



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEODINÂMICA E GEOFISICA

## **DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

### **MAPEAMENTO VIRTUAL DE FRATURAS EM ALTA RESOLUÇÃO PARA ANÁLISE ESTRUTURAL QUANTITATIVA EM ANÁLOGO DE RESERVATÓRIO CARBONÁTICO**

Autora:

**LUANA SOUSA DA SILVA**

Orientador:

**PROF. DR. VINCENZO LA BRUNA**

Coorientador:

**PROF. DR. FRANCISCO HILÁRIO REGO BEZERRA**

Dissertação nº 286/PPGG

Outubro de 2023

Natal/RN, Brasil

**LUANA SOUSA DA SILVA**

**MAPEAMENTO VIRTUAL DE FRATURAS EM ALTA RESOLUÇÃO PARA  
ANÁLISE ESTRUTURAL QUANTITATIVA EM ANÁLOGO DE RESERVATÓRIO  
CARBONÁTICO**

Dissertação apresentada em 10 de outubro de 2023 ao Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) como requisito à obtenção do Título de Mestre em Geodinâmica e Geofísica, Área de Concentração Geodinâmica.

**BANCA EXAMINADORA:**

---

**PROF. DR. VINCENZO LA BRUNA**  
*Presidente e orientador (PPGG-UFRN)*

---

**DR<sup>a</sup>. JULIANA APARECIDA GONÇALVES LOPES**  
*Membro interno (PPGG-UFRN)*

---

**DR. FÁBIO LUIZ BAGNI**  
*Membro externo (PETROBRAS)*

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

Silva, Luana Sousa da.

Mapeamento virtual de fraturas em alta resolução para análise estrutural quantitativa em análogo de reservatório carbonático / Luana Sousa da Silva. - 2023.

Orientação: Prof. Dr. Vincenzo La Bruna.

Coorientação: Prof. Dr. Francisco Hilário Rego Bezerra.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica. Natal, RN, 2023.

63 f.: il.

1. Geodinâmica - Dissertação. 2. Análogo de reservatório carbonático - Dissertação. 3. Análise estrutural quantitativa - Dissertação. 4. P10, P20 e P21 - Dissertação. 5. Lei de potência - Dissertação. 6. Lei exponencial - Dissertação. 7. Topologia - Dissertação. I. La Bruna, Vincenzo. II. Bezerra, Francisco Hilário Rego. III. Título.

RN/UF/CCET

CDU 551.2/.3(043.3)

## AGRADECIMENTOS

---

O agradecimento inicial vai a quem mais me apoiou e fortaleceu ao longo da vida, minha mãe, Maria. Espero ainda poder retribuir à altura todo o esforço e dedicação até aqui.

Agradeço ao meu companheiro diário nessa jornada, Raul, e aos amigos e amigas, que direta ou indiretamente, me ajudaram e incentivaram, em especial Lordana, Louise, Débora, Alyne, Alina, Maria Clara e Sophia, por me fortalecerem nos momentos mais difíceis, essa conquista seria mil vezes mais difícil sem vocês.

Serei eternamente grata à UFRN, por manter as portas sempre abertas, e a todos os servidores, que fazem a instituição seguir transformando vidas. Sobretudo, meus orientadores, os professores Vincenzo La Bruna e Francisco Hilário Bezerra, pela oportunidade e todo aprendizado, além da paciência, e por depositarem confiança no meu trabalho. Aos colegas do laboratório que me auxiliaram no desenvolvimento da pesquisa, em especial Renata Araújo e Antônio Vicente, que me ajudaram nas atividades de campo.

Agradeço aos coordenadores do PPGG, Frederico Vilalva, e do PRH na UFRN, David Lopes de Castro, por todo o apoio durante o período do mestrado. Agradeço à Agência Nacional do Petróleo que, por meio do Projeto PRH-ANP 42.1 – Hidrocarbonetos, custeou a presente pesquisa e forneceu o apoio financeiro por meio da concessão de bolsa de mestrado institucional.

## RESUMO

---

Os reservatórios carbonáticos podem ser bastante heterogêneos sobretudo na presença de fraturas e processos de dissolução, componentes capazes de alterar significativamente a porosidade e a permeabilidade das rochas carbonáticas. Neste sentido, a caracterização das fraturas é essencial para compreender a origem e desenvolvimento destes reservatórios. O objetivo da presente pesquisa consistiu em caracterizar os atributos de fraturas presentes em três afloramentos das rochas carbonáticas da Formação Jandaíra (Arapuá I, II e III), em Felipe Guerra/RN. O propósito foi alcançado por meio de uma análise estrutural quantitativa virtual, que possibilitou a descrição e quantificação dos elementos estruturais presentes. Foram utilizadas imagens aéreas obtidas com um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), linhas de varredura (*scanlines*) e áreas de varredura (*scanareas*) interpretadas virtualmente, para uma investigação em alta resolução, contemplando escalas de visualização não compreendidas pelos métodos tradicionais. A partir dos dados estruturais foi possível obter os valores de P10 (frequência), P20 (intensidade) e P21 (densidade), bem como realizar análises estatísticas e topológicas. Os resultados permitiram observar uma variação nos parâmetros citados, principalmente em P10, P20 e P21, em relação a proximidade ao eixo da dobra de Apodi. É possível verificar um aumento no grau de deformação e conectividade entre os elementos estruturais com a proximidade da zona de charneira, disposta paralelamente a um corredor de fraturas NE-SW, ocorrendo agrupamento (*clusters*) de fraturas associadas aos sets N-S e NW-SE. As características identificadas, associadas a estudos anteriores na região, sugerem que os elementos estruturais presentes na área exercem um expressivo controle sobre a distribuição das propriedades petrofísicas nas rochas mapeadas. Esta pesquisa reforça a relevância do estudo de afloramentos análogos de reservatórios carbonáticos para a identificação e compreensão do desenvolvimento de feições subsísmicas, e como tais elementos podem afetar a qualidade deste tipo de reservatório.

**Palavras-chave:** Análogo de reservatório carbonático; análise estrutural quantitativa; P10, P20 e P21; lei de potência; lei exponencial; topologia.

## ABSTRACT

---

Carbonate reservoirs can be quite heterogeneous, especially in the presence of fractures and dissolution processes, components capable of significantly altering the porosity and permeability of carbonate rocks. In this sense, the characterization of fractures is essential to understanding the origin and development of these reservoirs. The objective of this research was to characterize the attributes of fractures present in three outcrops of carbonate rocks of the Jandaíra Formation (Arapuá I, II, and III) in Felipe Guerra/RN. It started with virtual quantitative structural analysis, which enabled the description and quantification of the structural elements present. The virtual interpretation of Aerial images obtained with an Unmanned Aerial Vehicle (UAV), scan lines, and scan areas was used for a high-resolution investigation, covering viewing scales not understood by traditional methods. From the structural data, it was possible to obtain the values of P10 (frequency), P20 (intensity), and P21 (density), as well as perform statistical and topological analyses. The results allowed us to observe a variation in the parameters above, mainly in P10, P20, and P21, about the proximity to the axis of the Apodi fold. It is possible to verify an increase in the degree of deformation and connectivity between the structural elements with the proximity of the hinge zone, arranged parallel to a corridor of NE-SW fractures, with clusters of fractures associated with the N-S and NW-SE sets occurring. The identified attributes related to previous studies in the region suggest that the structural elements present in the area exert significant control over the distribution of petrophysical properties in the mapped rocks. This research reinforces the relevance of studying analogous outcrops of carbonate reservoirs for identifying and understanding the development of subseismic features and how such elements can affect the quality of this type of reservoir.

**Keywords:** Carbonate reservoir analog; quantitative structural analysis; P20, P21 e P10; power law; exponential law; topology.

## SUMÁRIO

|                                                                         |           |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| RESUMO .....                                                            | 4         |
| ABSTRACT .....                                                          | 5         |
| LISTA DE FIGURAS .....                                                  | 8         |
| LISTA DE TABELAS .....                                                  | 11        |
| 1. CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO .....                                        | 12        |
| <b>1.1. Apresentação .....</b>                                          | <b>12</b> |
| <b>1.2. Justificativa e Objetivos .....</b>                             | <b>12</b> |
| <b>1.3. Localização da Área de Estudo .....</b>                         | <b>13</b> |
| 2. CAPÍTULO II - CONTEXTO GEOLÓGICO .....                               | 16        |
| <b>2.1. Evolução Tectônica da Bacia Potiguar .....</b>                  | <b>16</b> |
| <b>2.2. Eventos Deformacionais Pós-Campaniano .....</b>                 | <b>17</b> |
| 3. CAPÍTULO III – ESTADO DA ARTE.....                                   | 20        |
| <b>3.1. Reservatórios Carbonáticos Fraturados e Carstificados .....</b> | <b>20</b> |
| 4. CAPÍTULO IV – METODOLOGIA.....                                       | 23        |
| <b>4.1. Levantamento em Campo.....</b>                                  | <b>23</b> |
| <b>4.2. Imagens aéreas (VANT) .....</b>                                 | <b>24</b> |
| <b>4.3. Análise dos Atributos de Fraturas.....</b>                      | <b>24</b> |
| <b>4.4. Análise estatística.....</b>                                    | <b>26</b> |
| <b>4.5. Análise topológica .....</b>                                    | <b>27</b> |
| 5. CAPÍTULO V – ARTIGO.....                                             | 29        |
| <b>Resumo.....</b>                                                      | <b>30</b> |
| <b>Abstract .....</b>                                                   | <b>31</b> |
| <b>5.1. Introdução.....</b>                                             | <b>32</b> |
| <b>5.2. Geologia Regional.....</b>                                      | <b>33</b> |
| <b>5.3. Metodologia .....</b>                                           | <b>35</b> |
| 5.3.1. Dados de Campo.....                                              | 35        |

|                                                   |           |
|---------------------------------------------------|-----------|
| 5.3.2. Análise Virtual.....                       | 35        |
| <b>5.4. Resultados.....</b>                       | <b>38</b> |
| 5.4.1. Análise Qualitativa.....                   | 38        |
| 5.4.2. Análise Quantitativa.....                  | 40        |
| <b>5.5. Discussões .....</b>                      | <b>48</b> |
| <b>5.6. Conclusões.....</b>                       | <b>52</b> |
| <b>5.7. Agradecimentos .....</b>                  | <b>53</b> |
| <b>5.8. Referências.....</b>                      | <b>54</b> |
| 6. CAPÍTULO V - CONSIDERAÇÕES FINAIS .....        | 57        |
| 7. CAPÍTULO VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... | 58        |

## LISTA DE FIGURAS

---

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.1:</b> a) Mapa geológico regional simplificado destacando a localização dos afloramentos no município de Felipe Guerra/RN. Base de Dados: Serviço Geológico do Brasil (Angelim <i>et al.</i> , 2006). b), c) e d) Fotografias aéreas dos três afloramentos selecionados para o estudo. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 15 |
| <b>Figura 2.1:</b> Diagramas representativos dos campos de tensões atuantes durante os eventos tectônicos SF-1 e SF-2, de acordo com os estudos de Bezerra <i>et al.</i> (2020). Diagramas modificados de Fossen (2010). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 18 |
| <b>Figura 3.1:</b> Métodos empregados para caracterizar reservatórios e suas respectivas escalas de investigação (adaptado de Giuffrida <i>et al.</i> , 2020; La Bruna <i>et al.</i> , 2021). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 22 |
| <b>Figura 4.1:</b> Síntese da metodologia adotada na pesquisa. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 23 |
| <b>Figura 4.2:</b> Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) modelo DJI Phantom 4 Pro. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 24 |
| <b>Figura 4.3:</b> Representação de scanlines e scanareas interpretadas no interior dos afloramentos, e softwares utilizados para a aquisição e processamento dos dados. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 25 |
| <b>Figura 4.4:</b> Planilha utilizada para o cálculo do coeficiente de variação (Cv) e para a análise das curvas exponencial e de potência. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 27 |
| <b>Figura 4.5:</b> Fluxograma da aquisição dos parâmetros topológicos realizada em três etapas: a) interpretação de fraturas nas scanareas; b) interpretação dos nós e ramificações presentes no sistema de fraturas; c) quantificação dos nós e ramificações identificados, e projeção nos diagramas ternários. ....                                                                                                                                                                                                                                                                      | 28 |
| <b>Figura 5.1:</b> a) Mapa geológico regional simplificado destacando a localização da área de estudo no município de Felipe Guerra/RN, inserida na Fm. Jandaíra. Base de Dados: Serviço Geológico do Brasil (Angelim <i>et al.</i> , 2006). b) Mapa geológico local evidenciando a localização dos afloramentos em relação à dobra anticlinal Apodi, ao corredor de fraturas paralelo ao eixo da dobra (NE-SW), e ao rio Apodi-Mossoró (modificado de Bagni <i>et al.</i> , 2022). c), d) e e) Imagens aéreas obtidas com VANT dos afloramentos Arapué I, II e III, respectivamente. .... | 34 |
| <b>Figura 5.2:</b> Síntese da metodologia do trabalho. a) Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT). b) Inserção dos dados no Illustrator 2019 CC. c) Interpretação de fraturas nas áreas, e em scanlines e scanareas selecionadas. d) Inserção das fraturas interpretadas no FFA 5.32 para obtenção de P20, P21 e P10. e) Projeção dos dados                                                                                                                                                                                                                                                     |    |

para seleção de sets a serem analisados estatisticamente. f) Análise estatística dos sets selecionados. g) Estudo topológico a partir das scanareas para estudar a relação de contato entre as fraturas e seu grau de conectividade..... 36

**Figura 5.3:** Fotos da etapa de campo. a), b) e d) Arapuá II com grande variação no tamanho e profundidade das fraturas, com zonas muito carstificadas. c), e) e f) Arapuá I com juntas e veios preferencialmente N-S e NW-SE, sub-verticais, e casualmente sub-horizontais. g) Arapuá III com menos fraturas, mais dispersas, extensas, de orientação E-W. .... 39

**Figura 5.4:** a) Imageamento com VANT, Arapuá I. b) Interpretação de fraturas utilizada para calcular P20 e P21 na área. As scanareas em azul foram também utilizadas para calcular P20 e P21, e o estudo topológico. As linhas tracejadas em vermelho são as scanlines utilizadas para a obtenção do P10. .... 41

**Figura 5.5:** Gráfico log-log do número cumulativo pelo espaçamento de fraturas. Em laranja a Lei Exponencial, em vermelho a Lei de Potência. Calculado para o afloramento Arapuá I..... 42

**Figura 5.6:** Análise da topologia do afloramento Arapuá I. As ramificações foram plotadas no gráfico a direita, os dados não foram apresentados na figura para melhorar a visualização dos nós. .... 43

**Figura 5.7:** a) Imagem aérea do afloramento Arapuá II. b) Fraturas interpretadas nas imagens, em azul a scanareas utilizada para calcular P20 e P21 e a topologia. Em vermelho, scanlines utilizadas para o cálculo de P10. .... 44

**Figura 5.8:** Análise da topologia no afloramento Arapuá II. Nós e ramificações foram plotadas nos gráficos ternários à direita..... 45

**Figura 5.9:** a) Imageamento de VANT, Arapuá III. b) Interpretação de fraturas utilizada para calcular P20 e P21 da área. As scanareas em vermelho foram também utilizadas para as análises de P20 e P21, e o estudo topológico. As linhas tracejadas são as scanlines utilizadas para a obtenção do P10..... 46

**Figura 5.10:** Gráfico log-log do número cumulativo pelo espaçamento de fraturas. Linhas laranjas correspondem a Lei Exponencial e linhas vermelhas à Lei de Potência, calculado para o afloramento Arapuá III..... 47

**Figura 5.11:** Análise da topologia do afloramento Arapuá III. À esquerda, as scanareas na imagem aérea, e à direita as interpretações. Os diferentes tipos de nós estão representados por círculos azuis (I), triângulos laranjas (Y) e quadrados roxos

(X). As ramificações não foram ilustradas em função da escala de visualização, contudo os dados foram projetados no gráfico ternário. .... 48

**Figura 5.12:** Mapa conceitual ilustrando a variação nos estilos estruturais e grau de deformação no Lajedo Arapuá em relação a proximidade com a dobra Apodi e ao corredor de fraturas paralelo ao seu eixo (NE-SW). a) Modelo simplificado do anticlinal Apodi, ilustrando a zona mais fraturada e um trecho do rio Apodi-Mossoró (modificado de Bagni *et al.*, 2020). Destaque para a localização das áreas de estudo em relação a essas estruturas, e a variação da morfologia dos afloramentos. b), c) e d) síntese dos resultados obtidos para as áreas I, II e III..... 52

## LISTA DE TABELAS

---

|                                                                                                                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1:</b> Informações sobre a orientação e tamanho das <i>scanlines</i> obtidas no afloramento Arapuá I, número de fraturas identificadas e o valor de P10 calculado (Dershowitz e Herda, 1992). .....                           | 40 |
| <b>Tabela 2:</b> Coeficiente de variação para cada <i>set</i> identificado nas 06 <i>scanlines</i> do afloramento I. ....                                                                                                               | 41 |
| <b>Tabela 3:</b> Resultado da análise topológica realizada no afloramento Arapuá I informando a quantidade de nós e ramificações identificadas em cada <i>scanarea</i> ... ..                                                           | 42 |
| <b>Tabela 4:</b> <i>Scanlines</i> interpretadas para o cálculo de P10.....                                                                                                                                                              | 44 |
| <b>Tabela 5:</b> Informações sobre a orientação e tamanho das <i>scanlines</i> adquiridas no afloramento III e resultados obtidos pós processamento dos dados, como o número de fraturas identificadas e o valor de P10 calculado. .... | 45 |
| <b>Tabela 6:</b> Valores do coeficiente de variação obtidos para cada <i>set</i> identificado nas 06 <i>scanlines</i> do afloramento III. ....                                                                                          | 46 |
| <b>Tabela 7:</b> Resultado da análise topológica realizada no afloramento Arapuá III informando a quantidade de nós e ramificações identificadas em cada <i>scanarea</i> ... ..                                                         | 47 |

## 1. CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

### 1.1. Apresentação

O presente documento constitui parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Geodinâmica e Geofísica, com ênfase em Geodinâmica, através do Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

O estudo foi desenvolvido sob a orientação do Prof. Dr. Vincenzo La Bruna, e coorientação do Prof. Dr. Francisco Hilário Rego Bezerra, cujo título consiste em “Mapeamento virtual de fraturas em alta resolução para análise estrutural quantitativa em análogo de reservatório carbonático”.

### 1.2. Justificativa e Objetivos

Os reservatórios carbonáticos são muito valiosos para a exploração de hidrocarbonetos, uma vez que representam entre 50 e 60 % das reservas mundiais (Akbar *et al.*, 2000; Burchette, 2012). Suas propriedades petrofísicas estão diretamente relacionadas à presença de fraturas e processos de dissolução (carstificação) (*e.g.*, Cazarin *et al.*, 2019; Araújo *et al.*, 2021; Bagni *et al.*, 2020; La Bruna *et al.*, 2021; Lopes *et al.*, 2022, 2023).

Diante da relevância de se compreender os processos envolvidos no desenvolvimento destes reservatórios, metodologias modernas, como o estudo de afloramentos análogos em alta resolução (*e.g.*, Bagni *et al.*, 2020; Araújo *et al.*, 2021; La Bruna *et al.*, 2021), vem sendo empregadas para refinar os modelos conhecidos. Os métodos tradicionais utilizados nesta caracterização podem deixar lacunas, por exemplo elementos estruturais em escala subsísmica, capazes de influenciar as propriedades dos reservatórios (*e.g.*, Giuffrida *et al.*, 2019; Panza *et al.*, 2018; Roehl e Choquette, 2012).

Os corredores de fraturas consistem em ótimos exemplos de elementos estruturais que ocorrem geralmente em escala subsísmica (La Bruna *et al.*, 2021). Essas feições têm despertado o interesse da comunidade científica e da indústria do Petróleo & Gás (P&G) nos últimos anos, pois são consideradas umas das principais descontinuidades estruturais em subsuperfície capazes de originar uma zona de alta permeabilidade ou zonas *super-k* (Ogata *et al.*, 2014; Watkins *et al.*, 2015; La Bruna *et al.*, 2021; Lopes *et al.*, 2022).

A ocorrência de fraturas em rochas carbonáticas que possuem matriz de baixas porosidade e permeabilidade exerce um papel fundamental no desenvolvimento dessas propriedades petrofísicas (e.g., Araújo *et al.*, 2021), influenciando diretamente a qualidade dos reservatórios deste tipo. O conhecimento sobre o arranjo espacial dos padrões de fraturas é essencial para a construção de modelos e na previsão do fluxo de fluidos (Gholipour *et al.*, 2016; Xu *et al.*, 2017; Bagni *et al.*, 2020). A análise estrutural quantitativa a partir de imagens de alta resolução pode fornecer tais parâmetros, como será apresentado.

A pesquisa usou o estudo de fraturas em alta resolução nos afloramentos de rochas carbonáticas da Formação Jandaíra como análogo de reservatório carbonático fraturado e carstificado. A região estudada, localizada no vale do rio Apodi-Mossoró, entre os municípios de Felipe Guerra e Gov. Dix-Sept Rosado/RN, se caracteriza pela presença de elementos estruturais hierarquicamente superiores, como a dobra de Apodi e o corredor de fraturas NE-SW paralelo ao eixo da referida dobra (Bagni *et al.*, 2020).

O objetivo principal do trabalho consistiu em quantificar, caracterizar e interpretar as fraturas presentes em três afloramentos da Formação Jandaíra, a fim de compreender qual a relação entre os estilos estruturais encontrados e o contexto geológico regional, bem como elaborar considerações sobre as propriedades petrofísicas das rochas, e como a presença de estruturas subsísmicas influenciam no fluxo de fluidos.

### 1.3. Localização da Área de Estudo

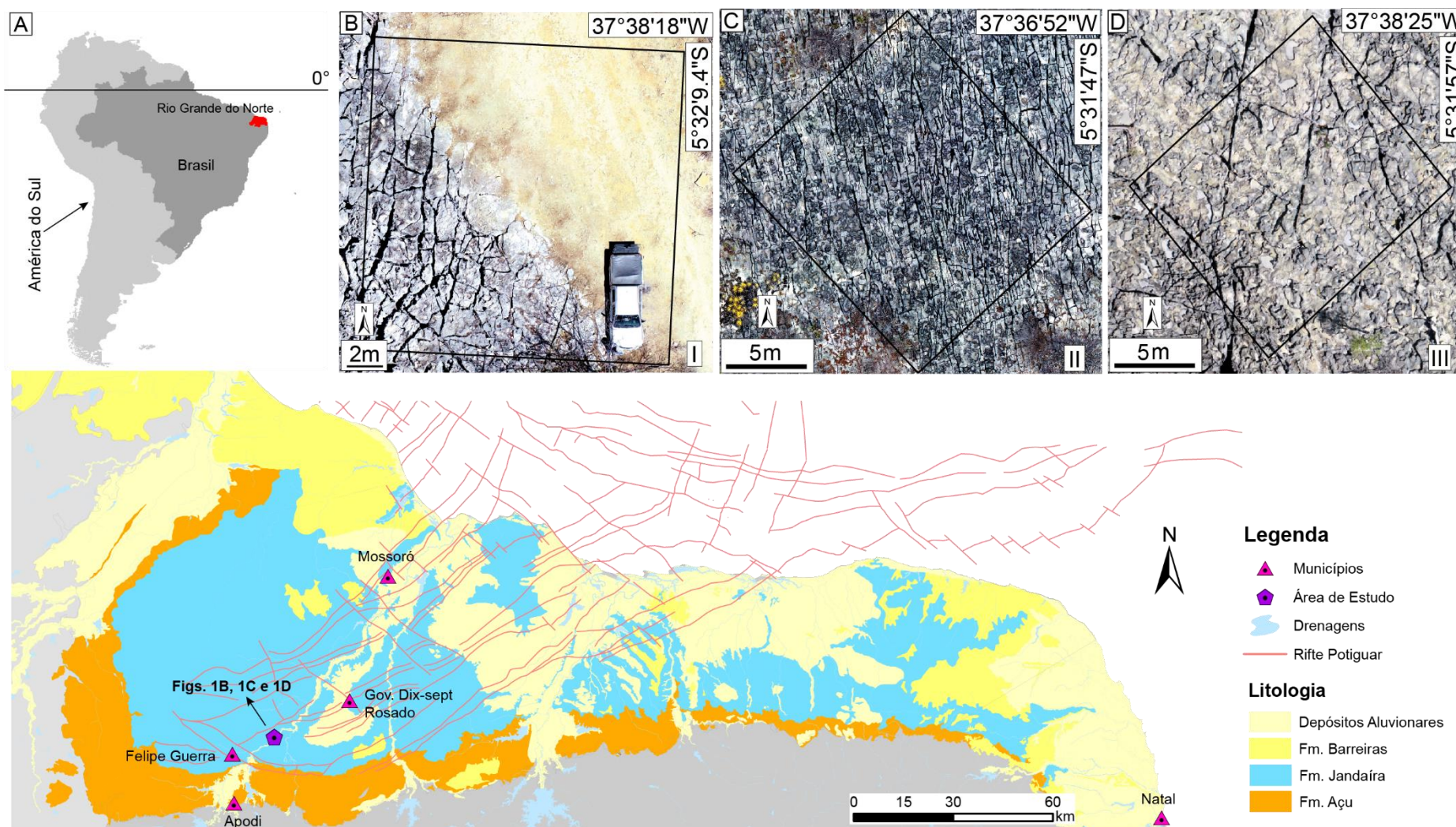
A área da pesquisa está localizada no Lajedo Arapuá, no município de Felipe Guerra/RN, litologicamente representada pelas rochas carbonáticas da Formação Jandaíra (Figura 1.1). Para o estudo foram selecionados três (03) afloramentos, dispostos perpendicularmente ao rio Apodi-Mossoró, os quais foram denominados: Arapuá I (14,59 m x 16,68 m) - (5°31'47.49"S; 37°36'52.24"O); Arapuá II (16,6 m x 16,76 m) - (5°32'9.41"S; 37°38'18.97"O); - e Arapuá III (19,09 m x 16,84 m) - (5°31'57.75"S; 37°38'25.23"O) (Figura 1.1).

A região está inserida no contexto climático do semiárido (Diniz e Pereira, 2015), com altas temperaturas associadas às chuvas, principalmente nos quatro primeiros meses do ano (Nimer, 1989). A proximidade dos afloramentos com o rio

Apodi-Mossoró exerce uma influência direta no contínuo processo de dissolução das rochas, principalmente em zonas mais fraturadas ([Bagni et al., 2020](#)).

O município de Felipe Guerra abrange um total de 191 cavidades mapeadas pelo CECAV/RN, e apresenta o maior potencial para a ocorrência de cavernas no Rio Grande do Norte ([Cruz et al., 2010](#)). A evolução do carste nesta área é fortemente controlada por eventos tectônicas relacionados ao desenvolvimento da Bacia Potiguar ([Xavier Neto et al., 2008](#)).

Nesse contexto, é essencial analisar a complexa relação existente entre os agentes endógenos e exógenos, que atuaram/atua em diferentes escalas temporais e espaciais, para compreender os aspectos relacionados a origem e desenvolvimento dos reservatórios carbonáticos.



**Figura 1.1:** a) Mapa geológico regional simplificado destacando a localização dos afloramentos no município de Felipe Guerra/RN. Base de Dados: Serviço Geológico do Brasil (Angelim *et al.*, 2006). b), c) e d) Fotografias aéreas dos três afloramentos selecionados para o estudo.

## 2. CAPÍTULO II - CONTEXTO GEOLÓGICO

### 2.1. Evolução Tectônica da Bacia Potiguar

A Bacia Potiguar está localizada predominantemente no estado do Rio Grande do Norte, e parcialmente no estado do Ceará, no extremo NE brasileiro (Figura 1.1). Sua origem e desenvolvimento estão associados ao rompimento do Gondwana, assim como à formação do Oceano Atlântico Sul (De Matos 1992; 2000; de Castro *et al.*, 2012; Melo *et al.*, 2016), e ao surgimento de uma série de bacias intracontinentais, integrantes do Sistema de Riftes do Nordeste Brasileiro (Brito Neves *et al.*, 1984; De Matos, 1992; de Castro *et al.*, 2012).

Os estágios evolutivos da bacia foram estabelecidos principalmente a partir da deposição de três sucessões sedimentares, desde o início do Cretáceo (~145.0 Ma) até o Quaternário (atual), denominados Rifte, Pós-rifte e Drifte (Souza *et al.*, 1982; Pessoa Neto *et al.*, 2007). Tais estágios compreenderam eventos tectônicos em diferentes regimes, responsáveis por alterações nas estruturas, sistemas deposicionais, e composição das unidades litológicas que integram a bacia.

O estágio Rifte se estendeu do Neoberriasiano (~145.0 Ma) até o Eobarremiano (~125 Ma) (Sousa *et al.*, 2003). É caracterizado inicialmente por um afinamento crustal e litosférico, responsável por falhas normais NE-SW de grande rejeito, que definem grábens assimétricos preenchidos por sedimentos continentais (Bertani *et al.*, 1990; Pessoa Neto *et al.*, 2007). Entre o Neobarremiano (~125.0 Ma) e o Eo-Aptiano (~121.4) a bacia experimenta um regime transcorrente-transformante que altera a cinemática do rifte e o transporte tectônico, de NNW para E-W, com movimentos transtracionais dextrais (De Matos, 1992; 2000; Cremonini, 1993). Ao fim do período, uma subsidência termal lenta e generalizada produz um relevo plano (Pessoa Neto *et al.*, 2007).

O período que inicia no Aptiano (~121.4 Ma) e vai até o Albiano (~113.0 Ma) corresponde ao segundo estágio, Pós-rifte, e é caracterizado por uma subsidência térmica posterior ao estiramento da fase Rifte (Bertani *et al.*, 1990; Pessoa Neto, 2003; Pessoa Neto *et al.*, 2007). Neste intervalo ocorre a transição gradativa entre o sistema deposicional continental, até então predominante na bacia, e a primeira incursão de sedimentos marinhos, documentada pela Camada Ponta do Tubarão (CTP), composta por folhelhos pretos e calcilutitos ostracoidais (Souza, 1982; Araripe e Feijó, 1994; Pessoa Neto *et al.*, 2007).

A partir do início da sedimentação marinha na bacia, no período Albiano inferior (~113.0 Ma), cessa a fase Pós-rifte e inicia a deposição da supersequência Drifte. Esta, por sua vez, foi classificada em dois conjuntos de sequências: marinhas transgressivas (Eoalbiano-Eocampaniano) e marinhas regressivas (Neocampaniano-Holoceno) (Bertani *et al.*, 1990; Pessoa Neto, 2003; Pessoa Neto *et al.*, 2007).

As sequências transgressivas foram depositadas sob um panorama de baixa taxa de subsidência, em uma calha fluvial de orientação principal NE-SW (Araípe e Feijó, 1994). Os sistemas fluviais foram gradativamente afogados, ocasionando uma sucessão vertical, com sistema entrelaçado na base, e estuarino no topo. Subsequente ao afogamento máximo, no Eoturoniano (~93.9 Ma), foi instalada a plataforma carbonática submetida por maré, Formação Jandaíra (Pessoa Neto *et al.*, 2007). O ciclo de sequências regressivas ficou registrado por meio de um evento erosivo de grande proporção (Córdoba, 2001; Pessoa Neto *et al.*, 2007).

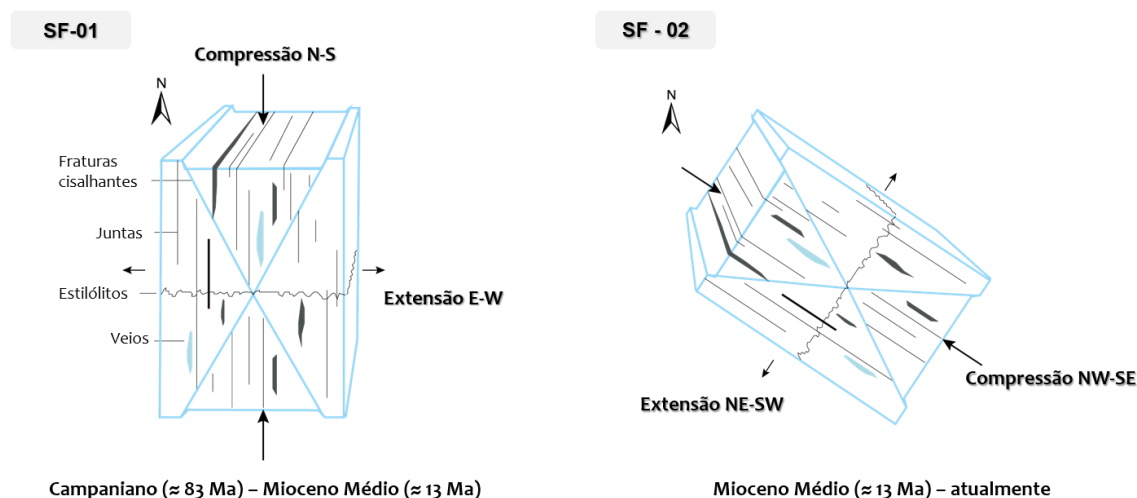
## 2.2. Eventos Deformacionais Pós-Campaniano

A Formação Jandaíra constitui uma plataforma/rampa carbonática dominada por maré, e sua litologia é composta tipicamente por calcarenitos bioclásticos a foraminíferos bentônicos e calcilutitos (Araípe e Feijó, 1994; Maia *et al.*, 2012; Santos, 2015). A espessura dos pacotes desta unidade pode alcançar até 600 m na porção mais profunda da bacia (Oliveira, 2013). Na região emersa ocorrem expressivas exposições destas rochas em lajedos, onde se visualizam os efeitos da erosão e carstificação intensas (Sampaio e Schaller 1968; Córdoba, 2001; Pessoa Neto *et al.*, 2007; Bagni *et al.*, 2020; Araújo *et al.*, 2021; Lopes *et al.*, 2022, 2023).

Ao longo do período Maastrichtiano (~72.1 Ma) foram documentados episódios de resfriamento crustal, indicando soerguimento e denudação, reativação de falhas, inversão tectônica e desenvolvimento de dobras nas formações Açu e Jandaíra (Morais Neto *et al.*, 2009; Françolin e Szatimari, 1987; Lima Neto, 1994; Pessoa Neto *et al.*, 2007). Dois campos de tensões (SF-1 e SF-2) atuaram na unidade desde o fim do Cretáceo (~70 Ma) até o período atual (Figura 2.1) (Bezerra *et al.*, 2020), e foram responsáveis por eventos de soerguimento que expuseram as rochas à erosão, e consequentemente ao desenvolvimento da carstificação epigênica (Xavier Neto *et al.*, 2008).

Entre o Cretáceo superior (~70 Ma) e o Mioceno médio (~13 Ma) houve a implantação do campo de tensão SF-1 (Bezerra *et al.*, 2020), responsável por

disseminar uma malha de fraturas e veios de orientação N-S, e estilólitos de orientação E-W, como produto de uma compressão N-S, de baixo ângulo, e uma extensão E-W (Figura 2.1) (Reis *et al.*, 2013; Bertotti *et al.*, 2017; Bezerra *et al.*, 2020).



**Figura 2.1:** Diagramas representativos dos campos de tensões atuantes durante os eventos tectônicos SF-1 e SF-2, de acordo com os estudos de Bezerra *et al.* (2020). Diagramas modificados de Fossen (2010).

A partir do Mioceno médio (~13 Ma) iniciou a atuação do evento tectônico SF-2, responsável por moldar o relevo da bacia e provocar a reativação e inversão de falhas NE-SW, desenvolvidas anteriormente (de Castro *et al.*, 2012; Bezerra *et al.*, 2020). Este evento é caracterizado por uma compressão NW-SE, sub-horizontal, com um campo extensional sub-horizontal NE-SW (Figura 2.1) (Bezerra *et al.*, 2020). A compressão durante esse estágio foi acomodada por falhas transversais e reversas, e dobras relacionadas ao afinamento crustal (Bertotti *et al.*, 2017).

O evento tectônico SF-2 foi responsável pelo desenvolvimento da dobra anticlinal de Apodi e um corredor de fraturas NE-SW paralelo à zona de charneira da dobra citada (Bagni *et al.*, 2020). Estas estruturas estão ainda relacionadas ao desenvolvimento do rio Apodi-Mossoró, disposto paralelamente às feições (Bezerra *et al.*, 2020; Bagni *et al.*, 2020). A dobra de Apodi possui a largura de  $\approx 10$  km, e comprimento de  $\approx 20$  km, o eixo da dobra e o corredor de fraturas possuem uma extensão de  $\approx 20$  km, e abrangem uma área de  $\approx 1,5$  km em torno da região central, marcada pela presença de um trecho do rio Apodi-Mossoró (Bagni *et al.*, 2020).

Outro aspecto relevante está relacionado ao fluxo hídrico nas rochas carbonáticas da Fm. Jandaíra, que influencia diretamente no desenvolvimento do carste epigênico nesta região da Bacia Potiguar (Maia e Bezerra, 2013; Diniz e Pereira, 2015; Bagni *et al.*, 2020). A área de estudo está localizada no baixo curso da

bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró ([Figura 1.1](#)), e a unidade Jandaíra compõe um dos principais aquíferos do Rio Grande do Norte ([Diniz e Pereira, 2015](#); [Da Silva e Troleis, 2019](#)). Nesse contexto, o substrato carbonático da unidade drena a água para os sumidouros, acelerando os processos de dissolução na unidade ([Bagni \*et al.\*, 2020](#)). As drenagens da bacia hidrográfica apresentam padrões do tipo paralela e treliça, expressos em vales incisos e lapiás ([Maia e Bezerra, 2013](#)).

### 3. CAPÍTULO III – ESTADO DA ARTE

#### 3.1. Reservatórios Carbonáticos Fraturados e Carstificados

A classificação de uma rocha como reservatório envolve a identificação de espaços vazios interconectados capazes de acumular fluidos e viabilizar sua circulação. Sendo assim, as propriedades petrofísicas fundamentais nestas rochas são a porosidade e permeabilidade (Melani, 2015). Ambas propriedades podem ser classificadas entre primárias e secundárias, de acordo com os processos genéticos envolvidos (Cosentino, 2001).

As propriedades petrofísicas primárias estão relacionadas às características originais preservadas na rocha após a deposição e compactação, como o espaço intergranular dos sedimentos e descontinuidades sedimentares (estratificações plano-paralelas e cruzadas) (Melani, 2015; Araújo *et al.*, 2021). Enquanto as secundárias podem estar relacionadas tanto à dissolução química através da circulação de fluidos, no contexto de rochas carbonáticas, quanto ao fraturamento por meio de eventos tectônicos (Bertotti *et al.*, 2017; Cazarin *et al.*, 2019; Araújo *et al.*, 2021, 2022; Lopes *et al.*, 2022).

Ao longo do tempo/espaço é comum o surgimento e destruição da porosidade e permeabilidade nos mais diferentes tipos de sistemas deposicionais, processos diagenéticos, e estágios de soterramento e compactação (Bagni, 2021). Em reservatórios carbonáticos fraturados e carstificados a porosidade bimodal é bastante comum e, normalmente, não exibe uma correlação linear com a permeabilidade (*e.g.*, Lucia, 2007).

Geralmente, os campos exploratórios de hidrocarbonetos compostos por reservatórios carbonáticos possuem seu volume associado à porosidade secundária, produzida por dolomitização, carstificação e/ou fraturas (Bagni, 2021). A ocorrência destes reservatórios é comum em trapas anticlinais relacionadas a antigos sistemas de falhas em atividade por um período de tempo prolongado, capazes de exercer controle regional no desenvolvimento do reservatório e suas propriedades (Bagni, 2021).

Os reservatórios carbonáticos, em um contexto amplo, apresentam o menor fator de recuperação final médio, apesar de apresentarem as maiores taxas de produção de hidrocarboneto (Sun e Sloan, 2003), isso se deve à comum ocorrência

de um sistema de dupla porosidade, geometria compartimentada e molhabilidade variável (Mazzullo e Harris, 1991; Sun e Sloan, 2003; Zhu *et al.*, 2018).

As rochas carbonáticas representam um grande desafio quando relacionadas a reservatórios de hidrocarbonetos, a susceptibilidade dessas rochas a reações químicas, e sua fragilidade mecânica, são responsáveis por influenciar significativamente a qualidade destes reservatórios, por meio de variações no tamanho, distribuição, preenchimento e grau de conectividade dos poros, ou na instalação de sistemas de fraturas e o nível do fraturamento (Lucia, 2007; Bust *et al.*, 2009; Dehler, 2009). Os reservatórios carbonáticos são caracterizados pela forma como se dá o arranjo do sistema poroso, e como é estabelecida a interconexão entre os poros (Bagni, 2021).

O processo de dissolução em rochas carbonáticas ocorre a partir da percolação de fluidos (Ford e Williams, 1989; Palmer, 2003). Diante das propriedades naturais dessas rochas, as fraturas podem exercer um controle fundamental no desenvolvimento do carste, e podem atuar como catalizador desse processo.

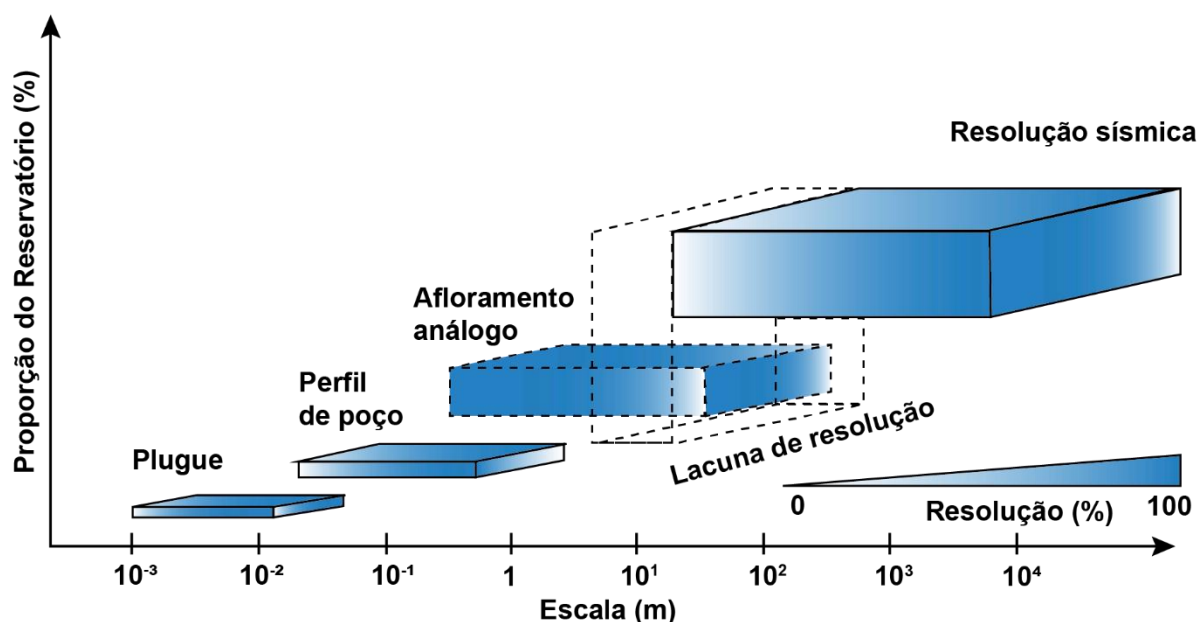
As propriedades petrofísicas dos reservatórios carbonáticos, isto é, a porosidade e a permeabilidade, são significativamente afetadas em função da ocorrência de discontinuidades e de processos de carstificação a partir da percolação de fluidos (Agosta *et al.*, 2010; Bertotti *et al.*, 2017; Cazarin *et al.*, 2019; Bagni *et al.*, 2020; La Bruna *et al.*, 2021; Araújo *et al.*, 2021, 2022; Lopes *et al.*, 2022). As fraturas são capazes de criar espaços vazios nas rochas, exercendo o papel de conduto, ou ter esses espaços preenchidos por materiais, podendo exercer o papel de selante (Bourne *et al.*, 2001). Outro aspecto importante consiste na possibilidade dessas estruturas ultrapassarem diferentes zonas do reservatório e/ou diferentes níveis estratigráficos (Questiaux *et al.*, 2010).

Conhecer a evolução temporal e espacial dos padrões de desenvolvimento de fraturas é fundamental para se dimensionar as propriedades petrofísicas, o que contribui para a modelagem e previsão do fluxo de fluidos em reservatórios carbonáticos (Xu *et al.*, 2017; Gholipour *et al.*, 2016). Os parâmetros-chave para tal modelagem consistem no conhecimento da geometria das fraturas, suas orientações, tamanho e densidade (Barton e Choubey, 1977; Odling, 1999; Gholipour *et al.*, 2016).

A escala de investigação utilizada para analisar tais estruturas é muito relevante, alguns estudos (*e.g.*, Bagni *et al.*, 2020; La Bruna *et al.*, 2021; Furtado *et al.*, 2022; de Lima *et al.*, 2023) demonstram a forte influência de estruturas

subsísmicas ( $< 50$  m) na qualidade dos reservatórios carbonáticos. Os métodos tradicionais empregados para essa caracterização podem apresentar limitações no reconhecimento desses elementos (Giuffrida *et al.*, 2020; La Bruna *et al.*, 2021) (Figura 3.1).

Um exemplo importante de feição subsísmica, principalmente no contexto de reservatórios carbonáticos, é o corredor de fraturas, considerado elemento-chave na caracterização do reservatório, uma vez que é capaz de formar uma zona (corredor) de alta permeabilidade ou zonas *super-k* (Giuffrida *et al.*, 2019; La Bruna *et al.*, 2021; Furtado *et al.*, 2022; Lopes *et al.*, 2022; de Lima *et al.*, 2023).



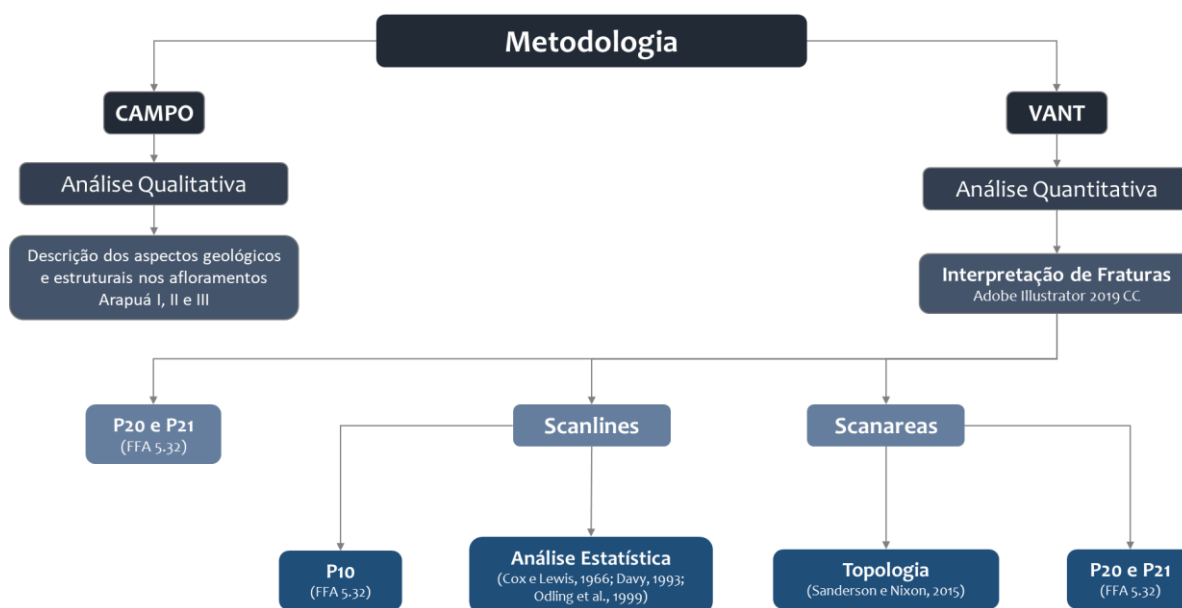
**Figura 3.1:** Métodos empregados para caracterizar reservatórios e suas respectivas escalas de investigação (adaptado de Giuffrida *et al.*, 2020; La Bruna *et al.*, 2021).

#### 4. CAPÍTULO IV – METODOLOGIA

O desenvolvimento da presente pesquisa iniciou com uma atividade realizada em campo, que permitiu a identificação e descrição dos principais aspectos qualitativos relacionados aos afloramentos. Em seguida foi realizada uma análise estrutural quantitativa a partir de imagens aéreas obtidas com um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT).

A análise estrutural quantitativa foi realizada de forma virtual, na superfície dos três afloramentos selecionados (Arapuá I, II e III), e contou com a identificação e quantificação das descontinuidades presentes, obtenção dos atributos de fraturas, intensidade (P20), densidade (P21) e frequência (P10), bem como o estudo da conectividade e distribuição espacial entre as estruturas, através de estudos topológicos e análises estatísticas.

A figura abaixo (Figura 4.1) representa a síntese das metodologias adotadas na pesquisa, as quais serão descritas com mais detalhe nos subcapítulos a seguir.



**Figura 4.1:** Síntese da metodologia adotada na pesquisa.

##### 4.1. Levantamento em Campo

A atividade de campo foi realizada em novembro de 2021, e contou com a caracterização dos aspectos geológicos e estruturais nos afloramentos Arapuá I, II e III. A visita aos afloramentos possibilitou o reconhecimento dos elementos estruturais presentes, a caracterização das litologias, e a identificação de algumas propriedades das fraturas, como por exemplo, o expressivo alargamento e rugosidade que ocorrem associados ao intenso processo de carstificação epigênica. Essa etapa foi muito

importante para a elaboração da análise qualitativa, assim como para a análise virtual quantitativa, realizada posteriormente, uma vez que as propriedades geométricas e topológicas, diretamente afetadas pelos efeitos da carstificação, podem ser difíceis de compreender apenas com a utilização de imagens aéreas.

#### 4.2. Imagens aéreas (VANT)

A aquisição das imagens aéreas contou com a utilização de um Veículo Aéreo Não Tripulado modelo *DJI Phantom 4 Pro* (Figura 4.2). Este equipamento é capaz de fornecer uma imagem com resolução de 20 megapixels. O voo de levantamento dos ortomosaicos foi realizado a uma altitude de 20 metros a partir da superfície do terreno. Entre cada uma das faixas de voo foram aplicadas sobreposições longitudinais e laterais de 85%, utilizadas para maximizar a precisão das informações adquiridas.

Portanto, com as características descritas, o voo permitiu uma resolução espacial de 0,5 cm/pixel. O imageamento possibilitou a identificação, caracterização e quantificação das fraturas, os sets presentes, bem como a obtenção dos atributos de fraturas, parâmetros geométricos, e topológicos.



**Figura 4.2:** Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) modelo DJI Phantom 4 Pro.

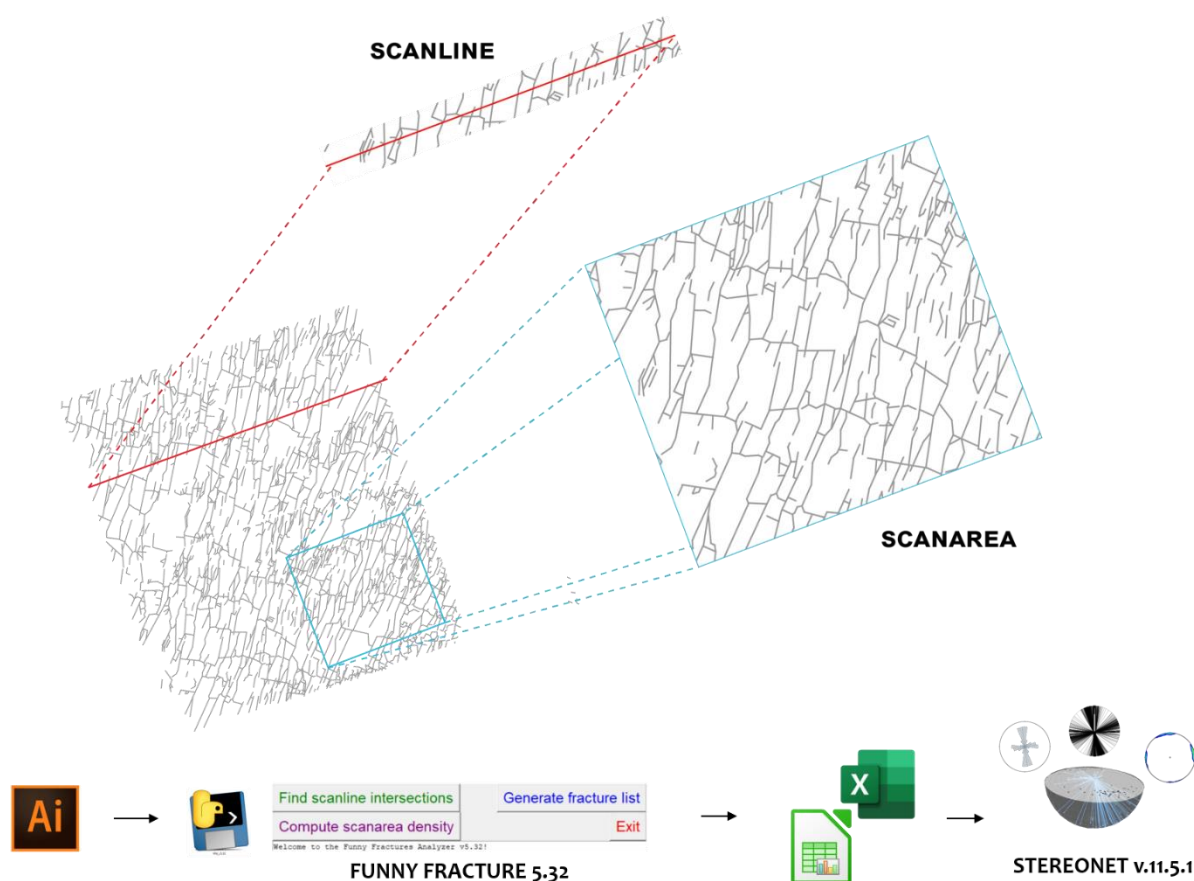
#### 4.3. Análise dos Atributos de Fraturas

O mapeamento virtual das fraturas iniciou com a interpretação das descontinuidades presentes nos três afloramentos (Arapuá I, II e III), a partir da

utilização do *software Adobe Illustrator 2019 CC*. Em seguida, foram aplicadas duas metodologias de aquisição de dados, *scanlines* e *scanareas* (Figura 4.3).

As *scanlines* são linhas de varredura (1D), interpretadas, traçadas sobre a superfície rochosa para identificar e mensurar atributos de fraturas, como orientação, frequência e espaçamento das fraturas, ao longo de uma linha de dimensão conhecida (Priest, 1993). Nesta pesquisa foram utilizadas para a obtenção da frequência de fraturamento (P10) e para a análise estatística.

As *scanareas* consistem em áreas de varredura (2D) interpretadas com o objetivo semelhante, contudo, permitem ainda a obtenção dos atributos de intensidade e densidade de fraturas (Smeraglia et al., 2021), bem como possibilitam a realização de interpretações topológicas, como demonstrado neste trabalho.



**Figura 4.3:** Representação de *scanlines* e *scanareas* interpretadas no interior dos afloramentos, e softwares utilizados para a aquisição e processamento dos dados.

A partir destes levantamentos foi possível calcular a frequência, intensidade e densidade de fraturas. Essas medidas são obtidas a partir da razão entre o número de fraturas identificadas e o comprimento ou área da *scanline* ou *scanarea* (Dershowitz e Herda, 1992; Sanderson e Nixon, 2015; Giuffrida et al., 2019). Para

esta etapa foi utilizado o *software Funny Fracture 5.32* (Figura 4.3), desenvolvido na linguagem *Python* pela equipe da Universidade de Parma, na Itália, e compartilhado com a equipe do Laboratório Sismológico da UFRN.

O *software* dispõe de duas ferramentas, denominadas “*compute scanarea density*”, utilizada para a obtenção de P20 e P21, e “*find scanline intersections*”, utilizada para a aquisição de P10.

Os dados de entrada no *software* são semelhantes para as duas finalidades. Ainda no *software Illustrator* é necessário criar três camadas: “*fractures*”, “*scanareas*” (para P20 e P21) ou “*scanline*” (para P10), e “*scale*”. Os arquivos devem ser salvos no formato “.svg” e inseridos no *Funny Fracture* a partir das ferramentas mencionadas no parágrafo anterior.

Os arquivos de saída, “.txt”, contendo valores de P20, P21, P10, comprimento e orientações das fraturas, foram processados nos *softwares Excel* e *Stereonet 11.4* para as análises posteriores.

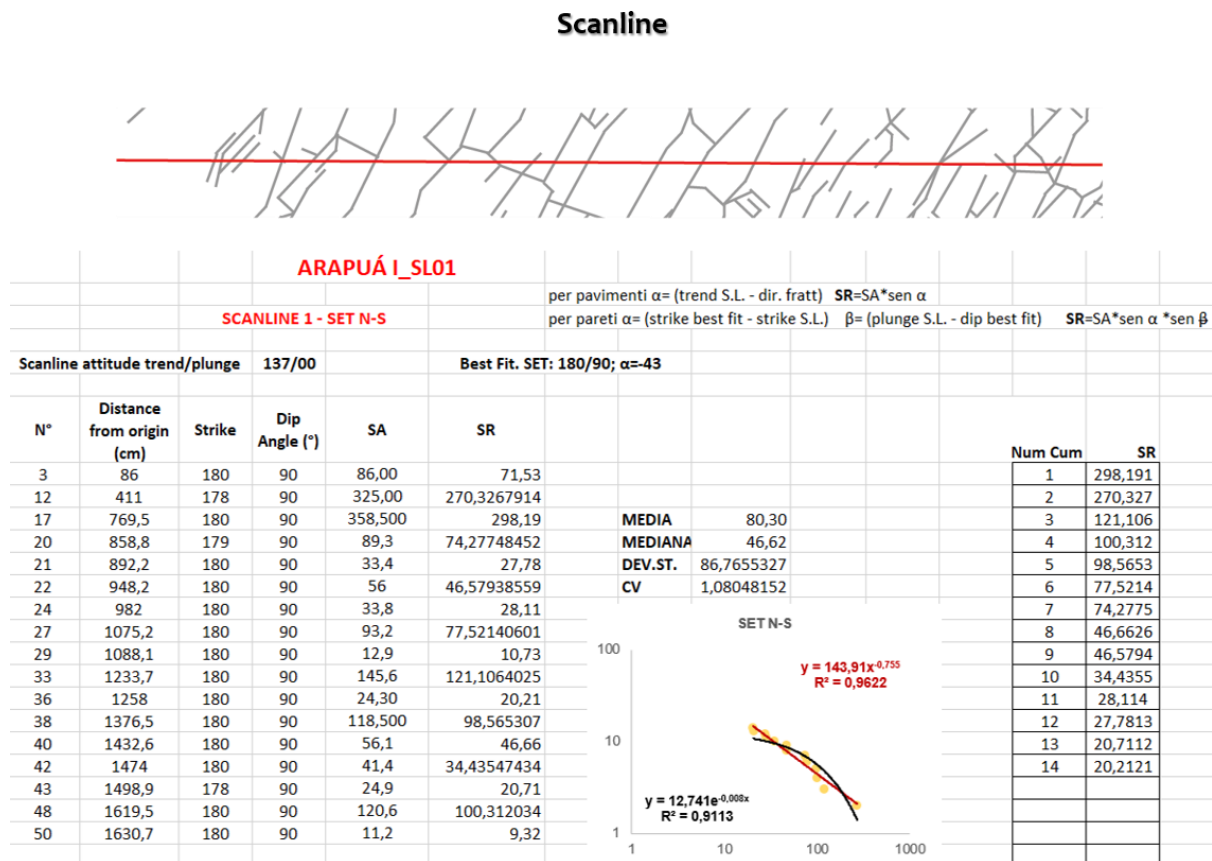
#### 4.4. Análise estatística

A análise estatística é tradicionalmente empregada, neste contexto, com o objetivo de caracterizar a distribuição espacial das fraturas. Duas metodologias tradicionais foram utilizadas para esta finalidade, aplicadas nos afloramentos Arapuá I e III, uma vez que na área Arapuá II não foi possível obter um quantitativo suficiente de fraturas para a elaboração do estudo.

Inicialmente foi calculado o coeficiente de variação (Cv), que consiste em uma medida da dispersão dos dados em torno de uma média, e é obtido por meio da razão entre o desvio padrão e o espaçamento médio,  $CV = \sigma/\mu$  (Cox e Lewis, 1966). Se a distribuição ocorrer de forma aleatório, o CV é igual a 1. Se as fraturas estão dispostas de forma regular, o CV é menor que 1. Se as estruturas estão agrupadas (*clusters*), o CV é maior que 1 (Odling et al., 1999).

Posteriormente, foi analisada a distribuição espacial do conjunto de dados, onde foram inseridos os dados do espaçamento entre as fraturas em um gráfico logaritmo para observar se essa distribuição segue a Lei da Potência ou a Lei Exponencial. Este método é baseado na compreensão de que as falhas seguem uma evolução dinâmica (Davy, 1993). Foi ainda calculado o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para avaliar o ajuste do modelo a essa distribuição.

Os dados estruturais, obtidos com as *scanlines* a partir da ferramenta “*find scanline intersections*” no FFA 5.32, foram projetados no *Stereonet 11.4*. A ferramenta “*lasso select*” permitiu identificar e filtrar os principais sets de fraturas e posteriormente analisar o conjunto de dados por meio das curvas de potência e exponencial. Os dados foram separados por *scanlines* e por set, neste exemplo temos a análise do set N-S, na *scanline* 1 (Figura 4.4).



**Figura 4.4:** Planilha utilizada para o cálculo do coeficiente de variação (Cv) e para a análise das curvas exponencial e de potência.

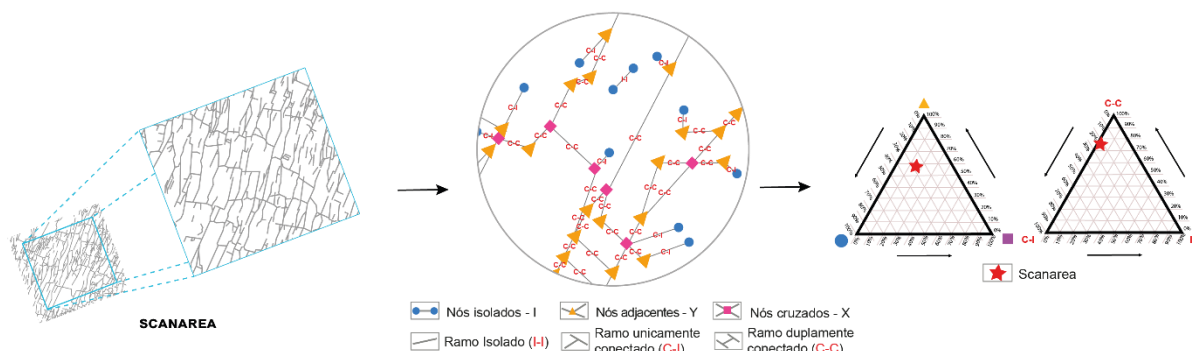
#### 4.5. Análise topológica

Um arranjo de fraturas pode ser definido como um sistema composto por ramificações e nós, que podem ser utilizados para estudar a conectividade das redes (Sanderson e Nixon, 2015; 2018). Os nós são definidos como o ponto de interseção entre duas fraturas, enquanto as ramificações são definidas como uma linha limitada por nós em cada extremidade (Sanderson e Nixon, 2015; 2018).

Os nós são basicamente de três tipos: isolados (I) – o ponto onde termina uma única fratura; adjacentes (Y) – apenas uma terminação encontra uma segunda fratura; e cruzados (X) – quando as duas terminações cruzam outras estruturas. A partir da interpretação dos nós é possível a identificação das ramificações, que podem ser de

três tipos: ramificações isoladas (I-I), ramificações unicamente conectadas (C-I), e ramificações duplamente conectadas (C-C) (Sanderson e Nixon, 2015; 2018; Balsamo *et al.*, 2019).

A análise da topologia iniciou com a quantificação dos nós e ramificações presentes nos arranjos de fraturas mapeados nos três afloramentos (Arapuá I, II e III). Em seguida os dados foram projetados nos diagramas ternários propostos pelos autores Sanderson e Nixon, 2015 (Figura 4.5).



**Figura 4.5:** Fluxograma da aquisição dos parâmetros topológicos realizada em três etapas: a) interpretação de fraturas nas scanareas; b) interpretação dos nós e ramificações presentes no sistema de fraturas; c) quantificação dos nós e ramificações identificados, e projeção nos diagramas ternários.

Para as áreas Arapuá I e III foram definidas quatro (04) *scanareas* de 7,27 m x 8,34 m e 9,54 m x 8,42 m, respectivamente. No afloramento Arapuá II só foi possível delimitar uma (01) *scanarea* de 8,3 m x 8,38 m, em função da proximidade com a estrada.

## 5. CAPÍTULO V – ARTIGO

### **Mapeamento virtual de fraturas em alta resolução para análise estrutural quantitativa em análogo de reservatório carbonático**

*High-resolution virtual fracture mapping for quantitative structural analysis in carbonate reservoir analog*

**Luana S. Silva<sup>1\*</sup>, Vincenzo La Bruna<sup>1</sup>, Renata E. B. Araújo<sup>1</sup>, Francisco H. R. Bezerra<sup>1</sup>, Walter E. Medeiros<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Caixa Postal 1596, CEP: 59078-970, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil. Telefone: +55 (084) 3342-2277

**\*Autor correspondente:** [ls.luanasilv4@gmail.com](mailto:ls.luanasilv4@gmail.com) (L.S. Silva)

**Geologia USP – Série Científica**

Data da submissão: 27 de setembro de 2023

## Resumo

Os reservatórios carbonáticos geralmente são complexos e heterogêneos. Diante da presença de fraturas e processos de dissolução podem ter suas propriedades petrofísicas alteradas. O presente estudo utilizou rochas carbonáticas fraturadas e carstificadas da Formação Jandaíra – Bacia Potiguar, como um análogo deste tipo de reservatório. Foram selecionados três afloramentos localizados no Lajedo Arapuá, em Felipe Guerra/RN, doravante designados Arapuá I, II e III. O objetivo da pesquisa é ressaltar a importância da análise estrutural quantitativa por meio de ferramentas de alta resolução para aprimorar a modelagem de reservatórios carbonáticos fraturados, contemplando escalas de investigação não compreendidas pelos métodos tradicionais. Este objetivo foi alcançado com o uso das seguintes metodologias: imageamento com Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), aquisições de linhas de varredura (*scanlines*) e áreas de varredura (*scanareas*). Para tal, os dados estruturais coletados foram processados para a obtenção dos valores de P20, P21 e P10, e a realização de estudos estatísticos e topológicos. Foi identificada uma variação nos parâmetros citados em relação aos setores do lajedo e a proximidade com o eixo da dobra de Apodi, disposto paralelamente a um corredor de fraturas NE-SW. É possível verificar um aumento no grau de deformação e conectividade entre os elementos estruturais com a proximidade do eixo da dobra, ocorrendo agrupamento (*clusters*) de fraturas associadas aos *sets* N-S e NW-SE. Na literatura, *clusters* são associados a concentrações locais de *strain*. Portanto, podem representar grupos de pequenas fraturas, afetando a porosidade do reservatório, ou de grandes estruturas capazes de conectar diferentes compartimentos, influenciando na permeabilidade. Tais características evidenciam a importância de compreender o desenvolvimento das fraturas subsísmicas, e como elas podem influenciar na qualidade dos reservatórios carbonáticos.

**Palavras-chave:** Análogo de reservatório carbonático; Análise estrutural quantitativa; P20, P21 e P10; Lei da potência e lei exponencial; Topologia.

## Abstract

Carbonate reservoirs are complex and heterogeneous. Due to the presence of fractures and dissolution processes, their petrophysical properties may change. The present study used fractured and karstified carbonate rocks from the Jandaíra Formation – Potiguar Basin, as an analogue of this type of reservoir. Three outcrops located in Lajedo Arapuá, in Felipe Guerra/RN, hereinafter referred to as Arapuá I, II and III, were selected. The objective of the research is to highlight the importance of quantitative structural analysis using high-resolution tools to improve the modeling of fractured carbonate reservoirs, covering investigation scales not understood by traditional methods. This objective was achieved using the following methodologies: imaging with an Unmanned Aerial Vehicle (UAV), acquisition of scanlines and scanareas. To this end, the structural data collected were processed to obtain the values of P20, P21 and P10, and to carry out statistical and topological studies. A variation in the aforementioned parameters was identified in relation to the slab sectors and the proximity to the Apodi fold axis, arranged parallel to a NE-SW fracture corridor. It is possible to verify an increase in the degree of deformation and connectivity between the structural elements with proximity to the fold axis, with clusters of fractures associated with the N-S and NW-SE sets occurring. In the literature, clusters are associated with local strain concentrations. Therefore, they may represent groups of small fractures, affecting the porosity of the reservoir, or large structures capable of connecting different compartments, influencing permeability. Such characteristics highlight the importance of understanding the development of subseismic fractures, and how they can influence the quality of carbonate reservoirs.

**Keywords:** Carbonate reservoir analog; Quantitative structural analysis; P20, P21 e P10; Power law and exponential law; Topology.

### 5.1. Introdução

Os reservatórios carbonáticos são muito valiosos para a exploração de hidrocarbonetos, uma vez que representam entre 50 e 60 % das reservas mundiais (Akbar *et al.*, 2000; Burchette, 2012). Suas propriedades petrofísicas estão diretamente relacionadas à presença de fraturas e processos de dissolução (carstificação) (e.g., Cazarin *et al.*, 2019; Araújo *et al.*, 2021; Bagni *et al.*, 2020; La Bruna *et al.*, 2021; Lopes *et al.*, 2022, 2023).

As fraturas (juntas e falhas) se relacionam com a textura da rocha, afetando a porosidade e permeabilidade, podendo exercer o papel de selante ou conduto (Bourne *et al.*, 2001), e ultrapassar zonas do reservatório em diferentes níveis estratigráficos (Questiaux *et al.*, 2010). O conhecimento sobre o arranjo espacial dos padrões de desenvolvimento de fraturas é essencial para a construção de modelos de reservatórios carbonáticos e na previsão do fluxo de fluidos (Gholipour *et al.*, 2016; Xu *et al.*, 2017; Bagni *et al.*, 2020).

O presente trabalho usou afloramentos de rochas carbonáticas fraturadas e carstificadas como um análogo de reservatórios carbonáticos fraturados e carstificados. A área de estudo está localizada no Lajedo Arapuá, no município de Felipe Guerra/RN, litologicamente representado pela Formação Jandaíra (Figura 5.1). Para a pesquisa foram selecionados três (03) afloramentos: Arapuá I (14,59 m x 16,68 m) - (5°31'47.49"S; 37°36'52.24"O); Arapuá II (16,6 m x 16,76 m) - (5°32'9.41"S; 37°38'18.97"O); e Arapuá III (19,09 m x 16,84 m) - (5°31'57.75"S; 37°38'25.23"O).

A aquisição de dados contou com uma análise estrutural qualitativa em campo e a análise de imagens aéreas obtidas com um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT). A análise estrutural realizada na superfície dos três afloramentos contou com a identificação, qualificação e quantificação das descontinuidades presentes, obtenção das medidas de intensidade, densidade e frequência do fraturamento (P20, P21 e P10) (Dershowitz e Herda, 1992), e o estudo da relação e distribuição espacial entre as estruturas (topologia e estatística) (Sanderson e Nixon, 2015). A integração dos dados permitiu constatar a variação do fraturamento em relação a distância do eixo da dobra em uma escala de alta resolução, e observar características importantes para a compreensão do fluxo de fluidos no contexto de afloramentos análogos à reservatórios carbonáticos fraturados.

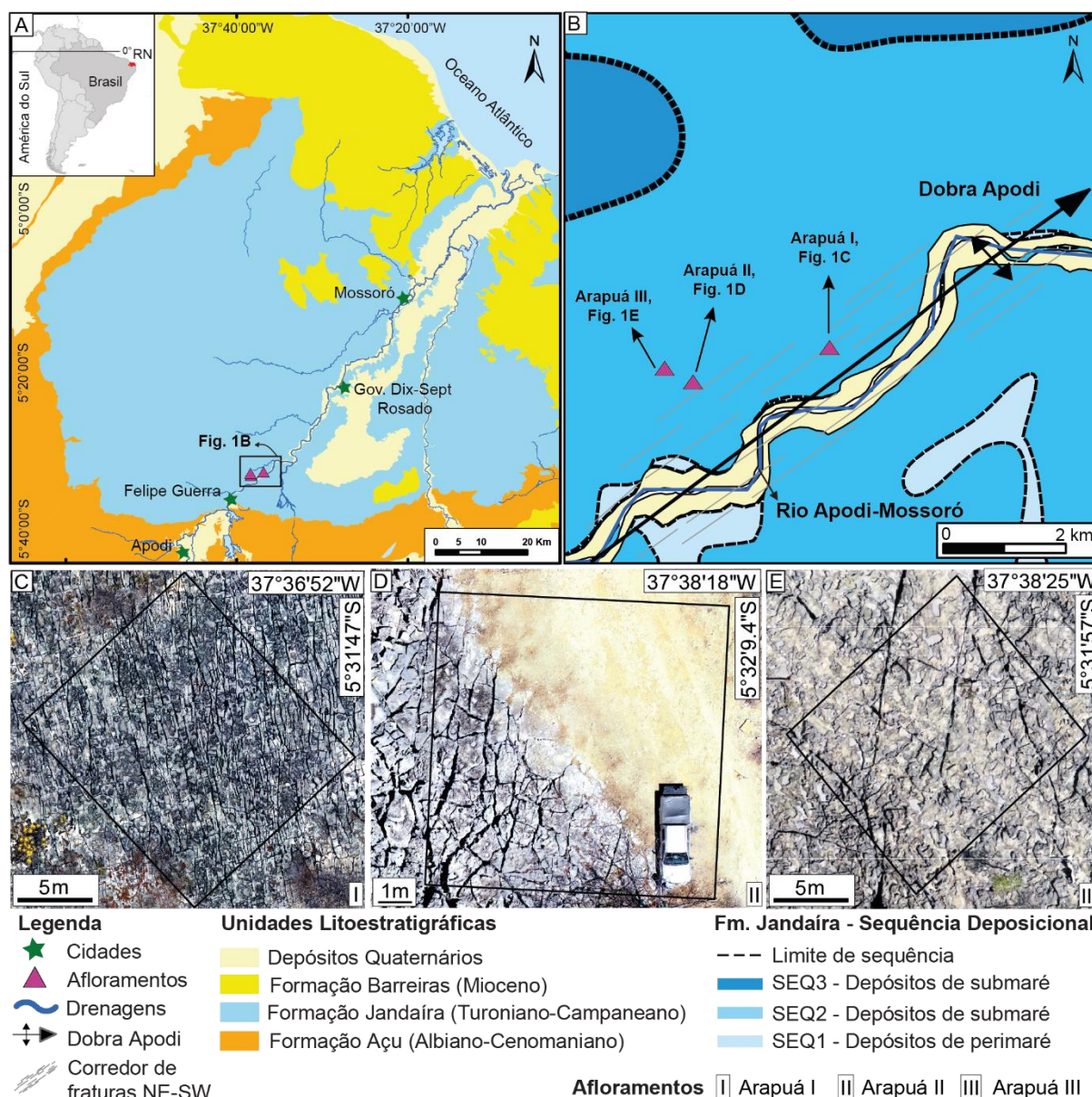
## 5.2. Geologia Regional

A Bacia Potiguar está localizada no extremo NE do Brasil, na Margem Equatorial. Seu desenvolvimento está associado a uma sucessão de eventos tectônicos que foram responsáveis pela separação dos continentes sul-americano e africano, e a formação do Oceano Atlântico Sul (De Matos, 1992). A evolução tectônica e o preenchimento da bacia se deram por meio de três estágios, entre o Neocomiano e o Quaternário, denominados Rifte, Pós-rifte e Drifte (Pessoa Neto *et al.*, 2007). Os diferentes estágios foram relacionados a significativas alterações em sua geometria, e nos sistemas deposicionais.

A área de estudo compreende as rochas da Formação Jandaíra (Figura 5.1B), unidade associada à sequência transgressiva da fase Drifte durante o desenvolvimento da Bacia Potiguar (Córdoba *et al.*, 2001). A porção emersa da bacia inclui largas exposições da unidade, onde se visualizam os efeitos da erosão e carstificação intensas, e uma baixa inclinação de mergulho em direção ao Oceano Atlântico (Pessoa Neto *et al.*, 2007).

No período de sua deposição, e após, a unidade carbonática foi influenciada por episódios de soerguimento, relacionados principalmente a dois campos de tensão instalados ao fim do Cretáceo (Bezerra *et al.*, 2008, 2019). Os episódios foram responsáveis pela exposição subaérea das rochas e sua consequente erosão, tendo como produto um intenso processo de carstificação epigênica (Xavier Neto *et al.*, 2008).

O período Maastrichtiano é associado a eventos de resfriamento crustal, indicando soerguimento e denudação, reativação de falhas, inversão tectônica e desenvolvimento de dobras nas formações Açu e Jandaíra (Françolin e Szatimari, 1987; Lima Neto, 1994; Pessoa Neto *et al.*, 2007). Estudos recentes (Bezerra *et al.*, 2020) estabeleceram a existência de dois campos de tensões principais, desde o Cretáceo Superior até o período atual. O campo de tensão inicial (SF-1) é caracterizado por uma compressão de orientação N-S, de baixo ângulo, e uma extensão E-W, que se prolonga até o Mioceno Médio. Como produto, houve a instalação de um set de fraturas N-S, apresentando veios preenchidos com calcita, e o desenvolvimento de estilólitos de direção E-W (Bertotti *et al.*, 2017; Bezerra *et al.*, 2020).



**Figura 5.1:** a) Mapa geológico regional simplificado destacando a localização da área de estudo no município de Felipe Guerra/RN, inserida na Fm. Jandaíra. Base de Dados: Serviço Geológico do Brasil (Angelim *et al.*, 2006). b) Mapa geológico local evidenciando a localização dos afloramentos em relação à dobra anticlinal Apodi, ao corredor de fraturas paralelo ao eixo da dobra (NE-SW), e ao rio Apodi-Mossoró (modificado de Bagni *et al.*, 2022). c), d) e e) Imagens aéreas obtidas com VANT dos afloramentos Arapua I, II e III, respectivamente.

O segundo estágio de deformação (SF-2) teve início no Mioceno Médio, foi responsável por moldar o relevo da bacia e provocar a reativação e inversão de falhas NE-SW desenvolvidas durante o Rifte, com dobramento relacionado. É definido por uma compressão de orientação E-W a NW-SE, sub-horizontal, integrada a uma extensão sub-horizontal N-S e NE-SW (Bezerra *et al.*, 2020). A compressão durante esse estágio foi acomodada por falhas transversais e reversas, e o desenvolvimento de dobras, como a dobra de Apodi (Bagni *et al.*, 2020).

### 5.3. Metodologia

A atividade de campo contou com a descrição qualitativa dos aspectos geológicos e estruturais nos afloramentos Arapuá I, II e III. A pesquisa foi desenvolvida a partir da elaboração dos dados estruturais quantitativos obtidos através da análise virtual de imagens aéreas (VANT). Tal análise contou com o mapeamento das estruturas a partir da vetorização das fraturas nas três áreas, com a utilização do *software Adobe Illustrator 2019 CC*. Em seguida os dados levantados foram processados com o auxílio do *software Funny Fracture 5.32* (desenvolvido na Universidade de Parma, Itália) que possibilitou identificar aspectos geométricos, orientação, análise da frequência (P10), intensidade (P20) e densidade (P21) do fraturamento nas áreas (Dershowitz e Herda, 1992). Foram interpretadas seis (6) *scanlines* em cada área, utilizadas para compreender a distribuição espacial das fraturas por meio de análise estatística. Por fim, foi realizado um estudo da topologia (Sanderson e Nixon, 2015) nos três afloramentos (Figura 5.2).

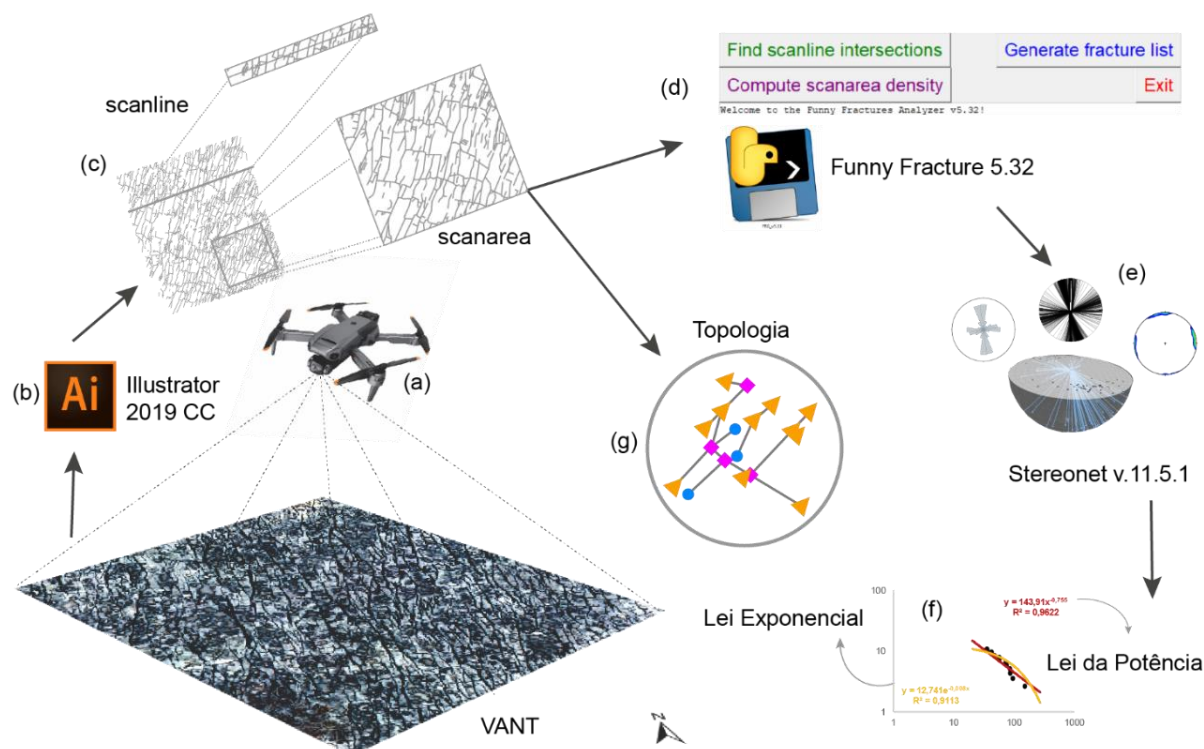
#### 5.3.1. Dados de Campo

##### 5.3.1.1. Imagens aéreas (VANT)

As imagens aéreas foram obtidas nas três áreas de estudo a partir de um Veículo Aéreo Não Tripulado (Figura 5.2A) modelo *DJI Phantom 4 Pro* que possui uma resolução de imagem de 20 megapixels. O levantamento foi realizado a uma altitude de 20 m a partir da superfície do terreno, com sobreposições longitudinais e laterais de 85% entre as faixas de voo. Dessa forma, o voo de 20 m de altura permitiu uma resolução espacial de 0,5 cm/pixel. Os ortomosaicos foram utilizados para a identificação dos principais sets, bem como a obtenção dos parâmetros geométricos e topológicos.

#### 5.3.2. Análise Virtual

Nesta etapa foram utilizadas duas tipologias de análise, *scanlines* e *scanareas*, através destas análises a medida de intensidade do fraturamento é obtida a partir da razão entre o número de fraturas identificadas e o comprimento ou área da *scanline* ou *scanarea* (Dershowitz e Herda, 1992; Sanderson e Nixon, 2015; Giuffrida et al., 2019).



**Figura 5.2:** Síntese da metodologia do trabalho. a) Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT). b) Inserção dos dados no Illustrator 2019 CC. c) Interpretação de fraturas nas áreas, e em *scanlines* e *scanareas* selecionadas. d) Inserção das fraturas interpretadas no FFA 5.32 para obtenção de P20, P21 e P10. e) Projeção dos dados para seleção de sets a serem analisados estatisticamente. f) Análise estatística dos sets selecionados. g) Estudo topológico a partir das *scanareas* para estudar a relação de contato entre as fraturas e seu grau de conectividade.

### 5.3.2.1. P10, P20 e P21

Os parâmetros P10, P20 e P21 foram obtidos a partir da inserção da fotointerpretação do *Illustrator* no software *Funny Fracture* 5.32, e se deu pelos seguintes passos:

- interpretação das fraturas com a ferramenta “caneta” do *Illustrator* em uma camada nomeada “*fractures*”;
- inserção dos limites da área na camada “*scanarea*”, para calcular P20 e P21, ou “*scanline*” para calcular P10, sendo o polígono ou linha confeccionado com a ferramenta “caneta”;
- adição da escala na camada “*scale*”, sendo representada por uma linha desenhada com a ferramenta “caneta”, e numeral único representando o valor equivalente em metro (exemplo: 5);
- salvamento dos arquivos no formato “.svg”, único aceito no *Funny Fracture* 5.32;
- inserção do arquivo “.svg” no *Funny Fracture* 5.32 a partir da ferramenta “*compute scanarea density*”, para P20 e P21, ou “*find scanline intersections*”, para P10;

f) conversão do arquivo de saída, “.txt” contendo valores de P20 e P21 ou P10, comprimento, e orientações das fraturas, em arquivo *Excel* para edição e posterior adição no *Stereonet 11.4*.

Todas as camadas precisam estar com letras minúsculas, e todos os objetos precisam ser confeccionados com a ferramenta “caneta” do *Adobe Illustrator*. O polígono da área precisa estar totalmente fechado. Recomenda-se, até então, a utilização da versão CC 2019, por sua estabilidade.

#### 5.3.2.2. *Análise estatística*

Estatisticamente, existem dois métodos principais para analisar a distribuição espacial de fraturas: o coeficiente de variação (CV) e a análise de curvas de potência e exponencial (Cox e Lewis, 1966; Davy, 1993; Odling *et al.*, 1999). O coeficiente de variação é uma medida da dispersão dos dados em torno da média, obtido a partir da razão entre o desvio padrão e o espaçamento médio,  $CV = \sigma/\mu$  (Cox e Lewis, 1966). Para estruturas dispostas de forma aleatória, o CV é igual a 1. Se as fraturas estão propagadas de forma regular, o CV é menor que 1. Se os traços estão agrupados (*clusters*), o CV é maior que 1 (Odling *et al.*, 1999). A análise das curvas de potência e exponencial é baseada na compreensão de que as falhas seguem uma evolução dinâmica (Davy, 1993). Para esta análise são projetadas curvas para avaliar qual padrão de distribuição o conjunto de dados irá seguir, por exemplo, uma Lei de Potência. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é obtido para avaliar o ajuste do modelo.

Os dados estruturais, obtidos com as *scanlines* a partir da ferramenta “*find scanline intersections*” no FFA 5.32, foram projetados no *Stereonet 11.4*. A ferramenta “*lasso select*” permitiu identificar e filtrar os principais *sets* de fraturas e posteriormente analisar o conjunto de dados por meio das curvas de potência e exponencial.

#### 5.3.2.3. *Topologia*

Os padrões de fraturamento possuem algumas propriedades importantes mais intimamente relacionadas à topologia do que à geometria. Do ponto de vista bidimensional, um arranjo de fraturas é basicamente um sistema de ramificações e nós, que podem ser utilizados para avaliar a conectividade da rede (Sanderson e Nixon, 2015).

Para tanto, são quantificadas as proporções dos nós, que podem ser definidos como o ponto de interseção entre duas fraturas. Os nós são basicamente de três tipos: isolados (I) – o ponto onde termina uma única fratura; adjacentes (Y) – apenas

uma terminação encontra uma segunda fratura; e cruzados (X) – quando as duas terminações cruzam outras estruturas. Através da quantificação dos nós, é possível a classificação das ramificações, definida como uma linha limitada por nós em cada extremidade. Os ramos podem ser de três tipos: ramos isolados (I-I), ramos conectados individualmente (C-I), e ramos duplamente conectados (C-C) (Sanderson e Nixon, 2015; Balsamo *et al.*, 2019).

O reconhecimento da distribuição do arranjo de fraturas, e o grau de conectividade ao qual estão sujeitas, foi realizado a partir do estudo da topologia nas interpretações de fraturas identificadas nas imagens aéreas das três (03) áreas de estudo. Para as áreas Arapuá I e III foram definidas quatro (04) *scanareas* de 7,27 m x 8,34 m e 9,54 m x 8,42 m, respectivamente. No afloramento Arapuá II só foi possível delimitar uma (01) *scanarea* de 8,3 m x 8,38 m, em função da proximidade com a estrada.

## 5.4. Resultados

### 5.4.1. Análise Qualitativa

O Lajedo Arapuá é caracterizado por um expressivo fraturamento de orientações N-S, E-W, NE-SW e NW-SE (Figura 5.3), relacionado principalmente aos eventos deformacionais SF-1 e SF-2 (Bezerra *et al.*, 2008, 2019; Bagni *et al.*, 2020), e a presença de um intenso processo de carstificação epigênica como produto da dissolução carbonática (Pereira Gomes *et al.*, 2019; Bagni *et al.*, 2022; Lopes *et al.*, 2022; Araújo *et al.*, 2023).

A área Arapuá I é a mais próxima ao eixo da dobra, distando 800 m, na região NE do lajedo. O fraturamento é muito expressivo, se dispondo de forma contínua, possuindo estruturas métricas com padrão ortogonal, representado principalmente por juntas sub-verticais e secundariamente por veios e estilólitos (Figura 5.3C, E e F). As estruturas mapeadas variam entre 9 cm a 16,1 m quanto ao comprimento e apresentam alta rugosidade, influenciada pelos processos de dissolução. Foram observados quatro sets de fraturas, com dois sets principais: N-S e NW-SE (Figura 5.3). Foi identificada a presença predominante de *grainstones* suportados pelos grãos, localmente foi observado processo de recristalização.

O afloramento Arapuá II está localizado na porção SW do lajedo, a 1,4 km de distância do trecho central do eixo de dobra, marcado pela presença do rio Apodi-Mossoró. Possui principalmente fraturas N-S e E-W, que variam desde 7 cm até 6,3

m de extensão (Figura 5.3D), com padrão ortogonal. Constituem juntas sub-verticais, com pontuais ocorrências de veios. A litologia é composta por *packstones* e *grainstones* com cimentação carbonática. Nas proximidades da área foram identificadas zonas muito carstificadas, com fraturas sub-verticais de profundidade maior que 1 m (Figura 5.3A, B).



**Figura 5.3:** Fotos da etapa de campo. a), b) e d) Arapua II com grande variação no tamanho e profundidade das fraturas, com zonas muito carstificadas. c), e) e f) Arapua I com juntas e veios preferencialmente N-S e NW-SE, sub-verticais, e casualmente sub-horizontais. g) Arapua III com menos fraturas, mais dispersas, extensas, de orientação E-W.

Por sua vez, o afloramento Arapuá III está a 1,8 km de distância do eixo, na porção NW do Lajedo Arapuá, sendo a área mais distante da zona principalmente fraturada. As rochas da área são *packstones* e *grainstones*. A orientação principal das fraturas é NE-SW, seguido de E-W à WNW-ESE. Neste afloramento as fraturas se mostram mais dispersas, se dispondo com padrão ortogonal. As estruturas variam entre 14,0 cm e 15,3 m, com mergulho sub-vertical.

#### 5.4.2. Análise Quantitativa

A análise estrutural quantitativa foi realizada nos três afloramentos a partir do mapeamento virtual em imagens aéreas de VANT, e com a utilização de *softwares* específicos para essa finalidade. As três áreas selecionadas, Arapuá I (14,59 m x 16,68 m), Arapuá II (16,6 m x 16,76 m), e Arapuá III (19,09 m x 16,84 m) estão inseridas no Lajedo Arapuá (Pereira Gomes *et al.*, 2019; Lopes *et al.*, 2022), próximo ao eixo da dobra Apodi, o qual se encontra paralelo ao corredor de fraturas NE-SW, e paralelo ao baixo curso do rio Apodi-Mossoró (Bagni *et al.*, 2020). Foram mapeados 4 sets de fraturas N-S, E-W, NE-SW e NW-SE.

##### 5.4.2.1. Arapuá I

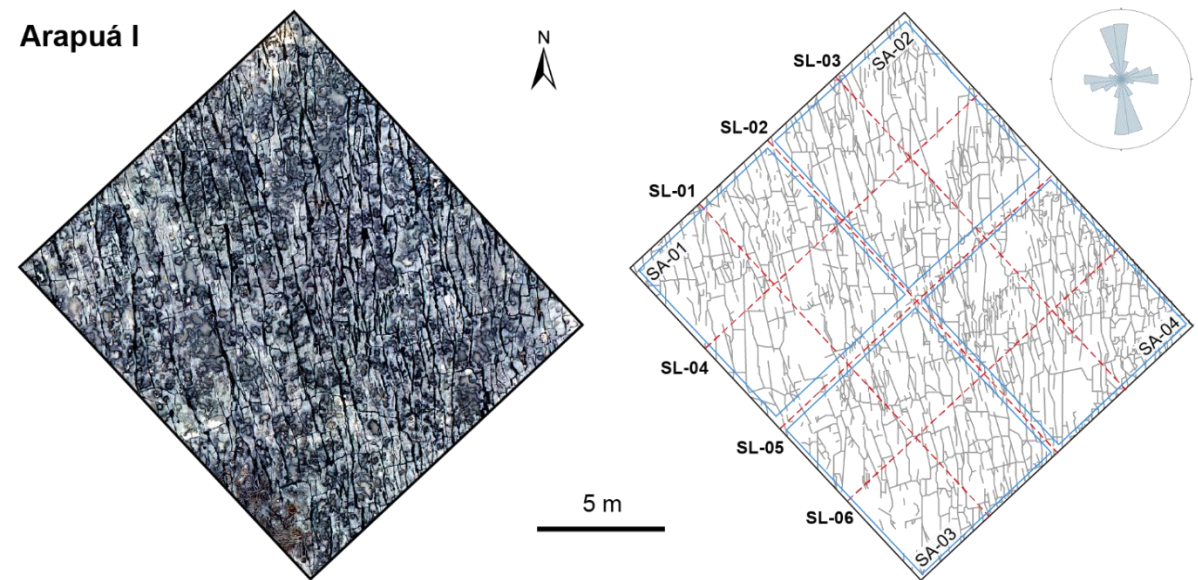
A interpretação estrutural permitiu identificar 1010 fraturas no afloramento Arapuá I, N-S (283), E-W (130), NE-SW (209) e NW-SE (388), com orientações preferenciais N-S e NW-SE. O cálculo da densidade (P20) e intensidade (P21) resultou em 2,420 e 2,314, respectivamente. Os valores de P20 e P21 obtidos nas *scanareas* apresentaram uma variação entre 2,993 e 5,238 para P20, e 2,337 e 3,233 para P21 (Figura 5.4). A análise da frequência do fraturamento (P10) realizada nas seis (6) *scanlines* mostrou variação entre 2,69 e 3,56 (Figura 5.4 e Tabela 1).

**Tabela 1:** Informações sobre a orientação e tamanho das *scanlines* obtidas no afloramento Arapuá I, número de fraturas identificadas e o valor de P10 calculado.

| Arapuá I  |            |                 |                |      |
|-----------|------------|-----------------|----------------|------|
| Scanlines | Orientação | Comprimento (m) | Nº de Fraturas | P10  |
| SL01      | 137°       | 16,42 m         | 51             | 3,10 |
| SL02      | 137°       | 16,69 m         | 48             | 2,87 |
| SL03      | 137°       | 16,69 m         | 45             | 2,69 |
| SL04      | 47°        | 14,67 m         | 50             | 3,40 |
| SL05      | 47°        | 14,63 m         | 46             | 3,15 |
| SL06      | 47°        | 14,61 m         | 52             | 3,56 |

Outro parâmetro mensurado foi a distribuição espacial entre as fraturas. O cálculo do coeficiente de variação (CV) resultou em valores entre: 1,0 e 1,56 para o

set N-S; 0,42 e 0,99 para E-W; 0,73 e 0,75 para NE-SW; e 1,0 e 1,33 para NW-SE. Em alguns sets não foram identificadas fraturas suficientes para o cálculo do CV. Os sets N-S e NW-SE apresentaram principalmente valores de CV acima de 1 (Tabela 2).



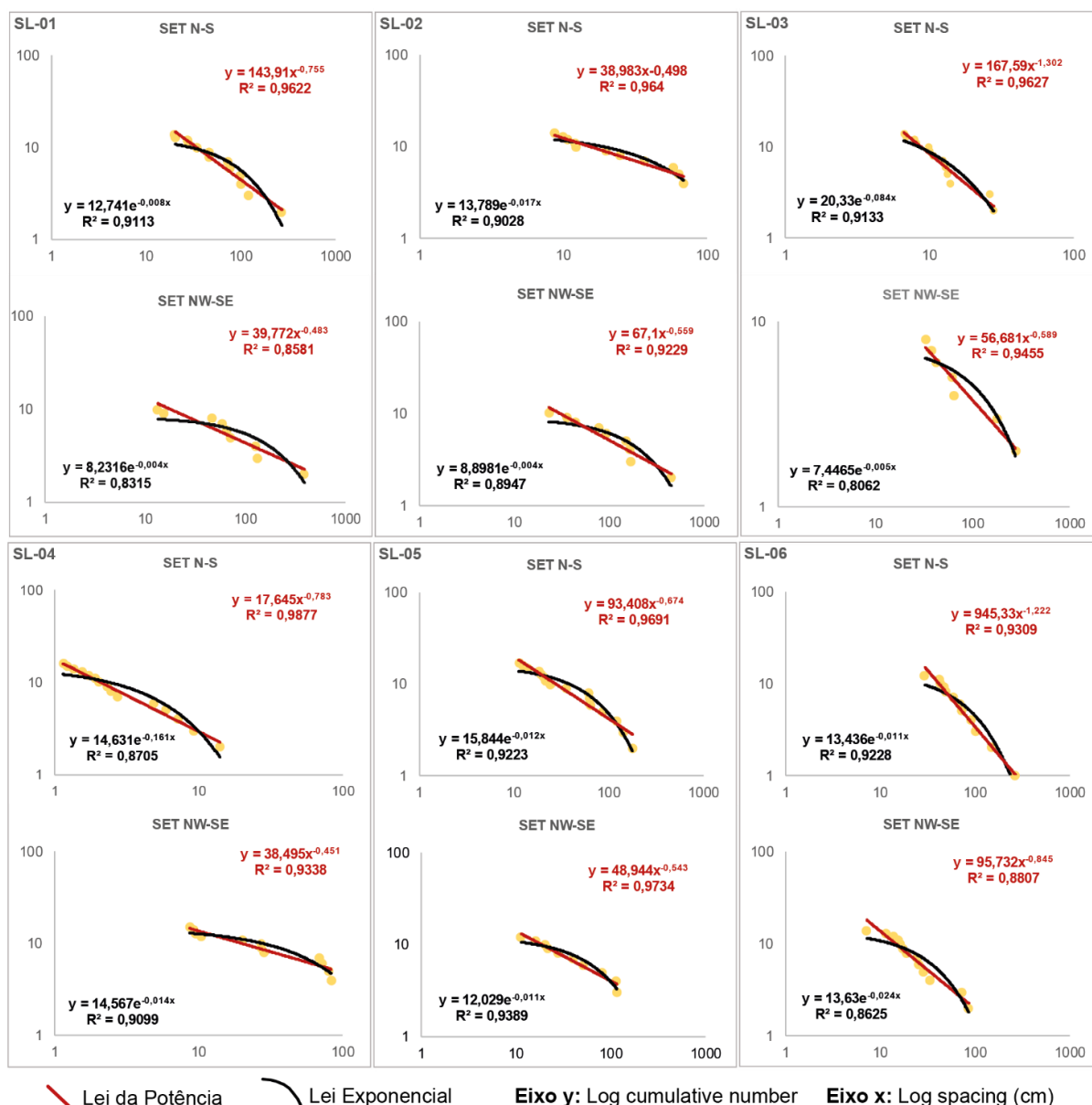
SA-01 P20: 3,060 P21: 2,337 SA-03 P20: 5,238 P21: 3,233  
P20: 2,420 P21: 2,314 SA Scanarea SL Scanline SA-02 P20: 2,993 P21: 2,462 SA-04 P20: 3,523 P21: 2,448

**Figura 5.4:** a) Imageamento com VANT, Arapua I. b) Interpretação de fraturas utilizada para calcular P20 e P21 na área. As scanareas em azul foram também utilizadas para calcular P20 e P21, e o estudo topológico. As linhas tracejadas em vermelho são as scanlines utilizadas para a obtenção do P10.

A análise do espaçamento multiescalar das fraturas no afloramento I correlacionou o conjunto de dados com as curvas exponencial e de potência, o que caracterizou os sets N-S e NW-SE por uma distribuição de potência, documentada a partir dos valores de  $R^2$  potencial maiores que o  $R^2$  exponencial (Figura 5.5). Os sets E-W e NE-SW mostraram uma distribuição ao longo da Lei Exponencial.

**Tabela 2:** Coeficiente de variação para cada set identificado nas 06 scanlines do afloramento I.

| Arapuá I  |      |                  |      |                  |       |                  |       |                  |              |
|-----------|------|------------------|------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|--------------|
| Sets      | N-S  |                  | E-W  |                  | NE-SW |                  | NW-SE |                  | Fraturas     |
| Scanlines | CV   | Fraturas por set | CV   | Fraturas por set | CV    | Fraturas por set | CV    | Fraturas por set | por scanline |
| SL01      | 1,08 | 17               | 0,97 | 8                | 0,75  | 9                | 1,11  | 10               | 51           |
| SL02      | 1,18 | 14               | 0,86 | 6                | -     | 3                | 1,04  | 11               | 48           |
| SL03      | 1,56 | 18               | 0,84 | 10               | 0,73  | 7                | 1,33  | 8                | 45           |
| SL04      | 1,00 | 17               | 0,99 | 10               | -     | 1                | 1,03  | 17               | 50           |
| SL05      | 1,01 | 19               | 0,42 | 5                | -     | 1                | 1,02  | 15               | 46           |
| SL06      | 1,10 | 22               | -    | 3                | -     | 0                | 1,00  | 17               | 52           |



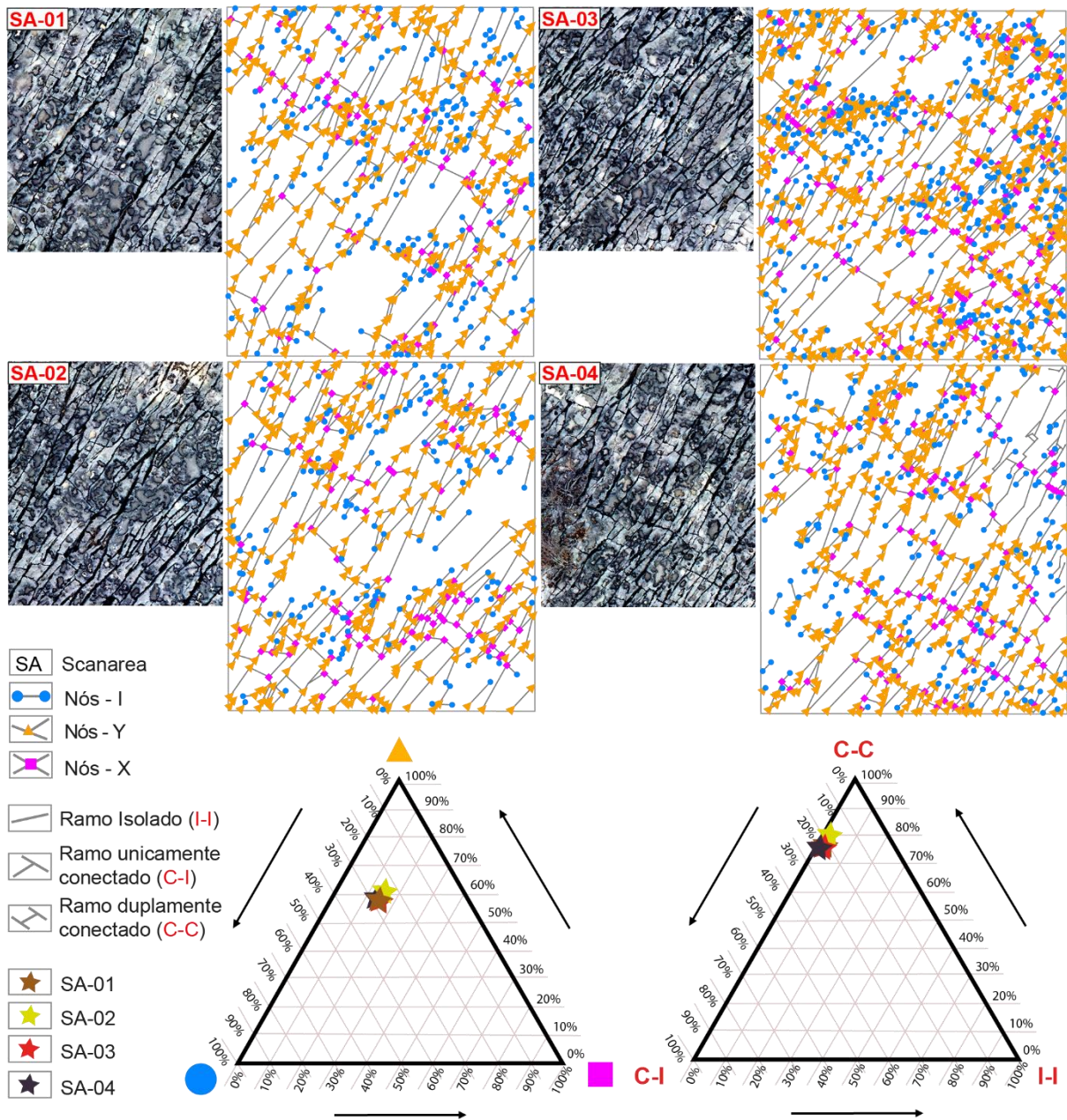
**Figura 5.5:** Gráfico log-log do número cumulativo pelo espaçamento de fraturas. Em laranja a Lei Exponencial, em vermelho a Lei de Potência. Calculado para o afloramento Arapuá I.

A análise topológica no afloramento Arapuá I foi realizada em quatro (4) *scanareas* (Figura 5.6 e Tabela 3) e permitiu observar a predominância dos nós do tipo Y, com um total de 1.906 (58,6%) ocorrências, seguido do tipo I, com 903 (27,7%), e o X com 441 (13,7%), sendo o menos frequente. Quanto à análise das ramificações, há predominância do tipo C-C, ocorrendo 2.636 vezes (76%), seguido do tipo C-I, contendo 756 (22%), e o menos frequente o tipo I-I, com 73 (2%) ocorrências (Figura 5.6).

**Tabela 3:** Resultado da análise topológica realizada no afloramento Arapuá I informando a quantidade de nós e ramificações identificadas em cada *scanarea*.

| Arapuá I |
|----------|
|----------|

| Scanarea     | SA-01 | SA-02 | SA-03 | SA-04 |
|--------------|-------|-------|-------|-------|
| Nós          |       |       |       |       |
| I            | 199   | 158   | 330   | 216   |
| Y            | 403   | 392   | 691   | 420   |
| X            | 83    | 98    | 154   | 106   |
| Ramificações |       |       |       |       |
| I-I          | 21    | 12    | 26    | 14    |
| C-I          | 157   | 134   | 278   | 187   |
| C-C          | 527   | 560   | 911   | 638   |



**Figura 5.6:** Análise da topologia do afloramento Arapuá I. As ramificações foram plotadas no gráfico a direita, os dados não foram apresentados na figura para melhorar a visualização dos nós.

5.4.2.2. Arapuá II

O mapeamento virtual no afloramento Arapuá II permitiu identificar 555 fraturas, com orientações N-S (164), E-W (90), NE-SW (198) e NW-SE (104). A análise de densidade (P20) e intensidade (P21) de fraturamento na área forneceu os valores de 1,713 e 0,899, respectivamente. Tais parâmetros também foram mensurados na *scanarea* SA-01 delimitada no interior do afloramento, que forneceu 1,166 para P20 e 0,831 para P21 (Figura 5.7). A partir das seis (6) *scanlines* levantadas, a frequência de fraturamento (P10) variou entre 1,00 e 2,85 (Figura 5.7 e Tabela 4) (Dershowitz e Herda, 1992; Sanderson e Nixon, 2015; Giuffrida et al., 2019). A quantidade de fraturas documentadas nesta área com as *scanlines* não permitiu desenvolver uma análise estatística.

Tabela 4: *Scanlines* interpretadas para o cálculo de P10.

| Arapuá II |            |                 |                |      |
|-----------|------------|-----------------|----------------|------|
| Scanlines | Orientação | Comprimento (m) | Nº de Fraturas | P10  |
| SL01      | 138°       | 5,96 m          | 17             | 2,85 |
| SL02      | 138°       | 11,87 m         | 24             | 2,02 |
| SL03      | 138°       | 17,9 m          | 25             | 1,39 |
| SL04      | 31°        | 5,60            | 14             | 2,5  |
| SL05      | 47°        | 11,9 m          | 12             | 1    |
| SL06      | 45°        | 7,72 m          | 13             | 1,68 |

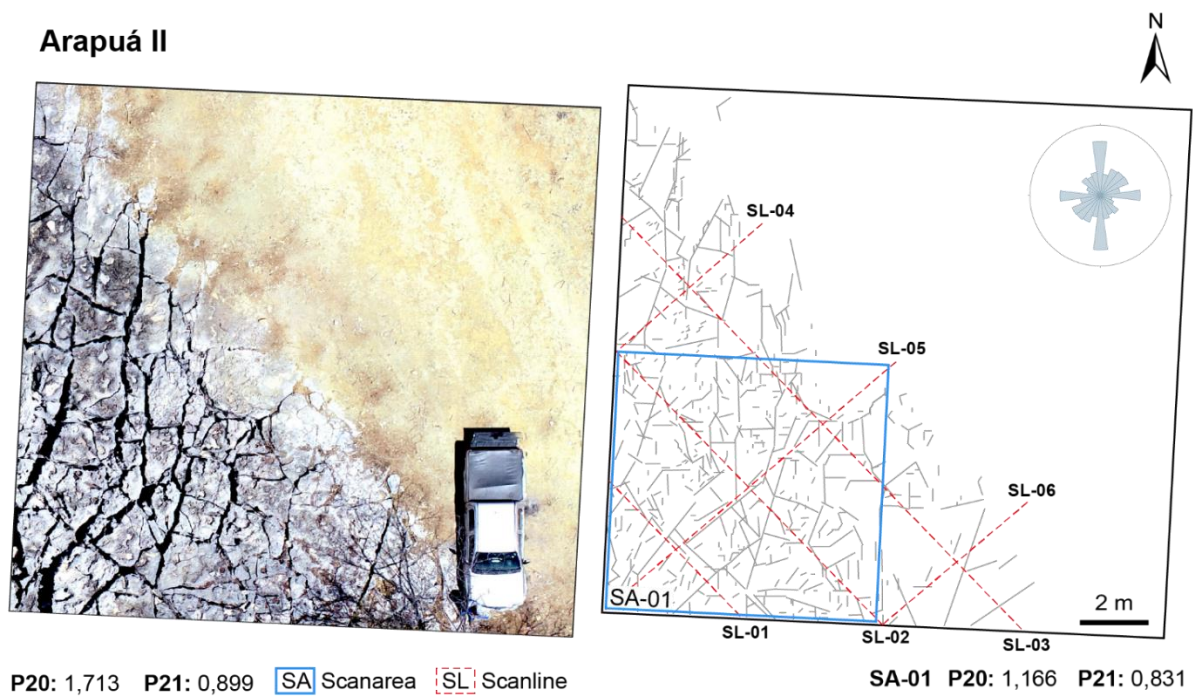
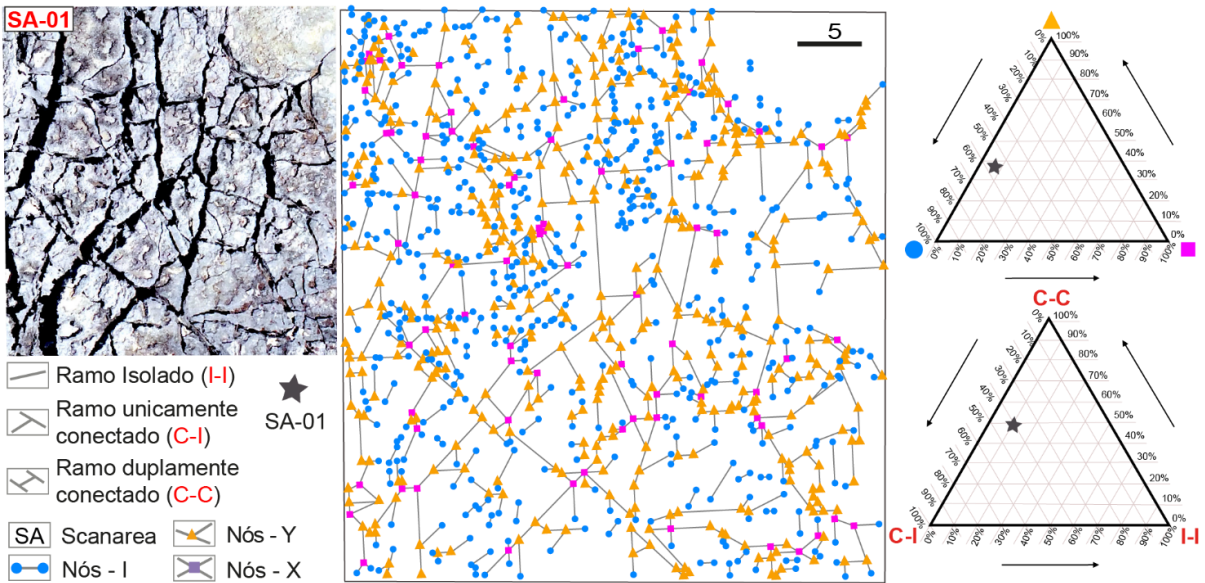


Figura 5.7: a) Imagem aérea do afloramento Arapuá II. b) Fraturas interpretadas nas imagens, em azul a *scanareas* utilizada para calcular P20 e P21 e a topologia. Em vermelho, *scanlines* utilizadas para o cálculo de P10.

O grau de conectividade entre as fraturas foi mensurado a partir das interpretações das imagens aéreas. A análise topológica no afloramento II foi realizada em uma (01) *scanarea* e permitiu observar a predominância dos nós do tipo I, com 589 ocorrências (53,5%), seguido do tipo Y com 434 (39,5%), e o X com 7 (7%), sendo o menos frequente. Quanto à análise das ramificações, há predominância do tipo C-C, ocorrendo 474 vezes (49,6%), seguido do tipo C-I contendo 376 (39,4%), e o menos frequente o tipo I-I, com 105 ocorrências (11%) (Figura 5.8).



**Figura 5.8:** Análise da topologia no afloramento Arapua II. Nós e ramificações foram plotadas nos gráficos ternários a direita.

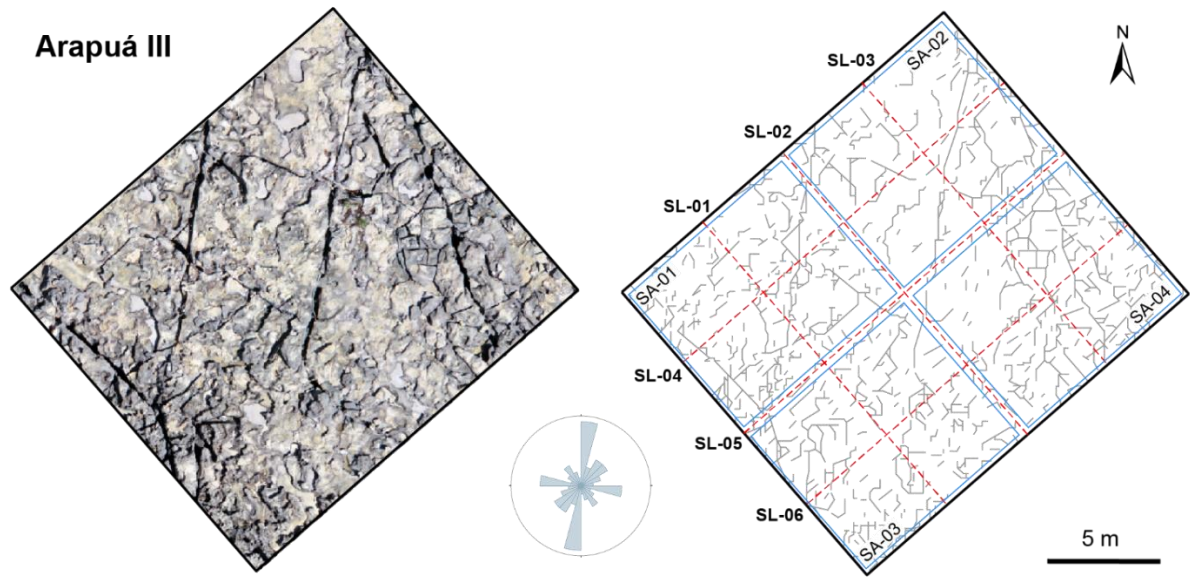
**5.4.2.3. Arapua III**

No afloramento Arapua III foram mapeadas 566 fraturas, N-S (235), E-W (101), NE-SW (163) e NW-SE (67), com *sets* preferenciais N-S e NE-SW (Figura 4.9). O valor obtido para P20 foi 0,962, e para P21 de 0,996. O levantamento da densidade e intensidade de fraturamento no interior das *scanareas* variou entre 1,006 e 1,376 para P20, e entre 0,720 e 1,014 para P21. A frequência do fraturamento obtida nas *scanlines* apresentou uma pequena variação, observado por valores de P10 entre 1,19 e 1,90 (Tabela 5).

**Tabela 5:** Informações sobre a orientação e tamanho das *scanlines* adquiridas no afloramento III e resultados obtidos pós processamento dos dados, como o número de fraturas identificadas e o valor de P10 calculado.

| Arapua III |            |                 |                |      |
|------------|------------|-----------------|----------------|------|
| Scanlines  | Orientação | Comprimento (m) | Nº de Fraturas | P10  |
| SL01       | 139°       | 16,8 m          | 32             | 1,90 |

|      |      |        |    |      |
|------|------|--------|----|------|
| SL02 | 139° | 16,8 m | 22 | 1,30 |
| SL03 | 139° | 16,8 m | 26 | 1,66 |
| SL04 | 49°  | 19,2 m | 28 | 1,45 |
| SL05 | 49°  | 19,2 m | 23 | 1,19 |
| SL06 | 49°  | 19,2 m | 23 | 1,19 |

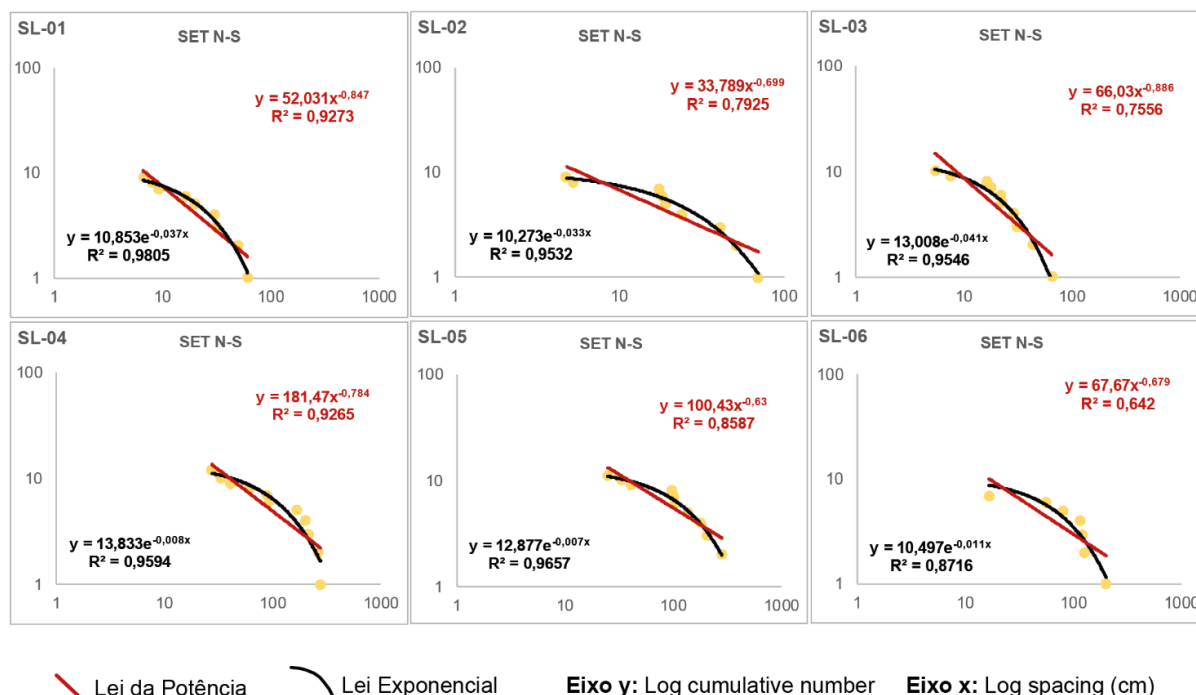


**Figura 5.9:** a) Imageamento de VANT, Arapuá III. b) Interpretação de fraturas utilizada para calcular P20 e P21 da área. As *scanareas* em vermelho foram também utilizadas para as análises de P20 e P21, e o estudo topológico. As linhas tracejadas são as *scanlines* utilizadas para a obtenção do P10.

A análise espacial estatística forneceu valores de coeficiente de variação (CV) entre 0,68 e 0,88 para o set N-S, entre 0,62 e 0,78 para E-W, entre 0,58 e 0,87 para NE-SW, e entre 0,63 e 0,97 para NW-SE. Todos os *sets* mapeados apresentaram principalmente CV menor que 1 (Tabela 6). A correlação dos dados com as curvas exponencial e de potência caracterizou a distribuição espacial da área segundo a Lei Exponencial Negativa, com R<sup>2</sup> exponencial maior que R<sup>2</sup> potencial (Figura 5.10).

**Tabela 6:** Valores do coeficiente de variação obtidos para cada set identificado nas 06 *scanlines* do afloramento III.

| Arapuá III |      |                  |      |                  |      |                  |      |                  |                       |
|------------|------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|------------------|-----------------------|
| Sets       |      | N-S              |      | E-W              |      | NE-SW            |      | NW-SE            |                       |
| Scanlines  | CV   | Fraturas por set | CV   | Fraturas por set | CV   | Fraturas por set | CV   | Fraturas por set | Fraturas por scanline |
| SL01       | 0,74 | 10               | 0,75 | 9                | 0,58 | 7                | -    | 1                | 32                    |
| SL02       | 0,78 | 10               | 0,19 | 7                | 0,85 | 4                | -    | 1                | 22                    |
| SL03       | 0,68 | 11               | 0,78 | 5                | 0,87 | 5                | -    | 2                | 26                    |
| SL04       | 0,75 | 13               | 0,62 | 6                | -    | 1                | 0,63 | 5                | 28                    |
| SL05       | 0,69 | 12               | -    | 3                | -    | 2                | -    | 1                | 23                    |
| SL06       | 0,88 | 9                | -    | 3                | -    | 2                | 0,97 | 8                | 23                    |

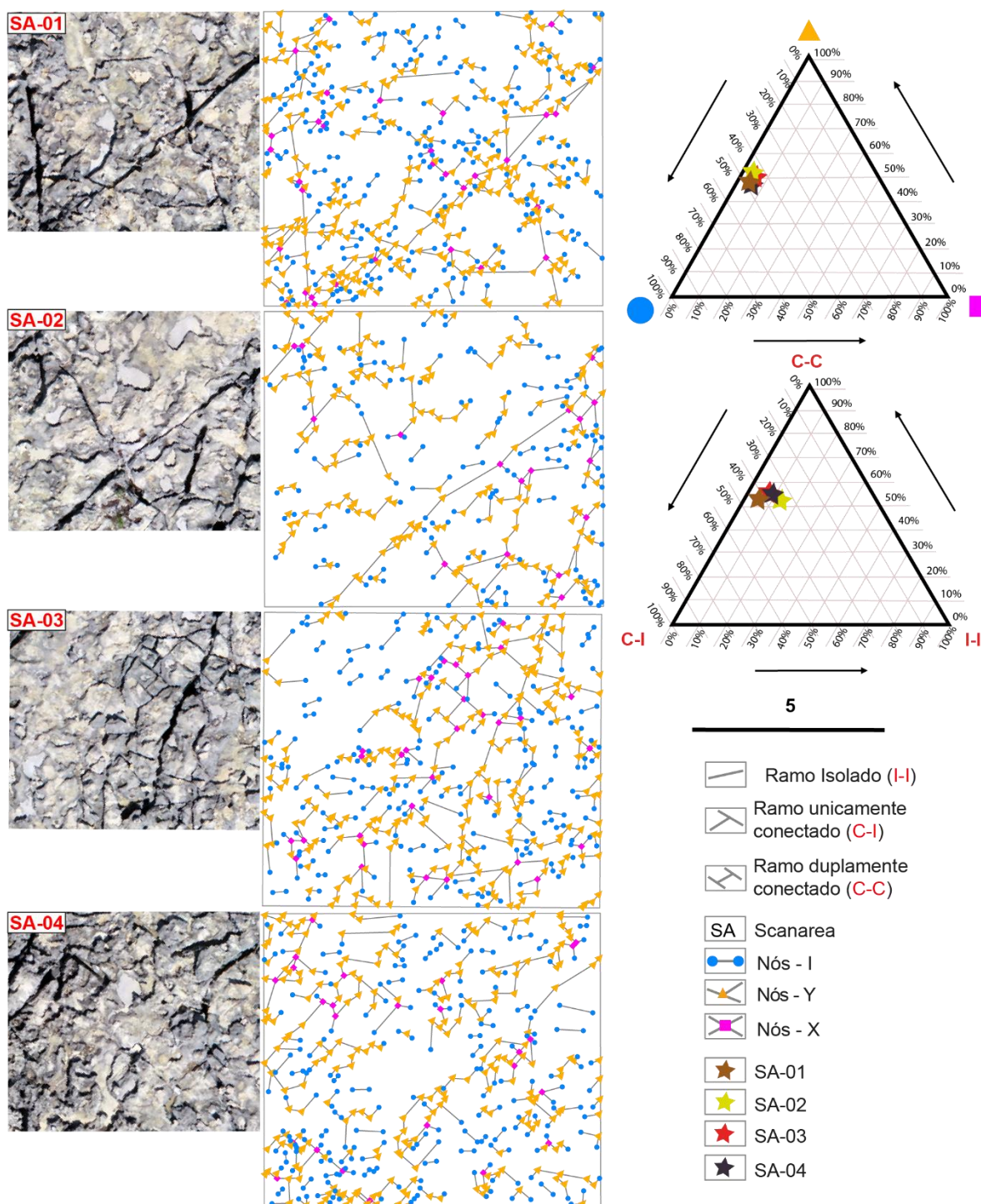


**Figura 5.10:** Gráfico log-log do número cumulativo pelo espaçamento de fraturas. Linhas laranjas correspondem a Lei Exponencial e linhas vermelhas à Lei de Potência, calculado para o afloramento Arapuá III.

A análise dos nós e ramificações no afloramento Arapuá III contou com a interpretação de quatro (4) *scanareas*, localizadas de acordo com a Figura 5.9. Foi visualizada a predominância de nós do tipo Y, com um total de 932 (49,8%) ocorrências, seguido do tipo I, surgindo 834 (44,6%) vezes, e o menos frequente o tipo X, com 106 (5,6%) ocorrências no total das quatro (4) *scanareas*. Quanto às ramificações, há predominância do tipo C-C, com 865 (54,4%) ocorrências, seguido de C-I com 612 (38,5%), e I-I com 112 (7,1%) vezes (Figura 5.11 e Tabela 7).

**Tabela 7:** Resultado da análise topológica realizada no afloramento Arapuá III informando a quantidade de nós e ramificações identificadas em cada *scanarea*.

| Arapuá III          |       |       |       |       |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| Scanarea            | SA-01 | SA-02 | SA-03 | SA-04 |
| <b>Nós</b>          |       |       |       |       |
| I                   | 246   | 146   | 210   | 232   |
| Y                   | 276   | 181   | 236   | 239   |
| X                   | 32    | 17    | 32    | 25    |
| <b>Ramificações</b> |       |       |       |       |
| I-I                 | 27    | 17    | 31    | 37    |
| C-I                 | 193   | 112   | 149   | 158   |
| C-C                 | 262   | 163   | 220   | 220   |



**Figura 5.11:** Análise da topologia do afloramento Arapuá III. À esquerda, as *scanareas* na imagem aérea, e à direita as interpretações. Os diferentes tipos de nós estão representados por círculos azuis (I), triângulos laranjas (Y) e quadrados roxos (X). As ramificações não foram ilustradas em função da escala de visualização, contudo os dados foram projetados no gráfico ternário.

## 5.5. Discussões

Os métodos tradicionais empregados para caracterização dos reservatórios de hidrocarbonetos, tais como, a perfuração de poços e o método sísmico, abrangem escalas de investigação que podem limitar a identificação de estruturas entre 1,0 -

50,0 m (Giuffrida *et al.*, 2019; La Bruna *et al.*, 2021; Furtado *et al.*, 2022). O estudo de afloramentos análogos, principalmente em reservatórios carbonáticos, auxilia na compreensão dos efeitos da presença de estruturas subsísmicas (fraturas, carste) nas propriedades de armazenamento e migração de fluidos nesses reservatórios (e.g., Cazarin *et al.*, 2019; Araújo *et al.*, 2021; Bagni *et al.*, 2020; La Bruna *et al.*, 2021; Furtado *et al.*, 2022; Lopes *et al.*, 2022, 2023). Esta pesquisa utilizou os afloramentos da Formação Jandaíra como um análogo de reservatórios carbonáticos fraturados e carstificados.

Após a deposição da Formação Jandaíra, foram descritos dois principais eventos deformacionais na Bacia Potiguar, denominados SF-1 e SF-2 (Bezerra *et al.*, 2020). O SF-1 é associado à uma compressão sub-horizontal N-S e extensão E-W, marcada pela presença de juntas N-S e estilólitos E-W, desenvolvida do Campaniano ao Mioceno (Figura 5.3E, F). Já o evento SF-2, do Mioceno até o presente, corresponde a uma compressão E-W com evidências de rotação do eixo de tensão para NW-SE, na porção oeste da bacia (Bezerra *et al.*, 2020). A dobra Apodi (Figura 5.12A) é associada ao evento SF-2 como produto da compressão NW-SE, possuindo eixo NE-SW paralelo a um corredor de fraturas e ao atual curso do rio Apodi-Mossoró (Bagni *et al.*, 2020).

O corredor de fraturas mapeado por Bagni *et al.* (2020) possui 1,5 km de largura e cerca de 20 km de comprimento. O afloramento Arapuá III está localizado a aproximadamente 1,8 km da região central do eixo (Figura 5.1, Figura 5.9, Figura 5.12. Tabela 5), e demonstra uma baixa influência da zona, se comparado com o Arapuá I, localizado a cerca de 800 m (Figura 5.12). Este último, por sua vez, apresenta maior intensidade e densidade de fraturamento (Figura 5.4, Figura 5.12. Tabela 1), demonstrando uma forte influência da proximidade com a estrutura. No Arapuá I, os dois sets preferenciais são o N-S e NW-SE, acompanhando os padrões de fraturas associados ao evento SF-2 (Bezerra *et al.*, 2020), oriundos da reativação de estruturas pretéritas e da atuação da compressão NW-SE, responsável por um campo distensional NE-SW.

A distribuição espacial do fraturamento pode ser avaliada por meio de ferramentas estatísticas, como a obtenção do coeficiente de variação (CV) e a análise de curvas de potência e exponencial (Cox e Lewis, 1966; Davy, 1993; Odling *et al.*, 1999). A determinação do CV documentou valores abaixo de 1 para o afloramento Arapuá III (Tabela 6), o que significa um fraturamento mais difuso e regular nessa

área. O afloramento I apresentou valores acima de 1, em detalhe os sets N-S, com o CV variando entre 1,0 e 1,56, e NW-SE de 1,0 até 1,33 (Tabela 2), indicando a presença de agrupamento de fraturas (*clusters*).

A análise do espaçamento multiescalar permitiu observar se as estruturas seguem uma distribuição de acordo com a Lei Exponencial Negativa, ou de acordo com a Lei de Potência. O set N-S permitiu comparar a análise das duas áreas estudadas (I e III) por conter uma maior quantidade de fraturas (Figura 5.5, Figura 5.10, Tabela 2, Tabela 6). Na área I, os sets N-S e NW-SE, predominantes, seguem a distribuição de acordo com a Lei de Potência (Figura 5.5), com  $R^2$  potencial sempre maior que o  $R^2$  exponencial, corroborando com os valores do CV, destacando a ocorrência de *clusters*. Na área III, o set N-S segue uma distribuição espacial Exponencial (Figura 5.10), reiterando o fraturamento difuso.

O estudo da topologia revelou uma boa conectividade para o afloramento Arapuá I, evidenciada pela concentração de nós do tipo Y e ramificações tipo C-C (Figura 5.6). Para o afloramento II houve um breve domínio de nós tipo I (Figura 5.8), ocorrendo em proporção semelhante aos tipos Y, o que denota uma conectividade menor em relação à área I, mas não caracteriza necessariamente uma baixa conectividade, uma vez que as ramificações predominantes foram do tipo C-C. A área III apresentou comportamento semelhante à área II, contendo tipos de nós preferencialmente Y, com uma proporção semelhante aos nós tipo I, e ramificações tipo C-C (Figura 5.11), o que o define como menos conectado em relação à área I.

A presença de elementos estruturais hierarquicamente superiores, e de escala regional, tem um papel fundamental no controle da distribuição dos elementos deformacionais e na conectividade do sistema (Bagni *et al.*, 2020). Corredores de fraturas geralmente estão associados à acentuada intensidade de fraturamento e a grande variação nas orientações dessas estruturas (Furtado *et al.*, 2022), o que promove uma boa conectividade ao reservatório (Questiaux *et al.*, 2010), e pode caracterizar uma zona de alta permeabilidade.

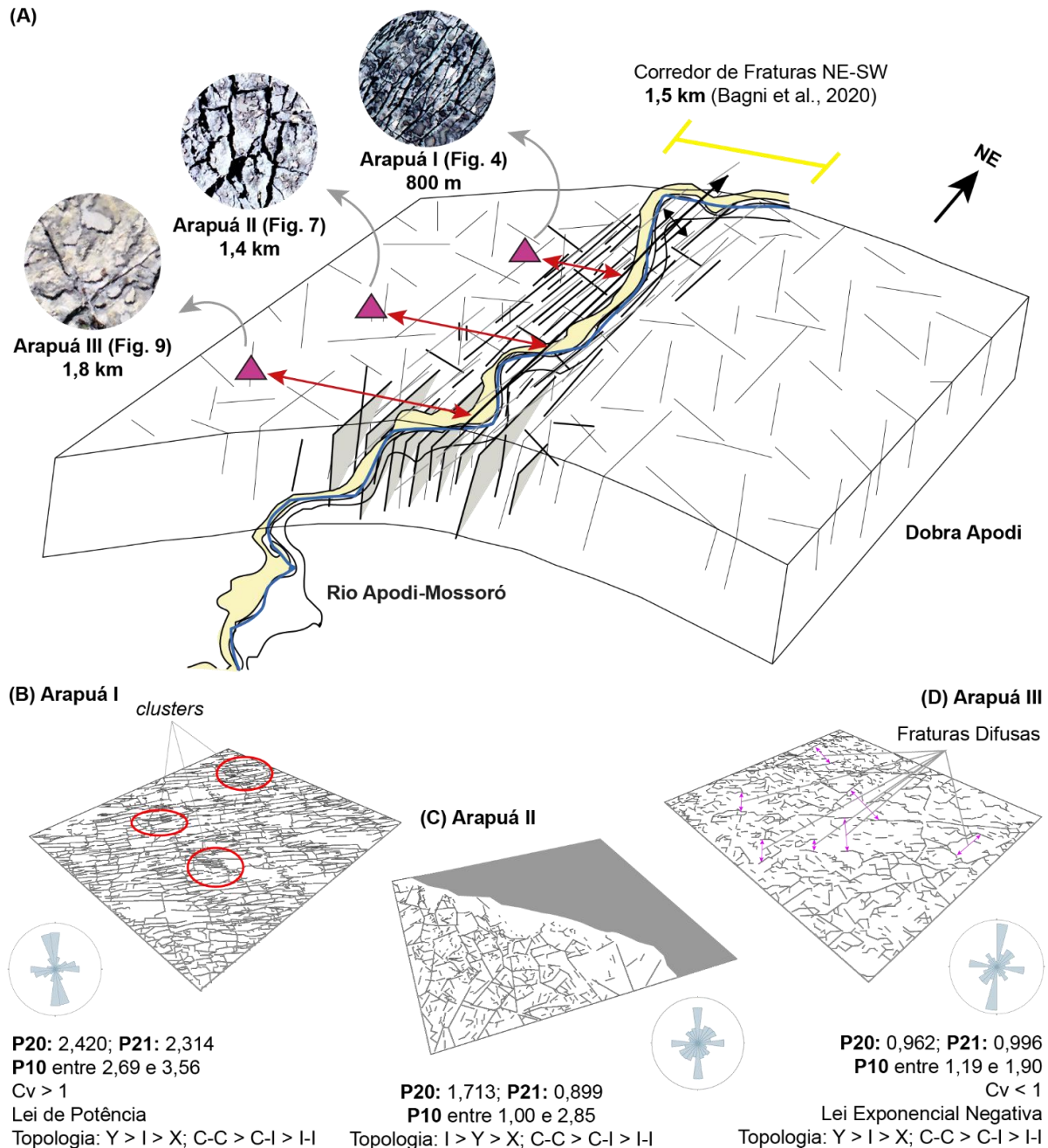
Os resultados da pesquisa corroboram com os modelos de Bezerra *et al.* (2019) e Bagni *et al.* (2020) a respeito da distribuição da deformação frágil em relação a dobra Apodi e ao corredor de fraturas (Figura 5.12). As orientações das estruturas seguem os padrões regionais (Bezerra *et al.*, 2020). Os dados permitiram avaliar: a variação da densidade e intensidade do fraturamento, o grau de conectividade das fraturas mapeadas e o arranjo espacial das estruturas em relação aos elementos de

escala regional. A ocorrência de *clusters* está associada a concentrações locais de *strain*, e podem modificar as propriedades petrofísicas do reservatório (Giuffrida *et al.*, 2019). Por sua vez, a localização de *clusters* de fraturas em proximidade ao eixo da dobra Apodi pode estar relacionada a reativações em cisalhamento dos elementos estruturais antecedentes (*e.g.*, De Joussineau e Aydin 2007).

O afloramento Arapuá I apresentou maior grau de conectividade das estruturas. Esses resultados, em conjunto aos demais obtidos por meio das análises quantitativas, demonstram que a distribuição dos elementos estruturais é fortemente influenciada pela proximidade da dobra Apodi (Figura 5.12). No entanto, não pode ser ignorada a influência dos processos de dissolução associados ao carste epigênico que compõe o lajedo. Nos afloramentos foi possível identificar grandes fraturas alargadas pela dissolução (Figura 5.3, Figura 5.4, Figura 5.7, Figura 5.9), o que pode limitar a identificação e quantificação de alguns parâmetros estruturais e/ou topológicos, principalmente em análises virtuais. Estudos anteriores demonstram a influência dos processos de dissolução localizados nas estruturas tectônicas (Lopes *et al.*, 2022, 2023).

A presença de variações nas distribuições das fraturas influencia diretamente na permeabilidade e heterogeneidade do pacote de rochas estudadas (Odling *et al.*, 1999). Os elementos estruturais documentados podem auxiliar na migração de fluidos através das camadas (Araujo *et al.*, 2021, 2023), ou até selar camadas a partir da precipitação de minerais em seu interior (Bertotti *et al.*, 2017). O estudo de fraturas em escala subsísmica (< 50 m), integrado aos dados regionais, possibilita uma avaliação mais precisa sobre a distribuição das propriedades dos reservatórios, permitindo a identificação de zonas de alta permeabilidade, a reconstrução da história geológica do reservatório, assim como a avaliação da sua heterogeneidade (Furtado *et al.*, 2022).

Esta pesquisa está apresentando um conjunto de análises estruturais, em alta resolução, fundamentais no estudo de análogo de reservatórios carbonáticos fraturados e carstificados. O fluxo de fluidos em rochas fraturadas depende tanto do sistema de fraturamento (comprimento, orientação, abertura e conectividade), quanto da textura da rocha (porosidade e permeabilidade).



**Figura 5.12:** Mapa conceitual ilustrando a variação nos estilos estruturais e grau de deformação no Lajedo Arapué em relação a proximidade com a dobra Apodi e ao corredor de fraturas paralelo ao seu eixo (NE-SW). a) Modelo simplificado do anticlinal Apodi, ilustrando a zona mais fraturada e um trecho do rio Apodi-Mossoró (modificado de Bagni et al., 2020). Destaque para a localização das áreas de estudo em relação a essas estruturas, e a variação da morfologia dos afloramentos. b), c) e d) síntese dos resultados obtidos para as áreas I, II e III.

## 5.6. Conclusões

Este trabalho apresenta uma caracterização dos elementos estruturais e as relativas propriedades multiescalar dos conjuntos de fraturas reconhecidas como agrupadas (*clusters*) e difusas, localizadas nas rochas carbonáticas da Formação

Jandaíra. Os resultados são discutidos em relação aos estudos anteriores e a distribuições das fraturas com a localização ao anticlinal Apodi.

A variação do fraturamento entre a região próxima ao corredor de fratura e a porção mais distante foi apresentada. Na região próxima ao eixo da dobra, no afloramento I, é possível identificar uma maior densidade, intensidade e frequência de fraturamento, com os sets N-S e NW-SE indicando formação de *clusters* (agrupamento). Esse resultado foi determinado a partir das análises estatísticas, evidenciando uma distribuição espacial das fraturas do tipo potencial, onde o desenvolvimento dos elementos estruturais pode estar relacionado a evolução da dobra Apodi e também a reativações dos elementos estruturais pretéritos.

Por outro lado, na região mais distante, representada pelo afloramento III, é possível observar uma deformação difusa, com menores valores de intensidade e densidade de fraturas, e apresentando um maior espaçamento entre si. O maior espaçamento das fraturas está demonstrado pela baixa ocorrência de *cluster* (agrupamentos) evidentes, e por ser representados por uma distribuição exponencial negativa.

O grau de conectividade dos elementos estruturais documentados no afloramento Arapuá I, localizado perto do eixo da dobra Apodi, evidencia valores maiores em comparação aos dados computados pelo afloramento III, mais distante do ponto de máxima curvatura da dobra. No entanto, o predomínio dos nós do tipo Y nas duas áreas, que sugere uma boa conectividade do fraturamento, pode estar relacionado tanto ao tipo de fraturamento característico das dobras, quanto ao elevado grau de dissolução exposto na região.

O estudo reforça a importância da utilização de ferramentas de investigação de alta resolução, de forma integrada aos métodos de análise estrutural tradicionais. Compreender a origem e o desenvolvimento de fraturas subsísmicas é essencial na construção de um modelo de reservatório mais preciso, principalmente em relação aos análogos de reservatórios carbonáticos fraturados.

### 5.7. Agradecimentos

Ao Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica pela oportunidade. À UFRN e ao Laboratório de Sismologia pela infraestrutura. À Agência Nacional do Petróleo que, por meio do Projeto PRH 42 – Hidrocarbonetos, custeou a presente pesquisa e forneceu o apoio financeiro por meio da concessão de bolsa de

Mestrado institucional. Ao Prof. Dr. David Lopes de Castro, por todo o apoio durante a execução do trabalho. FHRB e WEM agradecem ao CNPq pelas bolsas de pesquisa PQ e *Grants* associadas.

## 5.8. Referências

- Akbar, M., Vissapragada, B., A.H., A., Allen, D., Herron, M., Carnegie, A., Dutta, D., Olesen, J.-R., Logan, D., Stief, D., Netherwood, R., Russell, S.D., Saxena, K. (2000). A snapshot of carbonate reservoir evaluation. *Oilfield review*, 12(4), 20-21.
- 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*. Escala 1: 500.000. Recife: CPRM, 2006.
- Araújo, R. E., La Bruna, V., Rustichelli, A., Bezerra, F. H., Xavier, M. M., Audra, P., ... & Antonino, A. C. (2021). Structural and sedimentary discontinuities control the generation of karst dissolution cavities in a carbonate sequence, Potiguar Basin, Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 123, 104753. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104753>.
- Araújo, R. E., La Bruna, V., Rustichelli, A., Xavier, M. M., Agosta, F., Bezerra, F. H., ... & Antonino, A. C. (2023). Pore network characteristics as a function of diagenesis: Implications for epigenic karstification in shallow-water carbonates. *Marine and Petroleum Geology*, 149, 106094. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.106094>.
- Bagni, F. L., Bezerra, F. H., Balsamo, F., Maia, R. P., & Dall'Aglio, M. (2020). Karst dissolution along fracture corridors in an anticline hinge, Jandaíra Formation, Brazil: Implications for reservoir quality. *Marine and Petroleum Geology*, 115, 104249. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104249>.
- Bagni, F. L., Erthal, M. M., Tonietto, S. N., Maia, R. P., Bezerra, F. H., Balsamo, F., ... & Fonseca, J. P. T. (2022). Karstified layers and caves formed by superposed epigenic dissolution along subaerial unconformities in carbonate rocks—Impact on reservoir-scale permeability. *Marine and Petroleum Geology*, 138, 105523. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105523>.
- Balsamo, F., Clemenzi, L., Storti, F., Solum, J., & Taberner, C. (2019). Tectonic control on vein attributes and deformation intensity in fault damage zones affecting Natih platform carbonates, Jabal Qusaybah, North Oman. *Journal of Structural Geology*, 122, 38-57. <https://doi.org/10.1016/j.jsq.2019.02.009>.
- Bertotti, G., de Graaf, S., Bisdorn, K., Oskam, B., Vonhof, H. B., Bezerra, F. H., ... & Cazarin, C. L. (2017). Fracturing and fluid-flow during post-rift subsidence in carbonates of the Jandaíra Formation, Potiguar Basin, NE Brazil. *Basin Research*, 29(6), 836-853. <https://doi.org/10.1111/bre.12246>.
- Bezerra, F.H.R., Brito Neves, B.B., Corrêa, A.C.B., Barreto, A.M.F., Suguio, K., 2008. Late Pleistocene tectonic-geomorphological development within a passive margin – The Cariatá trough, northeastern Brazil. *Geomorphology* 97, 555–582. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.09.008>.
- Bezerra, F. H., de Castro, D. L., Maia, R. P., Sousa, M. O., Moura-Lima, E. N., Rossetti, D. F., ... & Nogueira, F. C. (2019). Postrift stress field inversion in the Potiguar Basin, Brazil—Implications for petroleum systems and evolution of the equatorial margin of South America. *Marine and Petroleum Geology*, 111, 88-104. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.08.001>.

- Bourne, S. J., & Willemse, E. J. (2001). Elastic stress control on the pattern of tensile fracturing around a small fault network at Nash Point, UK. *Journal of Structural Geology*, 23(11), 1753-1770. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(01\)00027-X](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(01)00027-X).
- Burchette, T.P., 2012. Carbonate rocks and petroleum reservoirs: a geological perspective from the industry. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 370, 17–37. <https://doi.org/10.1144/SP370.14>.
- Cazarin, C. L., Bezerra, F. H., Borghi, L., Santos, R. V., Favoreto, J., Brod, J. A., ... & Srivastava, N. K. (2019). The conduit-seal system of hypogene karst in Neoproterozoic carbonates in northeastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 101, 90-107. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.11.046>.
- Córdoba, V. C. (2001). *A evolução da plataforma carbonática Jandaíra durante o Neocretáceo na Bacia Potiguar: análise paleoambiental, diagenética e estratigráfica*. Tese (Doutorado). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas - UNESP.
- Cox, D. R., Lewis, P. A. (1966). *The statistical analysis of series of events*. Springer Dordrecht.
- Davy, P. (1993). On the frequency-length distribution of the San Andreas fault system. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98(B7), 12141-12151. <https://doi.org/10.1029/93JB00372>.
- De Joussineau, G., & Aydin, A. (2007). The evolution of the damage zone with fault growth in sandstone and its multiscale characteristics. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B12). <https://doi.org/10.1029/2006JB004711>.
- De Matos, R. M. D. (1992). The northeast Brazilian rift system. *Tectonics*, 11(4), 766-791. <https://doi.org/10.1029/91TC03092>.
- Dershowitz, W. S., Herda, H. H. (1992). Interpretation of fracture spacing and intensity. In *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium* (pp. ARMA-92). ARMA.
- Francolin, J. L., & Szatmari, P. (1987). Mecanismo de rifteamento da porção oriental da margem norte brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*, 17(2), 196-207.
- Furtado, C. P., Medeiros, W. E., Borges, S. V., Lopes, J. A., Bezerra, F. H., Lima-Filho, F. P., ... & Teixeira, W. L. (2022). The influence of subseismic-scale fracture interconnectivity on fluid flow in fracture corridors of the Brejões carbonate karst system, Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 141, 105689. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105689>.
- Gholipour, A. M., Cosgrove, J. W., & Ala, M. (2016). New theoretical model for predicting and modelling fractures in folded fractured reservoirs. *Petroleum Geoscience*, 22(3), 257-280. <https://doi.org/10.1144/petgeo2013-055>.
- Giuffrida, A., La Bruna, V., Castelluccio, P., Panza, E., Rustichelli, A., Tondi, E., ... & Agosta, F. (2019). Fracture simulation parameters of fractured reservoirs: Analogy with outcropping carbonates of the Inner Apulian Platform, southern Italy. *Journal of Structural Geology*, 123, 18-41. <https://doi.org/10.1016/j.jsq.2019.02.007>.
- La Bruna, V., Bezerra, F. H., Souza, V. H., Maia, R. P., Auler, A. S., Araujo, R. E., ... & Sousa, M. O. (2021). High-permeability zones in folded and faulted silicified carbonate rocks—Implications for karstified carbonate reservoirs. *Marine and Petroleum Geology*, 128, 105046. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.105046>.
- Lima Neto, F. F. (1994). *Geologia da Bacia Potiguar e de suas Acumulações de Petróleo*. PETROBRAS/DEBAR.
- Lopes, J. A., Medeiros, W. E., La Bruna, V., de Lima, A., Bezerra, F. H., & Schiozer, D. J. (2022). Advancements towards DFKN modelling: Incorporating fracture

- enlargement resulting from karstic dissolution in discrete fracture networks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 209, 109944. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109944>.
- Lopes, J. A., Medeiros, W. E., Oliveira, J. G., Santana, F. L., Araújo, R. E., La Bruna, V., ... & Bezerra, F. H. (2023). Three-dimensional characterization of karstic dissolution zones, fracture networks, and lithostratigraphic interfaces using GPR cubes, core logs, and petrophysics: Implications for thief zones development in carbonate reservoirs. *Marine and Petroleum Geology*, 150, 106126. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2023.106126>.
- Odling, N. E., Gillespie, P., Bourguine, B., Castaing, C., Chiles, J. P., Christensen, N. P., ... & Watterson, J. (1999). Variations in fracture system geometry and their implications for fluid flow in fractures hydrocarbon reservoirs. *Petroleum Geoscience*, 5(4), 373-384. <https://doi.org/10.1144/petgeo.5.4.373>.
- Pessoa Neto, O. C., Soares, U. M., Silva, J. G. F., Roesner, E. H., Florencio, C. P., & Souza, C. A. V. (2007). Bacia potiguar. *Bol. Geociências Petrobras*, 15(2), 357-369.
- Pereira Gomes, I., Vieira Veríssimo, C. U., Rego Bezerra, F. H., Lima dos Santos, J., & de Freitas Câmara, J. R. (2019). Fraturas, carste e cavernas nos calcários Jandaíra em Felipe Guerra, Rio Grande do Norte. *Geologia USP: Série Científica*, 19(1). DOI: 10.11606/issn.2316-9095.v19-149311.
- Priest, S. D. (1993). *Discontinuity analysis for rock engineering*. Springer Science & Business Media.
- Questiaux, J. M., Couples, G. D., & Ruby, N. (2010). Fractured reservoirs with fracture corridors. *Geophysical Prospecting*, 58(2), 279-295. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2009.00810.x>.
- Sanderson, D. J., & Nixon, C. W. (2015). The use of topology in fracture network characterization. *Journal of Structural Geology*, 72, 55-66. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2015.01.005>.
- Xavier Neto, P., Bezerra, F.H.R., Silva, C.C.N., da Cruz, J.B. (2008). O condicionamento estrutural do carste Jandaíra e da espeleogênese associada pela tectônica pós-campaniana da Bacia Potiguar. *44º Congresso Brasileiro De Geologia*, Curitiba.
- Xu, Y., Cavalcante Filho, J. S., Yu, W., & Sepehrnoori, K. (2017). Discrete-fracture modeling of complex hydraulic-fracture geometries in reservoir simulators. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 20(02), 403-422. <https://doi.org/10.2118/183647-PA>.

## 6. CAPÍTULO V - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa caracterizou os estilos estruturais em três diferentes setores do Lajedo Arapuá, nas rochas carbonáticas da Formação Jandaíra. A discussão dos resultados foi elaborada em relação aos estudos anteriores, e o arranjo da deformação em função da proximidade ao eixo do anticlinal de Apodi.

Foi identificado um contraste na deformação em função da presença dessas macroestruturas, a dobra Apodi e o corredor de fraturas NE-SW. A região mais próxima ao eixo da dobra, área I, denota maior intensidade, densidade e frequência de fraturamento, bem como maior grau de conectividade, além de evidenciar a formação de *clusters*. Por outro lado, na região mais distante, representada pelo afloramento III, é possível observar uma deformação difusa, com menores valores de intensidade, densidade e frequência de fraturas, apresentando uma conexão um relativamente mais baixa.

As principais conclusões do trabalho foram:

- Os elementos estruturais identificados seguem os padrões regionais, e possuem o seu desenvolvimento associado a evolução da dobra Apodi e reativação de estruturas pretéritas;
- O grau de deformação variou em função da distância do eixo da dobra Apodi e do corredor de fraturas;
- A conectividade das redes de fraturas mapeadas apresenta um contraste menor que o esperado, o que pode estar relacionado tanto ao tipo de fraturamento característico das dobras, quanto ao elevado grau de dissolução expresso na região;
- O estudo reforça a importância da utilização de ferramentas de investigação de alta resolução, de forma integrada aos métodos de análise estrutural tradicionais;
- Feições subsísmicas são essenciais na construção de modelos de reservatórios mais fidedignos, principalmente em relação aos análogos de reservatórios carbonáticos fraturados.

## 7. CAPÍTULO VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agosta, F., Alessandroni, M., Antonellini, M., Tondi, E., & Giorgioni, M. (2010). From fractures to flow: A field-based quantitative analysis of an outcropping carbonate reservoir. *Tectonophysics*, 490(3-4), 197-213. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.05.005>.
- Akbar, M., Vissapragada, B., A.H., A., Allen, D., Herron, M., Carnegie, A., Dutta, D., Olesen, J.-R., Logan, D., Stief, D., Netherwood, R., Russell, S.D., Saxena, K. (2000). A snapshot of carbonate reservoir evaluation. *Oilfield review*, 12(4), 20-21.
- 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*. Escala 1: 500.000. Recife: CPRM, 2006.
- Araújo, P. D. T., & Feijo, F. J. (1994). Potiguar basin; bacia potiguar. *Boletim de Geociências da PETROBRAS*, 8.
- Araújo, R. E., La Bruna, V., Rustichelli, A., Bezerra, F. H., Xavier, M. M., Audra, P., ... & Antonino, A. C. (2021). Structural and sedimentary discontinuities control the generation of karst dissolution cavities in a carbonate sequence, Potiguar Basin, Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 123, 104753. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104753>.
- Araújo, R. E., La Bruna, V., Rustichelli, A., Xavier, M. M., Agosta, F., Bezerra, F. H., ... & Antonino, A. C. (2023). Pore network characteristics as a function of diagenesis: Implications for epigenic karstification in shallow-water carbonates. *Marine and Petroleum Geology*, 149, 106094. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.106094>.
- Bagni, F. L., Bezerra, F. H., Balsamo, F., Maia, R. P., & Dall'Aglio, M. (2020). Karst dissolution along fracture corridors in an anticline hinge, Jandaíra Formation, Brazil: Implications for reservoir quality. *Marine and Petroleum Geology*, 115, 104249. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104249>.
- Bagni, F. L. (2021). O Carste Jandaíra, Bacia Potiguar, e suas implicações para a qualidade de reservatórios.
- Bagni, F. L., Erthal, M. M., Tonietto, S. N., Maia, R. P., Bezerra, F. H., Balsamo, F., ... & Fonseca, J. P. T. (2022). Karstified layers and caves formed by superposed epigenic dissolution along subaerial unconformities in carbonate rocks—Impact on reservoir-scale permeability. *Marine and Petroleum Geology*, 138, 105523. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105523>.
- Balsamo, F., Clemenzi, L., Storti, F., Solum, J., & Taberner, C. (2019). Tectonic control on vein attributes and deformation intensity in fault damage zones affecting Natih platform carbonates, Jabal Qusaybah, North Oman. *Journal of Structural Geology*, 122, 38-57. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2019.02.009>.
- Barton, N., & Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock mechanics*, 10(1), 1-54.
- Bertani, R.T., Costa, I.G., Matos, R.M., 1990. Evolução tectono-sedimentar, estilo estrutural e habitat do petróleo da bacia Potiguar, in: In Raja Gabaglia, G.P., Milani, E.J. (Ed.). *Origem e Evolução de Bacias Sedimentares*. PETROBRAS, Rio de Janeiro, pp. 291–301.
- Bertotti, G., de Graaf, S., Bisdorf, K., Oskam, B., Vonhof, H. B., Bezerra, F. H., ... & Cazarin, C. L. (2017). Fracturing and fluid-flow during post-rift subsidence in carbonates of the Jandaíra Formation, Potiguar Basin, NE Brazil. *Basin Research*, 29(6), 836-853. <https://doi.org/10.1111/bre.12246>.

- Bezerra, F.H.R., Brito Neves, B.B., Corrêa, A.C.B., Barreto, A.M.F., Suguio, K., 2008. Late Pleistocene tectonic-geomorphological development within a passive margin – The Cariatá trough, northeastern Brazil. *Geomorphology* 97, 555–582. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.09.008>.
- Bezerra, F. H., de Castro, D. L., Maia, R. P., Sousa, M. O., Moura-Lima, E. N., Rossetti, D. F., ... & Nogueira, F. C. (2019). Postrift stress field inversion in the Potiguar Basin, Brazil–Implications for petroleum systems and evolution of the equatorial margin of South America. *Marine and Petroleum Geology*, 111, 88-104. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.08.001>.
- Bourne, S. J., & Willemse, E. J. (2001). Elastic stress control on the pattern of tensile fracturing around a small fault network at Nash Point, UK. *Journal of Structural Geology*, 23(11), 1753-1770. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(01\)00027-X](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(01)00027-X).
- Burchette, T.P., 2012. Carbonate rocks and petroleum reservoirs: a geological perspective from the industry. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 370, 17–37. <https://doi.org/10.1144/SP370.14>.
- Bust, V.K.; Oletu, J.U.; Worthington, P.F. 2009. The Challenges for Carbonate Petrophysics in Petroleum Resource Estimation. International Petroleum Technology Conference. Doha, Qatar. 14p. IPTC 13772.
- Cazarin, C. L., Bezerra, F. H., Borghi, L., Santos, R. V., Favoreto, J., Brod, J. A., ... & Srivastava, N. K. (2019). The conduit-seal system of hypogene karst in Neoproterozoic carbonates in northeastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 101, 90-107. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.11.046>.
- Córdoba, V. C. (2001). *A evolução da plataforma carbonática Jandaíra durante o Neocretáceo na Bacia Potiguar: análise paleoambiental, diagenética e estratigráfica*. Tese (Doutorado). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas - UNESP.
- Cosentino, L. 2001. Integrated Reservoir Studies. Editions Technip, Paris, 336p.
- Cox, D. R., Lewis, P. A. (1966). *The statistical analysis of series of events*. Springer Dordrecht.
- Cremonini, O. A. *Caracterização estrutural e evolução da área de Ubarana, porção submersa da Bacia Potiguar, Brasil*. 1993. PhD Thesis. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Cruz, J.B.; Bento, D. M.; Bezerra, F. H. R.; Freitas, J. I.; Campos, U. P., Santos, D. J. Diagnóstico Espeleológico do Rio Grande do Norte. *Revista Brasileira de Espeleologia*, v. 01, p. 01-24, 2010.
- Da Silva, B. L., & Troleis, A. L. (2019). A estrutura hídrica do território do Rio Grande do Norte: uma análise sistêmica. *Sociedade e Território*, 31(2), 73-96.
- Davy, P. (1993). On the frequency-length distribution of the San Andreas fault system. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98(B7), 12141-12151. <https://doi.org/10.1029/93JB00372>.
- Dehler, N. M., Machado Jr, D., Hatushika, R., Gomes, L., & Trzaskos, B. (2009). Structural Analysis of a Core on Fractured Carbonate Reservoir, Brazil: Implications for Exploration and Reservoir Modeling. *AAPG Datapages/Search and Discovery*, 40408.
- De Brito Neves, B. B., Fuck, R. A., & Cordani, U. G. (1984). Influence of basement structures on the evolution of the major sedimentary basins of Brazil: a case of tectonic heritage. *Journal of Geodynamics*, 1(3-5), 495-510.
- De Castro, D. L., Bezerra, F. H., Sousa, M. O., & Fuck, R. A. (2012). Influence of Neoproterozoic tectonic fabric on the origin of the Potiguar Basin, northeastern Brazil and its links with West Africa based on gravity and magnetic data. *Journal of Geodynamics*, 54, 29-42.

- De Joussineau, G., & Aydin, A. (2007). The evolution of the damage zone with fault growth in sandstone and its multiscale characteristics. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B12). <https://doi.org/10.1029/2006JB004711>.
- De Lima, A., Lopes, J. A., Medeiros, W. E., Schiozer, D. J., La Bruna, V., & Bezerra, F. H. (2023). Impact of fracture set scales and aperture enlargement due to karstic dissolution on the fluid flow behavior of carbonate reservoirs: A workflow to include sub-seismic fractures in 3D simulation models. *Geoenergy Science and Engineering*, 221, 211374.
- De Matos, R. M. D. (1992). The northeast Brazilian rift system. *Tectonics*, 11(4), 766-791. <https://doi.org/10.1029/91TC03092>.
- De Matos, R. M. D., Mohriak, W. U., & Talwani, M. (2000). Tectonic evolution of the equatorial South Atlantic. *Atlantic rifts and continental margins*, 115, 331-354.
- De Melo, A. C. C., de Castro, D. L., Bezerra, F. H. R., & Bertotti, G. (2016). Rift fault geometry and evolution in the Cretaceous Potiguar Basin (NE Brazil) based on fault growth models. *Journal of South American Earth Sciences*, 71, 96-107.
- Dershowitz, W. S., Herda, H. H. (1992). Interpretation of fracture spacing and intensity. In *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium* (pp. ARMA-92). ARMA.
- Diniz, M. T. M., & Pereira, V. H. C. (2015). Climatologia do estado do Rio Grande do Norte, Brasil: sistemas atmosféricos atuantes e mapeamento de tipos de clima. *Boletim Goiano de Geografia*, 35(3), 488-506.
- Ford, Derek, and Williams, P.W., 1989, *Karst geomorphology and hydrology*: London, Unwin Hyman, 601 p.
- Fossen, H. Cambridge University Press. Edimburg. 463 pp. 2010. *Structural Geology*.
- Francolin, J. L., & Szatmari, P. (1987). Mecanismo de rifteamento da porção oriental da margem norte brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*, 17(2), 196-207.
- Furtado, C. P., Medeiros, W. E., Borges, S. V., Lopes, J. A., Bezerra, F. H., Lima-Filho, F. P., ... & Teixeira, W. L. (2022). The influence of subseismic-scale fracture interconnectivity on fluid flow in fracture corridors of the Brejões carbonate karst system, Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 141, 105689. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105689>.
- Gholipour, A. M., Cosgrove, J. W., & Ala, M. (2016). New theoretical model for predicting and modelling fractures in folded fractured reservoirs. *Petroleum Geoscience*, 22(3), 257-280. <https://doi.org/10.1144/petgeo2013-055>.
- Giuffrida, A., La Bruna, V., Castelluccio, P., Panza, E., Rustichelli, A., Tondi, E., ... & Agosta, F. (2019). Fracture simulation parameters of fractured reservoirs: Analogy with outcropping carbonates of the Inner Apulian Platform, southern Italy. *Journal of Structural Geology*, 123, 18-41. <https://doi.org/10.1016/j.jsq.2019.02.007>.
- Giuffrida, A., Agosta, F., Rustichelli, A., Panza, E., La Bruna, V., Eriksson, M., ... & Giorgioni, M. (2020). Fracture stratigraphy and DFN modelling of tight carbonates, the case study of the Lower Cretaceous carbonates exposed at the Monte Alpi (Basilicata, Italy). *Marine and Petroleum Geology*, 112, 104045.
- La Bruna, V., Bezerra, F. H., Souza, V. H., Maia, R. P., Auler, A. S., Araujo, R. E., ... & Sousa, M. O. (2021). High-permeability zones in folded and faulted silicified carbonate rocks—Implications for karstified carbonate reservoirs. *Marine and Petroleum Geology*, 128, 105046. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.105046>.
- Lima Neto, F. F. (1994). Geologia da Bacia Potiguar e de suas Acumulações de Petróleo. PETROBRAS/DEBAR.

- Lopes, J. A., Medeiros, W. E., La Bruna, V., de Lima, A., Bezerra, F. H., & Schiozer, D. J. (2022). Advancements towards DFKN modelling: Incorporating fracture enlargement resulting from karstic dissolution in discrete fracture networks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 209, 109944. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109944>.
- Lopes, J. A., Medeiros, W. E., Oliveira, J. G., Santana, F. L., Araújo, R. E., La Bruna, V., ... & Bezerra, F. H. (2023). Three-dimensional characterization of karstic dissolution zones, fracture networks, and lithostratigraphic interfaces using GPR cubes, core logs, and petrophysics: Implications for thief zones development in carbonate reservoirs. *Marine and Petroleum Geology*, 150, 106126. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2023.106126>.
- Lucia, J.F. 2007. Carbonate Reservoir Characterization - An Integrated Approach. 2nd Ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 336p.
- Maia, R. P.; Sousa, M.O.L.; Bezerra, F.H.B.; Xavier Neto, P.; Silva, C.C.N. DA; Moura-Lima, E.N.; Santos, R.D. A importância do controle tectônico para a formação da paisagem cárstica na Bacia Potiguar, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 13, nº 4 p.451-463, 2012.
- Maia, R. P., & Bezerra, F. H. R. (2013). Tectônica Pós-Miocênica e controle estrutural de drenagem no rio Apodi-Mossoró, Nordeste do Brasil. *Boletim de Geografia*, 31(2), 57-68.
- Mazzullo, S. J., & Harris, P. M. (1991). An overview of dissolution porosity development in the deep-burial environment, with examples from carbonate reservoirs in the Permian Basin. *West Texas Geological Society, Midland, TX*, 91-89.
- Melani, L. H. (2015). *Caracterização petrofísica de reservatório carbonático* (Doctoral dissertation, Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo). Universidade Estadual de Campinas).
- Morais Neto, J.M., Hegarty, K.A., Karner, G.D., Alkmim, F.F., 2009. Timing and mechanisms for the generation and modification of the anomalous topography of the Borborema Province, northeastern Brazil. *Mar. Pet. Geol.* 26, 1070–1086. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2008.07.002>.
- Nimer, E. (1989). *Climatologia do Brasil*. IBGE.
- Odling, N. E., Gillespie, P., Bourguine, B., Castaing, C., Chiles, J. P., Christensen, N. P., ... & Watterson, J. (1999). Variations in fracture system geometry and their implications for fluid flow in fractures hydrocarbon reservoirs. *Petroleum Geoscience*, 5(4), 373-384. <https://doi.org/10.1144/petgeo.5.4.373>.
- Ogata, K., Senger, K., Braathen, A., Tveranger, J., 2014a. Fracture corridors as seal-bypass systems in siliciclastic reservoir-cap rock successions: field-based insights from the Jurassic Entrada Formation (SE Utah, USA). *J. Struct. Geol.* 66, 162–187. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2014.05.005>.
- Oliveira, J. D. (2013). *Revisão Sistemática dos Equinóides (Echinodermata) na Formação Jandaíra (Cretáceo) Bacia Potiguar, Nordeste do Brasil*.
- Palmer, A.N., 2003. Speleogenesis in carbonate rocks: Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers. *Virtual Sci. J.* 1, 11.
- Panza, E., Sessa, E., Agosta, F., & Giorgioni, M. (2018). Discrete Fracture Network modelling of a hydrocarbon-bearing, oblique-slip fault zone: Inferences on fault-controlled fluid storage and migration properties of carbonate fault damage zones. *Marine and Petroleum Geology*, 89, 263-279.
- Pessoa Neto, O. D. C. (2003). Estratigrafia de Sequências da Plataforma Mista Neogênica. *Revista Brasileira de Geociências*, 33, 263.

- Pessoa Neto, O. C., Soares, U. M., Silva, J. G. F., Roesner, E. H., Florencio, C. P., & Souza, C. A. V. (2007). Bacia potiguar. *Bol. Geociências Petrobras*, 15(2), 357-369.
- Pereira Gomes, I., Vieira Veríssimo, C. U., Rego Bezerra, F. H., Lima dos Santos, J., & de Freitas Câmara, J. R. (2019). Fraturas, carste e cavernas nos calcários Jandaíra em Felipe Guerra, Rio Grande do Norte. *Geologia USP: Série Científica*, 19(1). DOI: 10.11606/issn.2316-9095.v19-149311.
- Priest, S. D. (1993). *Discontinuity analysis for rock engineering*. Springer Science & Business Media.
- Questiaux, J. M., Couples, G. D., & Ruby, N. (2010). Fractured reservoirs with fracture corridors. *Geophysical Prospecting*, 58(2), 279-295. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2009.00810.x>.
- Reis, A. F.C.; Bezerra, F.H.R.; Ferreira, J.M.; do Nascimento, A.F.; Lima, C.C. Stress magnitude and orientation in the Potiguar Basin, Brazil: Implications on faulting style and reactivation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.118,1-14, 2013.
- Roehl, P. O., & Choquette, P. W. (Eds.). (2012). *Carbonate petroleum reservoirs*. Springer Science & Business Media.
- Sampaio, A. V., & Schaller, H. (1968). Introdução à estratigrafia cretácea da Bacia Potiguar. *Boletim Interno da Petrobrás*, 11(1), 19-44.
- Sanderson, D. J., & Nixon, C. W. (2015). The use of topology in fracture network characterization. *Journal of Structural Geology*, 72, 55-66. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2015.01.005>.
- Sanderson, D. J., & Nixon, C. W. (2018). Topology, connectivity and percolation in fracture networks. *Journal of Structural Geology*, 115, 167-177.
- Santos, J. L. D. (2015). Controle estrutural e faciológico na espeleogênese em calcários da formação Jandaíra (Bacia Potiguar): Lajedo do Rosário, município de Felipe Guerra–RN.
- Smeraglia, L., Mercuri, M., Tavani, S., Pignalosa, A., Kettermann, M., Billi, A., & Carminati, E. (2021). 3D Discrete Fracture Network (DFN) models of damage zone fluid corridors within a reservoir-scale normal fault in carbonates: multiscale approach using field data and UAV imagery. *Marine and Petroleum Geology*, 126, 104902.
- Sousa, D. C., Sá, E. F. J.; Matos, R. M. D.; Antunes, A .F. Lima-Neto, F. F., Medeiros, W. E.; Xavier-Neto, P. Deformação cenozóica na região de Icapuí (CE), e sua implicação na estruturação de campos de petróleo na borda ocidental da Bacia Potiguar. In: Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás, 2, 2003, Rio de Janeiro. CD..Rio de Janeiro.
- Souza, S. M. D. (1982). Atualização da litoestratigrafia da Bacia Potiguar. In Congresso Brasileiro de Geologia (Vol. 32, No. 1982, pp. 2392-2406).
- Sun, S.Q., Sloan, R., 2003. Quantification of Uncertainty in Recovery Efficiency Predictions: Lessons Learned from 250 Mature Carbonate Fields, in: All Days. SPE, p. 15. <https://doi.org/10.2118/84459-MS>.
- Watkins, H., Bond, C. E., Healy, D., & Butler, R. W. (2015). Appraisal of fracture sampling methods and a new workflow to characterise heterogeneous fracture networks at outcrop. *Journal of Structural Geology*, 72, 67-82.
- Xavier Neto, P., Bezerra, F.H.R., Silva, C.C.N., da Cruz, J.B. (2008). O condicionamento estrutural do carste Jandaíra e da espeleogênese associada pela tectônica pós-campaniana da Bacia Potiguar. *44º Congresso Brasileiro De Geologia*, Curitiba.

- Xu, Y., Cavalcante Filho, J. S., Yu, W., & Sepehrnoori, K. (2017). Discrete-fracture modeling of complex hydraulic-fracture geometries in reservoir simulators. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 20(02), 403-422. <https://doi.org/10.2118/183647-PA>.
- Zhu, G., Cao, Y., Yan, L., Yang, H., Sun, C., Zhang, Z., Li, T., Chen, Y., 2018. Potential and favorable areas of petroleum exploration of ultra-deep marine strata more than 8000 m deep in the Tarim Basin, Northwest China. *J. Nat. Gas Geosci.* 3, 321–337. <https://doi.org/10.1016/j.jnggs.2018.12.002>