constituído de apenas uma antena ou composto por duas antenas, uma de transmissão e outra de recepção de sinais, uma unidade de controle responsável por visualização, armazenamento e até mesmo um pré-processamento (no momento da aquisição) dos dados coletados, e uma fonte capaz de gerar pulsos eletromagnéticos de frequências entre 10 Mhz e 2,6 Ghz (DAVIS & ANNAN, 1989).

Os pulsos de ondas EM transmitidos pelo GPR viajam pelo subsolo com uma velocidade para cada meio. As ondas EM são refletidas e refratadas quando se deparam com um contraste entre as propriedades eletromagnéticas dos materiais distintos gerando uma boa detecção dessas camadas (BRISTOW & JOL, 2003).

Quando se fala em formas de aquisição de dados com GPR, existem basicamente três tipos. O primeiro se baseia na velocidade do sinal contraposto a profundidade investigada, este se divide em dois arranjos, o *Wide Angle Reflection and Refraction* (WARR) e o *Common Mid Point* (CMP). O segundo é o de transiluminação ou tomografia, este menos usual que se baseia no posicionamento das antenas abaixo do nível do solo utilizando poços ou sondagens. O terceiro, o de perfil de reflexão que consiste na técnica mais empregada e mais simples, onde o afastamento entre as antenas é mantido fixo e ambas percorrem um perfil previamente estabelecido de forma simultânea (REYNOLDS, 2011). A seguir serão descritos os métodos WARR, CMP e o de perfil de reflexão por se tratar de métodos mais usuais, com mais enfoque no último por ter sido o método utilizado neste trabalho.

4.4.2.1. Refração e Reflexão de Grandes Aberturas Angulares (WARR)

Este arranjo consiste na posição fixa da antena transmissora enquanto a antena receptora se distancia horizontalmente ao longo do perfil abrindo o ângulo de reflexão e refração (Figura 12) (FISHER, 1992; BRISTOW & JOL, 2003).

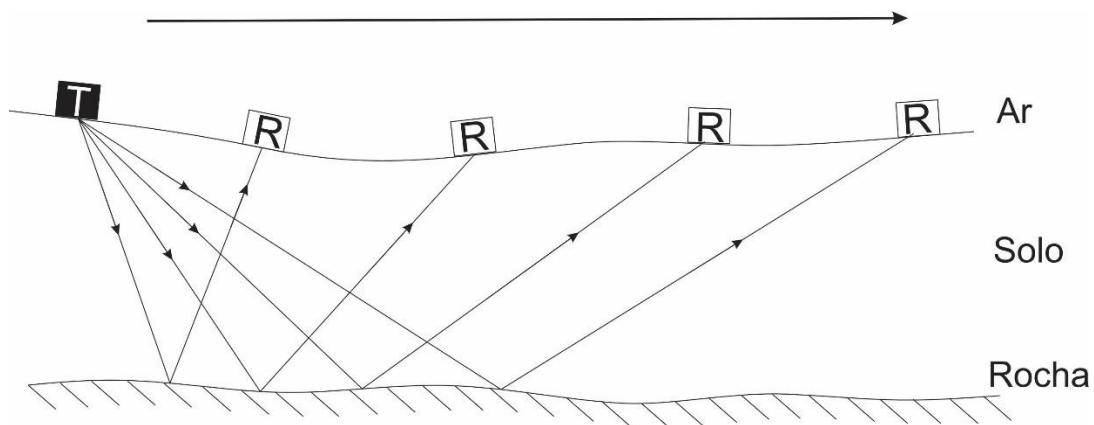


Figura 12 - Arranjo de levantamento WARR. Fonte: Adaptado de Pinto, 2007.

4.4.2.2. Ponto Médio Comum (CMP)

Neste arranjo o ângulo de reflexão e refração aumentam como no WARR, no entanto neste caso as antenas transmissora e receptora estão distantes entre si e ambas se afastam na mesma direção, mas em sentidos opostos, compartilhando um ponto médio comum de afastamento (Figura 13) (BRISTOW & JOL, 2003).

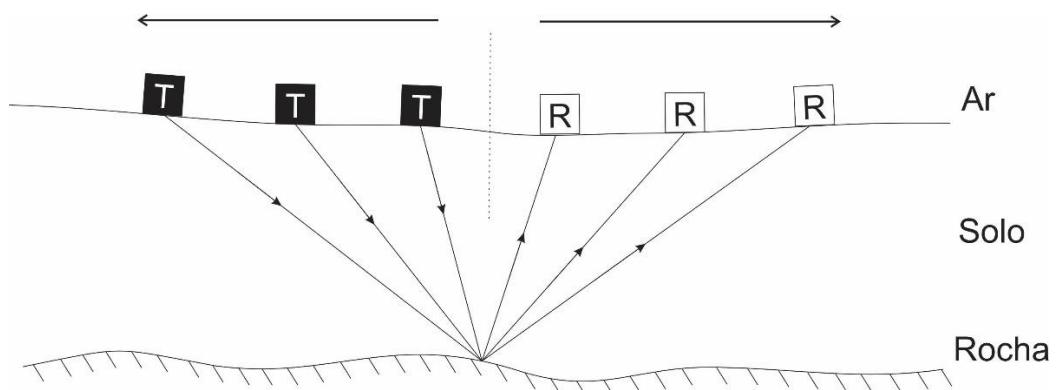


Figura 13 - Arranjo do tipo CMP. Fonte: Adaptado de Pinto, 2007.

4.4.2.3. Perfil de Reflexão com Afastamento Constante

Este foi o método utilizado neste trabalho e se caracteriza como a forma mais comum de aquisição de dados GPR (Figura 14). Consiste no deslocamento das antenas transmissora e receptora sobre a superfície, ambas com um espaçamento fixo entre elas (common offset), enquanto o deslocamento é feito a mão seguindo um perfil previamente estabelecido. Ao longo do perfil várias medidas vão sendo realizadas acerca do tempo de reflexão das ondas EM para cada camada em subsuperfície, as quais posteriormente irão compor o radargrama que possui em seu eixo horizontal, o posicionamento das antenas ao longo da distância do caminhamento realizado, enquanto que no seu eixo vertical é mostrada informações acerca do tempo duplo de propagação do sinal EM (*Two Way Travel Time - TWTT*) (PORSANI, 1999; ANNAN, 2004). Para este levantamento o equipamento utilizado foi o GPR SIR-3000 fabricado pela GSSI, tendo sido utilizada a antena de 200 Mhz (Figura 15). A janela temporal utilizada foi de trezentos nanosegundos (300×10^{-9} s) com amostragem de mil e vinte e quatro (1.024) amostras por traço e cinquenta (50) traços por metro. Além do GPR, um receptor GPS RTK foi utilizado para georreferenciar no espaço os perfis realizados (Figura 16).

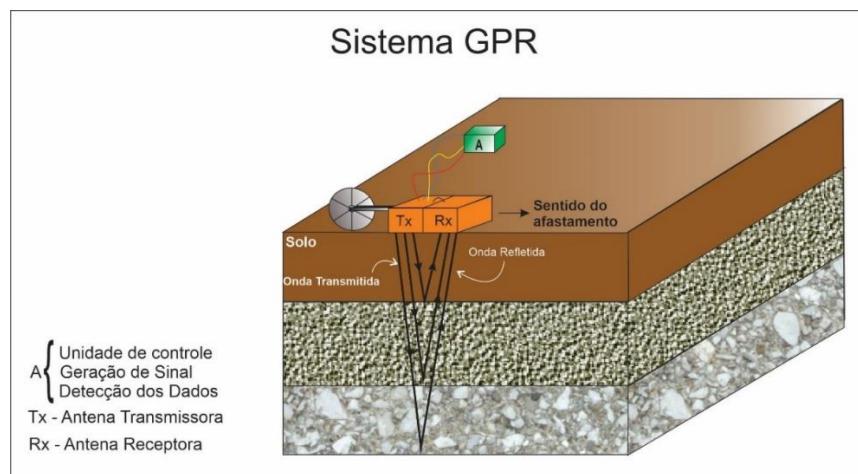


Figura 14 - Representação do sistema de funcionamento do GPR onde (Tx) - Antena Transmissora, (Rx) - Antena Receptora, (A) Unidade de controle. Fonte: Autor, 2023, baseado em Annan, 1991.



Figura 15 - Realização de amostragem de perfil GPR na área de estudo. Fonte: Autor, 2022.



Figura 16 - Levantamento de perfil GPR atrelado ao receptor de GPS RTK para georreferenciamento do perfil. Fonte: Autor, 2022.

4.4.3. Processamento dos Dados

Apesar da semelhança com a sísmica de reflexão, as ondas EM sofrem mais efeitos durante a propagação pelo meio do que as ondas elásticas. Diante disso, esta etapa é de extrema importância para obtenção, com êxito, do resultado do trabalho em que se deseja mapear as feições geológicas de subsuperfície. É no processamento que os radargramas são melhorados com o objetivo de reduzir os ruídos e distorções de modo a melhorar a resolução dos dados com o objetivo de facilitar a visualização e interpretação das estruturas e alvos estudados (ANNAN, 1992).

Para realização da etapa do processamento foi utilizado o *software* ReflexW versão 10.1 da empresa Sandmeier, as etapas de processamento seguiram a seguinte ordem: Importação dos dados, *Static Correction*, *Background Removal*, *Dewow*,

Remove Header Gain, Energy Decay, Spectral Whitening, Fk Filter, Bandpassfrequency, Correct 3Dtopography, Timedepth Conversion, Running Avarage, Exportação dos dados, conforme o fluxograma a seguir (Figura 17).

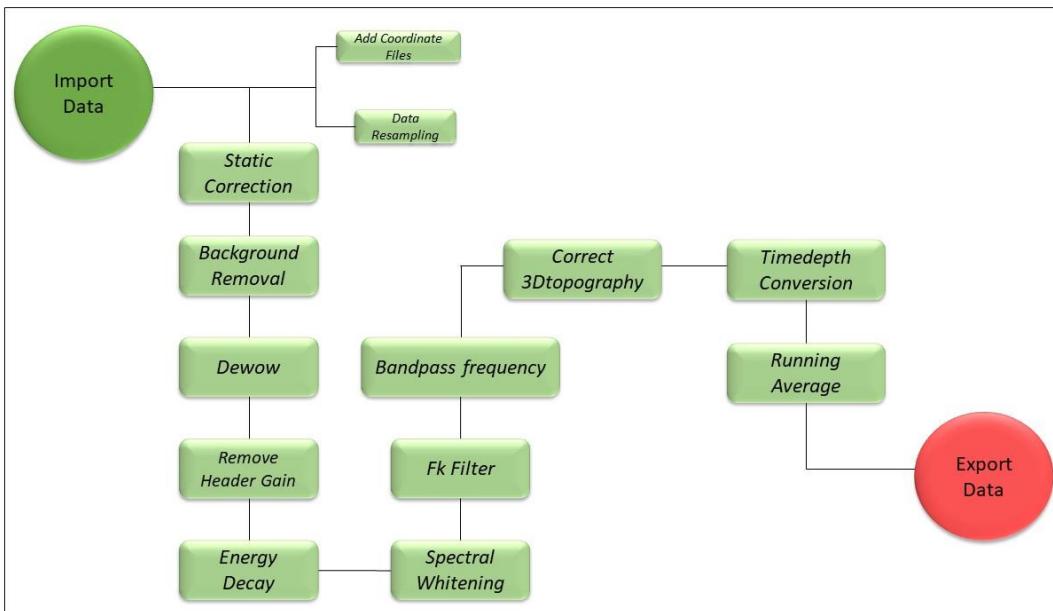


Figura 17 - Fluxograma das etapas realizadas para o processamento dos dados de GPR. Fonte: Autor: 2023.

A etapa de *Static Correction* ou ajuste do tempo zero, faz-se necessário para corrigir a janela de tempo entre a emissão, reflexão e recepção do sinal definindo um mesmo referencial no tempo para os perfis de reflexão realizados (SANTOS, 2013, SANDMEIER, 2022).

O *Background Removal* é útil para a correção do ruído causado pela indução, diretamente pelo ar, de ondas EM de alta frequência entre as antenas receptora e transmissora que mascaram os sinais de mais baixa amplitude das reflexões de subsuperfície (SANTOS, 2013, SANDMEIER 2022).

O *Dewow* é utilizado quando se deseja corrigir os ruídos oriundos das ondas EM de baixa frequência aéreas ou terrestres que causam um efeito denominado linha base (*Wow*), essas frequências são produzidas entre as antenas associadas a campos eletrostáticos ou indutivos (JOL, 2009).

A opção *Remove Header Gain* foi atribuída para remoção dos ganhos aplicados durante o processamento que servem para corrigir a atenuação que os pulsos eletromagnéticos sofrem com o aumento da profundidade (SANDMEIER, 2022).

A ferramenta *Energy Decay* foi utilizada para aplicação de ganho como alternativa de corrigir a atenuação da onda EM que ocorre com o aumento da profundidade, desse modo torna-se possível dar ênfase a refletores de interesse (SANDMEIER, 2022).

O *Spectral Whitening* atua corrigindo a atenuação da frequência das ondas EM que ocorre com o tempo objetivando nivelar para uma banda de frequência. Este filtro atua de forma independente em cada traço, dando ganhos diferentes para cada faixas de frequências, sendo que as maiores frequências recebem ganhos maiores, pois sofrem maior atenuação em profundidade, assim esse processamento permite melhorar a resolução em profundidades maiores (SANDMEIER, 2022).

O filtro *Fk Filter* foi utilizado como forma de diminuir ruídos indesejados fazendo uso do domínio frequêncica-número de onda. (SANDMEIER, 2022).

O filtro *Bandpassfrequency* foi utilizado para suprimir frequências muito distoantes acima e abaixo da média, centralizando o espectro de frequência em torno da frequência central da antena utilizada (SANDMEIER, 2022).

Para correção topográfica foi utilizado o *Correct 3Dtopography* que é ideal em terrenos com variações altimétricas significativas (SANDMEIER, 2022).

O *Timedepth conversion* possibilitou a conversão do tempo de reflexão das ondas EM em profundidade com base no conhecimento da velocidade média do meio estudado (SANDMEIER, 2022).

Por fim, foi utilizado o filtro *Running Average*. Este filtro possibilita suprimir os ruídos provenientes do deslocamento da antena dando ênfase as ondas EM horizontalmente mais próximas do real (SANDMEIER, 2022).

Após seguida esse fluxo de processos e aplicação dos filtros, os radargramas foram exportados nos formatos .bmp e SGY. Em seguida os arquivos .bmp foram importados no *software* de designer gráfico *CorelDraw* versão 2019, enquanto os arquivos .sgy foram importados no *Petrel* versão 2021.6.

4.5. Método VANT

Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) ou Aeronave Remotamente Pilotada (ARP), consiste em pequenas aeronaves destinadas aos mais diversos propósitos, sejam estes mais informais para diversão e lazer do proprietário ou para atuação profissional em uma vasta gama de possibilidades (ANAC, 2017; PRUDKIN & BREUNIG, 2019; BRUNCH *et. al.*, 2019).

O uso de VANT surge com finalidades militares e seu primeiro uso que se tem registro é por volta do fim do século XIX onde balões austríacos foram lançados carregando bombas contra a cidade de Veneza, sem controle algum e dependendo apenas do vento parte dos balões teriam atingido o propósito e outra parte retornado para as frentes de combate austríacas (UBIRATAN, 2015).

Décadas após este episódio, em cenário de Segunda Guerra Mundial, já em meados do século XX, engenheiros alemães criaram um VANT mais parecido anatomicamente com uma aeronave carregando bombas para as frentes inimigas, tudo isso tendo como motivação o uso de um método eficaz em se atingir um alvo distante para executar uma missão de perigo sem arriscar vidas de seus combatentes (BRANT, 1967; BUZZO, 2015).

Com o passar dos anos o VANT passou a ser utilizado por civis e não apenas para uso militar. O uso do VANT mudou o cenário da aerofotogrametria, devido ao seu baixo custo de operação atrelado a possibilidade de imageamento de grandes áreas em um curto espaço de tempo, foi o que tornou atraente o uso dessa metodologia para aquisição de imagens de alta resolução quando comparadas às imagens de satélite gratuitas disponíveis (JÚNIOR *et. al.*, 2014). No Brasil, essa metodologia tem se destacado na sociedade acadêmica para diversos fins, como prognóstico de áreas susceptíveis a inundação, planejamento urbano, topografia, cubagem na indústria da mineração, monitoramento de lavouras na agricultura, além de diversas outras aplicações possíveis se destacando em trabalhos de autores como (BUFFON, 2017; CÂNDIDO *et. al.*, 2016; AGUIAR *et. al.*, 2019; WEINER, 2021; ASSAIANTE & CAVICHIOLI, 2020).

4.5.1. Parâmetros de Aquisição

Alguns parâmetros são importantes de serem analisados previamente a ação de voo para que o objetivo do trabalho seja alcançado com segurança e eficácia. Os principais são as seguintes (DJI, 2021):

- Condições climáticas;
- Horário de voo;
- Carga da bateria dos equipamentos;
- Tamanho da área de interesse;
- Quantidade de baterias necessárias;

- Memória disponível;
- Correta fixação das hélices;
- Calibração da bússola;
- Definição do *homepoint*;
- Altitude de voo;
- Sobreposições laterais e frontais das imagens;

As principais variáveis climáticas a serem analisadas são três, luminosidade, velocidade do vento e precipitação pluviométrica. A luminosidade influencia na qualidade final da foto, dias nublados podem resultar em imagens de cores com baixo realce ou mudança de cores em momentos que haja alternância com raios incidentes no alvo ou regiões sombreadas devido à presença das nuvens. O vento pode comprometer o perfeito funcionamento do equipamento com alto consumo de bateria ou até mesmo derrubar o VANT a depender da velocidade do vento. O equipamento não é à prova de água, chuvas, bem como, umidade, podem comprometer seus circuitos prejudicando seu funcionamento em pleno voo (DJI, 2021).

O horário de voo deve ser considerado de modo que planos de voo muito grandes que necessitem de mais de um dia de voo não sejam realizados em horários muito diferentes do dia de modo a evitar o problema da luminosidade distinta no momento do processamento e geração do ortomosaico das imagens (DJI, 2021).

A bateria do VANT, o controle de comando e o aparelho eletrônico (Celular, tablet ou computador) devem estar carregados para que haja êxito no trabalho. Deve-se levar em conta o tamanho da área e a quantidade de baterias disponíveis para realização do plano de voo de modo a garantir a execução total do plano dentro do tempo disponível (DJI, 2021).

O equipamento faz uso de um cartão de memória durante o voo para o armazenamento das cenas fotografadas, portanto, é indispensável a validação não só do cartão de memória levando em conta memória disponível em face a necessária para realização completa do trabalho, como também a validação de todos os componentes do VANT de modo a evitar imprevistos indesejáveis no momento da execução do plano de voo (DJI, 2021).

O piloto deve se certificar de fixar corretamente cada par de hélices em sua devida posição para garantir que o VANT decole com segurança (DJI, 2021).

A bússola interna do VANT é de extrema importância para orientação do mesmo e deve ter sua calibração sempre checada e definida evitando incidentes relacionados à orientação geoespacial do equipamento durante a execução do voo. Atrelado a isso, é imprescindível que o *homepoint* ou ponto de partida seja definido antes de levantar voo, desse modo, garante-se que o equipamento retorne ao local de partida em caso de problemas técnicos como falha do sinal ou ao descarregar sua bateria (DJI, 2021).

A altitude do voo deve ser definida como forma de manter a segurança do levantamento. Este parâmetro é definido baseado em três fatores principais, são eles: a regulamentação, altura de possíveis obstáculos (árvores, prédios, colinas, postes, cabos de energia etc.), e a diferença topográfica entre o ponto de lançamento e a maior altura do obstáculo mais alto (Figura 18) (MELO JÚNIOR *et. al.*, 2018).

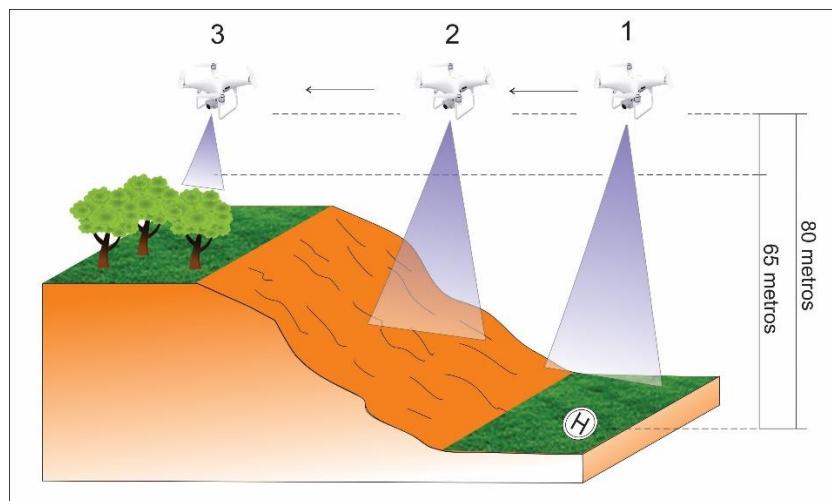


Figura 18 - Exemplificação da escolha da altitude de voo considerando todos os obstáculos dentro da área de levantamento de modo a garantir a segurança da atividade no local. Fonte: Autor, 2023.

A sobreposição lateral e frontal das imagens permite a identificação de pontos comuns entre uma foto e outra possibilitando a confecção do ortomosaico que é feito a partir da junção de todas as ortofotos registradas ao longo do voo. Diversos autores fazem uso de várias combinações entre estas sobreposições, neste trabalho foi utilizada uma sobreposição frontal de 80% e lateral de 70%. Este parâmetro influencia no tempo de voo e na qualidade final da ortofoto (PINTO FILHO; LIMA; OLIVEIRA JÚNIOR, 2020).

A utilização de aeronaves não tripuladas é regida pela regulamentação aprovada pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) em 03 de maio de 2017 que levou em consideração todos os riscos provenientes da operação com VANTS.

Alguns parâmetros são estabelecidos, dentre eles, uma distância mínima de trinta metros laterais de qualquer pessoa que não esteja envolvida com a operação desde que não haja nenhuma barreira impossibilitando esse distanciamento, o piloto deve ter idade superior ou igual a dezoito anos podendo operar apenas uma aeronave de cada vez (ANAC, 2017).

4.5.2. *Método de Aquisição*

O VANT utilizado neste trabalho foi um *Phantom 4 Pro V2* da empresa DJI modelo multirotor com 4 rotores (Figura 19), este modelo conta com uma câmera integrada de sensor CMOS de 1” e 20 *megapixels*, possui sensor de obstáculos em cinco direções que permite maior segurança na realização dos planos de voo que têm autonomia de trinta minutos (DJI, 2021). A autonomia do equipamento depende das condições de voo como o vento, por exemplo, que pode oferecer resistência consumindo maior energia das baterias durante o voo. Para este trabalho, foram necessárias três baterias e um cartão de memória de trinta e dois *gigabytes* sendo utilizado um total de quatorze *gigabytes* para armazenamento das novecentas e novena e nove imagens adquiridas. O voo foi realizado a uma altitude de vinte e cinco metros de altura com oitenta por cento de sobreposição lateral e setenta por cento de sobreposição frontal o que rendeu uma resolução de 0,68 cm/px.



Figura 19 - VANT Phantom 4 Pro V2, pertencente ao LAE-UFRN, utilizado para o levantamento aerofotogramétrico neste estudo. Fonte: Autor, 2023.

Para realização do plano de voo, necessita-se do auxílio de um aplicativo que pode ser operado tanto do celular, como de um tablet ou computador, neste trabalho foi utilizado um aparelho celular. Existem alguns aplicativos no cenário atual da aerofotogrametria, os aplicativos utilizados neste trabalho foram o *Pix4D* e *DJI GO 4* (Figura 20), que oferecem uma plataforma gratuita para execução de planos de voo e voos independentes com alguns modelos de VANT, incluindo *Phantom 4 Pro V2*. O *DJI GO 4* foi utilizado para conexão do VANT, calibração da bússola do equipamento, definição do *homepoint* e voo autônomo teste. O *Pix4D* foi utilizado para definir a área de voo, parâmetros de aquisição como angulação da câmera, altitude de voo, sobreposição das imagens e execução do plano de voo estabelecido.



Figura 20 - Aplicativo Pix4Dcapture utilizado para execução do plano de voo (A); Aplicativo DJI GO 4 utilizado para calibrar a bússola do equipamento, testar conexão, definir homepoint e voos autônomos testes (B).

A aeronave utilizada realiza a aquisição de dados nos planos X, Y, Z (Figura 21), no entanto, os erros correlacionados a esses dados são significativos, principalmente no eixo Z (eixo da altitude).

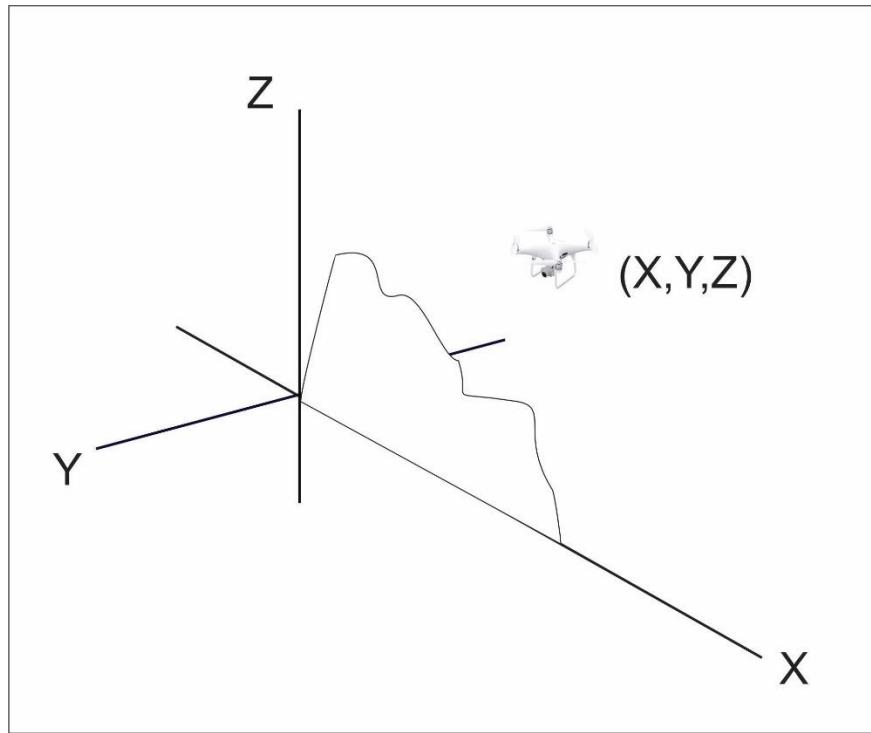


Figura 21 - Representação gráfica dos planos cartesianos considerados na aquisição do aerolevantamento contendo as posições geográficas em X e Y e altitude no plano Z. Fonte: Autor, 2023.

Para correção desse erro se faz uso do GPS RTK que diminui o erro para escalas centimétricas a partir da coleta de pontos de controle (PC) que são utilizados de modo que haja amarração dos dados obtidos com o VANT aos dados desses PC. Estes pontos coletados em terra são posicionados de modo que a malha de pontos abranja de forma homogênea a área de estudo considerando diferenças topográficas

buscando posicionar os alvos em áreas baixas e altas garantindo uma boa correlação dessas altitudes na fase do processamento desses dados. Os alvos devem ser de materiais que ofereçam bom contraste em relação ao objeto estudado de modo que a visualização na imagem aérea seja facilitada possibilitando o processamento. Diversos autores utilizam os mais variados materiais para alvos como placas de cerâmica branca, recortes de tecido coloridos, cartolina, ou feições identificáveis como faixas de pedestres, tampas de sistema de esgotamento sanitário, dentre outros (WEINER *et. al.*, 2021; MONTELO & OLIVE, 2021; RODRIGUES & GALLARDO, 2018). Neste trabalho os alvos utilizados foram confeccionados a partir do recorte de material de borracha preto e lona branca colados um no outro em formato quadrado com quarenta centímetros de lado e fitas amarelas para o lado preto e fitas vermelhas para o lado branco cruzando em formato de cruz. O tipo de material utilizado possibilitou melhor fixação em suas posições pelo peso final do alvo, além do uso em ambientes de cores distintas em que tanto o branco com vermelho e preto com amarelo contrastaram bem. Para garantir que o alvo manteria sua posição original, além do próprio peso atribuído do material, seixos de rocha carbonática do próprio lajedo foram utilizadas nos vértices do alvo (Figura 22A e 22B). O voo somente é iniciado após todos os alvos serem espalhados para se certificar de que todos os alvos serão capturados durante o voo.

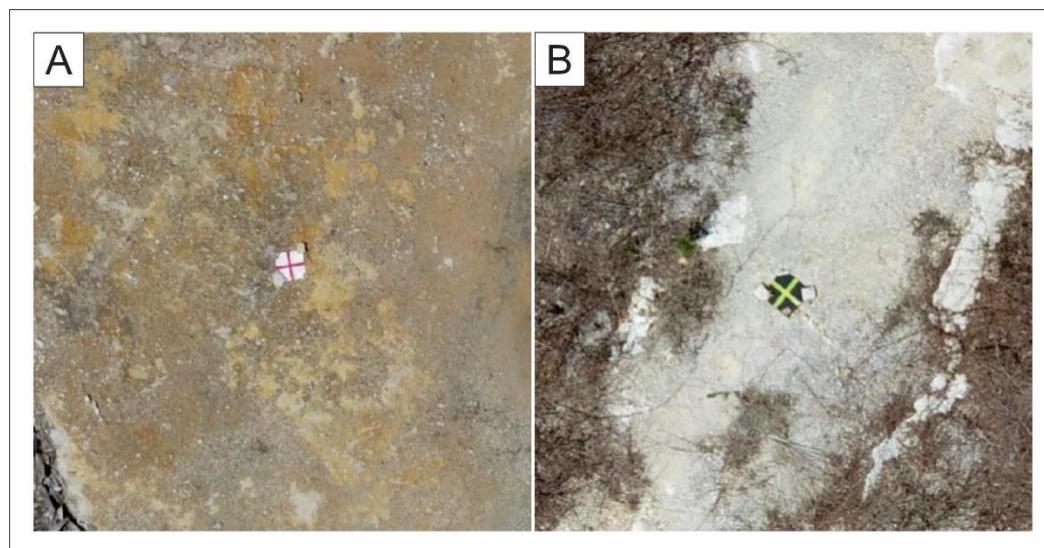


Figura 22 - Alvo branco com fitas vermelhas (A); Alvo preto com fitas amarelas (B). Fonte: Autor, 2023.

4.5.3. Processamento dos Dados

Ao todo foram capturadas novecentas e noventa e nove cenas durante o plano de voo realizado. As imagens capturadas foram processadas mediante a utilização do software *Agisoft PhotoScan*. O processamento seguiu as etapas pré-estabelecidas pelo software de modo que o fluxo do processo (Figura 23), ocorre de forma semiautomática com as seguintes fases: Seleção das imagens, Importação das imagens, Calibração das imagens para o sistema geográfico pertinente, *Align Photos*, Adição dos pontos de controle, *Optimize cameras*, Ajuste de pontos de controle, *Build Dense Cloud*, *Build Mesh*, *Build Texture*, *Build DEM*, *Build Orthomosaic*.

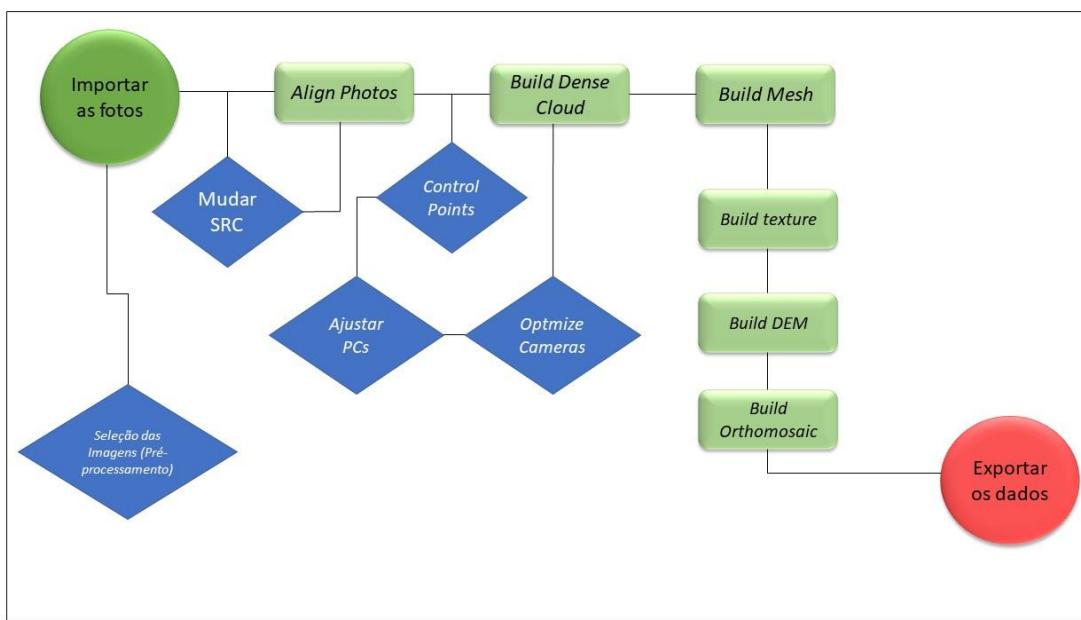


Figura 23 - Fluxograma das etapas do processamento das imagens adquiridas com levantamento aéreo realizado com VANT na área de estudo. Fonte: Autor, 2023.

Antes de começar o processamento das imagens, a escolha das imagens deve ser feita eliminando as imagens que estejam com angulação diferente de 90º e que por algum erro do equipamento tenha sido registrada com erros como imagem embaçada ou com cena incompleta.

Outro ponto importante é o processamento dos pontos de controle (PC) adquiridos. Os PC foram adquiridos com o equipamento GPS RTK Trimble R8S (Figura 24), a partir do uso de duas antenas, uma chamada de base que é instalada em um ponto fixo de modo que servirá para corrigir os pontos de controle coletados com a outra antena denominada de *rover*. O método de aquisição foi o *stop and go* em que após estabilização do sinal o ponto é coletado e então segue para o próximo ponto e

assim por diante até finalizar todos os pontos estabelecidos (FERRECCIO, 2006). Para o processamento do dado adquirido foi utilizado o site do IBGE.



Figura 24 - Equipamento GPS RTK R8S Trimble, pertencente ao LAE-UFRN, utilizado neste trabalho. Fonte: Autor, 2022.

Após essa fase de seleção das imagens e processamento dos dados RTK, o processamento das ortofotos pode ser iniciado importando as imagens para o software e em seguida selecionando o Sistema Referencial de Coordenadas (SRC) que represente o local da área de estudo. Como a área em questão está localizado no município de Baraúna, Rio Grande do Norte, o SRC escolhido foi o Sirgas 2000 UTM zona 24S de EPSG 31984 (AGISOFT LLC, 2018).

A primeira etapa do processamento consiste no uso da ferramenta *Align Photos*. Neta etapa as fotos são posicionadas de acordo com suas coordenadas geográficas atribuindo uma posição para cada uma no espaço alinhando-as gerando a nuvem *Tie Points* que nada mais é do que os pontos correlatos entre as imagens (AGISOFT LLC, 2018).

A segunda etapa consiste na adição dos *Control Points* na plataforma que deve ser adicionado no formato .txt com a seguinte ordem: Nome, x – *easting*, y – *northing*, z – altitude (Figura 25). Deve-se otimizar as câmeras em seguida a partir da ferramenta *Optimize Cameras*. Após feito isso o próximo passo é averiguar ponto a ponto e correlacionar suas imagens a cada PC a partir dos alvos espalhados no momento da aquisição (Figura 26) (AGISOFT LLC, 2018).

Nome	x - easting	y - northing	<i>z</i> altitude
Drone_PC_01	656694.068	9438328.948	98.923
Drone_PL_02	656675.132	9438373.150	98.893
Drone_PL_03	656711.480	9438394.533	99.665
Drone_PL_04	656676.785	9438410.229	98.864
Drone_PL_05	656664.156	9438416.549	98.836
Drone_PC_06	656604.256	9438388.976	98.220
Drone_PC_07	656720.417	9438458.843	99.781
Drone_PC_08	656709.249	9438455.684	99.608
Drone_PC_09	656691.989	9438453.098	98.784
Drone_PL_10	656744.756	9438483.855	99.528
Drone_PL_11	656735.113	9438512.797	99.480
Drone_PL_12	656715.534	9438491.674	99.597
Drone_PL_13	656710.421	9438489.137	98.748
Drone_PL_14	656663.555	9438490.006	98.923
Drone_PC_15	656605.724	9438524.509	98.497
Drone_PC_16	656618.912	9438584.163	96.639
Drone_PC_17	656618.734	9438582.402	98.522

Figura 25 - Apresentação da organização dos dados dos pontos de controle em .txt, como devem ser importados no software. Fonte: Autor, 2023.

A nomenclatura foi estabelecida com base na diferenciação dos pontos de controle que foram utilizados em áreas de diferença altimétrica ou como forma de deixar homogênea a área de levantamento (PC) e aqueles que estavam ao longo de algum perfil GPR realizado (PL).

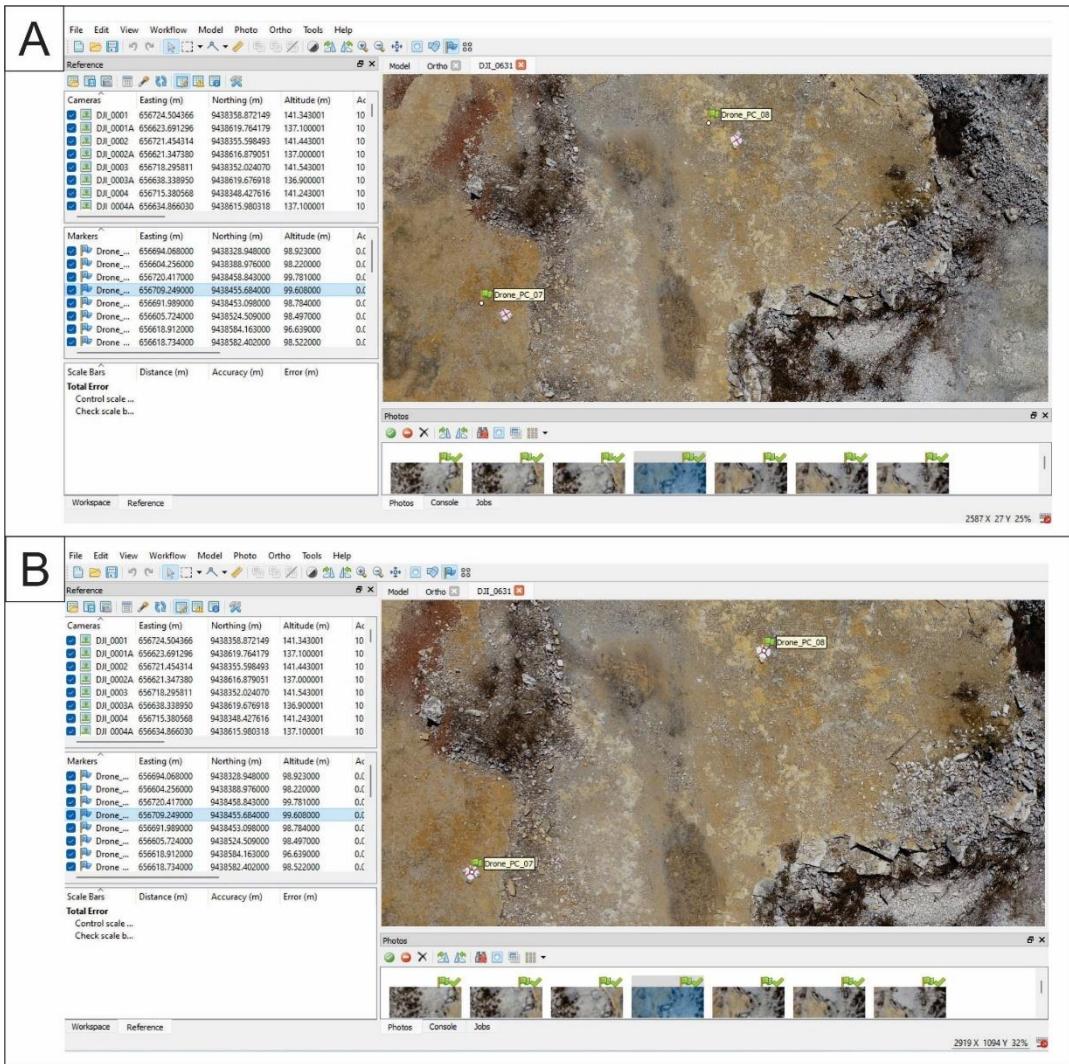


Figura 26 - Pontos de controle antes do ajuste fora do centro do alvo demarcado (A); Pontos de controle ajustados com seus respectivos alvos centralizados para correção ortométrica das imagens (B). Fonte: Autor, 2023.

A terceira etapa é a de construção da nuvem densa, *Build Dense Cloud*. Nesta etapa a nuvem de *Tie Points* gerada na etapa de alinhamento das fotos tem sua densidade de pontos melhorada com objetivo de diminuir os espaços vazios entre os pontos melhorando a qualidade dessa primeira fase (AGISOFT LLC, 2018).

A quarta etapa é a construção da malha, *Build Mesh*, ou modelo, a partir da nuvem densa criada na etapa anterior. Com esta ferramenta o modelo tridimensional é criado e as feições, como também, diferenças altimétricas podem ser visualizadas numa perspectiva 3D (AGISOFT LLC, 2018).

A quinta etapa é a aplicação de textura, com a utilização da ferramenta *Build Texture*, no modelo tridimensional criado na etapa anterior conferindo a este modelo uma melhor visualização (AGISOFT LLC, 2018).

A sexta etapa consiste na geração do Modelo Digital de Elevação (MDE) com a ferramenta *Build DEM*. Nesta etapa do processamento o modelo de elevação é gerado em 2D em formato de imagem com coloração quentes para representação de elevações maiores e cores frias para elevações menores (AGISOFT LLC, 2018).

Por fim, tem-se a geração do ortomosaico, *Build Orthomosaic*, que é a criação de um mosaico com todas as ortofotos adquiridas unificadas em uma única imagem de toda a área de estudo mapeada (AGISOFT LLC, 2018).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão abordados os resultados e discussões alcançados neste trabalho a partir do uso de dois métodos de imageamento das geometrias internas e externas do afloramento estudado. O método de GPR se apresenta como uma ótima opção para o imageamento da geometria interna das rochas sedimentares resistivas, envolvendo as feições deposicionais e deformacionais. A geometria externa do afloramento foi imageada com o método de aerofotogrametria utilizando como ferramenta o VANT que a partir de fotografias aéreas de alta resolução, georreferenciadas, permitiu a elaboração de um modelo virtual de superfície.

As informações georreferenciadas das feições internas e externas do afloramento selecionado permitiu a elaboração de um Modelo Virtual do Afloramento (MVA).

5.1. Produtos do aerolevantamento (VANT)

O plano de voo realizado priorizou a área em que os perfis GPRs foram realizados e seu entorno totalizando uma área de 5,8 hectares. Para essa área foram utilizados um total de 17 *targets* ou alvos, destinados a correção ortométrica das imagens adquiridas que totalizaram 999 imagens, sendo utilizadas 988 pós processamento das melhores imagens a serem utilizadas. Os alvos foram posicionados de modo a garantir uma homogeneidade na área e valorizando as diferenças altimétricas como no caso do alvo 16 e 17 delimitados em vermelho (Figura 27), que apesar da proximidade possuem uma diferença altimétrica de 1,88 metros (Tabela 2).

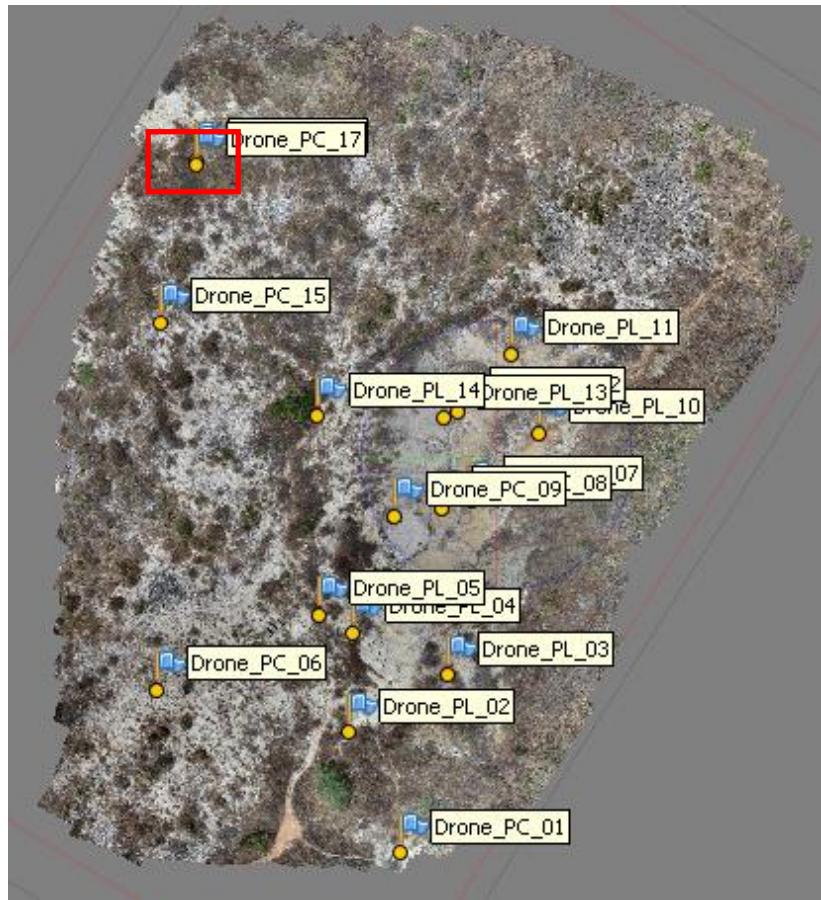


Figura 27 - Distribuição dos alvos ao longo da área de estudo com detalhe para os alvos 16 e 17 delimitados pelo retângulo vermelho. Fonte: Autor, 2023.

Tabela 2 - Posição e altimetria dos alvos utilizados na correção dos dados do VANT. Fonte: Autor, 2023.

Nome do Ponto	N	E	Altitude Elipsoidal (m)
Drone_PC_01	9438328,948	656694,068	98,923
Drone_PL_02	9438373,150	656675,132	98,893
Drone_PL_03	9438394,533	656711,480	99,665
Drone_PL_04	9438410,229	656676,785	98,864
Drone_PL_05	9438416,549	656664,156	98,836
Drone_PC_06	9438388,976	656604,256	98,220
Drone_PC_07	9438458,843	656720,417	99,781
Drone_PC_08	9438455,684	656709,249	99,608
Drone_PC_09	9438453,098	656691,989	98,784
Drone_PL_10	9438483,855	656744,756	99,528
Drone_PL_11	9438512,797	656735,113	99,480
Drone_PL_12	9438491,674	656715,534	99,597
Drone_PL_13	9438489,137	656710,421	98,748
Drone_PL_14	9438490,006	656663,555	98,923
Drone_PC_15	9438524,509	656605,724	98,497
Drone_PC_16	9438584,163	656618,912	96,639
Drone_PC_17	9438582,402	656618,734	98,522

Apesar de possuir GPS incluso no seu sistema, o erro atribuído aos dados de altimetria do VANT é métrico, o uso dos referidos pontos de controle no sistema GPS RTK diminuiu o erro, alcançando uma precisão média centimétrica para o eixo Z e milimétrica para os eixos XY conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Pontos de controle e os erros atribuídos após correção durante processamento. Fonte: Autor, 2023.

Ponto de Controle	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)
Drone_PC_01	0.229888	0.308142	-0.275158	0.472771
Drone_PL_02	-0.0929512	0.904044	1.22074	1.52189
Drone_PL_03	0.96547	-0.578091	-0.493185	1.22864
Drone_PL_04	-1.43047	-1.22736	0.0424229	1.88533
Drone_PL_05	0.398292	-0.426892	-0.879694	1.05581
Drone_PC_06	-0.23529	-0.0729078	0.258918	0.357373
Drone_PC_07	0.140431	0.837524	-0.980863	1.29741
Drone_PC_08	0.174453	-0.055372	-1.30162	1.31443
Drone_PC_09	-0.0112034	0.123957	0.611471	0.62401
Drone_PL_10	0.280245	-0.868799	1.76317	1.98547
Drone_PL_11	-0.0606388	0.154443	-0.471467	0.499811
Drone_PL_12	-0.724424	-0.209655	-0.40653	0.856745
Drone_PL_13	0.0302371	0.779294	0.712499	1.05635
Drone_PL_14	-0.116482	0.539325	0.890953	1.04797
Drone_PC_15	0.327096	0.244884	-0.259518	0.484056
Drone_PC_16	0.890241	0.489501	-0.479395	1.12337
Drone_PC_17	-0.791341	-0.897263	0.384434	1.25662
Total	0.566277	0.617668	0.801645	1.15966

O processamento das imagens conforme mostrado no fluxo de processamento na Figura 22 gerou alguns produtos como: *Tie Points*, *Dense Cloud*, *Mesh* ou malha 3D, *DEM* e Ortomosaico.

A fase do processamento de alinhamento das imagens gerou uma *Tie Points* ou pontos fotogramétricos com uma densidade de 1.204.766 pontos (um milhão duzentos e quatro mil setecentos e sessenta e seis), destes resultando após a otimização em 1.094.391 pontos (um milhão noventa e quatro mil trezentos e noventa e um), com três passos atribuídos nesta fase, o alinhamento que durou 21 minutos e 49 segundos, a triangulação dos pontos que durou 1 hora e 50 minutos e a otimização dos pontos que durou apenas 1 minuto e 33 segundos resultando em um tempo total para essa fase de 2 horas 13 minutos e 22 segundos (Figura 28A).

A construção da *Dense Cloud* ou nuvem densa atribuiu uma melhor densidade dos pontos da fase anterior elevando para 91.425.382 pontos (noventa e um milhões quatrocentos e vinte e cinco mil trezentos e oitenta e dois), esta etapa sendo dividida em

duas, a geração do mapa de profundidade que durou 16 horas e 14 minutos e a própria nuvem densa que durou 1 hora e 46 minutos totalizando 18 horas para essa etapa (Figura 28B).

A produção do *Mesh* ou malha 3D serviu para aplicar textura a nuvem densa, nesta etapa foram processadas 6.055.130 faces (seis milhões cinqüenta e cinco mil e cento e trinta) durando cerca de 8 horas 13 minutos e 37 segundos para finalização (Figura 29).

O *DEM* ou Modelo Digital de Elevação (MDE) se configura como uma representação 2D da altimetria do terreno em formato de imagem. Seu processo construtivo pode dar origem a dois produtos, o Modelo Digital de Superfície (MDS) ou o Modelo Digital de Terreno (MDT). O MDS considera todas as altitudes do ambiente representando elevações das copas de árvores, construções, veículos e qualquer coisa que esteja acima do solo (Figura 30A). O MDT desconsidera qualquer feição ou objeto acima do solo como os exemplos mencionados anteriormente, veículos, construções, vegetação e qualquer outro objeto que esteja acima do nível do solo (Figura 30B). A etapa de construção do MDE durou apenas 4 minutos e 52 segundos para cada produto com resolução de 2,83 cm/pixel. A obtenção do MDT se dá a partir do processamento da nuvem densa de pontos com aplicação de filtro que pode ser realizada de forma automática, manual ou mista.

Por fim se obteve o ortomosaico que foi o produto da união das 988 ortofotos utilizadas no processamento gerando um mosaico com resolução de 7.08 mm/pixel. Esta etapa durou 55 minutos e 19 segundos (Figura 31). Unindo todas as etapas dos processamentos realizados para as imagens totalizou 29 horas 27 minutos e 10 segundos de tempo de processamento, utilizando uma máquina com processador intel core i7 8^a geração, memória RAM de 8 gigabytes, com 3 terabytes de capacidade de armazenamento e sistema operacional de 64 bits.

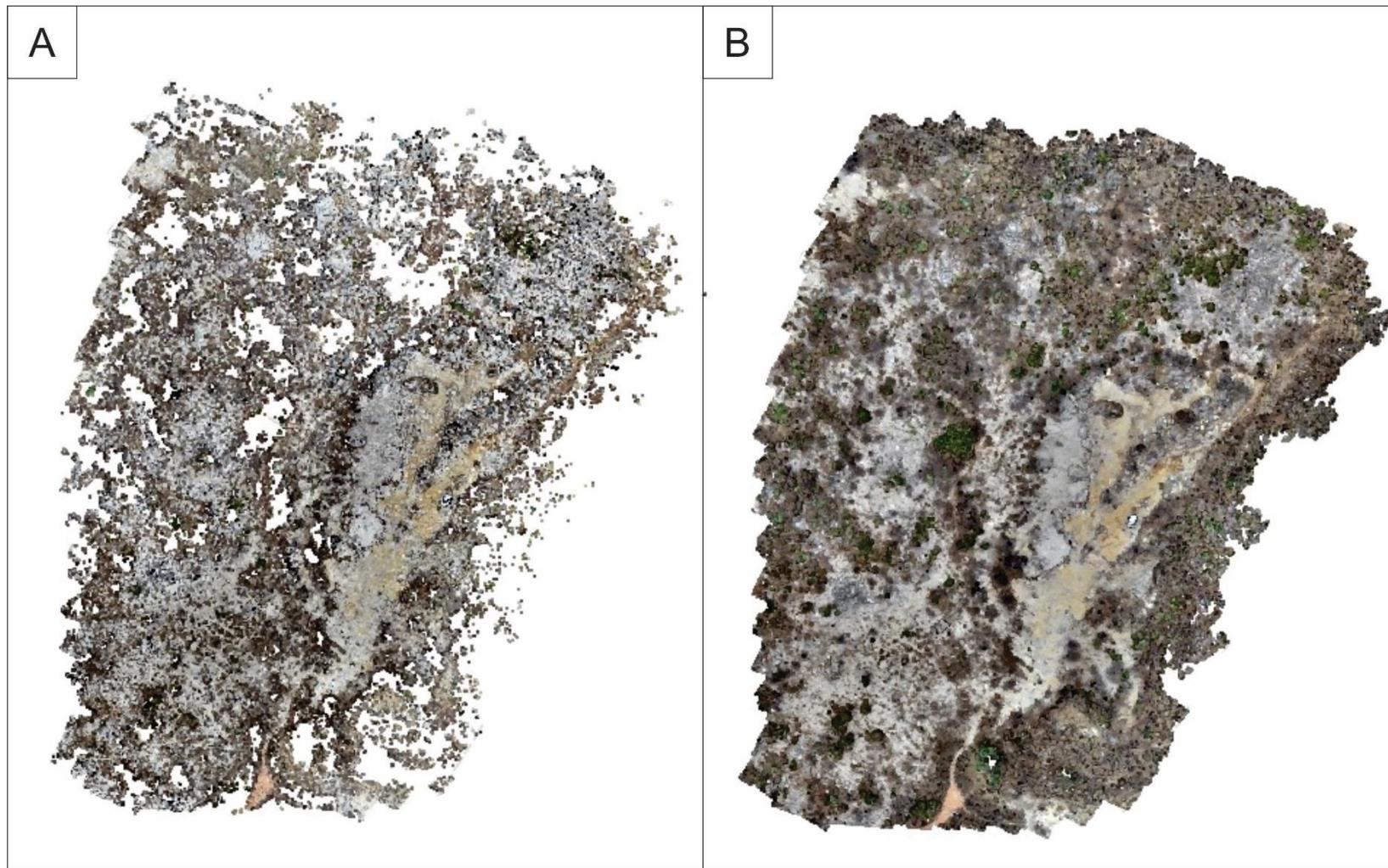


Figura 28 - Tie Points com 1.204.766 pontos (A); Resultado após construção da Dense Cloud com 91.425.382 pontos (B). Fonte: Autor, 2023.

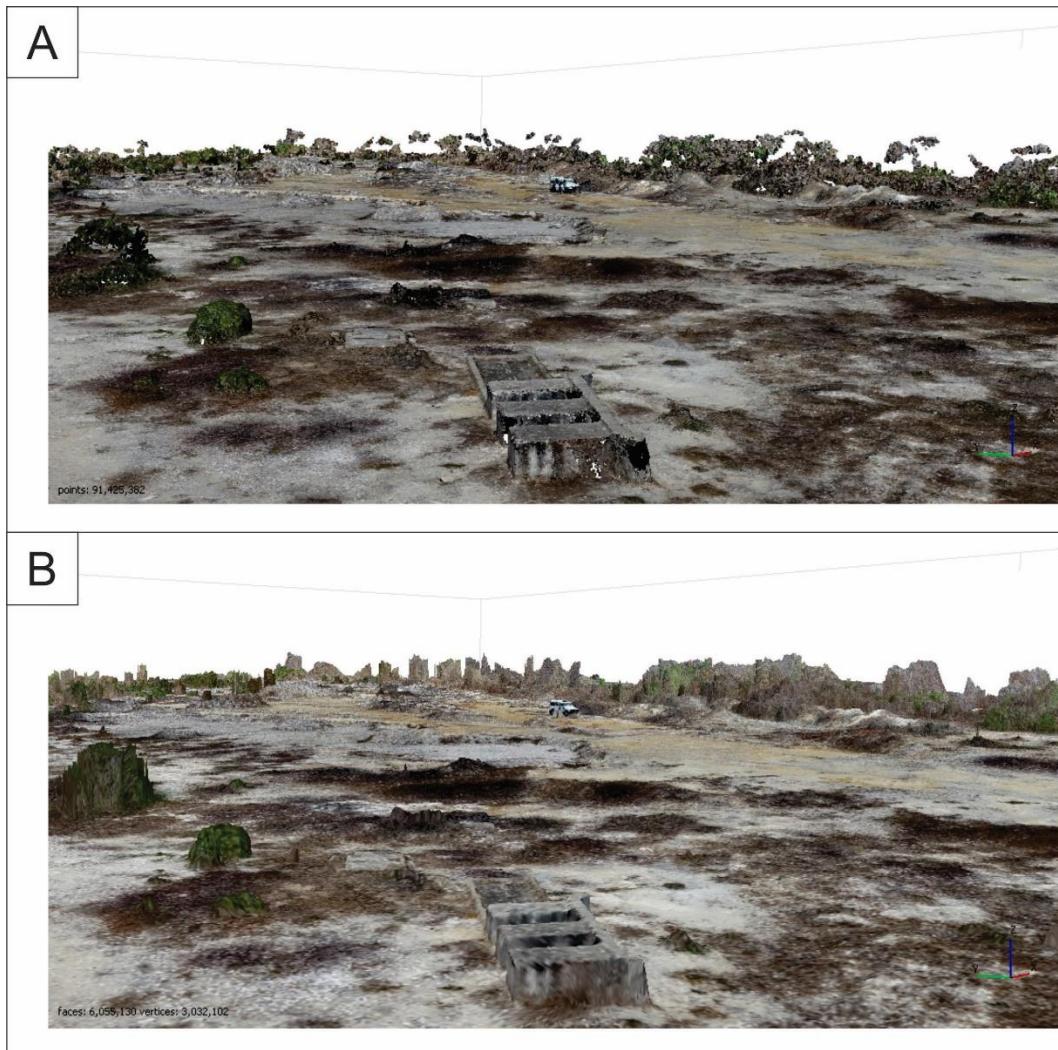


Figura 29 - Comparativo da Dense Cloud com a Malha (Mesh) com textura aplicada. Fonte: Autor, 2023.

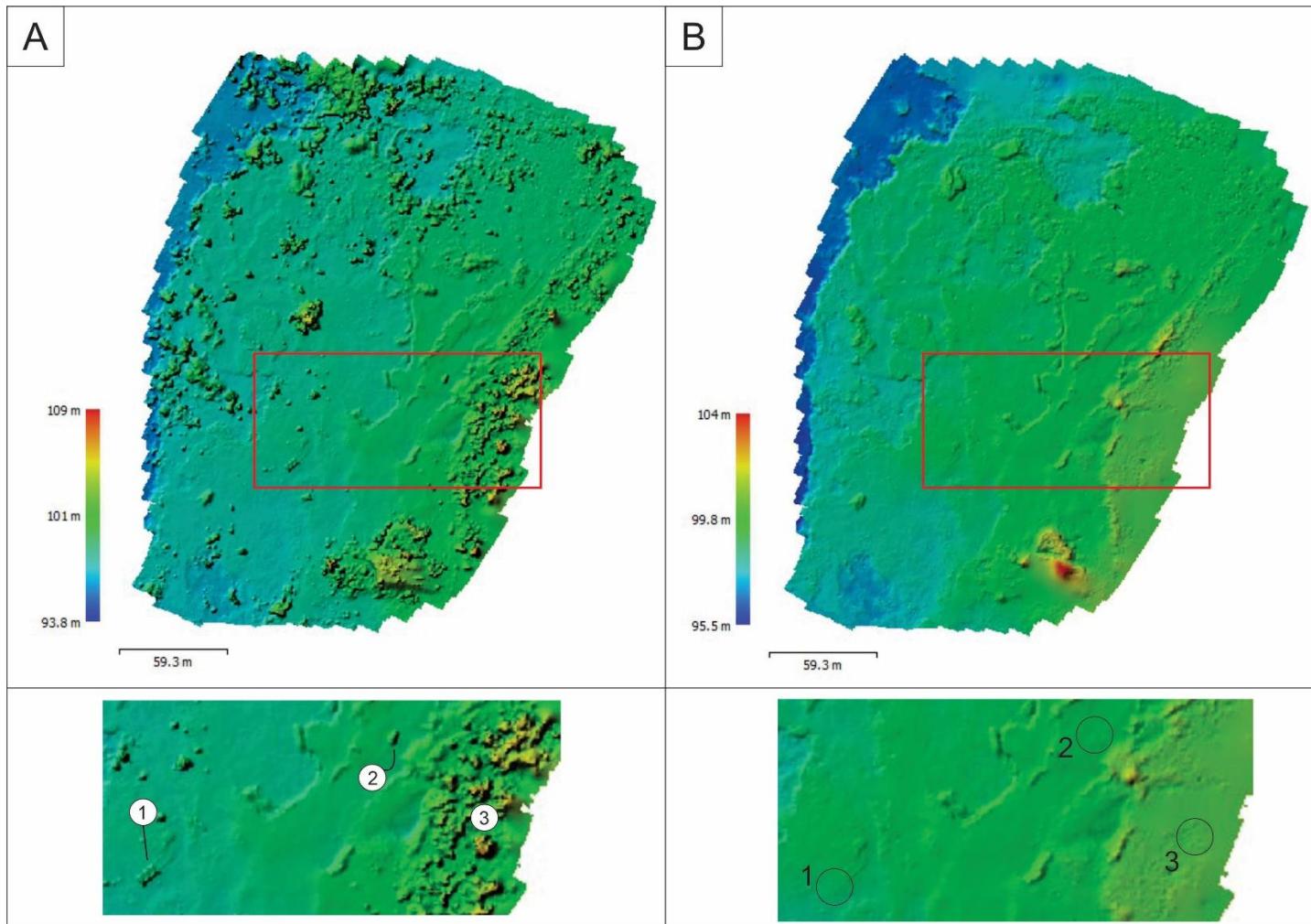


Figura 30 - Comparativo entre os produtos MDS e MDT. Em (A) o MDS considerando todas as feições para gerar o modelo de elevação com destaque para uma área com presença de construção (1), veículo (2) e vegetação (3) e abaixo o recorte dessa área. Em (B) o MDT desconsiderando os objetos acima do nível do solo com o mesmo recorte do retângulo vermelho para fins comparativos.



Figura 31 – Ortomosaico produzido a partir das ortofotos adquiridas com o aerolevantamento. Fonte: Autor, 2023.

As curvas de nível geradas com MDS são poluídas devido ao grande número de cotas a serem consideradas, principalmente em regiões onde a vegetação arbórea se faz presente em comparação com as curvas geradas a partir do MDT, em que apenas o nível do solo é considerado (Figura 32).

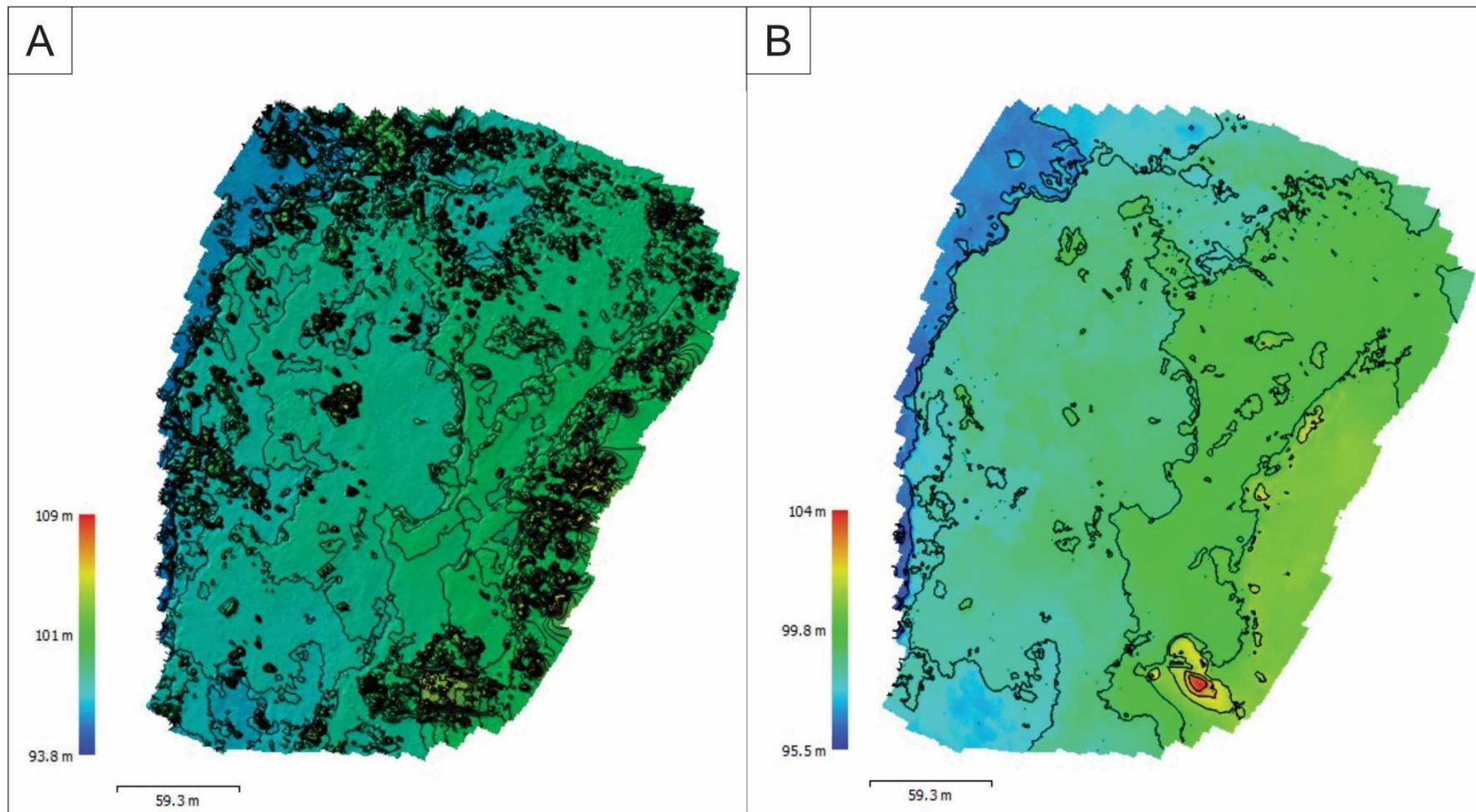


Figura 32 - (A) Curvas de nível geradas a partir do MDS considerando qualquer feição ou objeto acima do solo; (B) Curvas de nível geradas a partir do MDT desconsiderando feições e objetos que estejam acima do solo como veículos, construções e vegetação. Fonte: Autor, 2023.

A partir do *DEM* foi possível trabalhar com o arquivo *raster* para identificação dos principais lineamentos na área. Os lineamentos foram analisados e traçados em ambiente SIG com aplicação da ferramenta *Hillshade*. Esta ferramenta funciona como uma inclusão de luminosidade realçando as feições de acordo com o sombreamento delas. A técnica consiste em aplicar a *Hillshade* em diferentes direções buscando identificar as feições que estejam em direções distintas (Figura 33). Na área de estudo foram identificados quatro sistemas de fraturas com direções N-S, E-W, SE-NW e NE-SW. O *trend* preferencial foi SE-NW conforme análise amostral de 477 lineamentos traçados conforme diagrama de roseta. (Figura 34).

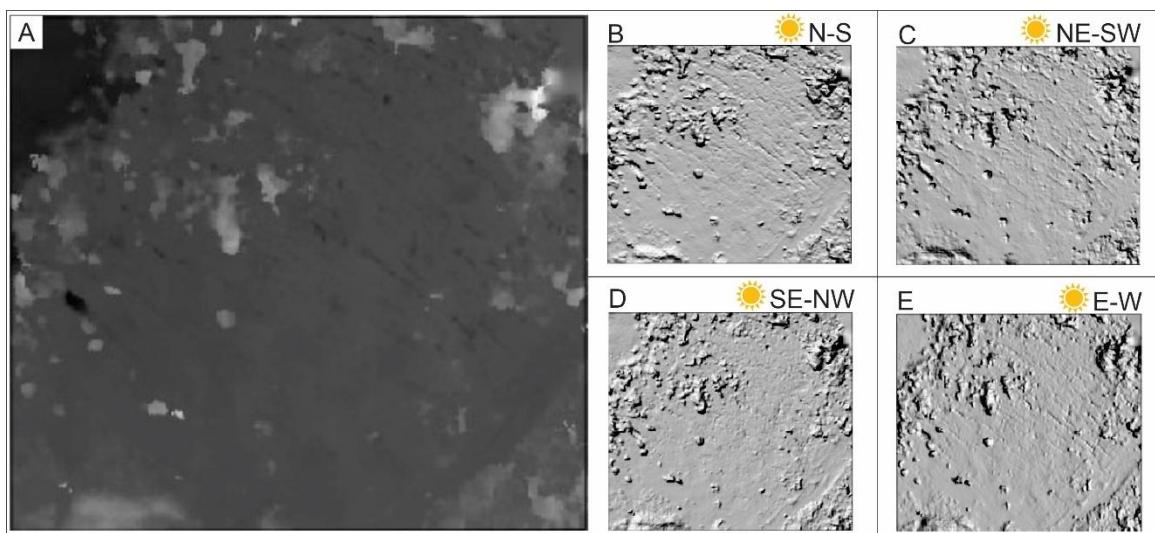


Figura 33 - (A) MDT sem aplicação do filtro hillshade; (B) MDT com aplicação da técnica hillshade com iluminação na direção N-S; (C) MDT com aplicação da técnica hillshade com iluminação NE-SW; (D) MDT com aplicação da técnica hillshade com iluminação na direção SE-NW; (E) MDT com aplicação da técnica hillshade com iluminação E-W. Fonte: Autor, 2023.

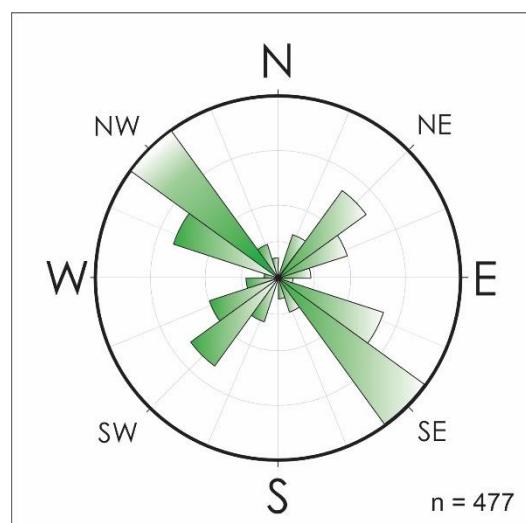


Figura 34 - Diagrama de roseta demonstrando o trend preferencial NW-SE dos lineamentos traçados dentro dos limites da área de estudo. Fonte: Autor, 2023.

5.2. Interpretação dos perfis GPR

A área do afloramento é de aproximadamente 7,2 hectares. Dentro dessa área foram realizados cerca de 629,14 metros de caminhamento com GPR, distribuídos em 11 perfis de reflexão (Tabela 4). A distribuição espacial dos perfis ao longo da área de estudo pode ser vista abaixo nas figuras 37 e 38. A Figura 37 representa a localização, em planta, dos 11 perfis de reflexão realizados, já a Figura 38, demonstra a disposição desses perfis realizada no *software* Petrel dando uma perspectiva 3D dos dados adquiridos através do caminhamento, enfatizando as zonas de intersecção dos perfis que auxiliou a interpretação com a correlação dos pontos de intersecção com as estruturas mapeadas, integrando dados de superfície e subsuperfície.

Tabela 4 - Comprimento, Direção e Sentido de caminhamento dos onze perfis de GPR realizados ao longo da área de estudo

Perfil	Comprimento (m)	Direção	Sentido
GPR 1	52,51	NW-SE	NW
GPR 2	131,95	NE-SW	NE
GPR 3	120,01	N-S	N
GPR 4	40,78	NE-SW	SW
GPR 5	38,91	NE-SW	SW
GPR 6	47,32	E-W	W
GPR 7	27,94	NW-SE	NW
GPR 8	23,58	E-W	E
GPR 9	64,95	N-S	S
GPR 10	25,99	SE-NW	NW
GPR 11	55,20	NE-SW	SW
Total	629,14		

Por se tratar de um método indireto, os resultados alcançados com os perfis de reflexão são interpretativos. Dessa forma, é desejável o aumento do conhecimento, por parte do intérprete, dos sistemas em que os dados foram adquiridos. Apesar de subjetivos, os dados de reflexão dos perfis de GPR fornecem alguns padrões de reflexão que auxiliam a interpretação dos dados. Neste trabalho foram utilizados os

padrões propostos por Mitchum (1977) como, por exemplo, as terminações e os padrões das reflexões e as geometrias dos depósitos sedimentares.

Nos perfis de reflexão adquiridos, a profundidade alcançada foi de 15 metros, sendo identificados quatro padrões principais de reflexão: regular, subparalelo, contorcido e caótico (Figura 35). Além destes padrões puderam ser identificadas zonas de atenuação verticalizadas pouco largas que foram associadas a fraturas isoladas ou, quando essas mesmas zonas ocorreram com maior espessura e largura, foram associadas a pequenas cavidades. O conjunto de padrões de reflexão agrupados, distintos das zonas vizinhas, pode ser denominado de radarfácies, ou seja, o grupo de padrões reflexivos que diferem das camadas adjacentes (HUGGENBERGER, 1993). Nos radargramas aqui interpretados foram definidas três radarfácies distintas, a partir da análise, além dos padrões de reflexão, também das propriedades das reflexões como continuidade, amplitude e frequência (Figura 36). A primeira (R1) possui refletores com elevada taxa de continuidade, paralelos a subparalelos, sendo segmentados, por vezes, por algumas fraturas verticalizadas ou pequenas cavidades resultantes da dissolução e alargamento das fraturas. A segunda (R2) possui refletores com baixa continuidade e atenuados, além de mesclar padrões subparalelos a contorcidos, representa a interface na transição entre R1 e R3. A terceira (R3) possui refletores de padrão caótico, atenuados, altamente segmentados e com presença abundante de fraturas verticalizadas.

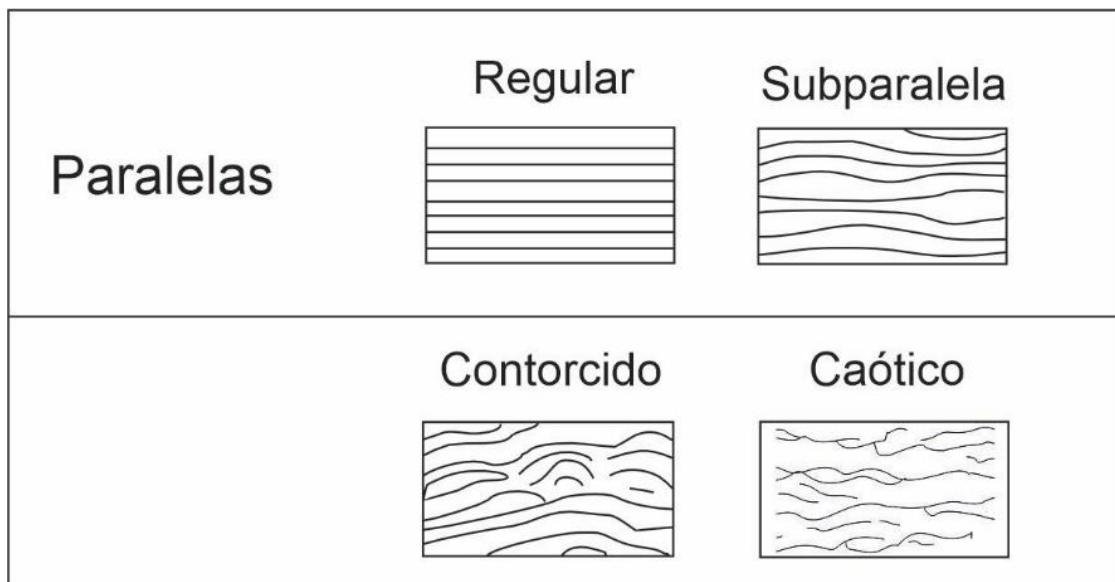


Figura 35 - Padrões de reflexão. Fonte: Adaptado de Mitchum et. al., 1977.

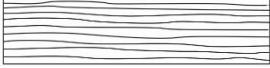
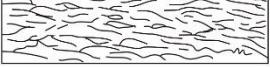
Propriedades das Reflexões		Radarfácies Correlacionadas
	Contínuo, baixa frequência e média a alta amplitude	R1
	Segmentado, alta frequência e alta amplitude	R2
	Caótico	R3

Figura 36 - Propriedades das reflexões. Fonte: Adaptado de Veenken, 2007.

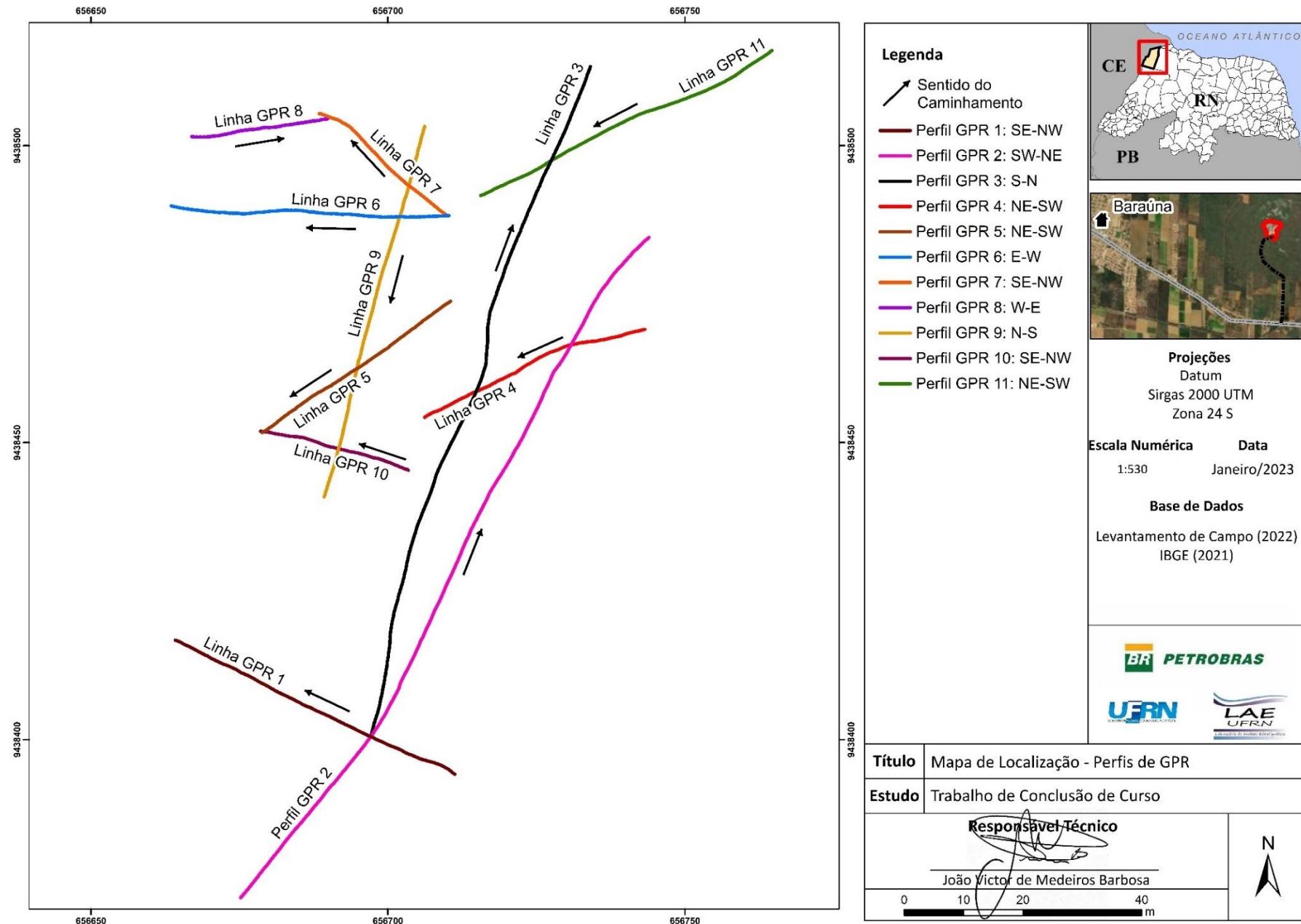


Figura 37 - Mapa de localização demonstrando a disposição dos onze perfis GPR realizados enfatizando suas direções e sentidos de caminhamento. Fonte: Autor, 2023.



Figura 38 – Disposição espacial dos perfis GPR realizados neste trabalho, conforme Figura 26, aqui dispostos sobre o ortomosaico adquirido com o aerolevantamento. Fonte: Autor, 2023.

Os perfis apresentam em geral zonas atenuadas pontuais até os seis metros de profundidade com reflexões que perdem continuidade à medida que a profundidade aumenta. As reflexões se apresentam ao longo dos perfis com amplitude e frequência de média a alta. Na Figura 39 são mostradas as interpretações das três radarfácies encontradas, utilizando o perfil GPR 1 como exemplo.

A radarfácie R1 foi caracterizada por apresentar reflexões mais contínuas e padrões que variam entre regular e subparalelo, sua profundidade variou entre 2,8 e 6 metros, vale ressaltar que nesta em R1 também foi observado a maior concentração de zonas atenuadas. A radarfácie R2 marcou uma transição entre R1 e R3, à medida que a profundidade aumenta as reflexões vão perdendo sua continuidade, apresentando-se mais atenuadas com padrões contorcidos até o ponto em que se tornam caóticas, de modo que distinguir alguma feição se torna difícil, R2 está exatamente no meio dessa mudança com

profundidade que variou entre 4 e 8 metros, conforme exemplo abaixo (Figura 39). A radarfácie R3 se apresentou com reflexões de alta descontinuidade, atenuadas, com padrão de reflexão caótico em que dificilmente consegue-se distinguir alguma feição.

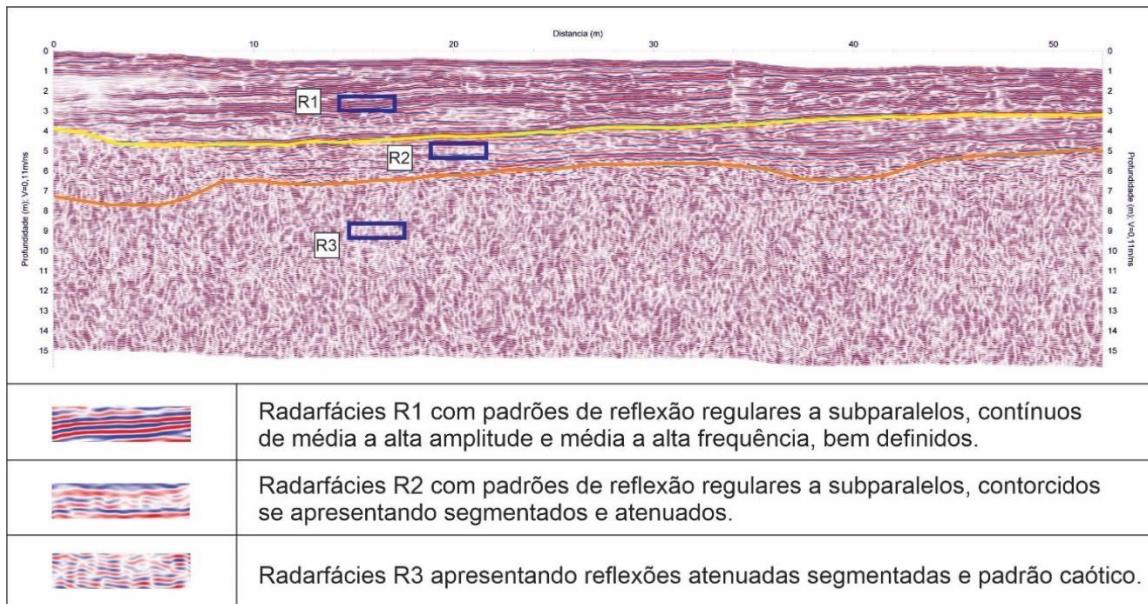


Figura 39 - Recorte do perfil GPR 1 (retângulo azul), exemplificando as radarfácies R1, R2 e R3 com suas características. Fonte: Autor, 2023.

Em alguns perfis, foi possível notar a presença de reflexões em forma de hipérbole, sendo mais claramente evidenciado no perfil 8, na posição próximo a 5 metros, entre 10 e 20 metros distante da origem. As hipérboles nos radargramas ocorrem quando um objeto ou feição distinta (ponto refletor) são encontrados em subsuperfície, de modo que a velocidade do tempo duplo aumenta a medida que as antenas transmissora e receptora se aproximam da região do objeto, gerando uma hipérbole no sinal recebido em que o tempo de registro da onda EM é maior nas laterais e menor no centro próximo da posição do objeto ou feição que se distingue do meio estudado (Figura 40) (KEAREY *et. al*, 2001).

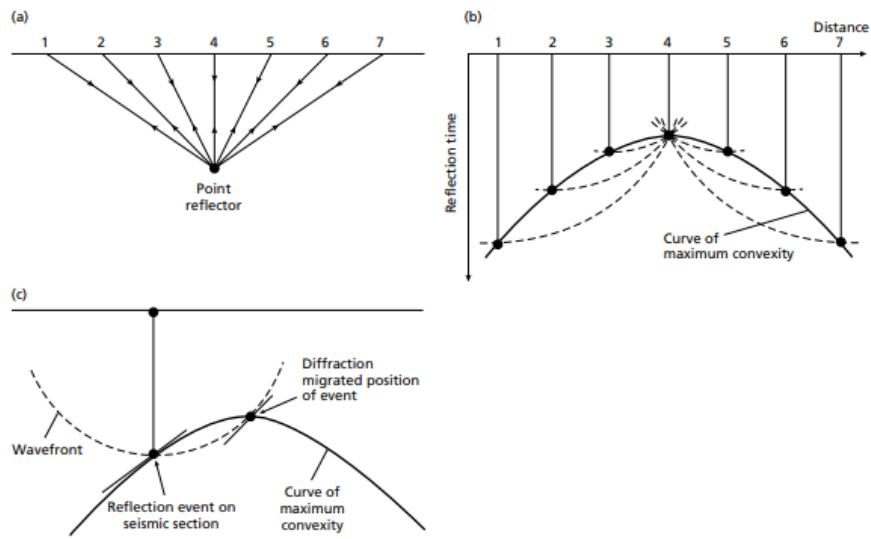


Figura 40 - Princípios de migração por difração. (a) Caminhos de reflexão de um ponto refletor. (b) Migração de eventos de reflexão individuais para cada ponto com distância horizontal diferente. (c) Frente de onda e curva de convexidade máxima para um evento específico de reflexão. Fonte: Kearey et. al., 2002.

Para facilitar a interpretação os perfis foram agrupados de acordo com as principais feições existentes. Dessa forma foram obtidos três grupos. O grupo dos perfis GPR 1 a 5 em que padrões regulares e subparalelos estiveram mais evidentes. O grupo dos perfis 6, 7, 9, 10 e 11 em que as superfícies de dissolução foram melhor observadas e interpretadas. Por fim, o Perfil GPR 8 que aparece isolado dos demais por ter apresentado reflexões em desenho de hipérbole bem demarcadas associadas ao fraturamento vertical do afloramento.

5.2.1. Perfil GPR 1, 2, 3, 4, 5.

Os perfis de reflexão GPR de 1 a 5 apresentam os padrões regulares a subparalelos em R1, estes padrões foram interpretados como característicos de ambiente de pouca energia como no caso de sistemas deposicionais de planície de maré, laguna rasa, característicos da Formação Jandaíra.

As zonas mais atenuadas verticalizadas foram associadas a zonas fraturadas que por vezes aparecem com dimensões maiores, apresentando formas circulares ou extensas longitudinais à direção do perfil, além de pequenas porções verticalizadas ao longo de todos os perfis que foram interpretadas como fraturas verticais (figuras 41 a 45).

Em R2 as reflexões passaram a se apresentar mais segmentadas e contorcidas indicando uma menor continuidade das reflexões. Os padrões contorcidos podem estar associados neste caso ao fraturamento da rocha carbonática assim como o padrão caótico

de R3 que pode ser associado a deformações, falhas e fraturas. Neste trabalho o padrão caótico foi interpretado como fator resultante da presença do fraturamento principalmente verticalizados distribuídos lateralmente ao longo de todos os perfis.

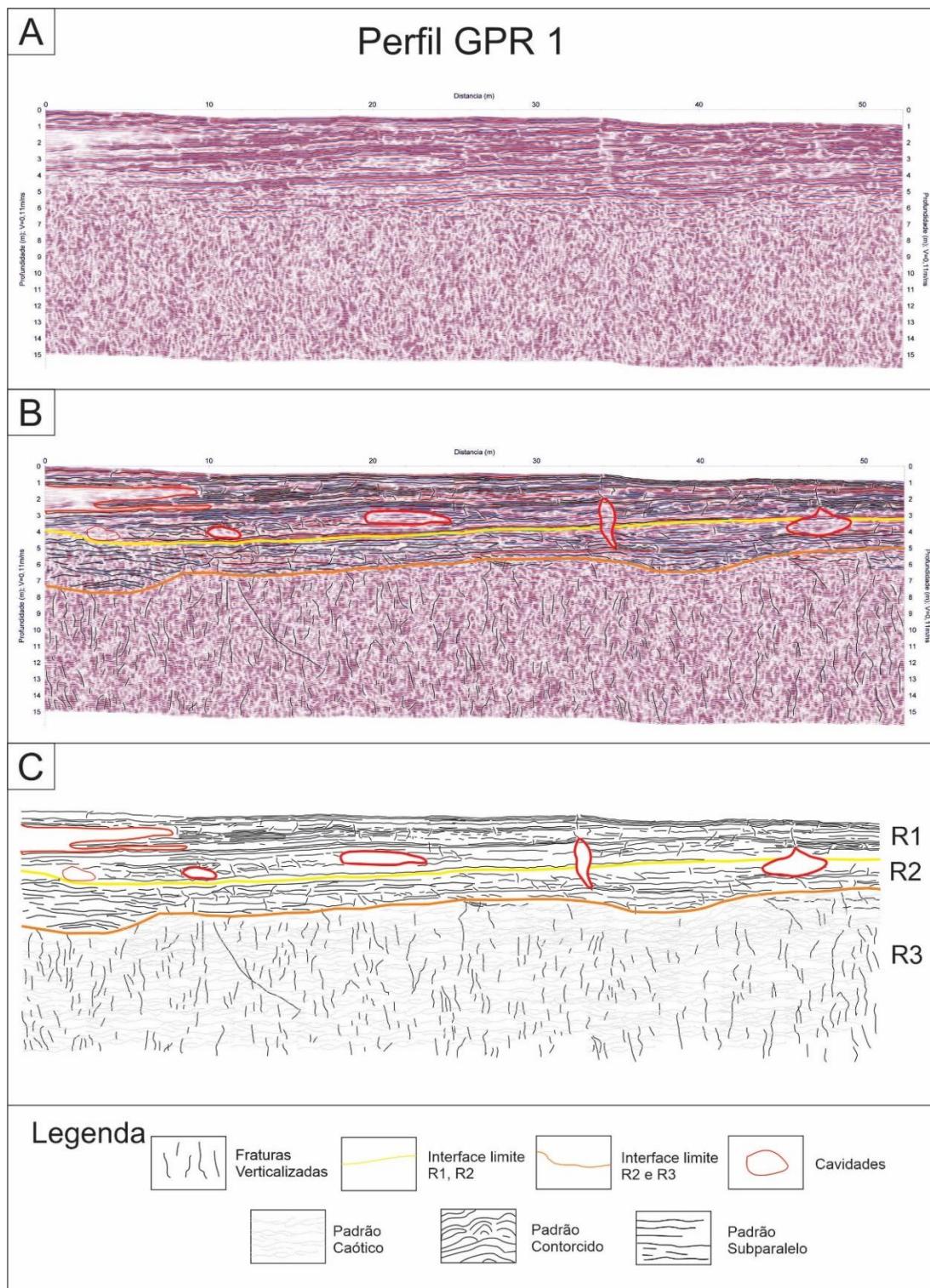


Figura 41 - Perfil de GPR 1 sem interpretação (A); Perfil de GPR 1 com interpretação (B); Interpretação do perfil de reflexão de GPR 1, com fraturas verticalizadas (linhas pretas verticais), refletores paralelos a subparalelos (linhas pretas horizontais), refletores divisores das radarfácies (amarelo e laranja) e cavidades (em vermelho).

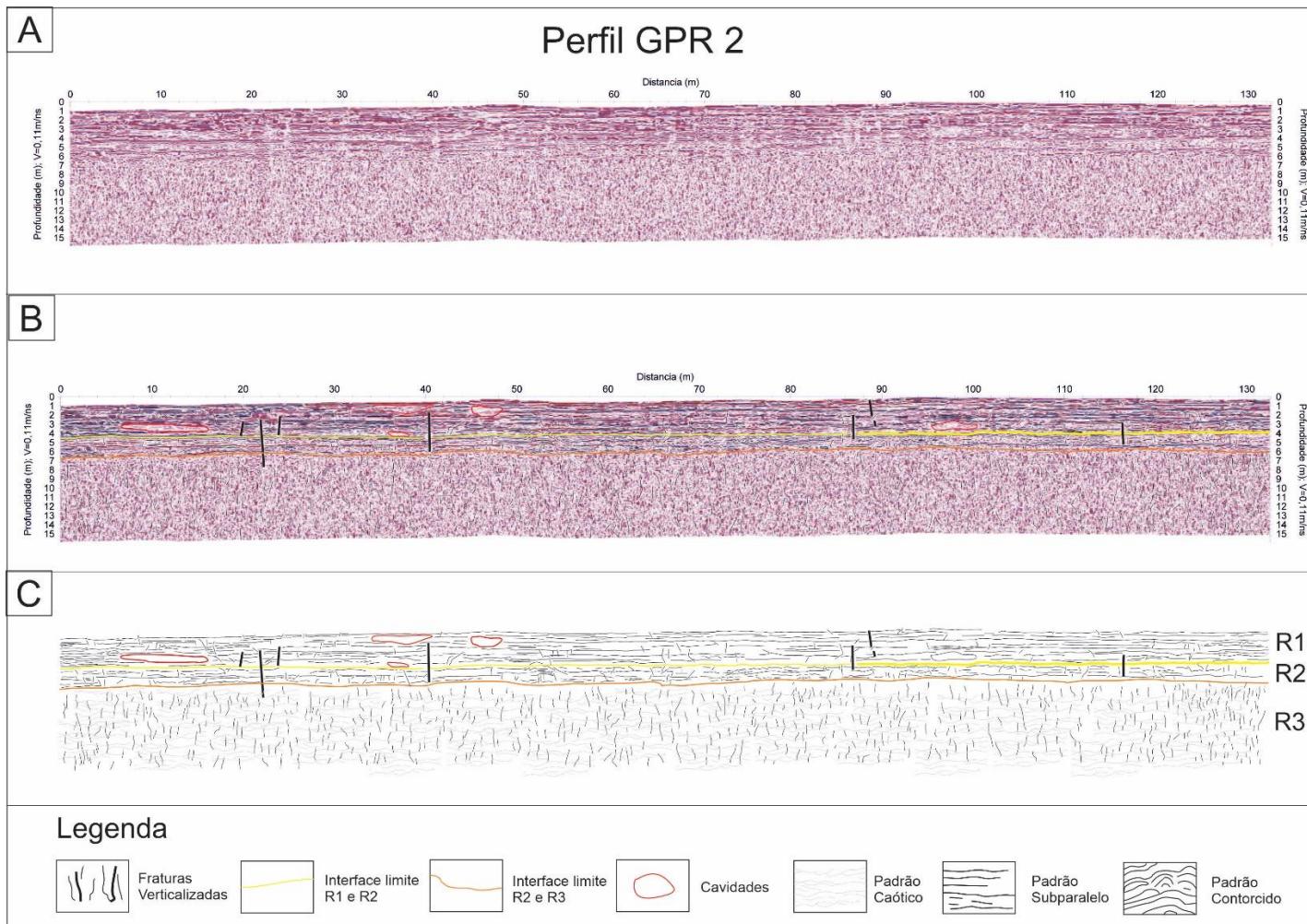


Figura 42 - Perfil de GPR 2 sem interpretação (A); Perfil de GPR 2 com interpretação (B); Interpretação do perfil de reflexão de GPR 2, com fraturas verticalizadas (linhas pretas verticais), refletores paralelos a subparalelos (linhas pretas horizontais), refletores divisores das radarfácies (amarelo e laranja) e cavidades (em vermelho).

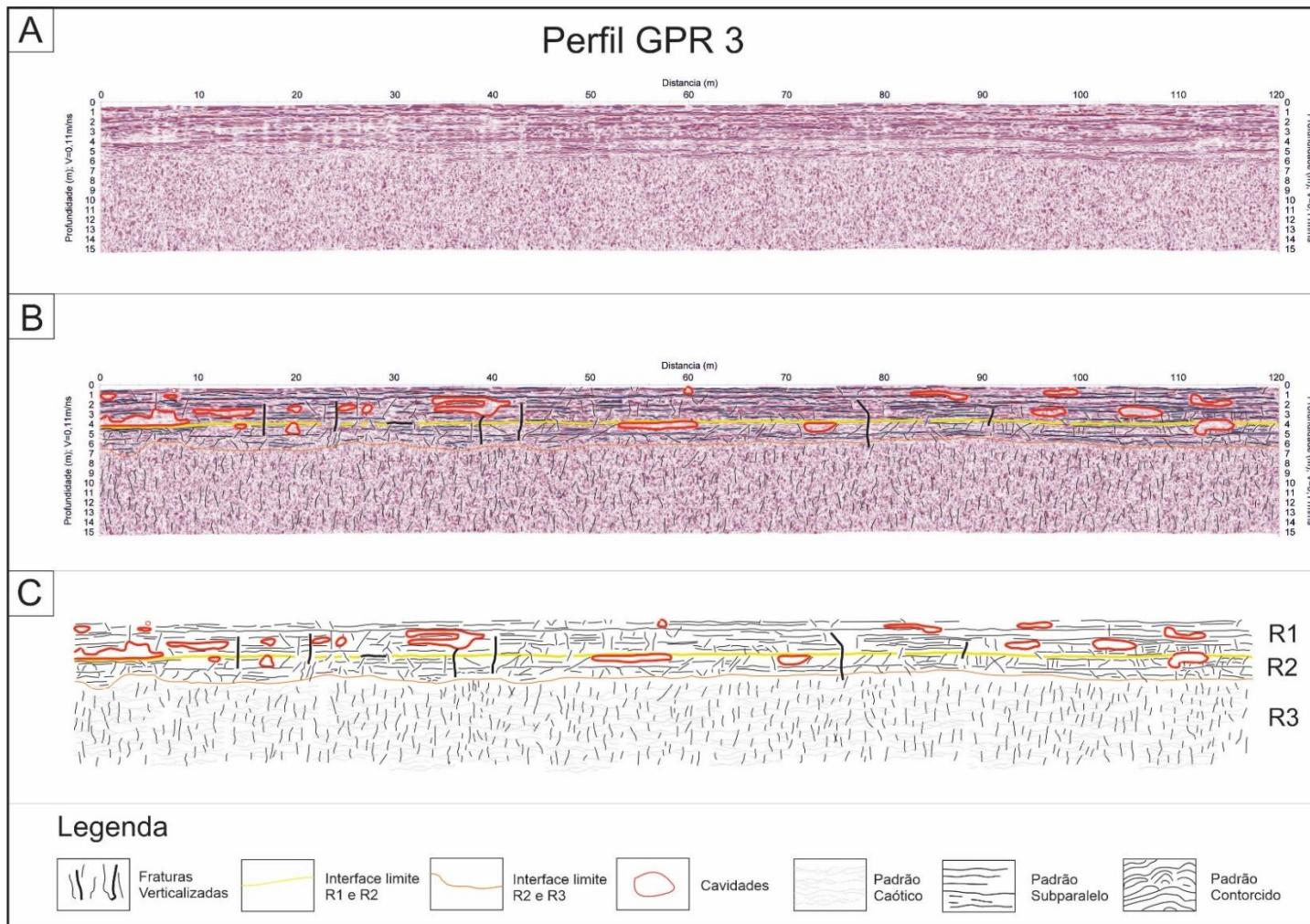


Figura 43 - Perfil de GPR 3 sem interpretação (A); Perfil de GPR 3 com interpretação (B); Interpretação do perfil de reflexão de GPR 3, com fissuras verticalizadas (linhas pretas verticais), reflexores paralelos a subparalelos (linhas pretas horizontais), reflexores divisores das radarfácies (amarelo e laranja) e cavidades (em vermelho).

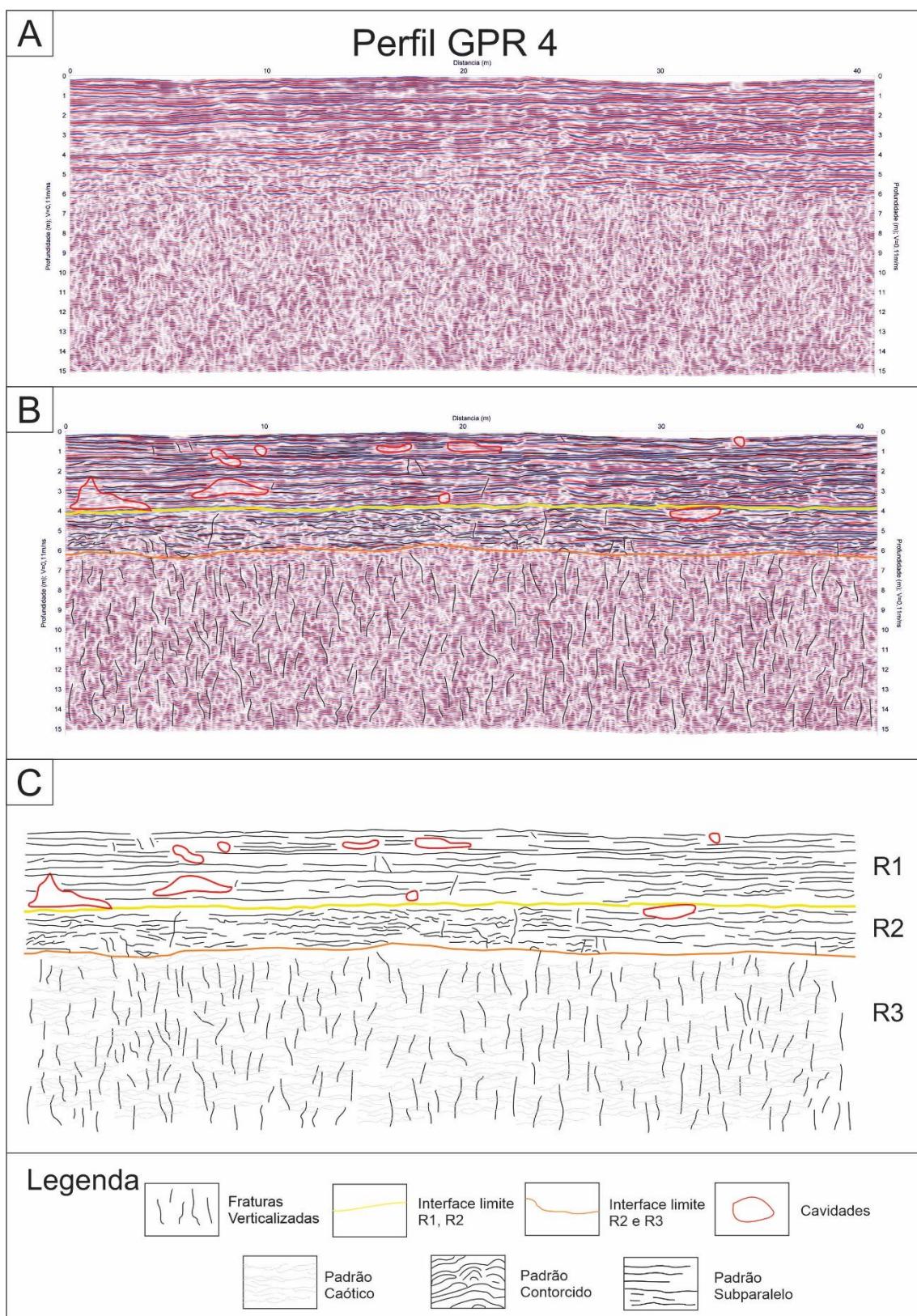


Figura 44 - Perfil de GPR 4 sem interpretação (A); Perfil de GPR 4 com interpretação (B); Interpretação do perfil de reflexão de GPR 4, com fraturas verticalizadas (linhas pretas verticais), refletores paralelos a subparalelos (linhas pretas horizontais), refletores divisores das radarfácies (amarelo e laranja) e cavidades (em vermelho).

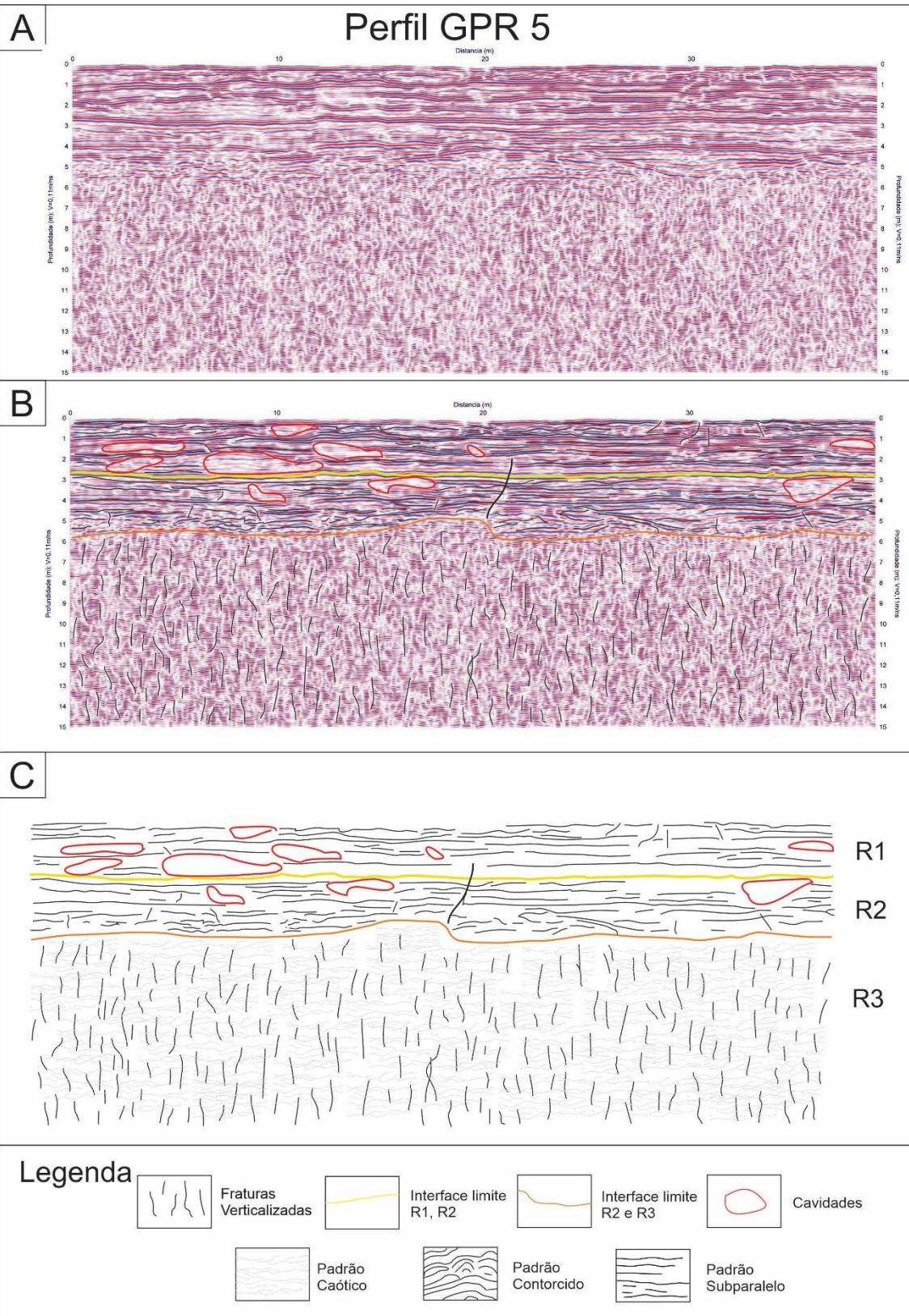


Figura 45 - Perfil de GPR 5 sem interpretação (A); Perfil de GPR 5 com interpretação (B); Interpretação do perfil de reflexão de GPR 5, com fraturas verticalizadas (linhas pretas verticais), refletores paralelos a subparalelos (linhas pretas horizontais), refletores divisores das radarfácies (amarelo e laranja) e cavidades (em vermelho).

5.2.2. Perfil GPR 6, 7, 9, 10 e 11

Os perfis GPR 6, 7, 9, 10 e 11 se diferenciam dos demais por apresentar uma maior concentração de áreas atenuadas de maior extensão lateral, as quais foram interpretadas como pequenas cavidades e superfícies de dissolução evidenciadas em campo. No perfil GPR 6 essa área possui cerca de 32 metros de extensão e espessura de 1 a 3 metros (Figura 46).

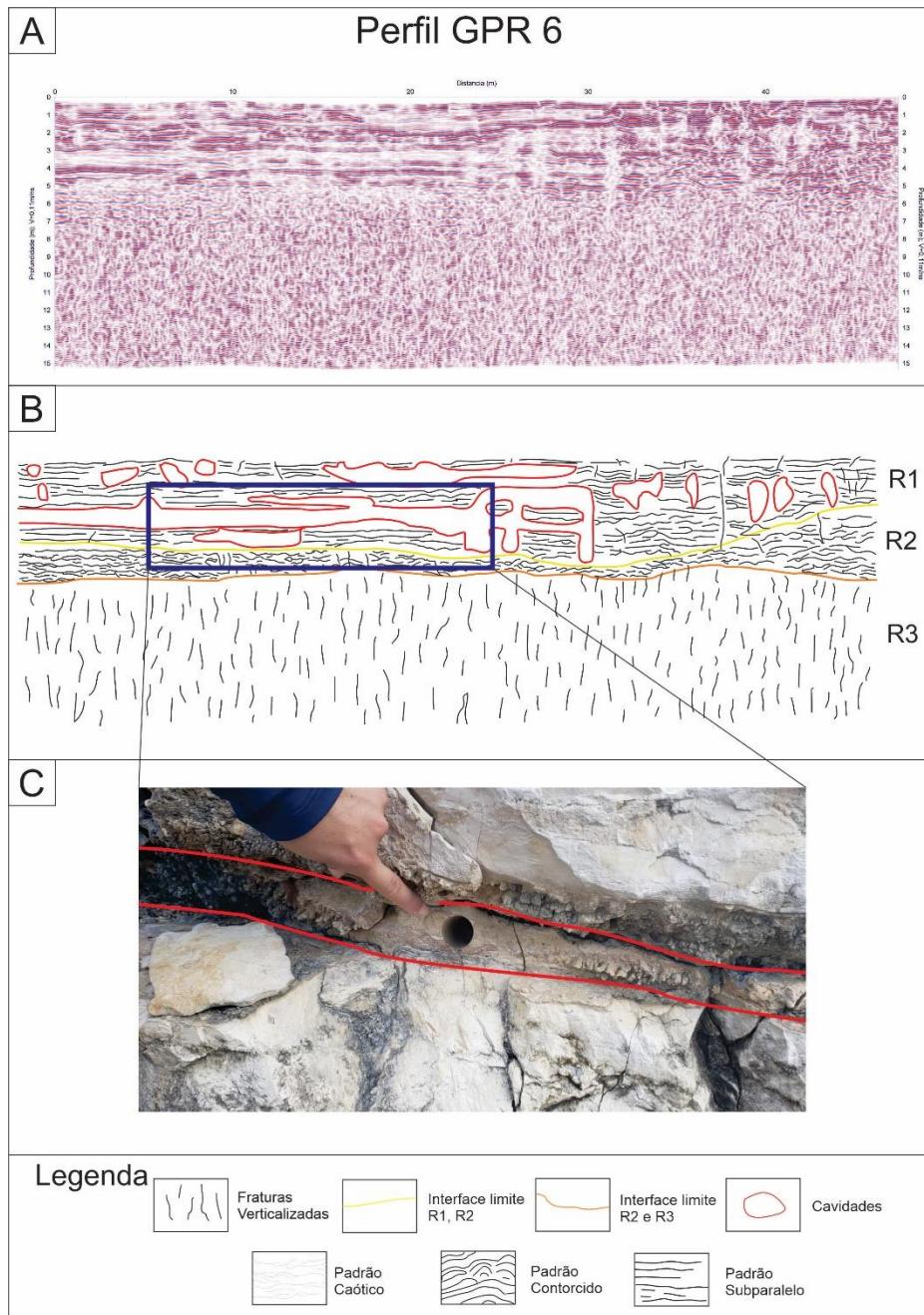


Figura 46 - Perfil de GPR 6 sem interpretação (A); Interpretação do Perfil de GPR 6 com fraturas verticalizadas (linhas pretas verticais), interface de R1/R2/R3 (linha amarela e laranja), padrão de reflexão (linhas pretas horizontais, recorte (linha azul) (B); Imagem retratando superfícies de dissolução evidenciadas em campo na área de estudo (C). Fonte: Autor, 2023.

No perfil GPR 7 essa superfície de dissolução apresenta cerca de 17 metros de extensão com profundidade também variando de 1 a 3 metros e outras seções verticalizadas de extensão variando entre 1 e 2 metros e 4 metros de espessura com profundidade variando de 1 a 5 metros indicadas pela linha vermelha (Figura 47).

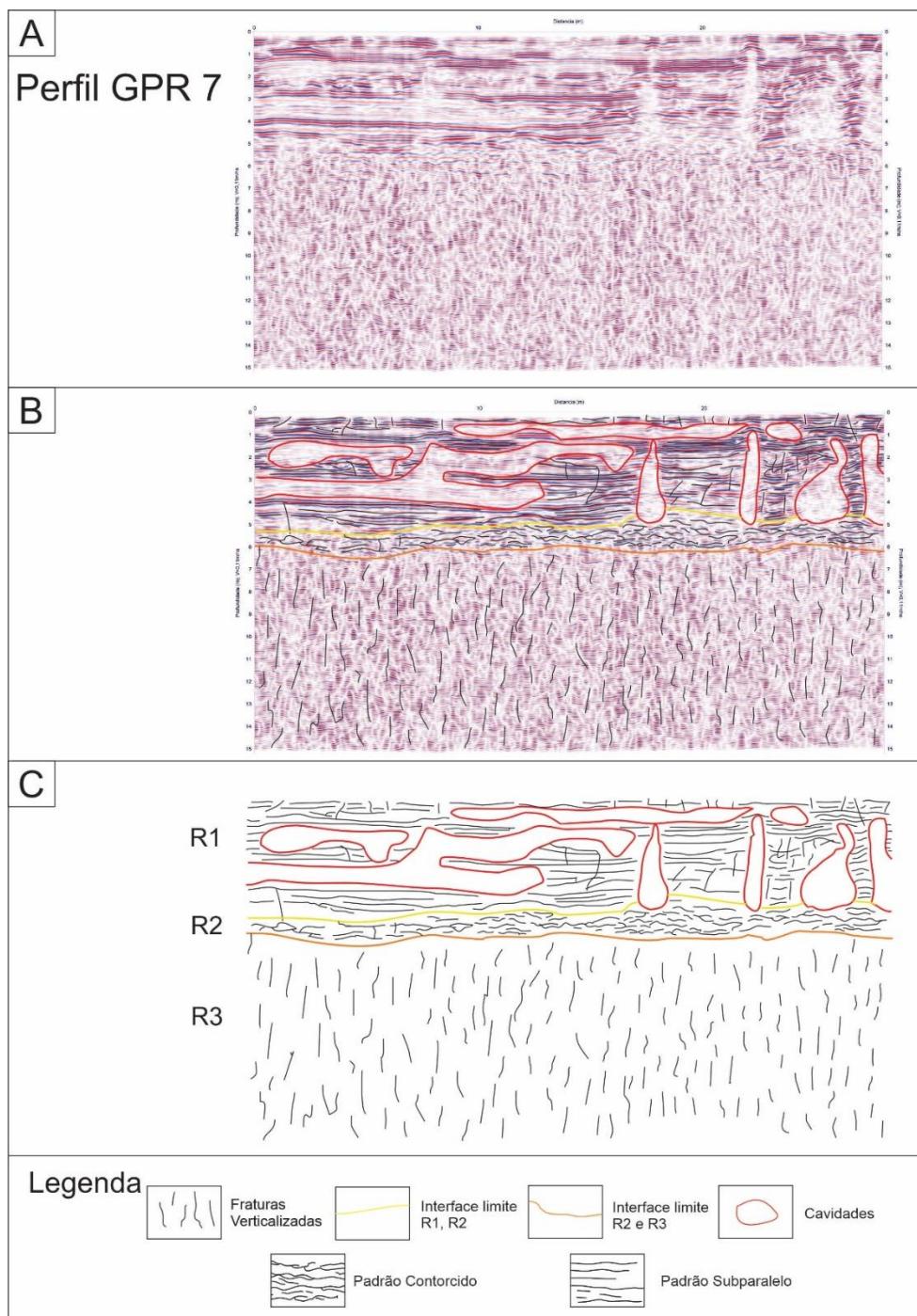


Figura 47 - Perfil de GPR 7 sem interpretação (A); Perfil de GPR 7 com interpretação (B); Interpretação do perfil de reflexão de GPR 7, com fraturas verticalizadas (linhas pretas verticais), refletores paralelos a subparalelos e contorcidos (linhas pretas horizontais), interface das radarfácies (amarelo e laranja), cavidades e superfícies de dissolução (em vermelho).

No perfil GPR 9, superfícies de dissolução foram evidenciadas seguindo quase toda a extensão do perfil, com tamanho que passou dos 40 metros de extensão e espessura que variou de 1 a 2,5 metros, aproximadamente, considerando a profundidade de 2 a 4,5 metros (Figura 48). O restante do perfil se apresenta como os demais, padrões de reflexão regular a subparalelos em profundidades mais rasas, variando a contorcidos e caóticos a medida que a profundidade aumenta.

Nos perfis GPR 10 e 11 as características são semelhantes a este grupo de perfis em que as superfícies de dissolução aparecem mais claramente, seguindo padrão de reflexões atenuadas intercaladas por reflexões contínuas, regulares a subparalelas, diminuindo a continuidade e o sinal refletido com o aumento da profundidade com R1 de profundidade média na faixa dos 4,5 metros, onde foram observadas as principais cavidades e superfícies de dissolução e R2 com espessura média por volta dos 4,5 metros (Figura 49 e 50).

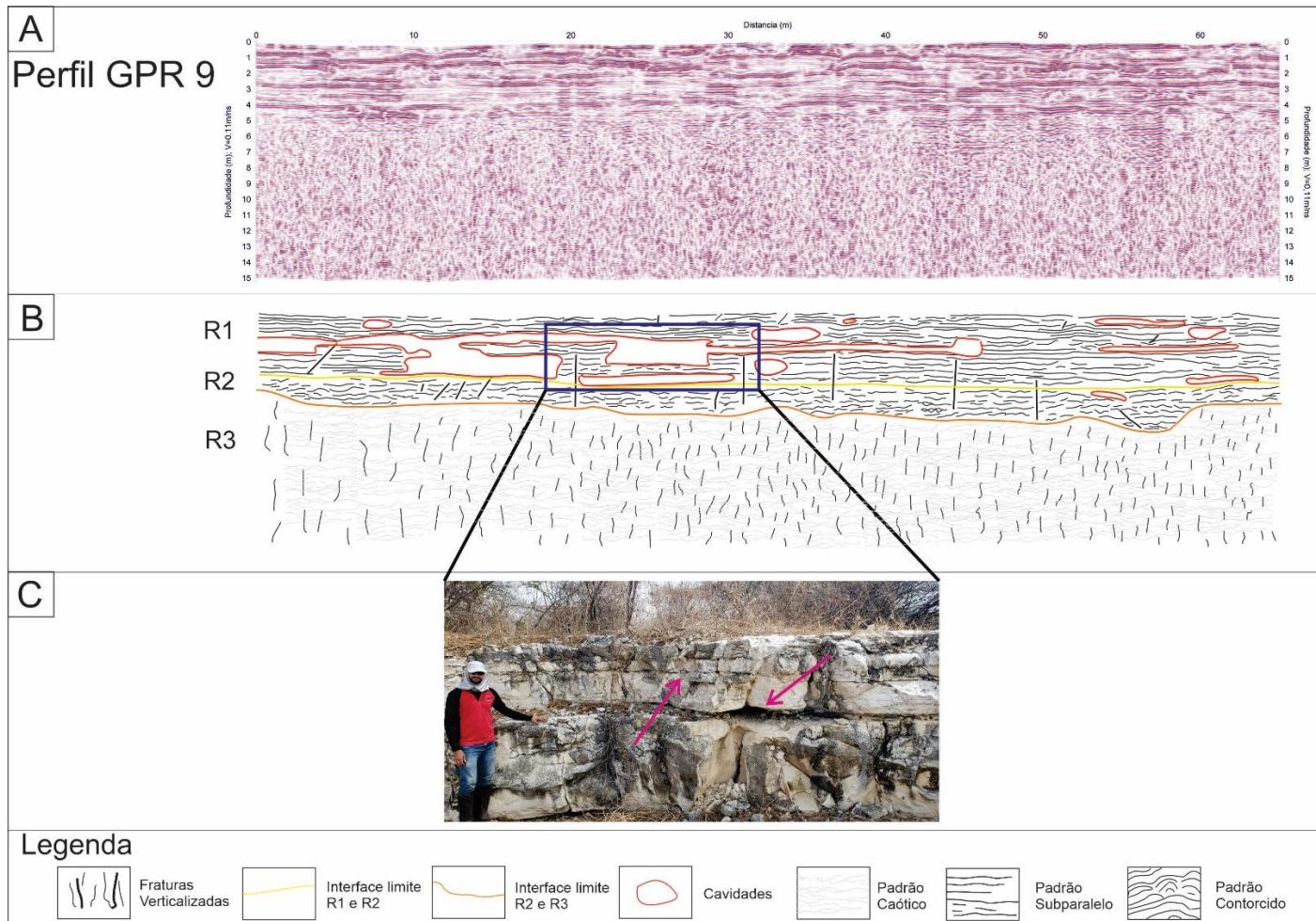
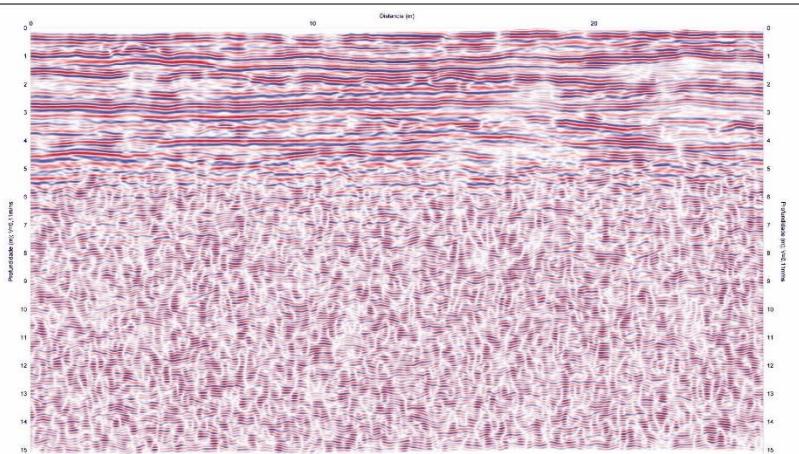
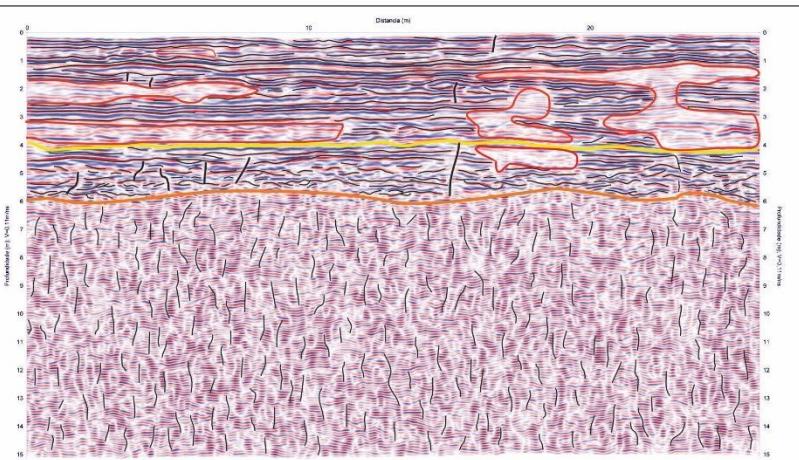
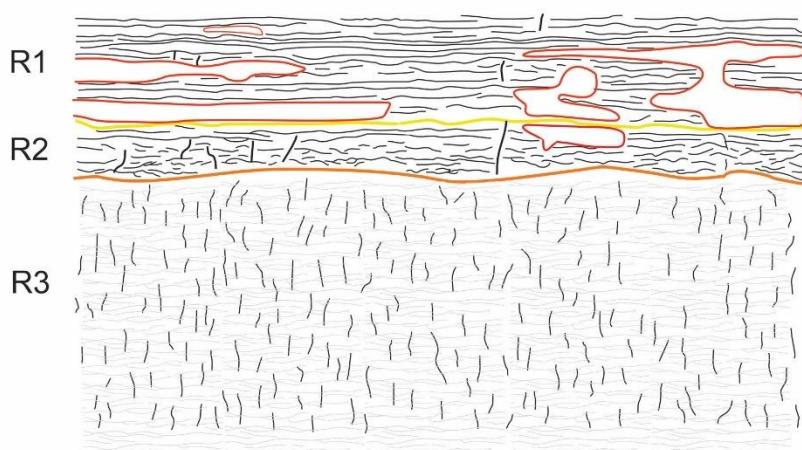


Figura 48 - Perfil de GPR 9 sem interpretação (A); Apenas a interpretação do perfil de reflexão de GPR 9 realizado, com fraturas verticalizadas (linhas pretas verticais), refletores paralelos a subparalelos e contorcidos (linhas pretas horizontais), interface das radarfácies (amarelo e laranja), cavidades e superfícies de dissolução (em vermelho) (B); Imagem de campo ilustrando o recorte do perfil com as superfícies de dissolução encontradas apontadas pelas setas rosas (C). Fonte: Autor, 2023.

A

Perfil GPR 10

**B****C**

Legenda

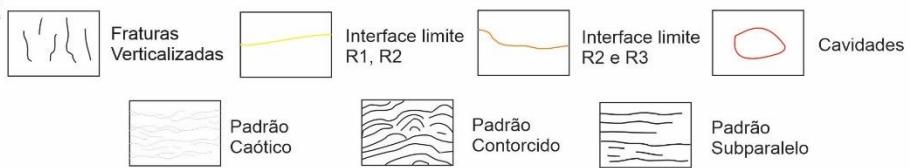


Figura 49 - Perfil de GPR 10 sem interpretação (A); Perfil de GPR 10 com interpretação (B); Apenas a interpretação do perfil de reflexão de GPR 10 realizado, com fraturas verticalizadas (linhas pretas), refletores paralelos a subparalelos e contorcidos (linhas pretas horizontais), interface das radarfácies (amarelo e laranja) e cavidades (em vermelho).

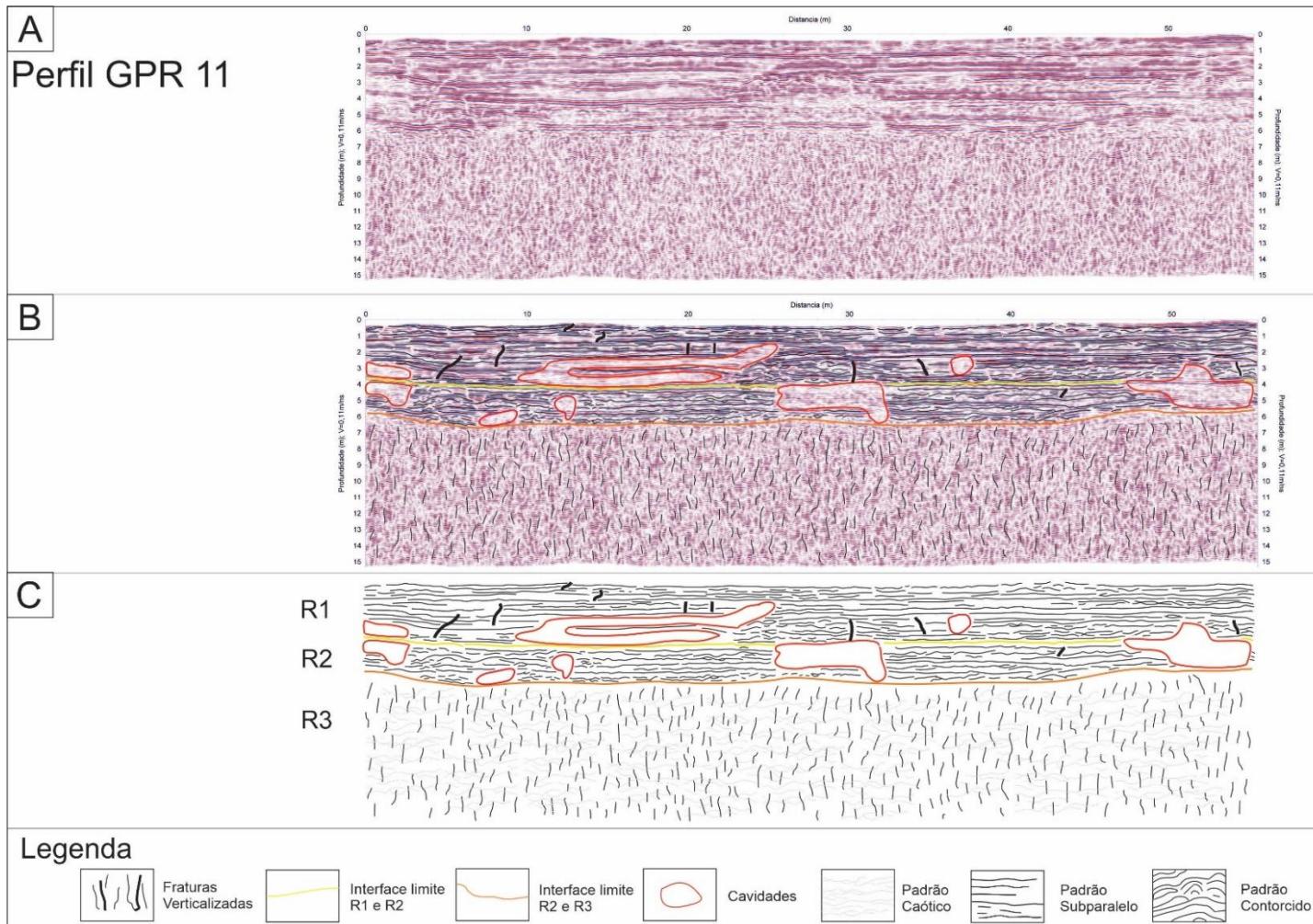


Figura 50 - Perfil de GPR 11 sem interpretação (A); Perfil de GPR 11 com interpretação (B); Apenas a interpretação do perfil de reflexão de GPR 11 realizado, com fraturas verticalizadas (linhas pretas verticais), refletores paralelos a subparalelos e contorcidos (linhas pretas horizontais), interface das radarfácies (amarelo e laranja) e cavidades (em vermelho).

5.2.3. Perfil GPR 8

O perfil GPR 8 foi o menor perfil de reflexão realizado com 23,58 metros de comprimento, e com direção E-W, sentido de caminhamento para E. O perfil 8 se diferencia dos demais por apresentar padrões de reflexão contorcidos em forma de hipérboles em R1, associados a duas zonas de fraturas, uma a cerca de 4 metros da origem, e outra a, aproximadamente, 12 metros da origem do perfil. O restante de R1 é marcada pelas reflexões variando de regulares a subparalelos até os 5 metros de profundidade, seguido de R2 que alcança profundidades de até, aproximadamente, 7,5 metros, e espessuras variando entre 1 metro e pouco mais de 2 metros ao longo do perfil, com padrões contorcidos e de sinal atenuado. A radarfácie R3 segue apresentando espessuras menores com refletores atenuados e padrão caótico com fraturas verticalizadas, como nos demais perfis (Figura 51).

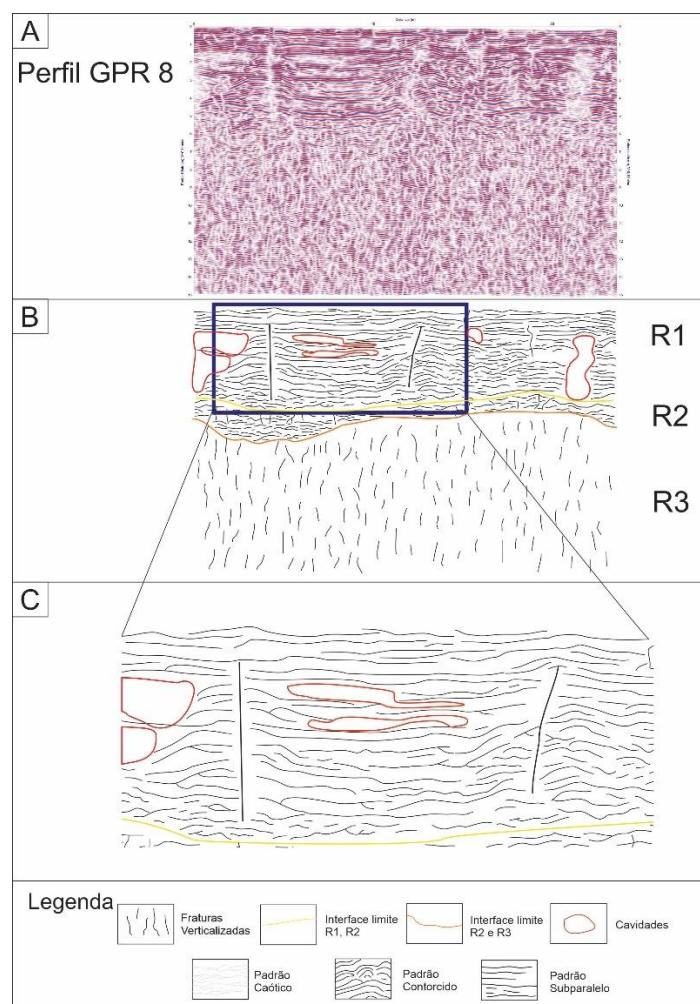


Figura 51 - Perfil de GPR 8 sem interpretação (A); Interpretação do Perfil de GPR 8 com fraturas verticalizadas (linhas pretas verticais), interface de R1/R2/R3 (linha amarela e laranja), padrão de reflexão (linhas pretas horizontais), recorte (linha azul) (B); Ênfase do recorte do perfil evidenciando as reflexões hiperbólicas correlatas as zonas de fraturas verticalizadas (C). Fonte: Autor, 2023.

5.3. Modelo Virtual de Afloramento – MVA (3D)

O Modelo Virtual de Afloramento (MVA) foi gerado a partir da integração dos dados obtidos com o VANT e GPR. A altimetria de alta precisão adquirida com o aerolevantamento proporcionou a modelagem de superfície, ao passo que os perfis de reflexão realizados com o GPR permitiram a construção do modelo de subsuperfície, de acordo com a interpolação das interpretações feitas e apresentadas na seção 5.1 deste relatório.

Os dados foram carregados no software *Petrel* onde foram feitas as interpolações resultando no MVA, passando por carregamento e interpolação dos 11 perfis (Figura 51), aplicação das interpretações realizadas no software *CorelDraw* (Figura 53), aplicação dos dados altimétricos de alta precisão adquiridos com VANT, e por fim, a criação do MVA com a interpolação de todas essas informações gerando um produto visual tridimensional em bloco diagrama tanto com o ortomosaico como com a altimetria (Figura 54 e 55).

Para a criação do MVA foram consideradas apenas as radarfácies R1 e R2, onde as cavidades e superfícies de dissolução, relacionadas à porosidade secundária, foram melhor interpretadas.

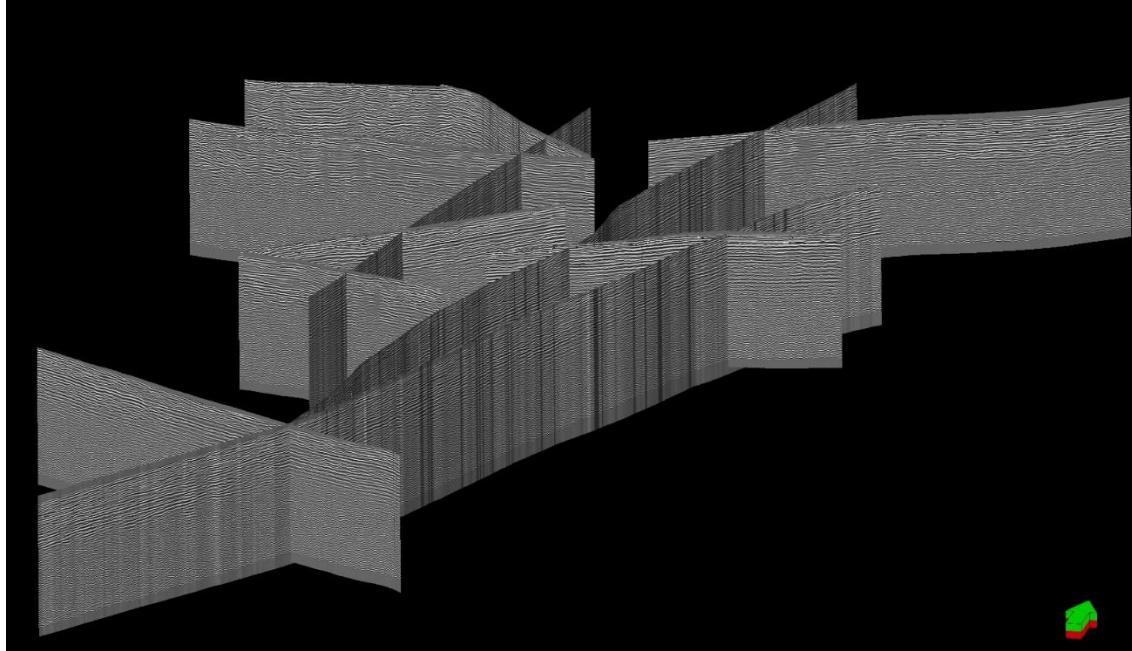


Figura 52 – Visualização tridimensional dos 11 perfis de reflexão realizados, com seta verde indicando o Norte. Fonte: Autor, 2023.

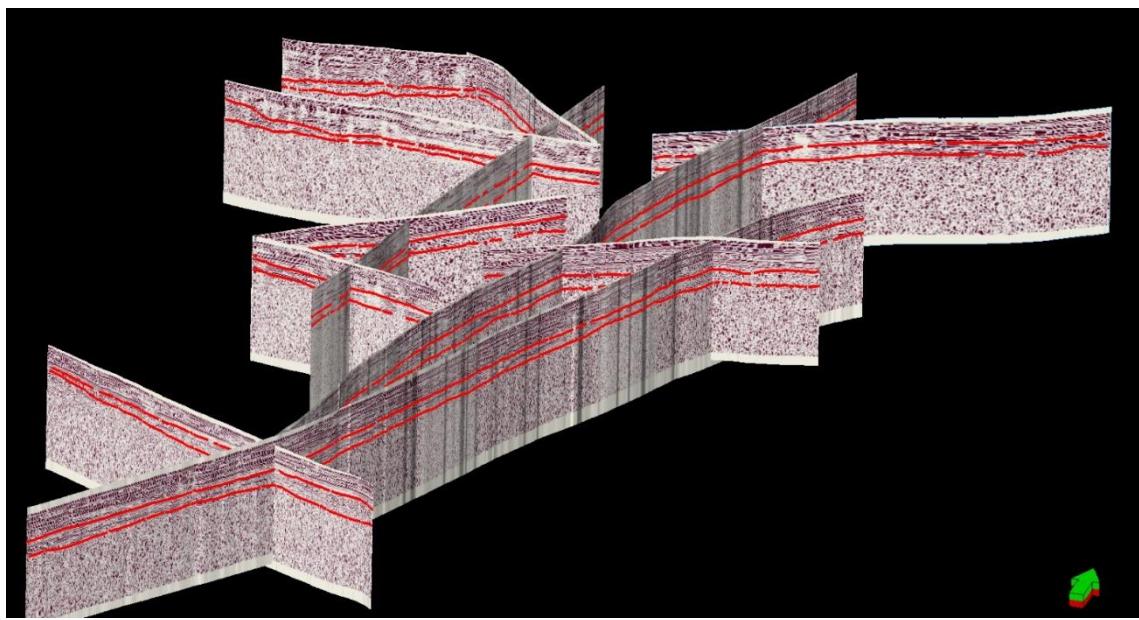


Figura 53 - Aplicação das interpretações realizadas com os perfis de reflexão obtidos em perspectiva 3D, com seta verde indicando o Norte e radarfácies separadas por linhas vermelhas. Fonte: Autor, 2023.

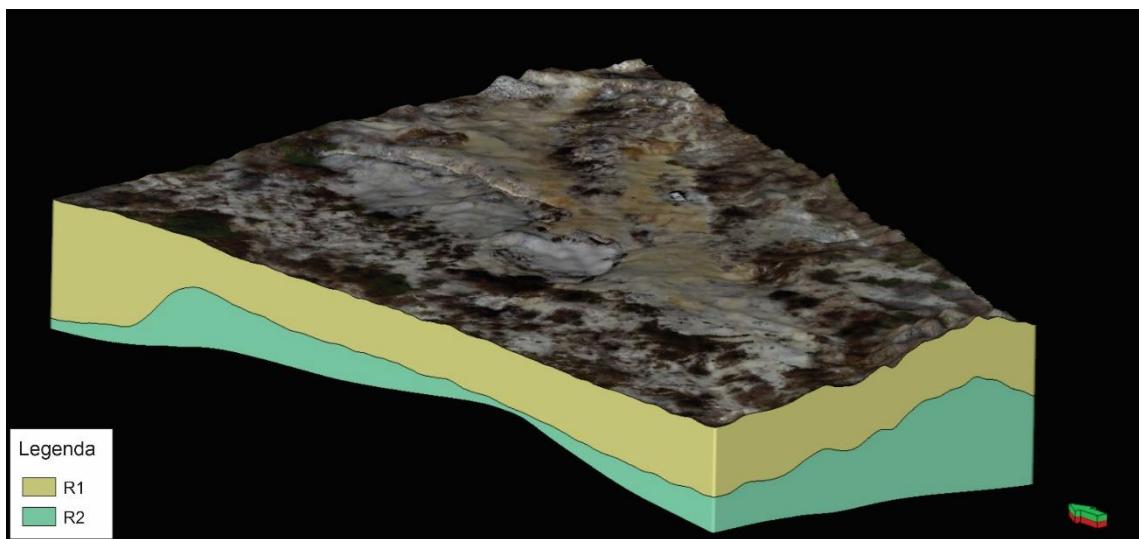


Figura 54 - MVA gerado a partir da integração dos dados de VANT e GPR obtidos com camada bege indicando radarfácies R1 e a posterior indicando R2, com seta verde indicando o norte. Fonte: Autor, 2023.

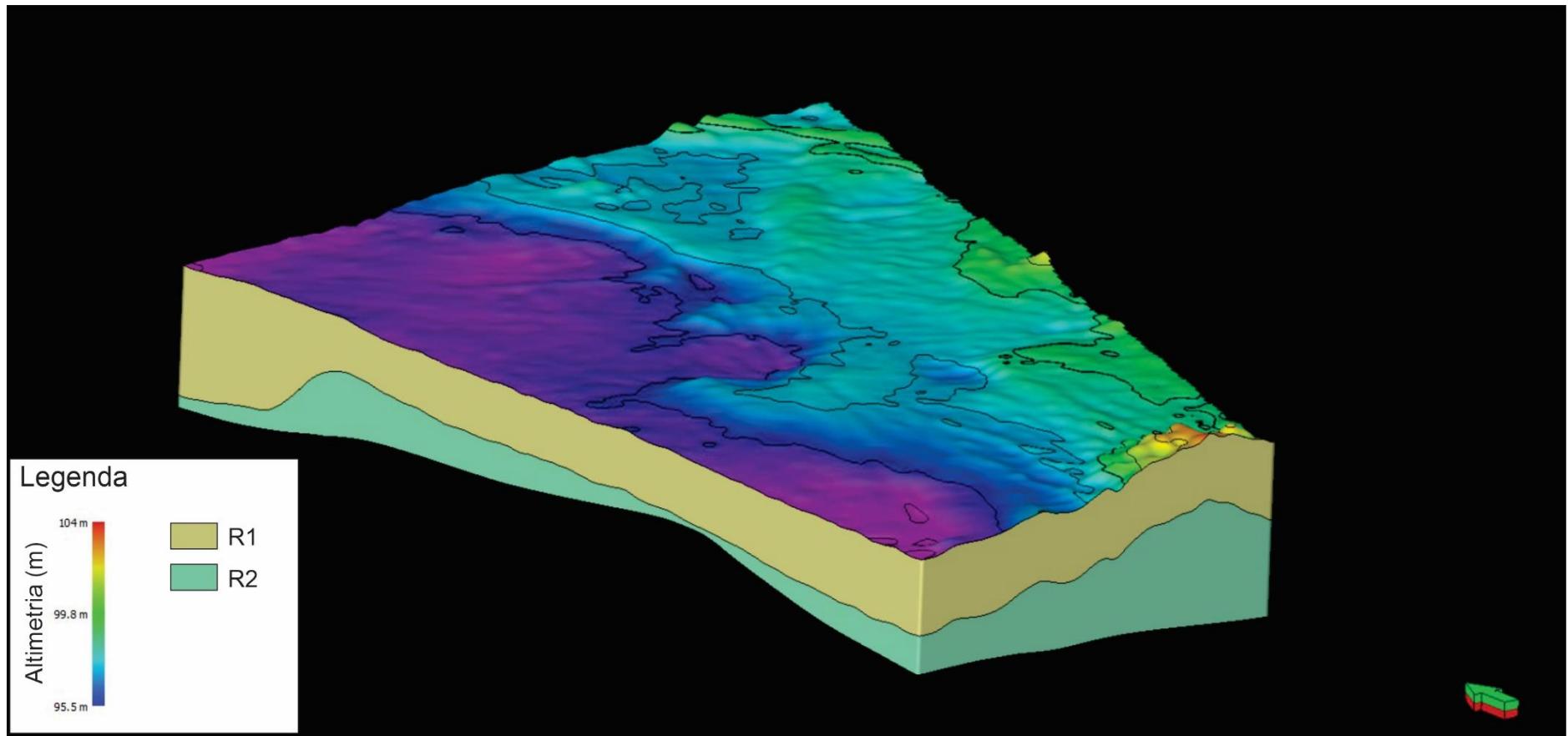


Figura 55 - MVA criado a partir da integração dos dados de altimetria de alta precisão adquirida com VANT e de interpretação dos perfis de reflexão realizados com GPR, com seta indicando posição do norte. Fonte: Autor, 2023.

6. CONCLUSÕES

A aerofotogrametria associada ao uso do GPS RTK possibilitou neste trabalho a obtenção de dados planialtimétricos e fotogramétricos de alta resolução e precisão, permitindo a geração de Modelos Digitais de Elevação e um ortomosaico com resolução de 7.08 mm/pixel. Estes modelos foram usados para identificar quatro sistemas de fraturas na área estudada, com direções preferenciais: N-S, E-W, NE-SW e NW-SE.

A partir da interpretação de onze perfis (GPR) de reflexão foi possível identificar os padrões da geometria interna das rochas carbonáticas estudadas, como: regular, subparalelo, contorcido e caótico.

Com a identificação dos padrões de reflexão, os perfis foram divididos em três radarfácies com características semelhantes entre si, denominadas de radarfácies R1, R2 e R3. A radarfácie R1, mais superficial, alcançando uma profundidade média de 4,5 metros, apresenta refletores bem definidos, contínuos, regulares a subparalelos, com cavidades intercaladas lateralmente, fraturamento vertical e superfícies de dissolução interpretadas a partir da atenuação dos sinais de GPR. A radarfácie R2 apresentou reflexões mais atenuadas com padrões variando de regulares e subparalelos a contorcidos com menor densidade de cavidades e superfícies de dissolução, sua espessura média foi de 2,5 metros. A radarfácie R3 apresentou refletores com reflexões atenuadas segmentadas, padrão de reflexão interpretado como caótico pela presença diversificada de padrões pouco definidos.

Os padrões de reflexão regulares a subparalelos observados foram associados a depósitos de baixa energia como planícies de maré e laguna rasa que são característicos da Formação Jandaíra. Os padrões contorcidos e hiperbólicos, assim como o padrão caótico, foram associados a deformação da rocha posterior a sedimentação em decorrência da dissolução carbonática e/ou influência tectônica que deram origem ao sistema de fraturas que são comumente observados nestes ambientes.

O GPR se mostrou um método eficaz na identificação da porosidade secundária, na escala decimétrica a submétrica, gerada a partir da carstificação das rochas carbonáticas. A porosidade evoluiu a partir da dissolução de planos de fratura (verticais e subverticais) distribuídas lateralmente de forma aparentemente irregular e identificadas com base na atenuação do sinal GPR e da presença de reflexões hiperbólicas.

A associação do método GPR com o de aerofotogrametria (realizada com uso de VANT) possibilitou a elaboração de um Modelo Virtual de Afloramento (MVA),

integrando dados de superfície e de subsuperfície, que pode ser usado no futuro para “popular” informações geométricas de heterogeneidades (deposicionais ou deformacionais) e dados petrofísicos para geração de modelos de fluxo.

O MVA possibilitou uma visão tridimensional do afloramento carbonático estudado, aumentando a compreensão das feições de superfície e subsuperfície. Mostrou que a abordagem metodológica utilizada neste trabalho se apresenta como uma alternativa viável para o estudo de sistemas carbonáticos fraturados e carstificados. Particularmente, para a identificação de porosidade, na escala decimétrica a submétrica, em afloramentos análogos à reservatórios petrolíferos como, por exemplo, os do Pré-Sal.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGISOFT LLC (Rússia). **Agisoft PhotoScan User Manual.** [S. l.: s. n.], 2018. 121 p.
- AGUIAR, J. C. M. **Radar de Penetração no Solo (GPR): Aspectos Geofísicos e Geodésicos, Processamento e Análise em Pavimento Flexível.** 2005. 146 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE, 2005.
- AGUIAR, L. de S; AMARO, V. E.; ARAÚJO, P. V. do N.; SANTOS, A. L. S. dos. Geotecnologias de Baixo Custo Aplicadas à Avaliação de Risco por Inundação em Áreas Urbanas Costeiras em Cenários de Mudanças Climáticas. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, Rio de Janeiro, n. ISSN 1982-3908, p. 267-290, 2019.
- ALMEIDA, F. F. M. de; HASUY, Y.; BRITO NEVES, B. B. de; FUCK, R. A. **Províncias Estruturais Brasileiras.** In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 8., 1977, Campina Grande. **Atas...** Campina Grande: SBG, 1977. p. 363-391.
- ALVES, A. de L. **Cartografia temporal e análise geoambiental da dinâmica da foz do rio Piranhas-Açu, região de Macau-RN, com base dm imagens LANDSAT 5-TM.** 2001. 103 f. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica) - Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2001.
- ANAC, Agência Nacional de Aviação Civil. **Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial.** 2017. Disponível em <http://www2.anac.gov.br/transparencia/audiencia/2015/aud13/anexoI.pdf> Acesso em: 25 jan. 2023.
- ANGELIM, L. A. de A. (Org.); NESI, J. de R.; TORRES, H. H. F.; MEDEIROS, V. C. de; SANTOS, C. A. dos; VEIGA JR., J. P.; MENDES, V. A. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Norte: texto explicativo dos mapas geológico e de recursos minerais do estado do Rio Grande do Norte, Escala 1: 500.000. Recife: CPRM, 2006.
- ANNAN, A. P. **Transmission dispersion and GPR.** Journal of Environmental and Engineering Geophysics. v.0, n.2, 1992. p. 125-136.
- ANNAN, A. P. **Ground Penetrating Radar Workshop Notes.** Sensors & Software Inc., Internal Report, 2001. 197p.
- ANNAN, A. P. **GPR—History, trends, and future developments.** Subsurface sensing technologies and applications, v. 3, n. 4, 2002. 253-270 p.
- ANNAN, A. P. **Ground penetrating radar: Principles, procedures & applications.** Sensors & Software Inc. Technical Paper. 2003. 286 p.
- ANNAN, A. P. 2004. Ground penetrating radar principles, procedures & applications. Mississauga: Sensors & Software. 293 p.
- ARANHA, P. R. A.; PARIZZI, M. G.; SOBREIRA, F. G.; GALVÃO, T. C. de B.; BEIRIGO, E. A. Aplicação do GPR na análise da estabilidade de taludes na Região Metropolitana de Belo Horizonte, MG. **Revista de Geologia - UFC**, Fortaleza-CE, v. 19, ed. 1, p. 87-98, 2006.

ARARIPE, P. T.; FEIJÓ, F. P. Bacia Potiguar. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, Rio de Janeiro, v. 8, n.1, p.127-141, 1994.

ARAÚJO, Eduardo Henrique Silveira de. **Sistema inteligente para estimar a porosidade em sedimentos a partir da análise de sinais GPR**. Orientador: Prof. Dr. Francisco Pinheiro Lima Filho. 2013. 143 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Petróleo) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, 2013.

ASSAIANTE, B. A. de S.; CAVICHIOLI, F. A. A UTILIZAÇÃO DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS (VANT) NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR. **Interface Tecnológica**, São Paulo, v. 17, ed. 1, p. 444 - 455, 2020.

AULER, A. S.; ZOGBI, L. A. Espeleologia. Noções Básicas. São Paulo: Redespeleo Brasil, 2005. 104 p.

BARBOSA FILHO, J. M. L.; NETO, S. F. G.; JÚNIOR, V. A. de Sousa. Aplicações em Radar: Uma Análise Prospectiva. **VIII Fórum de Pesquisa e Inovação: Ciclo de Desenvolvimento e Operações Aeroespaciais**, Natal/RN, Outubro 2018.

BESL, P.J. Active, Optical Range Imaging Sensors. *Mach. Vis. Appl.* 1988, 1, 127–152.

BRANT, J. E. **Guerra Psicológica**: Reminiscência da 2^a Guerra Mundial. 1. ed. São Paulo: Digital Source, 1967. 144 p.

BRITO NEVES, B. B. de; SANTOS, E. J. dos; VAN SCHMUS, W. R. The tectonic history of the Borborema Province. In: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 31, 2000, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: Secretariat Bureau, 2000. p. 151-182.

BRISTOW, C. S.; JOL, H. M. **Ground Penetrating Radar in Sediments**, Geological Society, London, Special Publications, 2003, 211p.

BRUNCH, A. F.; CIROLINI, A.; THUM, A. B.; CARNEIRO, M. Avaliação da acurácia das cubagens de volumes de mineração através de levantamentos convencionais e fotogramétricos. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 12, n. 1, p. 283-298, 2019.

BUFFON, E. A. M.; DA PAZ, O. L. S.; SAMPAIO, T. V. M. Uso de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) para mapeamento das vulnerabilidades à inundação urbana: referenciais e bases de aplicação. *Revista do Departamento de Geografia*, p. 180-189, 2017

BUZZO, Lucas (Org.). **História dos Drones**: do início aos dias de hoje. 2015. Disponível em: <<https://odrones.com.br/historia-dos-drones/>>. Acesso em: 7 jan. 2023.

CALLISTER, W. D. e RETHWISCH, D. G. 2009. Materials Science and Engineering: an Introduction. 8th edition, John Wiley & Sons, USA.

CAMPOS E SILVA, A. Considerações sobre o quaternário do Rio Grande do Norte. **Arquivo do Instituto de Antropologia da UFRN**, Natal, v. 2, n. 1-2, p. 275-301, 1966.

CÂNDIDO, A. K. A. A.; SILVA, N. M.; PARANHOS FILHO, A. C. Imagens de alta resolução espacial de veículos aéreos não tripulados (VANT) no planejamento do uso e ocupação do solo. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 38, n. 1, p. 147-156, 2016

COIMBRA, Iury; PEREZ; Yoe A.R.; Murad, Marcio A.; CUSTODIO, Fabio L.; CAZARIN, Caroline L.; Pereira, Patricia A.; LOPES, Tuane V.; BARROSO, Josue dos S.; LIMA-FILHO, Francisco P. **Upscaling digital outcrop models to infer well connectivity in carbonates with karstic features**. Journal of Petroleum Science and Engineering, Volume 215, Part B, 2022, 110606, ISSN 0920-4105.

CÓRDOBA, V. C. 2001. A evolução da plataforma carbonática Jandaíra durante o NeoCretáceo na Bacia Potiguar: análise paleoambienteal, diagenética e estratigráfica. Tese de Doutorado, Pós-graduação em Geociências – UNESP. 240p.

COSTA, W. D.; FEITOSA, F. A. C. (Org.). **Comportamento das bacias sedimentares da região semiárida do Nordeste Brasileiro:** hidrogeologia do Aquífero Açu na borda leste da Bacia Potiguar, trecho Upanema - Afonso Bezerra. Natal: CPRM, 2007.

DANIELS, D. J. (1996). Surface-Penetrating Radar – IEE Radar, Sonar, Navigation and Avionics Series 6: London, The Institute of Electrical Engineers, 320 p.

DJI. **Phantom 4 PRO/PRO+ SERIES:** Manual do Usuário V2.0. 2021.11. ed. [S. l.: s. n.], 2021. 71 p.

DREW, D. **Karst Processes and Landforms.** London: Macmillan Education Ltd, 1985.

DAVIS, J. L. and ANNAN, A. P. **Ground penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy.** Geophysical Prospecting, Vol. 37, 1989. 531–551 p.

EDMUNDO UBIRATAN (Washington (d.c.)). Aero Magazine. **A origem dos vant:** As primeiras aeronaves não tripuladas tais como as conhecemos hoje surgiram logo após o fim da Segunda Guerra.2015. Disponível em: <http://aeromagazine.uol.com.br/artigo/origem-dos-vant_1907.html>. Acesso em: 7 Jan. 2023.

ELLIOTT, R. S. The History of Electromagnetics as Hertz Would Have Known It. IEEE Transactions on microwave theory and techniques , v. 36, n. 5, p. 806-823, 1988.

FERRECCIO, Nicolás. **Análisis de la técnica RTK.** 1. ed. Argentina: EDULP, 2006. 228 p. ISBN 950-34-0377-4.

FISHER, E., MCMECHAN, G. A. & ANNAN, A. P. 1992. Acquisition and processing of wide-aperture groundpenetrating radar data. Geophysics, 57, 495-504.

GALINDO, Antonio Carlos (Org.) Geologia e Recursos Minerais da Folha Apodi SC.24-X-C-VI Escala 1:100.000. Estados do Rio Grande do Norte. / Antonio Carlos Galindo [et al.]. - Recife: CPRM - Serviço Geológico do Brasil / Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2016.

GOMES, I. P.; VERÍSSIMO, C. U. V.; BEZERRA, F. H. R.; SANTOS, J. L. dos; CÂMARA, J. R. de F. Fraturas, carste e cavernas nos calcários Jandaíra em Felipe Guerra, Rio Grande do Norte. **Revista do Instituto de Geociências - USP**, São Paulo, v. 19, ed. 1, p. 43-67, Março 2019.

GRAY, S. A letter to Cromwell Mortimer, M.D. Secr. R.S. containing several experiments concerning electricity. Philosophical Transactions of The Royal Society, v. 37, p. 18-44, 1731.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física: Eletromagnetismo**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora LTDA, 2016. 812 p. v. 3. ISBN 978-85-216-3208-5.

HANNINEN, P. **Application of Ground Penetrating Radar and Radio Wave Moisture Probe Technique to Peatland Investigations**. Geological Survey of Finland, Espoo, Finland, Bulletin 361. 1992.

JARDIM DE SÁ, E. F.; MATOS, R. M. D.; OLIVEIRA, D. C. **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Norte**: Escala 1: 500.000. Natal: DNPM/UFRN/PETROBRÁS/CPRM, 1998.

JANOCHA, Julian; SMYRAK-SIKORA, Aleksandra; SENGER, Kim; THOMAS, Birchall. Seeing beyond the outcrop: Integration of ground-penetrating radar with digital outcrop models of a paleokarst system. **Elsevier**, [s. l.], 2021.

JOL, H. M. & SMITH, D. G. 1992. Geometry and structure of deltas in large lakes: a ground penetrating radar overview. In: HANNINEN, P. & AUTIO, S. (eds) *Fourth International Conference on Ground Penetrating Radar, June 8-13, Rovaniemi*. Geological Survey of Finland Special Papers, 16, 159-168.

JOL, M. H. **Ground Penetrating Radar Theory and Applications** / H. M. Joy. – Elsevier, 2009. 574 p. ISBN: 978-0-444-53348-7.

JÚNIOR, L. R. A.; CÔRTES, J. B. R.; FERREIRA, M. E. Validação de mosaicos aerofotogramétricos utilizando fotografias obtidas com câmera digital não metálica acoplada a um vane. 2014.

KEAREY, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). An Introduction to Geophysical Exploration. Malden, MA: Blackwell Science.

KLIMCHOUK, A. Towards defining, delimiting and classifying epikarst: Its origin, processes and variants of geomorphic evolution. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*, [s.l.], v. 2, n. 1, p. 1-13, 2015.

LANDGRAF, F. J. G. Propriedades Magnéticas de aços para fins elétricos. In: Ivani Bott; Paulo Rios; Ronaldo Paranhos. (Org.). **Aços: perspectivas para os próximos 10 anos**. 1a ed. Rio de Janeiro, 2002, v., p. 109-128.

LETOUZEY, J., CRAMEZ, C. 1986. Stress Regime and Structural Style: A New Classification for Seismic Structural Interpretation. AAPG Annual Convention, Atlanta, Georgia.

LORENZO, Cimadevila Enrique. 1994. Proyección geofísica de alta resolución mediante geo-radar. Aplicación a obras civiles. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid. 201 páginas.

MABESOONE, J. M. (1966). Relief of Northeastern Brazil and its correlated sediments. *Zeif. F. Geomorph.*, 10: 419 – 453.

MABESOONE, J. M.; CAMPOS E SILVA, A.; BEURLEN, K. Estratigrafia e origem do grupo Barreiras em Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Geociências**, [s. l.], v. 2, ed. 3, p. 173-188, Setembro 1972.

MARTINI, J. Karst in the Black Reef Quartzite near Kaapsehoop, Transvaal. Ann. Geol. Surv. South Africa, Vol. 13, p. 115-128, 1979.

MELO JÚNIOR, C. M. et al. Geração de mapas de danos de fachadas de edifícios por processamento digital de imagens capturadas por Vant e uso de fotogrametria digital. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 18, n. 3, p. 211-226, 2018.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto. UnB-CNPq. Brasília, 2012.

MITCHUM JR, R. M.; VAIL, P. R.; SANGREE, J. B. Seismic stratigraphy and global changes of sea level: Part 6. Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences: Section 2. Application of seismic reflection configuration to stratigraphic interpretation. 1977.

MONTELO, Aline Carlos; OLIVE, Caio César Rodrigues. Levantamento Planialtimétrico com o uso de drone. TCC, Curso de Engenharia Civil, UniEVANGÉLICA, Anápolis, GO, 76p. 2021.

MOURA, J. S.; FERRO, T. P. S.; BAUTISTA, E. V. Análise da dissolução de scale de carbonato de cálcio em substâncias químicas. **II Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**, Salvador/BA, 8 ago. 2018.

MOURA LIMA, E. N.; SOUSA, M. O. L.; BEZERRA, F. H. R.; AQUINO, M. R. de; VIEIRA, M. M.; LIMA FILHO, F. P.; FONSECA, V. P. da; AMARAL, R. F. do. Sedimentação e Deformação Tectônica Cenozoicas na Porção Central da Bacia Potiguar. **Revista do Instituto de Geociências - USP**, São Paulo, v. 10, ed. 1, p. 15-28, Março 2010.

NASCIMENTO, A. J. da S.; DENADAI, M. C. Drone, a história desta tecnologia. **Tekhne e Logos**, Botucatu/SP, v. 12, n. ISSN 2176 ? 4808, ed. 2, Setembro 2021.

PALMER, A.N., 2000. Hydrogeologic control of cave patterns. In: Klimchouck, A., Ford, D., Palmer, A., Dreybrodt, W. (Eds.), Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers. National. Spleological Society, Huntsville, p. 77-90.

PASSOS, M. N. S.; OLIVEIRA, A. M. de; GOMES, A. K. F. Aplicação das equações de Maxwell. **Revista Acadêmica - IFSP**, Cubatão/SP, v. 4, ed. 4, p. 260-273, 2019.

PENHA, V. C. S. **Solubilidade do carbonato de cálcio em soluções aquosas contendo CO₂ e monoetilenoglicol**. Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Chiavone-Filho. 2022. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, 2022.

PESSOA NETO, O. C.; SOARES, U. M.; SILVA, J. G. F.; ROESNER, E. H.; FLORENCIO, C. P.; SOUZA, C. A. V. (2007). Bacia Potiguar. Boletim de Geociências da Petrobras, 15(2), 357-369.

PESSOA NETO, O. C. Estratigrafia de Sequências da Plataforma Mista Neogênica na Bacia Potiguar, margem equatorial brasileira. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 33, n. 3, p. 263-278, set. 2003.

PFALTZGRAFF, P. A. S., TORRES, F. S. M. & BRANDÃO, R. L. (2010). Geodiversidade: adequabilidades/ potencialidades e limitações frente ao uso e ocupação. In: Pfaltzgraff, P. A. S., Torres, F. S. M. & Brandão, R. L. (Org.). Geodiversidade do estado do Rio Grande do Norte. Recife: CPRM, p. 115-136.

PINTO FILHO, J. L. de O.; LIMA, M. L. de A.; OLIVEIRA JUNIOR, H. S. de. Mapeamento aéreo com drone para planejamento urbano. **Revista de Políticas Públicas & Cidades**, [s. l.], v. 9, n. ISSN 2359-1552, ed. 3, p. 1 - 20, 2020.

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.

PORSANI, J. L. **Ground Penetrating Radar (GPR): proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado- SP**. Tese (Doutorado em Geofísica) – UNESP, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campos de Rio Claro-SP, 1999. 145 p.

PRUDKIN, Gonzalo; BREUNIG, Fábio Marcelo. Drones e Ciência: teoria e aplicações metodológicas-volume I. 2019.

REYNOLDS, J. M. Un introduction to applied and environmental geophysics. 2^a ed. UK: Wiley-Blackwell, 2011.

RIBEIRO, Gisele Guimarães. **Caracterização eletromagnética e geotécnica de um solo fino de Brasília**. Orientador: Prof. Dr. Hernán Eduardo Martínez Carvajal. 2013. 94 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnologia) - Universidade de Brasília, [S. l.], 2013.

RODRIGUES, Danilo Aparecido; GALLARDO, Amarilis Lucia Casteli Figueiredo. **VANTAGENS DA AEROFOTOGRAMETRIA POR DRONE NA OBTENÇÃO DE DADOS TOPOGRÁFICOS EM ESTUDOS DE LIXÕES E ATERROS SANITÁRIOS. VII SINGEP**: Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, São Paulo, n. ISSN 2317-8302, 2018.

RODRIGUES, Rafael Saraiva. **Caracterização geofísica do ambiente carstico da caverna Furna Feia (Baraúna/RN) e do complexo de cavernas Toca da Boa Vista (Lajes dos Negros/BA)**. Orientador: Prof. Dr. Raimundo Mariano Castelo Branco. 2020. 148 f. Tese (Doutor em Geologia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

SAMPAIO, A. V.; SCHALLER, H. Introdução à estratigrafia da Bacia Potiguar. **Boletim Técnico da Petrobrás**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 1, p. 19-44, 1968.

SANDMEIER, K. J. **REFLEXW Version 9.5 for Windows XP/7/8/10**. Program for the processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction and transmission data. Manual do Software. Karlsruhe, 2022.

SANTOS, R.S.V. Detecção 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.

SILVA, H. M. **Sistema de informacao geografica do aquifero carstico da micro-regiao de Irece, Bahia**: Subsídio para a gestão integrada dos recursos hídricos das bacias dos rios Verde e Jacaré. 2005. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2005.

SMITH, D. G. & JOL, H. M. 1995. Ground penetrating radar: antennae frequencies and maximum probable depths of penetration in Quaternary sediments. *Journal of Applied Geophysics*, **33**, 93-100.

SOUZA, D. do C. **Litoestratigrafia e deformação cenozóica na região de Icapuí, Ceará, e implicações para a estruturação de campos de petróleo na borda ocidental da Bacia Potiguar (NE do Brasil)**. 2003. 222 f. Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica) - Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2003.

SOUZA, Anderson de Medeiros. **Uso do GPR na Geração de Modelos Estáticos 3D Para o Planejamento de Lavra de Minerais Pesados Depositados**. Orientador: Prof. Dr. Francisco Pinheiro Lima Filho. 2008. 123 f. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, 2008.

SOUZA, Bianca Adriana de; CAVICHIOLI, Fabio Alexandre. **A UTILIZAÇÃO DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS (VANT) NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR**. *Revista Interface Tecnológica*, v. 17, n. 1, p. 444-455, 2020.

TIBANA, P. & TERRA, G. - 1981 - Seqüências carbonáticas do Cretáceo na Bacia Potiguar. Boi. Tee. Petrobras. 24(3):174- 183.

ULABY, F. T. 2004. Fundamentals of Applied Electromagnetics. 2004 media edition, USA, Cap. 4, p.156.

VEEKEN, P. C. H., 2007, Seismic stratigraphy, basin analysis and reservoir characterisation, in K. Helbig and S. Treitel, eds., Handbook of geophysical exploration, vol. 37: Elsevier Science Publishing.

WEINER, D. M.; AMARO, V. E.; CARVALHO, I. Q. de; ARAÚJO, P. V do N. Geotecnologias aplicadas na análise da dinâmica costeira na desembocadura do Rio Punaú-RN, Nordeste do Brasil. **Rede: Revista Eletrônica do PRODEMA**, Fortaleza-CE, v. 1, n. ISSN 1982-5528, ed. 15, p. 21-41, 2021.