UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ARMANDO MUCHANGA

PARAMETRIZAÇÃO AUTOMÁTICA DE SISTEMA DE FRATURAS EM SUPERFÍCIES ROCHOSAS A PARTIR DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM DIGITAL

Recife
2025

ARMANDO MUCHANGA

PARAMETRIZAÇÃO AUTOMÁTICA DE SISTEMA DE FRATURAS EM SUPERFÍCIES ROCHOSAS A PARTIR DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM DIGITAL

Tese apresentada ao Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Simulação e gerenciamento de reservatórios de petróleo.

Linha de pesquisa: Formulações numéricas e ferramentas computacionais na simulação de reservatórios

Orientador: Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes

Coorientador: Prof. Dr. José Antônio Barbosa

Recife

2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Muchanga, Armando.
Parametrização automática de sistema de fraturas em superfícies rochosas a partir de processamento de imagem digital / Armando Muchanga. - Recife, 2025.
148f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2025.
Orientação: Igor Fernandes Gomes.
Coorientação: José Antônio Barbosa.
Inclui referências e anexos.

1. Análise fractal; 2. Caracterização de fraturas; 3. Código aberto; 4. Permeabilidade; 5. Porosidade; 6. Reservatórios naturalmente fraturados. I. Gomes, Igor Fernandes. II. Barbosa, José Antônio. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

ARMANDO MUCHANGA

PARAMETRIZAÇÃO AUTOMÁTICA DE SISTEMA DE FRATURAS EM SUPERFÍCIES ROCHOSAS A PARTIR DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM DIGITAL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, Área de Simulação e Gerenciamento de Reservatórios de Petróleo.

Aprovada em 21/05/2025

Orientador: Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes, UFPB
Orientador: Prof. Dr. José Antônio Barbosa, UFPE

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência
Prof.ª Dr.ª Analice França Lima Amorim (examinadora interna)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof. Dr. Tiago Siqueira de Miranda (examinador externo)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof. Dr. Jefferson Tavares Cruz Oliveira (examinador externo)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Dr. Osvaldo José Correia Filho (examinador externo)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Dr.ª Leidy Laura Álvarez Berrío (examinadora externa)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço, com grande estima, aos meus orientadores, Professores Igor Fernandes Gomes e José Antônio Barbosa, por sua orientação conjunta, precisa e dedicada ao longo destes anos. Sua expertise, paciência e comprometimento foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Expresso minha profunda gratidão à minha família, amigos e colegas, cujo apoio constante foi essencial nos momentos desafiadores da pesquisa. Cada palavra de encorajamento, cada gesto de apoio fez diferença ao longo da jornada.

Agradeço à Petrobras, pelo apoio financeiro ao desenvolvimento da pesquisa, por meio do projeto de P, D & I intitulado *"Estudos dos Acoplamento Geomecânico e Geoquímico em Reservatórios Carbonáticos - Projeto GeomeCCarb"*. Também registro meu agradecimento à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), pelo supor concedido, por meio do Código de Financiamento 001.

“Posso todas as coisas naquele que me fortalece” (Filipenses 4:13)

RESUMO

A caracterização de fraturas em rochas é um fator-chave na exploração de reservatórios naturalmente fraturados, com aplicações em campos petrolíferos, geotérmicos e outros sistemas porosos em subsuperfície. Entretanto, a obtenção de informações detalhadas sobre padrões de fraturamento diretamente no poço enfrenta limitações tecnológicas e operacionais. Nesse contexto, a análise de afloramentos análogos de superfície surge como uma estratégia valiosa para inferir propriedades geométricas, estatísticas e hidráulicas do meio fraturado, complementando a caracterização do reservatório. Este trabalho apresenta o FRAMFRAT, uma rotina computacional de código aberto, hospedado no GitHub, desenvolvida em Python, que integra técnicas avançadas de processamento e análise de imagens, estatística e geometria fractal para a caracterização quantitativa e automatizada de fraturas em afloramentos. Entre as principais técnicas empregadas destacam-se: Segmentação e Rotulação de Fraturas (*Contour Tracing* e *Labeling*), que faz a identificação automática das fraturas e atribuição de rótulos individuais; Transformada do Eixo Medial (*Medial Axis Transform*), que envolve a redução das fraturas a esqueletos, viabilizando medições precisas de comprimento, conectividade e orientação; Segmentação Avançada das Fraturas em Segmentos Lineares para a decomposição de fraturas complexas em partes mais lineares, permitindo análises detalhadas em nível de segmento, incluindo comprimento, abertura e direção; Dimensionamento Fractal (*Box Counting*), pelo qual é realizado o cálculo da dimensão fractal, refletindo a complexidade e heterogeneidade do sistema de fraturas; Medição de Abertura (Scanline Adaptado e Transformada de Distância) para a determinação da abertura mínima, média, máxima e desvio padrão, auxiliando na avaliação da permeabilidade; Quantificação de Propriedades Estatísticas e Hidráulicas, que contempla o cálculo da porosidade, permeabilidade, parâmetros de distribuição das aberturas e conectividade, fornecendo subsídios para entender a influência das fraturas no fluxo de fluidos no reservatório. A aplicação do FRAMFRAT no estudo de um afloramento na Praia de Itapoama, na Bacia Pernambucana, demonstrou que os comprimentos das fraturas variam de cerca de 100 mm a 18.100 mm, as aberturas médias entre 10 mm e 178 mm, a porosidade equivalente de 0,02% a 9,04% e a permeabilidade calculada variou entre 2×10^{7} a 6×10^{9} Darcy. Ademais, a análise das orientações das

fraturas, representadas em diagrama de roseta, revelou duas direções principais: NE–SW (aproximadamente 45° a 70° Az), associadas aos esforços tectônicos primários, e W–SW (aproximadamente 250° a 265° Az), atribuídas a eventos tectônicos subsequentes ou reativações. Além disso, orientações secundárias em torno de 175° e 90° Az foram identificadas, reforçando a interpretação de que o sistema fraturado registra múltiplos episódios tectônicos e uma evolução estrutural complexa. Ao unir métodos de processamento digital de imagens, análise fractal, segmentação em segmentos lineares e avaliação estatístico-hidráulica, o FRAMFRAT oferece um conjunto robusto e automatizado de ferramentas. Essa solução aberta, mantida em um repositório GitHub, democratiza o acesso ao código, facilita colaborações e contribuições da comunidade científica e industrial, e potencializa a caracterização de fraturas a partir de afloramentos análogos, resultando em modelos mais confiáveis e detalhados de reservatórios naturalmente fraturados.

Palavras-Chaves: análise fractal; caracterização de fraturas; código aberto; permeabilidade; porosidade; reservatórios naturalmente fraturados; segmentação de imagem.

ABSTRACT

Fracture characterization in rocks is a key factor in the exploration of naturally fractured reservoirs, with applications in petroleum fields, geothermal systems, and other subsurface porous media. However, obtaining detailed information on fracture patterns directly from well data faces technological and operational limitations. In this context, the analysis of surface outcrop analogs emerges as a valuable strategy to infer the geometric, statistical, and hydraulic properties of fractured media, complementing reservoir characterization. This work presents FRAMFRAT, an open-source computational routine, hosted on GitHub and developed in Python, which integrates advanced techniques of image processing and analysis, statistics, and fractal geometry for quantitative and automated fracture characterization in outcrops. The main techniques employed include: Fracture Segmentation and Labeling (Contour Tracing and Labeling), enabling automatic fracture identification and individual labeling; Medial Axis Transform, which reduces fractures to skeletons for precise measurement of length, connectivity, and orientation; Advanced Fracture Segmentation into Linear Segments, allowing the decomposition of complex fractures into straighter parts for detailed segment-level analyses, including length, aperture, and direction; Fractal Dimensioning (Box Counting), used to calculate fractal dimension as a measure of fracture system complexity and heterogeneity; Aperture Measurement (Adapted Scanline and Distance Transform) for determining minimum, average, maximum, and standard deviation values, supporting permeability assessment; and Quantification of Statistical and Hydraulic Properties, encompassing porosity, permeability, aperture distribution, and connectivity, providing insights into the influence of fractures on fluid flow within the reservoir. Application of FRAMFRAT to an outcrop study at Praia de Itapoama, Pernambuco Basin, revealed fracture lengths ranging from ~100 mm to 18,100 mm, mean apertures between 10 mm and 178 mm, equivalent porosity from 0.02% to 9.04%, and calculated permeability between 2×10^{7} and 6×10^{9} Darcy. Furthermore, fracture orientation analysis based on rose diagrams revealed two main sets: NE–SW (approximately 45°–70° Az), associated with primary tectonic stresses, and W–SW (approximately 250°–265° Az), attributed to subsequent tectonic events or reactivations. In addition, secondary orientations around 175° and 90° Az were identified, reinforcing the interpretation that

the fractured system records multiple tectonic episodes and a complex structural evolution. By integrating digital image processing methods, fractal analysis, segmentation into linear segments, and statistical-hydraulic evaluation, FRAMFRAT provides a robust and automated toolset. This open-source solution, maintained in a GitHub repository, democratizes code access, facilitates collaboration and contributions from the scientific and industrial communities, and enhances fracture characterization from outcrop analogs, resulting in more reliable and detailed models of naturally fractured reservoirs.

Keywords: fractal analysis; fracture characterization; open source; permeability; porosity; naturally fractured reservoirs; image segmentation**.**

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação de Fratura (Nelson, 2001) 25
Figura 2 - Exemplo de fraturas abertas (tracejado em azul à esquerda) e de fraturas fechadas (tracejado em azul escuro à direita) 29
Figura 3 - Exemplos de fractais gerados por computador 34
Figura 4 - Método *Box Counting* 36
Figura 5 – Demonstração da coleta de dados de fraturas por Método de *scanline* 37
Figura 6 - Sistema de Cores RGB 41
Figura 7 - Pixels em tom de cinza 43
Figura 8 - Esquemas de elementos conectados com 4 vizinhos (A) e 8 vizinhos (B) 45
Figura 9 - Análise dos picos de um histograma genérico 47
Figura 10 - Imagem com segmentação realizada pelo Método Otsu 49
Figura 11 - Estrutura metodológica do FRAMFRAT 61
Figura 12 - FRAMFRAT Página Inicial 81
Figura 13 - Funções de Pré-processamento (A), Detecção de Fraturas (B), e Caracterização (C) 82
Figura 14 - Interface com visualização avançada e análise estatística 82
Figura 15 - Elementos utilizados para a coleta dos dados de fratura em campo. 84
Figura 16 - Áreas consideradas para medição manual de fraturas 86
Figura 17 - Cálculo de parâmetros para a Área 1 87
Figura 18 - Cálculo de parâmetros para a Área 2 87
Figura 19 - Cálculo de parâmetros para a Área 3 88
Figura 20 - Cálculo de parâmetros para a Área 4 88
Figura 21 - Comparação gráficos de dispersão (*Scatter Plots*) 92
Figura 22 - Análise de Bland-Altman 94
Figura 23 - Experimento do estudo do Pi *et al.* (2021) 97
Figura 24 - Resultado do FRAMFRAT 98
Figura 25 - Gráfico do tempo de cálculo entre os Métodos 100
Figura 26 - Gráfico da Dimensão Fractal com intervalos de confiança 100
Figura 27 - Gráfico da taxa de diferença da Dimensão Fractal 101
Figura 28 - Localização da Bacia Pernambuco em relação a região nordeste do Brasil 104

Figura 29 - Imagem do Afloramento 105
Figura 30 - Imagem do ortomosaico do traquito que aflora na Praia de Itapoama (a); Recorte de Imagem para estudo (b) 106
Figura 31 - Demonstração do Pré-processamento de imagem no FRAMFRAT (Ajuste equalização de Histograma, Brilho=2.10 e Contraste=0.10) 108
Figura 32 - Detecção de Fraturas sem ajuste e com ajuste manual 109
Figura 33 - Fraturas em forma esqueletizada com linha média 109
Figura 34 - Etapas de Deteção 110
Figura 35 - Resultado da Caracterização das fraturas 110
Figura 36 - Visualização de Fraturas segmentadas Individuais (Fratura F_1 e F_7) 112
Figura 37 - Variação dos Comprimento em relação as aberturas medias 113
Figura 38 - Distribuição dos Tamanho das Fraturas 114
Figura 39 - Diagrama de Roseta e Estereograma 117
Figura 40 - Matriz de Correlação das métricas das Fraturas 119
Figura 41 - Exemplo sem a suavização 125
Figura 42 - Exemplo sem suavização 125
Figura 43 - Distribuição das aberturas (px) - comparação 126
Figura 44 - CCDF (Função de Distribuição Acumulada Complementar) log-log – comparação [px] 126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados de medição manual das fraturas 86
Tabela 2 - Resultados do FRAMFRAT 89
Tabela 3 - Tabela comparativa dos resultados manuais e do FRAMFRAT 89
Tabela 4 - Tabela das diferenças absolutas dos resultados manuais e do FRAMFRAT 90
Tabela 5 - Indicadores Estatísticos 91
Tabela 6 - Resultados do experimento do Pi *et al.* (2021) 96
Tabela 7 - Dados das fraturas detectadas pela FRAMFRAT 111
Tabela 8 - Dados dos segmentos das fraturas detectadas pela FRAMFRAT 115

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATotal	Area total da imagem.
Az	Azimute
CCDF	Função de distribuição acumulada complementar
CCL	*Connected Component Labeling*
CLAHE	*Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization*
CNNs	Redes Neurais Convolucionais
CTL	*Contour Tracing Labeling*
DFN	*Discrete Fracture Network*
FRAMFRAT	Ferramenta de Análise de Fraturas
GUI	Interfaces Gráficas de Usuário
IC95%	Intervalo de confiança de 95% (para a abertura média)
LiDAR	*Light Detection and Ranging*
MAE	Erro Médio Absoluto
MAPE	Erro Médio Percentual Absoluto
MAT	Medial Axis Transform
MM	Morfologia Matemática
NE–SW	Nordeste–Sudoeste
NLM	*Non-Local Means* (remoção de ruído)
PCA	Análise de Componentes Principais
Pixel	*Picture Elements*
R^2	Coeficiente de Determinação
RGB	*Red, Green, Blue*
RMSE	Erro Quadrático Médio
RNF	Reservatórios Naturalmente Fraturados
ROI	Região de Interesse (recorte da imagem analisada)
SFM	*Structure-from-Motion*
TH	Transformada de Hough
UAV	Veículo aéreo não tripulado
W–SW	Oeste–Sudoeste

LISTA DE SÍMBOLOS

$C_i(T)$	Conjunto de pixels pertencentes à classe i para o limiar T
D_f	Dimensão fractal
$I_{suavizada}(x, y)$	Intensidade do pixel na posição (x, y) na imagem
$N_i(T)$	Número de pixels na classe i para o limiar T
$\mu_i(T)$	Média das intensidades dos pixels na classe i para o limiar T.
$\sigma^2(T)$	Variância intraclasse total T
σ_B^2	Variância
$\sigma_i^2(T)$	Variância dos pixels na classe i para o limiar T
$\omega_i(T)$	Proporção de pixels na classe i
$h(I)$	Histograma da imagem
K	Expoente de escala (Lei de Potência)
N	Número cumulativo de valores superiores a “b” (Lei de Potência)
C	Covariância
$D(x, y)$	Transformada de distância
$G(u, v)$	Valor do kernel gaussiano na posição (u, v)
I	Imagem binária original após a binarização por Otsu
$I(x, y)$	Intensidade do pixel na posição (x, y) na imagem original;
$I(x)$	Intensidade do pixel na posição x
$Im(x, y)$	Imagem binarizada.
L	comprimento total da fratura
N	Número total de pixels na imagem
$S(x, y)$	Esqueleto
T	Limiar
$V = [v_1, v_2]$	Autovetor correspondente ao maior autovalor.$\emptyset\ porosidade$
a	Constante (Lei de Potência)
$f(x, y)$	Função sobre a intensidade de luz
k	Permeabilidade
u, v	Deslocamentos em relação ao pixel central (x, y)
σ	Desvio padrão
$\sum$	Somatório

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	**18**
1.1	JUSTIFICATIVA	20
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	21
1.2.1	**Objetivo Geral**	**21**
1.2.2	**Objetivos Específicos**	**22**
1.3	ESTRUTURA DA TESE	22
2	**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**	**24**
2.1	RESERVATÓRIOS NATURALMENTE FRATURADOS	24
2.2	DESCONTINUIDADES GEOLÓGICAS	26
2.2.1	Afloramentos fraturados	**27**
2.3	CARACTERIZAÇÃO DE FRATURAS	28
2.3.1	**Rede de fraturas**	**30**
2.3.2	**Propriedades e atributos**	**32**
2.4	GEOMETRIA FRACTAL	33
2.4.1	**Dimensão Fractal**	**34**
2.4.2	**Método *Box – Counting***	**35**
2.5	TÉCNICA DE *SCANLINE*	37
2.6	ABORDAGEM DE FRATURAS DISCRETAS	38
2.7	CONCEITOS DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM DIGITAL	40
2.7.1	**Pré-processamento e operações fundamentais**	**40**
2.7.2	**Rotulagem de componentes conectados**	**44**
2.7.3	**Segmentação de imagem**	**45**
2.7.4	**Limiarização (*Thresholding*)**	**46**
2.7.5	**Método de Otsu**	**47**
2.7.6	**Algoritmo de Detecção de Borda e Esqueletização**	**49**
2.7.7	**Morfologia Matemática e Transformada de Hough**	**51**
2.8	MÉTODOS DE RECONHECIMENTO DE DESCONTINUIDADES EM MATÉRIA ROCHOSA BASEADO EM IMAGEM DIGITAL	53
2.8.1	**Método Manual de Delineamento de Fraturas**	**53**
2.8.2	**Métodos Baseados em Detecção de Bordas por Gradiente de Cor**	**54**
2.8.3	**Métodos Baseados em Detecção de Bordas em Escala de Cinza**	**55**

2.8.4 Métodos Baseados em Detecção de Bordas em Imagens Binárias 55
2.8.5 Métodos Baseados em Análise Morfológica e Textura 56
2.8.6 Métodos Baseados em Aprendizado de Máquina e Redes Neurais 56
2.8.7 Baseados em Fotogrametria e Modelagem 3D 57
2.8.8 Métodos Baseados em Varredura Laser Terrestre (LiDAR) 58
2.8.9 Limitações Gerais dos Métodos Existentes 58
2.8.10 Necessidade de Soluções Acessíveis e Integradas 59
2.8.11 Nossa Solução: FRAMFRAT 59
3 METODOLOGIA 61
3.1 AQUISIÇÃO E PRÉ-PROCESSAMENTO DA IMAGEM 64
3.2 DETECÇÃO DE FRATURAS 66
3.2.1 Passos para a Determinação do Limiar T 68
3.2.2 Operações Morfológicas 70
3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS FRATURAS 72
3.3.1 Cálculo de Comprimento 72
3.3.2 Cálculo de Abertura 73
3.3.3 Cálculo de Orientação 74
3.3.4 Área da Fratura ($Afraturas$) 75
3.3.5 Porosidade (∅) 75
3.3.6 Permeabilidade (k) 76
3.4 CÁLCULO DA DIMENSÃO FRACTAL 76
3.5 SEGMENTAÇÃO AVANÇADA 77
3.6 VISUALIZAÇÃO E ANÁLISE ESTATÍSTICA 78
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 80
4.1 APRESENTAÇÃO DO SISTEMA 80
4.2 VALIDAÇÃO DO SISTEMA FRAMFRAT 83
4.2.1 Coleta de Dados para Validação 83
4.2.2 Procedimento de Medição Manual 84
4.2.3 Resultados do FRAMFRAT 87
4.2.4 Análise Comparativa entre FRAMFRAT e Medições Manuais 89
4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA 90
4.4 ANÁLISE DOS GRÁFICOS DE DISPERSÃO 92
4.5 ANÁLISE DE BLAND-ALTMAN 93

4.6 PONTOS POSITIVOS E LIMITAÇÕES 95
4.7 ANÁLISE COMPARATIVA COM OUTROS MODELOS 95
4.7.1 Cálculo da Taxa de Diferença para o FRAMFRAT 98
4.7.2 Análise dos Resultados 99
4.7.3 Considerações sobre os Métodos 101
4.8 APLICAÇÃO: ESTUDO DE CASO 102
4.8.1 Pré-processamento de Imagem 107
4.8.2 Detecção das Fraturas 108
4.8.3 Caracterização das Fraturas 110
4.8.4 Aspectos conclusivos do Estudo de Aplicação do FRAMFRAT 120
5 CONCLUSÕES 128
REFERÊNCIAS 131
ANEXOS 141
ANEXO A - DESCRIÇÃO DOS CÓDIGOS E INSTALAÇÃO DO SISTEMA FRAMFRAT 141

1 INTRODUÇÃO

A geologia estrutural representa o campo de estudo de falhas, dobras e outras estruturas formadas na litosfera. A caracterização do meio geológico permite conhecer, classificar e quantificar as estruturas que formam descontinuidades naturais nestes meios, em escalas que variam de milímetros a quilômetros (Anders *et al.*, 2014; Fossen, 2017). O conhecimento dessas estruturas é importante para o mapeamento e a exploração de recursos naturais armazenados em meios geológicos cujo fluxo de fluidos, como óleo e gás, depende dessas estruturas.

Um exemplo importante da necessidade da caracterização de sistemas fraturados envolve a província petrolífera da margem atlântica sudeste do Brasil, onde estão localizados os campos de óleo e gás natural do intervalo pré-sal. Os depósitos do pré-sal do Brasil são constituídos por rochas carbonáticas em sua maior parte, as quais possuem porosidade associada a eventos diagenéticos tardios que influenciam falhas, fraturas e zonas de dissolução (karst) (Milani *et al.*, 2000).

Para a caracterização de reservatórios naturalmente fraturados, utiliza-se o estudo de sistemas de fraturas naturais por meio de ferramentas estatísticas. O presente estudo tem seu foco exatamente nos conceitos e abordagens que utilizam afloramentos naturais para capturar padrões que possam auxiliar na modelagem e na simulação numérica de reservatórios naturalmente fraturados (RNF).

Diante dos padrões complexos de heterogeneidades físicas que compõem o meio geológico, a compreensão dos fenômenos de origem das fraturas e de seus modos de ocorrência e preenchimento apresenta enormes desafios. A maior parte das fraturas que ocorrem em reservatórios apresenta dimensões que não permitem sua detecção/quantificação por meio de métodos geofísicos, como a sísmica de reflexão e, por isso, são classificadas como heterogeneidades sub-sísmicas. Uma maneira de tratar esse desafio é utilizar afloramentos naturais fraturados para buscar entender como os padrões de fratura se comportam a partir de dados amostrais que podem ser equiparados a dados de amostragens de poços até determinadas condições (Laubach *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2018; Anders *et al.*, 2014).

Algoritmos de segmentação podem auxiliar no processo de definição de propriedades que envolvem sistemas porosos em meio geológico, mas a ocorrência de artefatos e a dificuldade de separar feições como microporos, devido à resolução, representa desafios importantes para a obtenção de resultados quantitativos. Este é

um exemplo dos problemas relacionados a segmentação de imagens digitais para a identificação de padrões naturais em meio geológico, da mesma forma como a segmentação de imagens enfrenta para o tratamento de sistemas de fraturas.

Para que um reservatório seja viável economicamente, primeiro é desejável que esse tenha porosidade e permeabilidade que permitam o adequado armazenamento e escoamento dos fluidos em seu interior. As propriedades petrofísicas podem ainda ser afetadas pela presença de uma rede de fraturas, como abordado por Volatilli *et al.* (2022), sejam naturais e ou induzidas, e em diferentes escalas, as quais afetam, ou possivelmente irão afetar, o fluxo de fluido no seu interior. Nesse sentido, destaca-se que a forte relação entre fraturas e escoamento, pois elas funcionando como vias preferenciais por onde óleo, gás ou água se movem com maior facilidade.

Ademais, para que a contribuição da rede de fraturas ocorra efetivamente no escoamento dos fluidos em produção, é necessário que a estrutura da rede de fraturas tenha uma integração eficiente, ou seja, deve existir conexão entre fraturas. As fraturas naturais são, em geral, resultantes das interações das tensões atuantes em subsuperfície. No entanto, há fraturas que podem ser provocadas por ações como a perfuração, pelo aumento da pressão nos poros durante a injeção de fluidos, pelo fraturamento hidráulico, por interações entre a rocha e os fluidos, além da redistribuição das tensões ocasionada pela exploração do reservatório.

Assim sendo, a abordagem de reservatórios naturalmente fraturados trata do primeiro tipo de fraturas, relacionado às causas naturais. Do ponto de vista puramente geomecânico, as fraturas podem ser definidas como descontinuidades do maciço rochoso e de superfícies que sofreram a perda de coesão. Desta maneira, as fraturas são o resultado da ruptura do material que deixou de ser coeso.

Ressalta-se que analisar fraturas não é tarefa simples, haja vista a variedade de características que estas podem apresentar e, consequentemente, os efeitos em uma escala produtiva. Como os reservatórios de hidrocarbonetos estão submersos, tem-se um acréscimo de complexidade operacional para estudos sobre as fraturas. Então, evidencia-se como de grande valia a realização de pesquisas com vistas à melhoria contínua de operações em torno de reservatórios de petróleo, principalmente em virtude do alto valor deste recurso para a sociedade.

Nesta tese, almeja-se a demonstração do uso de processamento de imagem digital para auxiliar estudos de fraturas, uma vez que é possível se fundamentar em

sistemas matemático-computacionais para caracterizar esses tipos de descontinuidade. Assim, com a otimização de tempo operacional, linguagens de programação reduzem tempos de cálculos em um custo com redução significativa, resultando um efeito que se reflete na elevação de produtividade.

Embora não seja o real enfoque deste estudo, deve-se trazer para destaque a imagem digital como uma fonte de dados bastante valiosa. Essa fonte de dados não se delimita ao que pode ser visível por olhos humanos, pois o processamento de imagem digital consegue extrair dados para visão computacional que podem se desdobrar em análises substanciais. No que tange às fraturas, sublinha-se que o processamento de imagens digitais e a operacionalização matemática viabilizam estudos de forma a contornar certas complexidades, como as do contexto da geometria fractal.

1.1 JUSTIFICATIVA

Fraturas são rupturas em superfícies rochosas que geram descontinuidades mecânicas e hidráulicas, conferindo deslocamento na rocha. Em reservatórios geológicos, tais como os de petróleo, a produção de fluidos pode também se dar através de redes de fraturas, especialmente em formações de baixa permeabilidade, as quais podem, ao mesmo tempo, representar desafios e oportunidades para a exploração e produção de hidrocarbonetos.

No âmbito dos desafios, a caracterização realista de reservatórios naturalmente fraturados demanda informações precisas sobre a distribuição e parâmetros das fraturas, incluindo abertura, comprimento, orientação, porosidade e permeabilidade. Kharrat e Ott (2023) destacam que a descrição inadequada dessas redes de fraturas pode levar a super ou subestimativas na recuperação de petróleo, com impacto direto nas estratégias de produção e nos resultados econômicos.

Além disso, Li *et al.* (2024) evidenciam que a caracterização incorreta de fraturas resulta em erros significativos na simulação de fluxo, dificultando a otimização da produção. A complexidade de obtenção de dados diretos de subsuperfície, o elevado custo computacional e a subjetividade presente em metodologias tradicionais justificam a busca por abordagens automatizadas. Nesse sentido, Wang *et al.* (2024) demonstram que o uso de processamento digital de imagens permite detectar e

parametrizar fraturas de maneira mais objetiva, reduzindo incertezas e tornando as análises mais ágeis.

Por outro lado, do ponto de vista das oportunidades, as fraturas podem constituir os principais canais de escoamento em rochas com baixa permeabilidade de matriz, incrementando a produtividade de poços. A análise de afloramentos análogos, conforme discutida por Palamakumbura *et al.* (2019), fornece uma alternativa valiosa para compreender e validar as características das fraturas em subsuperfícies, permitindo extrapolar padrões observados em campo aberto (afloramento) para reservatórios profundos. O uso de imagens digitais de alta resolução torna viável a extração quantitativa de parâmetros geométricos críticos à modelagem dessas redes de fraturas.

Adicionalmente, a incorporação de conceitos de dimensão fractal na análise das fraturas, conforme indicado por Tian *et al.* (2023) e Wang e Cheng (2020), confere uma perspectiva quantitativa mais robusta. Esses estudos demonstram que a geometria fractal das fraturas está diretamente ligada à permeabilidade, conectividade e, consequentemente, ao comportamento do fluxo de fluidos no meio poroso.

Diante desse panorama, justifica-se o desenvolvimento de uma metodologia automatizada para a detecção e parametrização de fraturas em afloramentos ou testemunhos, empregando técnicas de processamento de imagem digital. Ao permitir a extração sistemática de parâmetros fundamentais e reduzir a subjetividade e o trabalho manual, espera-se melhorar a qualidade da caracterização das fraturas nesse contexto, diminuir incertezas e otimizar a modelagem de reservatórios naturalmente fraturados.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal do trabalho é desenvolver uma metodologia automatizada para a detecção e parametrização de sistemas de fraturas em superfícies rochosas, utilizando técnicas de processamento de imagem digital.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para o alcance do objetivo geral deste estudo, elencam-se os seguintes objetivos específicos:

- Segmentação e Identificação Automática: Implementar técnicas de processamento de imagem para segmentar e identificar, de forma automatizada, as fraturas a partir de imagens de afloramentos ou testemunhos.
- Extração de Parâmetros Geométricos: Determinar automaticamente parâmetros geométricos das fraturas, incluindo comprimento, abertura, orientação, conectividade e a distribuição do tamanho das aberturas.
- Dimensão Fractal e Parâmetros Hidráulicos: Calcular a dimensão fractal das redes de fraturas e correlacioná-la a parâmetros como porosidade e permeabilidade, estabelecendo uma base quantitativa mais sólida para a modelagem.
- Validação da Metodologia: Testar e validar o método proposto por meio de imagens de fraturas, comparando os resultados obtidos com outras técnicas consagradas.
- Aplicação Integral: Aplicar o método desenvolvido em um caso completo, utilizando imagens de fraturas de afloramentos naturais, de modo a avaliar sua eficiência na análise ponta a ponta

1.3 ESTRUTURA DA TESE

A presente tese está estruturada em cinco seções principais. Na primeira seção, Introdução, são apresentados o contexto do tema, a motivação do estudo, os objetivos da pesquisa e a justificativa da sua relevância. A segunda seção, Fundamentação Teórica, reúne referenciais sobre reservatórios naturalmente fraturados e processamento de imagens digitais, fornecendo as bases conceituais necessárias para o entendimento do problema e das abordagens adotadas.

Na terceira seção, Metodologia, detalham-se as estratégias, procedimentos e algoritmos utilizados na elaboração do aplicativo para caracterização automática de fraturas, abrangendo desde a aquisição e pré-processamento das imagens até a extração dos principais atributos das descontinuidades. Em seguida, a quarta seção, Resultados e Discussão, apresenta as análises, validações e comparações dos

resultados obtidos, estabelecendo um diálogo entre as descobertas do estudo e a literatura consultada.

Por fim, a quinta seção, Conclusões, sintetiza as principais contribuições do trabalho, suas limitações e sugestões de pesquisas futuras, consolidando o papel da tese no avanço do conhecimento sobre caracterização automatizada de fraturas em superfícies rochosas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RESERVATÓRIOS NATURALMENTE FRATURADOS

Em todo o mundo há formações geológicas fraturadas, como as rochas, que apresentam estruturas descontínuas diversas, sendo estas o foco de atenção em vários campos produtivos, abrangendo o abastecimento de água, exploração petrolífera, aplicações geotécnicas, entre outros campos citados por Berkowitz (2002). Por isso, estudos tematizados em fraturas geológicas são fundamentais, sendo que as formas como as estruturas se caracterizam são importantes para determinadas operações do campo da mineração e geotecnia, como enfatizado por Pi *et al.* (2021).

Nesse contexto, fraturas podem ser conceituadas como falhas, juntas ou descontinuidades em um elemento rochoso. Em geologia estrutural, fratura é uma descontinuidade mecânica em um corpo rochoso, onde ocorre separação ou ruptura sem necessariamente haver deslocamento relativo entre os blocos adjacentes. Ela pode se manifestar como: juntas - fraturas sem deslocamento visível; falhas - fraturas com deslocamento paralelo ao plano da fratura; e diaclases: fraturas com afastamento perpendicular (Zerfass; Chemale Júnior, 2011). Em mais detalhamentos, Berkowitz (2002) explica que as juntas decorrem de erosão, soerguimento, pressão de fluidos, ação térmica ou química; enquanto as falhas resultam de tectonismo intenso.

De acordo com Galindo *et al.* (2018), as fraturas naturais ocorrem mais notoriamente em rochas carbonáticas em nível mundial, sendo que, nacionalmente, estas são mais encontradas em reservatórios carbonáticos do Pré-Sal, que é oriundo da ruptura terrestre entre territórios continentais da África e da América do Sul.

No campo da produção de petróleo, como na atuação da Petrobras no Brasil, por exemplo, há um cenário de trabalho em profundidades compreendidas entre 5,5 e 7 km aproximadamente, onde há os chamados reservatórios do pré-sal brasileiro, cujas fraturas podem armazenar e fomentar o fluxo ou ser um entrave para o escoamento. Sabe-se que os reservatórios são massas rochosas constituídas de fraturas ou fissuras diversas. Assim, há uma matriz rochosa (ou rocha-matriz) onde há a maioria dos hidrocarbonetos e as fraturas que possibilitam o transporte de fluidos. Adicionalmente, nesse meio poroso, quando as fraturas naturais apresentam papel crucial sobre o comportamento mecânico e hidrodinâmico, tem-se o caso dos

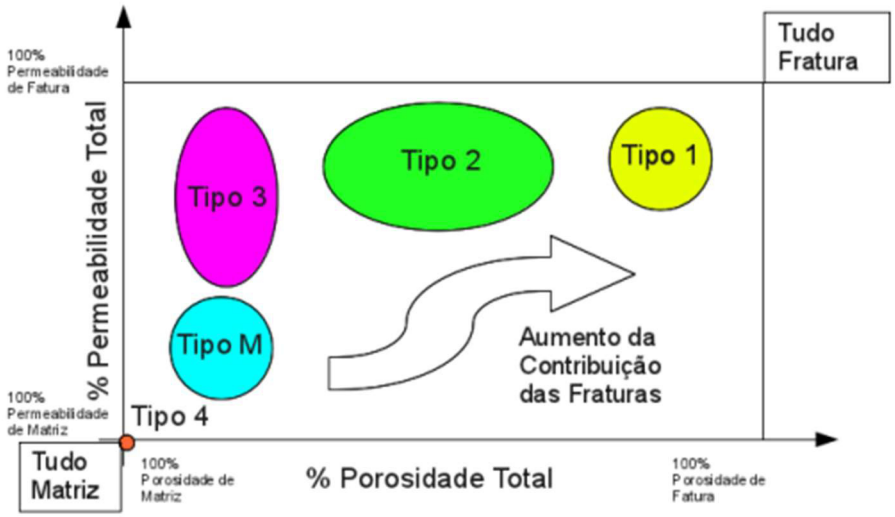
reservatórios naturalmente fraturados (RNF) (Duque Neto *et al.*, 2015; Nelson, 2001; Passos *et al.*, 2013).

Destaca-se a essencial participação dos RNF na produção de hidrocarbonetos em escala global, o que reitera a importância destes elementos rochosos. A produtividade desses reservatórios se fundamenta nas propriedades de porosidade e permeabilidade da rocha que são influenciadas pelas fraturas e fatores estruturais. A porosidade e permeabilidade dos RNF se distribuem heterogeneamente. Contudo, a tendência é que as fraturas apresentem permeabilidades consideráveis, ao passo que a porosidade pode ser de grandeza mais reduzida, permitindo que o fluxo de fluido armazenado seja controlado pelas fraturas (Assis, 2019; Paula; Campos, 2016; Palamakumbura *et al.*, 2019; Raitz *et al.*, 2018).

Nelson (2001) aborda sobre quatro tipos de reservatórios naturalmente fraturados, a saber (Figura 1):

- Tipo 1 – quando a matriz é impermeável, sendo a porosidade e permeabilidade do reservatório responsabilidades das fraturas;
- Tipo 2 – quando a matriz é responsável por metade da porosidade, porém sem ligação significativa com a permeabilidade e produtividade;
- Tipo 3 – a matriz do reservatório possui porosidade e permeabilidade consideráveis, e as fraturas elevam a produtividade; e
- Tipo 4 – quando as fraturas do reservatório não impactam positivamente no fluxo, mas sim aumentam a anisotropia.

Figura 1 - Classificação de Fratura (Nelson, 2001)



Fonte: Paiva (2012)

Embora se tenha o conceito de reservatórios naturalmente fraturados como um sistema poroso, envolvendo rocha-matriz e fraturas, a representação e modelagem desse meio podem ser complexas devido às características petrofísicas dos reservatórios, uma vez que são função de dois meios que interagem entre si - matriz porosa e fraturas - cada um com suas particularidades, que podem impactar na produção de hidrocarbonetos (Galindo *et al.* 2018; Passos *et al.*, 2013).

Ademais, no âmbito dos reservatórios naturalmente fraturados, deve ser considerada a chamada hipótese de dupla porosidade[1], cuja gênese ocorreu no campo da exploração de petróleo na década de 1960. Esse conceito de porosidade dupla leva em conta que o fluido escoa devido à maior permeabilidade das fraturas que, por sua vez, têm baixa capacidade de armazenamento. Desse modo, o fluido se armazena nos blocos rígidos e porosos da matriz rochosa, que possui baixa permeabilidade. As duas porosidades em questão geram a porosidade total do meio (Paula; Campos, 2016).

Ainda persistem os esforços de pesquisadores em torno dos RNF a fim de obter melhores caracterizações de fraturas devido ao já mencionado papel das fraturas no escoamento de fluido, sendo imprescindível maximizar o conhecimento em torno desse mecanismo. Isso é respaldado por Miranda (2015), quando destaca que os reservatórios naturalmente fraturados consistem no tipo mais complexo. O autor aponta que a apresentação espacial das fraturas desse contexto, bem como as variações laterais e verticais de como estas estruturas se apresentam, eleva a dificuldade em modelagens do sistema poroso, que também deve considerar a já mencionada dupla porosidade.

2.2 DESCONTINUIDADES GEOLÓGICAS

Na Geologia, um termo reiteradamente mencionado é o de “descontinuidade”, que abrange quaisquer elementos geológicos que demonstrem interrupção na continuidade física de formações.

Fossen (2017) conceitua as fraturas, que fazem parte do objeto de estudo desta tese, como descontinuidades, que podem ser planas ou subplanas, geradas por

[1] Convém destacar que a porosidade e a permeabilidade são propriedades de rochas, sendo que a primeira diz respeito aos espaços vazios em relação ao volume total da rocha; enquanto a permeabilidade se refere à resistência à percolação hidráulica (Chiossi, 2013).

esforço interno ou externo. De forma semelhante, Chiossi (2013) também utiliza o termo “descontinuidade” para definir as fraturas. Desta maneira, o autor explica que fratura pode ser compreendida como qualquer descontinuidade de um elemento rochoso que cause separação com distribuição desordenada. O autor complementa que as fraturas apresentam irregularidades e rugosidades quanto à configuração física mais comum.

2.2.1 Afloramentos fraturados

Diante das tantas heterogeneidades que uma formação rochosa pode evidenciar, a compreensão de como as fraturas são geradas e disseminadas pode ser tarefa complexa. Há fraturas de reservatórios que possuem características dimensionais indetectáveis adequadamente por ferramentas sísmicas. Como ação que pode contornar essa problemática, há o estudo dos chamados afloramentos análogos, pelos quais pode ser possibilitada a identificação de informações completas sobre os componentes da formação rochosa, classificações e aspectos estruturais (Assis, 2019; Costa, 2012).

Conforme abordagens de Araújo, A. (2019), os afloramentos são formações de rocha da superfície que tendem a apresentar semelhanças com formações em subsuperfície. No que concerne aos afloramentos análogos de reservatórios de petróleo, pode-se afirmar que há representantes para quase que a totalidade de tipos geométricos de reservatórios. Diante disso, pesquisas que intentem a avaliação visual de fraturas podem se valer dos afloramentos devido à dificuldade de registros de imagens em área de subsuperfície. Como exemplificação do abordado, Araújo, A. (2019) desenvolveu sua pesquisa em torno de um calcário laminado da Formação Crato, que consiste em afloramento correspondente a uma das fácies dos reservatórios do Pré-Sal das bacias brasileiras de Santos e Campos.

De acordo com Assis (2019), o emprego de afloramentos análogos gera um modelo em escala menor, em relação a uma célula de simulação de um modelo relacionado ao reservatório. Entretanto, há o ganho em entendimento do sistema de fraturas. Em suma, a aplicação de técnicas e fórmulas matemáticas consistentes favorece a obtenção de características geomecânicas e petrofísicas correspondentes, como destaca a autora.

No que tange aos estudos de fraturas que envolvem imagens digitais e afloramentos, Palamakumbura *et al.* (2019) listam alguns cuidados fundamentais, que abrangem a clareza da identificação da fratura na imagem, cenário sem vegetação e outros elementos que possam causar ruídos. Nas imagens, devem ser incluídas referências dimensionais para fins de escala. As fotografias devem ser obtidas sob ângulo o mais reto possível a fim de evitar distorções. Quanto aos afloramentos horizontais, os autores recomendam o uso de régua com bússola com orientação para o norte com vistas a posteriores correções de orientações de fraturas.

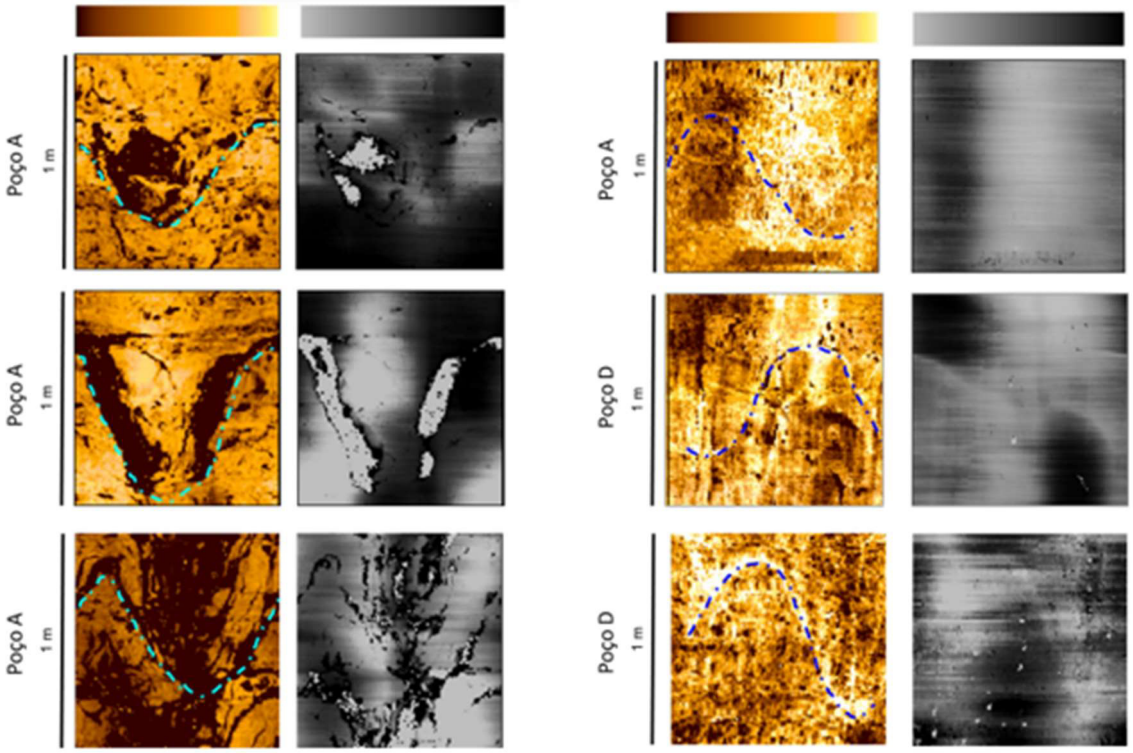
2.3 CARACTERIZAÇÃO DE FRATURAS

Em linhas passadas, foram abordadas as fraturas como de alta responsabilidade no que tange ao fluxo de fluido em reservatórios. Desta forma, quando as fraturas são abertas, elas tendem a favorecer escoamentos; em outro extremo, quando há material de preenchimento das fraturas, é esperado que elas atuem como barreira de fluxo (Olson *et al.*, 2009).

Berkowitz (2002) enfatiza que em meios fraturados, a conectividade proporcionada por fraturas abertas pode ser o principal fator que controla o transporte de fluidos, ao passo que o preenchimento das fraturas diminui drasticamente essa conectividade. Além disso, Wu *et al.* (2006) demonstram, em estudos de reservatórios associados a rochas vulcânicas, que a abertura das fraturas é determinante para o fluxo, enquanto a cementação ou deposição de material nos espaços fraturados pode atuar como barreira, limitando a circulação de fluidos.

Nesse contexto, sublinham-se os tipos de fratura em abertas e fechadas (Figura 2), o que já demonstra heterogeneidade nas características de fraturas, porém há outros aspectos relevantes que ampliam as distinções entre elas. Galindo *et al.* (2018), por exemplo, descrevem as fraturas como elementos geológicos de três dimensões, sendo uma das dimensões bastante reduzidas, que geram planos em um maciço rochoso. Os autores complementam que há a formação de descontinuidades capilares.

Figura 2 - Exemplo de fraturas abertas (tracejado em azul à esquerda) e de fraturas fechadas (tracejado em azul escuro à direita)



Fonte: Adaptado de Fatah (2020)

Liu *et al.* (2016) explicam que o surgimento natural de fraturas enseja uma força que permite a propagação de trinca em três maneiras a depender do ambiente de tensão atuante, sendo por tração, cisalhamento ou ambos combinados. Para complementar, Araújo, A. (2019) elenca alguns tipos de fraturas em função da origem, podendo estas ocorrer das seguintes formas: por compactação; pela separação do meio rochoso; hidraulicamente; por tração a partir de ação mecânica; por cisalhamento; e por abertura a partir de tração.

De acordo com Berkowitz (2002), fraturas de rocha possuem como visão clássica um par de placas planas e paralelas. Além disso, pesquisas já demonstraram que há a rugosidade superficial irregular e propriedades fractais auto-afins. Contudo, estudos têm sido desenvolvidos com foco na ampliação da caracterização morfológica de superfícies naturais de fraturas e no preenchimento de lacunas sobre o tema. Nesse contexto, Yu *et al.* (2020) explicam que, no âmago da análise de fraturas, mais especificamente a partir de fraturas individuais, são medidas as características geométricas que abrangem orientação, tamanho, abertura e rugosidade superficial.

Caracterizar fraturas de RNF pode ser tarefa complexa. Entretanto, de maneira geral, as propriedades das fraturas se determinam a partir de condições da tipologia e estrutura da massa rochosa, bem como tensões, espessura de camada, dentre outros aspectos. Os reservatórios se diferenciam sobremaneira entre si devido à diversidade de distinções entre as fraturas, principalmente quanto ao número de famílias, comprimentos, abertura, padrão topológico, direção e mergulho.

Compreender as características de fraturas é imprescindível para que reservatórios sejam precisamente caracterizados, tornando favorecida, também, a previsão de seu funcionamento. Neste aspecto, destaca-se que os atributos de fraturas indicados no parágrafo anterior podem ser determinantes para o comportamento do fluxo.

Por diversos anos, estudos voltados para fraturas de reservatórios geraram dados para subsidiar a determinação de distribuições de probabilidades representativas de características de fraturas. Desta forma, chegou-se à Lei de Potência, que se relaciona aos comprimentos; enquanto a distribuição de Fisher é a que melhor se volta para o aspecto da inclinação (Reis; Alamy Filho, 2018; Santos *et al.*, 2015).

De acordo com ensinamentos de Santos *et al.* (2015), um modo de aplicação da Lei de Potência em estudos sobre meios fraturados ocorre com distribuição cumulativa, em que há a expressão $N = ab^{-k}$. Nesta, conforme os autores, “b” equivale à medida de abertura da fratura, “N” é o número cumulativo de valores superiores a “b”, a é uma constante e K é o expoente de escala.

2.3.1 Rede de fraturas

É válido apreciar a ressalva de Berkowitz (2002) sobre uma fratura poder se assemelhar a um traço único e contínuo em uma visão aérea, mas que, ao nível do solo, pode ser percebida uma série de traços de fratura menores e sem conexão. Portanto, é imperativo o cuidado na análise de conjunto de fraturas.

É fato que as redes de fraturas apresentam consideráveis irregularidades e condições de conexão e desconexões (padrão topológico), elevando a complexidade para representações matemático-computacionais. Tendo em vista isso, para os RNFs, utiliza-se o modelo de fraturas discretas. Assim, em modelos bidimensionais de

reservatórios, as fraturas são representadas por linhas; enquanto em modelos tridimensionais, por planos.

A finalidade dos modelos de redes de fraturas discretas é a representação da geometria do meio, cuja fidelidade a partir de medidas *in situ* é inviável, pois envolve atuação em subsuperfície. Devido a questões de inviabilidade, redes de fraturas são obtidas a partir de registros de medições em espaçamentos abertos no subsolo, afloramentos análogos, imagens de poços e testemunhos. Desse modo, para geometria de planos de fraturas, trabalha-se com representações em planos poligonais ou elipsoidais considerando um sistema finito abrangendo uma rocha-matriz. Além disso, para as propriedades envolvendo o fluxo em torno das fraturas, considera-se a distribuição das aberturas (Zhang, 2002).

No âmbito do modelo de fraturas discretas, ou *Discrete Fracture Network* (DFN), de reservatórios naturalmente fraturados, deve-se destacar situações em que se observa baixa permeabilidade da rocha-matriz levando ao protagonismo das fraturas sobre a permeabilidade da rocha. Portanto, supõe-se que o fluxo escoa somente nas fraturas conectadas na abordagem de modelos de fraturas discretas, que, por sua vez, apresentam melhor tratamento em uma estrutura estocástica (Assis, 2019; Berkowitz, 2002; Liu *et al.*, 2016).

A caracterização de redes de fratura abrange diversas distribuições, orientação, comprimento, localização, abertura, densidade e conectividade no que diz respeito às fraturas. A quantificação dessas propriedades requer, principalmente, a aplicação de conceitos matemáticos, como a Lei de Potência e aspectos de escala, além da Teoria da percolação.

Com base nas explanações de Berkowitz (2002), há destaque para as propriedades de tamanho de fratura, densidade, orientação e abertura, sendo que a descrição de fraturas, com esses atributos, envolve distribuições lognormal, exponencial e gama. Entretanto, estudos relativamente mais recentes lançam luz sobre a Lei de Potência e caracterizações fractais devido ao volume das pesquisas, ficando evidenciado o uso destas como fundamentais para descrever quase todas as propriedades de fraturas.

Assim, por exemplo, pesquisas com simulações têm evidenciado que as distribuições de Lei de Potência são inerentes ao processo de quebra de rochas naturais. Nesse tema, Santos *et al.* (2015) abordam que a análise do aspecto da

distribuição de abertura de fratura é mais favorável com uma equação de Lei de Potência por escala log-log do que por ajustes lognormais ou exponenciais.

2.3.2 Propriedades e atributos

Reitera-se que há uma distinção bastante significativa quanto às propriedades de porosidade e permeabilidade entre fraturas e rocha-matriz. Isso porque as referidas propriedades tendem a se apresentar em maior nível nas fraturas; enquanto os fluidos se concentram no material rochoso principal. Sobre essas duas principais propriedades de materiais porosos, Shen *et al.* (2018) explicam que estas se condicionam à microestrutura dos poros, que geralmente é complexa, tornando desafiante a descrição precisa da porosidade e permeabilidade através de métodos geométricos.

Embora exista o enfoque nas referidas propriedades, há outros aspectos que também devem ser abordados. Assis (2019) explica que geralmente não ocorre conexão das fraturas em todos os locais da rocha, gerando separações. Além disso, a autora detalha que a descrição de padrões de fraturas envolve atributos importantes, sobre os quais se têm as abordagens seguintes.

Quanto à forma, tem-se um atributo de complicada compreensão haja vista a raridade de ocasiões em que uma fratura pode ser observada em contexto tridimensional. De toda forma, Assis (2019) menciona que fraturas balizadas por outras estruturas tenderão a ser regulares; caso contrário, poderão se demonstrar em formas de círculos ou elipses. Sobre o tamanho, tem-se a medida do comprimento das linhas de fraturas que cortam os afloramentos. Vale ressaltar que esse comprimento pode variar de centímetros a quilômetros, sendo que a Lei de Potência pode trazer uma boa representação para esse atributo das fraturas.

Sobre a abertura, conforme Assis (2019), essa consiste na separação perpendicular ao plano da fratura. Essa característica se distingue do espaçamento, que se trata da distância entre duas fraturas que se sucedem. Seguindo o raciocínio da autora, há o fator da intensidade, que corresponde à quantidade de fratura ou segmentos de fraturas por unidade de volume de rocha. Há também a característica do mergulho, que se define como um ângulo gerado pelo plano geológico em relação

à direção horizontal, podendo este mergulho ser de 0º quando se tratar de camadas de fraturas horizontais.

Após apresentados os parâmetros inerentes às fraturas individuais, deve-se mencionar sobre a orientação, que é pertinente às redes de fraturas. Babadagli (2001) discute que as fraturas com orientação perpendicular ao fluxo de fluido provocarão uma redução de permeabilidade. Já quanto às fraturas com orientação no mesmo sentido do fluido, ocorrerá um efeito contrário. Tendo em vista isso, o autor alerta que a orientação deve receber enfoque em análises em que a porosidade importa consideravelmente.

2.4 GEOMETRIA FRACTAL

De acordo com Barbosa (2015), vários exemplares de estruturas fractais podem ser encontrados na natureza, abrangendo desde o formato da costa de um país e, até mesmo, os formatos de nuvens. Dentre os vários exemplos citados pelo autor, nesta tese interessa o relevo terrestre com suas formas sinuosas e a forma estrutural da porosidade de formações rochosas. Sobre esta última, o autor realça a importância do conhecimento para a produtividade de empresas do campo da produção de petróleo.

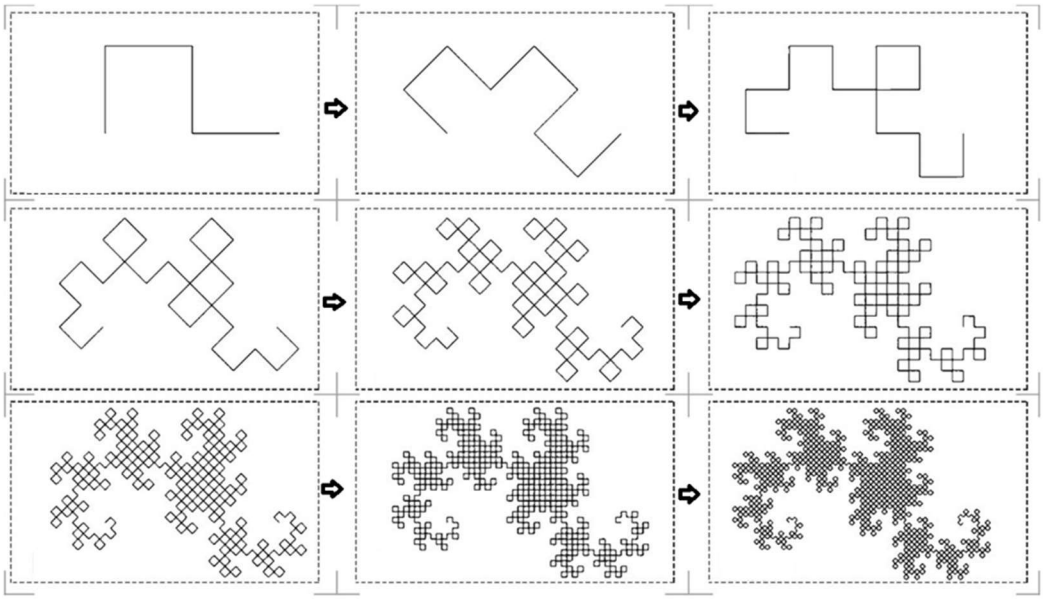
Ainda na síntese de Barbosa (2015), há que os fractais consistem em formas com o atributo chamado de autossemelhança; isto é, as figuras podem se desmembrar em partes que representem a sua totalidade, mesmo que de maneira aproximada. O autor explica que as referidas figuras são obtidas por mecanismos matemáticos baseados em números complexos, geralmente auxiliados por sistemas computacionais.

Santos *et al.* (2017) descrevem o surgimento da abordagem fractal por volta do início do século XX, mencionando matemáticos como Hausdorff, Cantor, Koch e Sierpinski, que buscavam maneiras de representar as inúmeras formas da natureza diante de limitações do modelo euclidiano. De acordo com os autores, o campo do petróleo foi um dos primeiros a receber enfoque da teoria fractal.

Em uma generalização, pode-se dizer que os fractais são objetos com formato geométrico que se fundamenta em características de autossemelhança, dimensão e escala, cuja detecção é comum em elementos da natureza. Desta forma, entende-se

que objetos com formas fractais permitem que sejam obtidas réplicas menores ou maiores deles a partir de processos matemático-iterativos. Alguns exemplos de fractais são apresentados na Figura 3.

Figura 3 - Exemplos de fractais gerados por computador



Fonte: Adaptado de Nunes (2006)

Martins e Librantz (2006) ressaltam que a geometria fractal possibilita que imagens geométricas apresentem sombra e luminosidade, gerando objetos geométricos de alta complexidade, porém bem representativos de formas da natureza. Os autores destacam também que o conhecimento desse campo foi promovido pela evolução computacional que, por sua vez, passou a possibilitar consideráveis iterações matemáticas e composições gráficas que os autores caracterizam como não lineares.

2.4.1 Dimensão Fractal

Santos *et al.* (2017) detalham sobre três pontos-chave referentes à abordagem fractal. No primeiro ponto, há a dimensão fractal, que é uma forma única de representar quantitativamente determinados objetos com formatos complexos, fora do escopo da geometria tradicional. Em segundo lugar, tem-se que sublinhar a característica da autossimilaridade, que representa o fato de um objeto ter sua ampliação ou redução invariável, uma vez que cada parte do objeto representa o seu

todo. Ainda com base nos autores, há o terceiro ponto-chave, que envolve um processo iterativo na construção de fractais; isto é, há cálculos ou regras que se fundamentam na repetição de procedimentos até chegar a um determinado propósito.

A dimensão fractal se condiciona ao formato do que está em visualização, consistindo em uma propriedade dos fractais, bastante abordada na ciência e engenharia (Barbosa, 2015). Isso é concordado por Wang e Cheng (2020), que também apontam que as redes de fraturas presentes em reservatórios de petróleo submersos demonstram estruturas que se assemelham às redes de árvores com formato fractal. Os autores destacam que diversos modelos de permeabilidade de fraturas se fundamentam em aspectos de contexto de formatos fractais.

Para complementar, são válidas as explanações de Liu *et al.* (2016) quanto à geometria de fraturas, principalmente no atributo comprimento, seguirem características fractais, gerando um precedente para estimativas quantitativas de como as fraturas se distribuem.

De forma mais específica, Santos *et al.* (2017) citam como dimensão fractal a chamada Dimensão de Escala (D_f), que se adequa a quaisquer elementos cuja representação geométrica segue o atributo da autossimilaridade. Assim, tem-se uma dimensão sobre a irregularidade de determinado objeto fractal, sendo que D_f pode se direcionar a um, representando uma linha ou algo aproximado disso; ou se direcionar a dois, configurando ou se aproximando de um plano bidimensional.

2.4.2 Método *Box – Counting*

Para que fraturas sejam caracterizadas, pode-se recorrer ao método *Box – Counting*, ou “contagem de caixas”, que envolve um algoritmo para mensuração de dimensão fractal. Em termos genéricos, pode-se explicar o método como no uso de um conjunto de caixas com determinado tamanho para se sobrepor a um objeto com geometria fractal. Assim, conta-se a quantidade de caixas que conseguem cobrir esse objeto. Contudo, há a aplicação de equações matemáticas e sistemas computacionais na implementação do método visando a geração de um conjunto adequado de caixas.

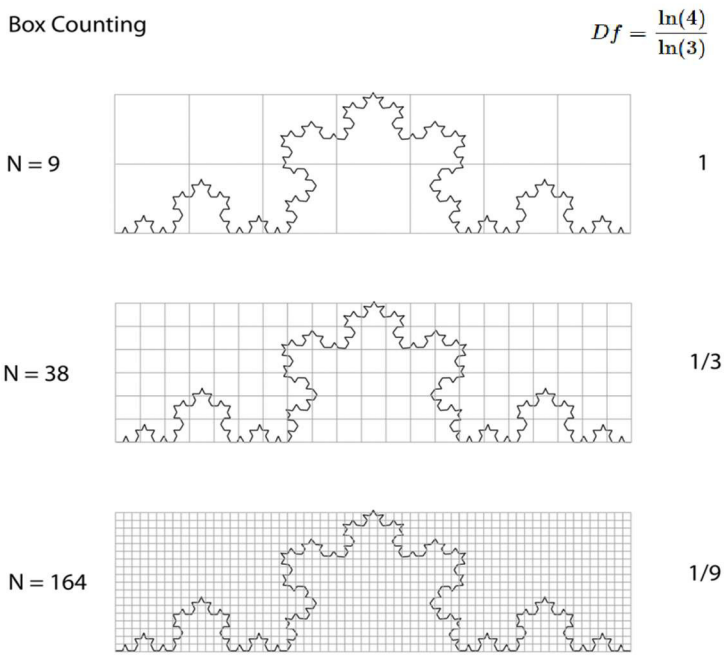
Conforme o já abordado, os fractais possuem representações matemáticas sobre o seu grau de irregularidade, gerando a dimensão fractal. Nesse contexto, o método *Box – Counting* auxilia no cálculo da distribuição espacial do fractal. Caballero

et al. (2020) detalham que esse método abrange a projeção de uma malha quadriculada destinada à quebra do objeto analisado em pedaços menores, formando “caixas”. Sendo conhecidas as dimensões das caixas, adota-se uma equação matemática para que o tamanho da caixa deve tender a zero. Os autores adotaram o método para estudo da geomorfologia de bacias hidrográficas do Brasil.

Contudo, Verscheure (2010) alerta sobre possíveis inconsistências no que tange ao método *Box – Counting* na representação de fraturas. Dentre elas há os prováveis desvios para tamanhos de caixa quando fraturas se apresentarem com dimensões mais significativas. No cenário contrário, que envolve as fraturas de menor escala, deve-se atentar para que não haja contagem incorreta para menos.

Gürel *et al.* (2016) demonstram um estudo desenvolvido com a aplicação do método *Box – Counting* para cálculo da dimensão fractal no âmbito de afloramentos do Reservatório Geotérmico de Alasehir, na Turquia, sendo utilizado um aplicativo de análise de imagens. Pela Figura 4, a letra “N” representa a quantidade de caixas (ou células da malha) que contêm pelo menos parte do fractal em cada escala de análise. Os autores ressaltam sobre alguns erros que podem estar envolvidos nos resultados da aplicação do referido método em relação à realidade do meio fraturado, porém destacam em seus resultados boas estimativas de permeabilidade e porosidade.

Figura 4 - Método *Box Counting*



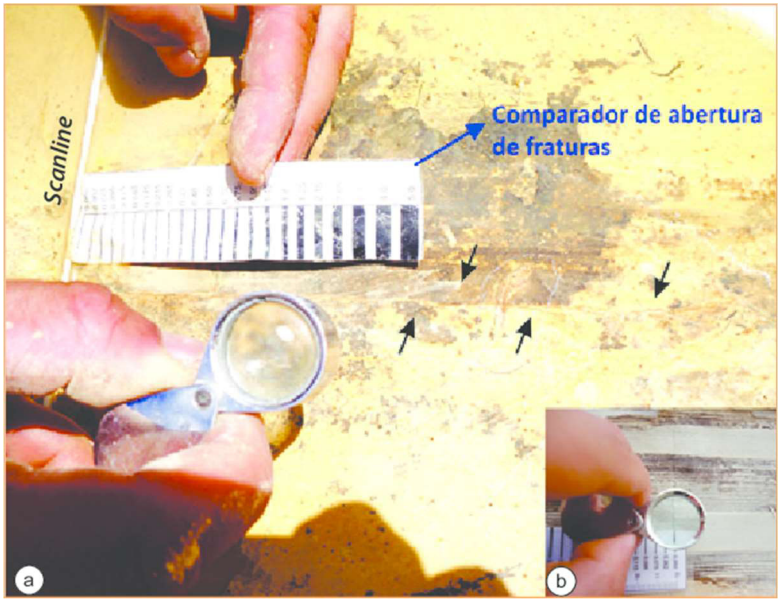
Fonte: Adaptado de So *et al.* (2017)

2.5 TÉCNICA DE *SCANLINE*

Para levantamentos de dados de campos fraturados por meio de afloramentos, vários autores apontam como técnica mais comum à de *scanline*. A técnica envolve uma contagem de estruturas ao longo de uma linha, área ou volume de amostragem, com ajuda de uma régua de comparação e uma bússola geológica (Miranda *et al*, 2018; Nurshal *et al.*, 2020; Ortega; Marrettt; Laubach, 2006; Santos *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2020).

De acordo com Miranda *et al.* (2012), no contexto de fraturas, *scanlines* são linhas de varredura para auxiliar na obtenção de dados de fraturamento. Desta maneira, tem-se uma técnica de baixo custo e relativamente simples para gerar informações de diâmetro de abertura, espaçamento, morfologia, preenchimento de veios, dentre outros parâmetros de fraturas. Em seus estudos, os autores demonstram a coleta de dados de fraturas em afloramentos, sendo necessário utilizar uma régua comparadora e uma lupa de bolso para observações por olho humano, como se pode verificar na Figura 5.

Figura 5 – Demonstração da coleta de dados de fraturas por Método de *scanline*



Fonte: Miranda *et al.* (2012)

No que tange ao instrumento comparador, que é a régua comparadora, Miranda (2015) explica que o desenvolvimento desta ocorreu especificamente para o fim de aplicação de técnica de *scanline* para estudo de fraturas. Conforme o autor, a régua

em abordagem apresenta um padrão de valores em escala logarítmica, espaçados entre as dimensões de 0,05 e 5 mm, que deve ser adotada para comparação dos atributos de fraturas que puderem ser observáveis *in loco.*

As *scanlines* podem ser lineares ou circulares, sendo que, para esta pesquisa, interessa o primeiro tipo. Santos *et al.* (2019) descrevem o uso da técnica de *scanline* linear, cujos dados obtidos foram organizados e tratados em planilhas para geração de gráficos. Para complementar, na análise dos autores, foram observadas orientações de estruturas que interceptavam as *scanlines*, tanto de modo *in loco*, como também por imagem em estudo fora de campo.

Detalhamentos operacionais acerca da técnica de *scanline* podem ser verificados em estudos que envolvem análise de fraturas a partir de afloramentos, tais como os de Santos *et al.* (2015) com levantamento realizado na formação Crato, localizada no Nordeste brasileiro. Em suma, também usando esse local de aplicação, há o estudo de Miranda *et al.* (2018), que demonstram a aplicação das chamadas macro *scanline* e microscaline para pavimentos de afloramentos e seções delgadas respectivamente.

2.6 ABORDAGEM DE FRATURAS DISCRETAS

No escopo de estudos envolvendo RFN, a correta abordagem das estruturas é essencial para prever com precisão a produtividade de reservatórios de petróleo, entre outras aplicações das diversas áreas atreladas à geotecnia. Nesse cenário, são quatro principais estratégias que são empregadas na modelagem do escoamento em meios fraturados: a representação direta das fraturas, o uso de pseudofunções para capturar seus efeitos, a abordagem de múltiplos contínuos ou domínios, e os modelos baseados em redes de fraturas discretas, como elencado por Saalfeld (2016).

Para esse estudo, destacam-se as fraturas discretas. Nesse aspecto, conforme Chung (2019), o modelo de fratura discreta é uma abordagem mais recente utilizada na simulação numérica do fluxo em meios com fraturas, e tem atraído o interesse de vários pesquisadores por oferecer uma representação mais fiel dos reservatórios fraturados.

Nesse contexto, os modelos de Fraturas Discretas (DFN) têm se consolidado como ferramentas robustas para representar explicitamente a geometria e a

conectividade das fraturas, como abordado por Saalfeld (2016). Os DFNs são construídos com base em parâmetros estatísticos derivados de dados reais e permitem simular o fluxo de fluidos e o transporte de massa em meios fraturados com alta fidelidade. A integração de DFNs com modelos de fluxo multifásico e com simulações geomecânicas possibilita avaliar o impacto das fraturas na produtividade de reservatórios e na eficiência de recuperação de hidrocarbonetos.

A aplicabilidade desses modelos em cenários reais é ampla e estratégica. Na indústria do petróleo, a simulação de reservatórios fraturados é essencial para o desenvolvimento de campos carbonáticos e de reservatórios não convencionais, onde a produção depende fortemente da rede de fraturas. Em geotecnia, DFNs são utilizados para prever a estabilidade de encostas rochosas, túneis e barragens, permitindo avaliar trajetórias de fluxo e zonas de fraqueza estrutural, entre outras aplicações. Assim, a simulação de reservatórios naturalmente fraturados, aliada à análise estatística e ao uso de DFNs, constitui uma abordagem indispensável para a tomada de decisões técnicas e econômicas em diversos setores da engenharia e das geociências.

Ademais, a análise estatística de fraturas constitui uma etapa fundamental na caracterização desses sistemas, como demonstrado em estudos como o de Figueiredo (2017) e Silva *et al.* (2024). Isso ocorre a partir de parâmetros como orientação, espaçamento, extensão, densidade e conectividade das fraturas. Estatisticamente, a análise de fraturas pode ocorrer por estatística descritiva (contemplando média, mediana, desvio padrão e outros parâmetros), estudos de correlação ou modelos de regressão linear. Esses dados devem ser tratados para gerar distribuições probabilísticas que fornecem subsídios para modelos estocásticos.

Como importante complemento dessa abordagem, há também os diagramas de Roseta. Os diagramas de roseta são classificados em dois formatos principais: os de frequência, que indicam as direções mais recorrentes dos diversos tipos de lineamentos, e os de comprimento, nos quais o total de extensão dos lineamentos em cada direção é representado pelo tamanho proporcional das pétalas no gráfico. Essa ferramenta se mostra bastante eficaz para segmentar a análise em subáreas, especialmente diante da diversidade de medidas observadas dentro de uma mesma área de interesse (Fossen, 2012).

Diante do exposto, realça-se que a indústria do petróleo vem sendo impulsionada a adotar novas técnicas de caracterização de reservatórios, tanto pelos elevados custos envolvidos no desenvolvimento de campos com alta heterogeneidade quanto pela busca por maior eficiência na recuperação dos recursos. Nesse cenário, destaca-se a importância da abordagem interdisciplinar, que promove uma integração mais efetiva entre geólogos, engenheiros de petróleo, estatísticos e outros profissionais, favorecendo uma interpretação mais consistente da complexidade geológica (Rocha, 2005).

2.7 CONCEITOS DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM DIGITAL

2.7.1 Pré-processamento e operações fundamentais

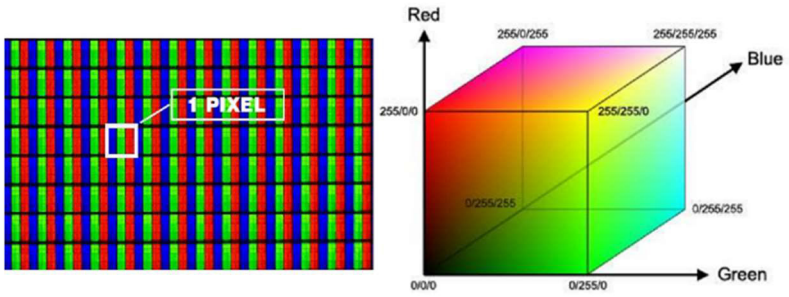
Uma imagem digital é uma representação de um cenário por meio de um conjunto de elementos discretos e de tamanhos finitos, chamados “pixels”, formando um arranjo bidimensional. Pautando-se nas abordagens de Gonzalez e Woods (2000), uma imagem digital consiste em uma matriz, em que os índices de linhas e colunas referenciam a localização de um ponto na imagem; enquanto o valor relacionado a esse ponto indica um vetor de três elementos, que representa as cores primárias vermelho, verde e azul no sistema de cores RGB, como explicado por Nelson (2019). Conforme o autor, cada uma dessas cores consiste em um canal de cor com profundidade de bits específicos.

A cor pressupõe a existência da luz percorrendo determinado espaço, sendo que distintas fontes luminosas geram diferentes cores. Há um arcabouço teórico que ultrapassa a delimitação desta pesquisa para explicar os fenômenos das cores até chegar aos chamados sistemas de cores. Para este estudo, é importante saber do sistema de cor RGB, que são as iniciais para os nomes das cores vermelho, verde e azul em inglês, gerando “*red*”, “*green*” e “*blue*” respectivamente. Desta forma, o sistema RGB versa sobre cores que, se misturadas em determinadas proporções, podem gerar a luz branca. Deve-se destacar que esse sistema é adotado comumente em fotografias coloridas.

Em síntese, pixel que é abreviatura de “*picture elements*”, sendo o menor elemento em um dispositivo de exibição, ao qual é possível atribuir uma cor. De uma

forma mais simples, pixel é definido também como sendo o menor ponto que forma uma imagem digital, sendo que um conjunto de pixels com várias cores formam a imagem interina (Figura 6).

Figura 6 - Sistema de Cores RGB



Fonte: Adaptado de Maia e Trindade (2016)

Gazzoni *et al.* (2006) explicam que as figuras que se baseiam no sistema RGB seguem a representação de 8 bits para cada canal de cor, resultando em 24 bits por pixel, e podendo gerar mais de 16 milhões de cores diferentes, ou mais especificamente 16.777.216 milhões de cores, como apontado por Nelson (2019). Portanto, com base no discorrido por esse autor, quanto maior for o número de bits de uma imagem, maior serão as variações de cores.

Normalmente, fotografias são imagens de determinados objetos ou cenários obtidas por câmeras ou sensores. Quando estas imagens passam por processamento a partir de máquinas computacionais, ocorre a modificação da imagem com auxílio de algoritmos específicos de forma que seja emitido um resultado esperado em termos de informações, mas sendo mantido o vínculo com a imagem original.

A conversão da imagem analógica para se tornar digital equivale à transferência de componentes da imagem para itens representativos de cada espaço minúsculo da original. Esses “espaços” são os já mencionados pixels, identificados conforme cores da imagem processada. Ocorre um processo de codificação dos elementos da imagem para propiciar o reconhecimento e leitura por dispositivos digitais, como será entendido através de parágrafos mais à frente.

Rosot *et al.* (2001) abordam que o processamento de imagens consiste na manipulação numérica de imagens digitais por uso de algoritmos, como também destacado por Gonzalez e Woods (2000). Há um vasto campo de aplicação de processamento de imagens digitais, sendo isso de grande valia para ações em que é

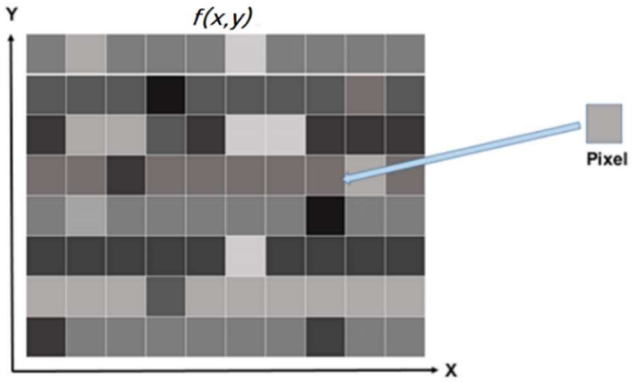
limitado o mecanismo visual do olho humano. Uma imagem processada por máquinas permite a extração de dados importantes para subsidiar determinadas ações e decisões, mas, para isso, há um conjunto de procedimentos necessários de transformação, segmentação e tratamento por meios lógico-matemáticos.

De acordo com Meira *et al.* (2020), antes do processamento de uma imagem adquirida para formato digital, deve ocorrer o pré-processamento, pois a imagem obtida geralmente apresenta irregularidades. Por isso, podem ser necessárias operações matemáticas para melhorar a qualidade da imagem com efeitos diretos nos valores de intensidade dos pixels que a constituem. Após isso, deve ocorrer a segmentação para a devida identificação das regiões de *background* (plano de fundo) e *foreground* (primeiro plano), o que é imprescindível para a realização de análises por algum sistema computacional.

Quanto ao pré-processamento de imagens com vistas a melhorias após a obtenção destas, Gonzalez e Woods (2000) exemplificam que ocorre a aplicação de técnicas para que contrastes sejam realçados e ruídos sejam removidos. De acordo com os autores, essas ações são fundamentais para maximizar os resultados de etapas sequentes do processamento digital.

Já na esteira do processamento digital de imagem, Gonzalez e Woods (2000) abordam sobre a extração de informações de imagens por ações computacionais. Nesse contexto, os autores explicam sobre imagens monocromáticas, que se representam por função $f(x,y)$ sobre a intensidade de luz, em que x e y indicam coordenadas. Neste aspecto, f para determinado ponto (x,y) é proporcional ao nível de cinza ou brilho da imagem para o ponto em questão, como exemplificado na Figura 7. Assim, os autores sintetizam que uma imagem digital em tom de cinza consiste em uma imagem $f(x,y)$ discretizada em brilho e em coordenadas.

Figura 7 - Pixels em tom de cinza



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Na obtenção de imagens digitais através de câmeras fotográficas, por exemplo, há a busca da detecção de distinção de cores entre os componentes da cena a ser retratada, como as diferenças entre objetos e o ambiente em que eles estão inseridos. Após isso, conforme explicado por Rosot *et al.* (2001), há a conversão da imagem analógica para uma representação numérica, ou binarização de imagem, para viabilizar o posterior processamento digital através de computadores.

Segundo explicações de Nelson (2019), um computador não indica o local exato em que está o pixel de uma imagem como é visualizada normalmente, mas sim considera uma grade sobre a imagem com base na relação entre os eixos de localização espacial dos pixels. O autor acrescenta que, para fins de armazenamento, o computador se vale de códigos de localização e tonalidade de cada elemento de imagem, ou seja, a posição e cor exata dos pixels.

O armazenamento de códigos de imagens se dá por meio dos chamados bits, que consistem na informação digital de valor mínimo, sendo que 8 bits correspondem a 1 byte. No formato digital, a descrição das imagens se baseia na quantidade de bits necessários para cada pixel. Gazzoni *et al.* (2006) complementam que, para imagens digitais em escala de cinza, os 8 bits por pixel geram 256 diferentes níveis de cinza. Entretanto, para imagens binárias, é necessário somente 1 bit por pixel, o que resulta em apenas duas cores, preto e branco.

Em termos mais simples, apoiando-se nas abordagens de Nelson (2019), pode-se dizer que a reunião de pontos pretos e brancos gera um padrão que, por sua vez, representa a imagem digital em escala de cinza ou imagem de 1 bit/pixel. Nesse aspecto, uma imagem binária só possui um bit, que corresponde a dois níveis de

cinza, que são brancos e pretos. Esse formato é essencial para considerável parcela de algoritmos relacionados a estudos de imagens.

Considerando o já informado sobre os valores de pixels de imagens binárias, são válidas as considerações de He *et al.* (2017), que destacam que os pixels de primeiro plano são os pixels de objeto, enquanto os demais são os pixels de fundo. Como se depreende do abordado pelos autores, geralmente os pixels da borda de uma imagem são, também, pixels de fundo.

No campo do processamento de imagens digitais, deve ocorrer a operação de amostragem de imagem, que se relaciona à separação da imagem em pequenos espaços considerando a já citada função bidimensional $f(x, y)$, cuja representação é uma matriz de pixels em quantidade finita, sendo x e y as coordenadas para cada um desses elementos e a amplitude de f em determinadas coordenadas gera o nível de cinza ou intensidade (Gouveia *et al.*, 2015). Desta maneira, é como se fosse gerada uma grade de pixels que pode ser desmontada, devendo ser obedecida certa qualidade para que os pixels sejam armazenados sem impactar na visualização da realidade do que a imagem registra.

2.7.2 Rotulagem de componentes conectados

As bordas são componentes essenciais para que objetos em uma imagem sejam devidamente identificados pelo olho humano. Importância semelhante há para os contornos em processamento de imagem digital. Em diversas ocasiões, pode ser necessária a detecção e aprimoramento de pixels de bordas para que objetos sejam contrastados do fundo. Nesse assunto, há o lecionado por Gonzalez e Woods (2000) sobre a chamada rotulagem de componentes conectados ou conexos, que é um processo para facilitar o reconhecimento e a interpretação por sistemas computacionais do que a imagem quer informar.

A rotulagem de componentes conectados ou *Connected Component Labeling* (CCL) é abordada por He *et al.* (2017), que explicam que essa rotulagem envolve a atribuição de rótulo único aos pixels de cada objeto da imagem, sendo que esses objetos são os chamados componentes ou elementos conectados em uma imagem binária. Esse processo é importante devido à necessidade de diferenciar objetos em uma imagem binária, tornando-a compreensível por máquinas computacionais.

De acordo com o raciocínio de Calvo *et al.* (2012) e He *et al.* (2017), a essência da rotulagem de componentes conectados é o fato de que um pixel a com uma localização (x, y) possui quatro vizinhos $b(x-1, y)$, $b(x, y-1)$, $b(x+1, y)$ e $b(x, y+1)$ e mais outros quatro vizinhos $b(x-1, y-1)$, $b(x+1, y-1)$, $b(x-1, y+1)$, e $b(x+1, y+1)$, resultando em 8 vizinhos do pixel conforme o seguinte esquemas A e B, respectivamente, da Figura 8.

Figura 8 - Esquemas de elementos conectados com 4 vizinhos (A) e 8 vizinhos (B)

Esquema A

	$b(x-1, y)$	
$b(x, y-1), b$	$a\ (x, y)$	$b(x, y+1)$
	$b(x+1, y)$	

Esquema B

$b(x-1, y-1)$	$b(x-1, y)$	$b(x-1, y+1)$
$b(x, y-1), b$	$a\ (x, y)$	$b(x, y+1)$
$b(x+1, y-1)$	$b(x+1, y)$	$b(x+1, y+1)$

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Desta maneira, Calvo *et al.* (2012) e He *et al.* (2017) versam sobre componente 4 vizinhos ou 8 vizinhos em uma imagem binária, gerando objetos, sendo o primeiro tipo de menor complexidade. Além disso, conforme os autores, após a rotulagem, uma imagem binária se torna uma imagem rotulada. Nesse aspecto, Gonzalez e Woods (2000) mencionam sobre quatro vizinhos horizontais e verticais do pixel e mais quatro vizinhos diagonais.

Portanto, com algoritmos de CCL, um conjunto de pixels de propriedades semelhantes em uma imagem binária, e conectados entre si, recebe um identificador específico. De acordo com Calvo *et al.* (2012), a rotulagem em questão é uma etapa essencial do processamento de imagem e gera a distinção entre pixels do *foreground* e *background*, respectivamente.

2.7.3 Segmentação de imagem

Quando se versa sobre segmentação de imagem, significa dizer que esta é dividida entre o objeto que faz parte dela e a região de fundo. Para isso, são

fundamentais as propriedades de similaridade e descontinuidade, sendo possível gerar duas formas de segmentação: a baseada em região e a baseada em borda.

Para este estudo, considera-se importante destacar os dois métodos, o primeiro usamos para detecção das fraturas e o segundo para determinação dos comprimentos. As duas técnicas se fundamentam na descontinuidade de pixels, facilitando a detecção de separações e arestas em regiões da imagem onde há transição de tons. O resultado da segmentação, então, é uma imagem binarizada ou binária (Araújo, O. 2019; Gonzalez; Woods, 2000). Há métodos específicos para segmentar uma imagem, sendo de interesse nessa pesquisa o Método de Otsu, a ser descrito em linhas futuras neste trabalho.

Araújo, O. (2019) aborda sobre análise de rochas naturais através de tecnologias digitais que envolvem imagens. A autora explica que a segmentação das imagens, nesse contexto, é imprescindível, pois diferentes métodos de segmentação podem gerar distintas formas do meio poroso devido à variedade de tamanhos dos poros. Ela destaca que algoritmos de segmentação podem auxiliar no processo, mas alerta sobre imagens em escala de cinza geraram faixas representativas de áreas com preenchimento por materiais sólidos, espaços vazios e microporos. Assim, tem-se um exemplo de aplicação semelhante no que tange a segmentação de imagem para esta pesquisa.

2.7.4 Limiarização (*Thresholding*)

Limiarização ou *Theresholding* é uma técnica de segmentação de imagem digital que consiste em dividir os níveis de tom de cinza em duas classes, que irá compor *background* e *foreground*, a partir de certo valor limite T estabelecido de acordo com as características dos objetos que se quer isolar.

De acordo com Artero e Tommasell (2000), a segmentação faz parte da etapa inicial de processamento de uma imagem para que informações sejam extraídas a partir da identificação de objetos contidos na imagem. Neste aspecto, pode haver a necessidade de que uma imagem seja transformada em tons de cinza antes da linearização para redução de custo computacional, que é o caso aplicado nesta tese. Para tanto, é considerado que os objetos da imagem estão em tons de cinza claros, distinguindo-se do fundo em tom escuro, por exemplo. Com essa separação, há um

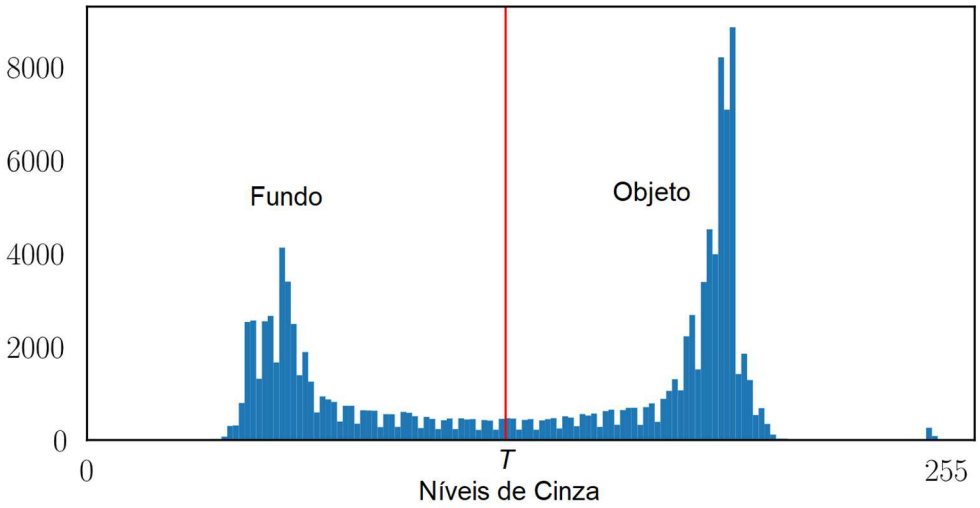
limiar que gera uma classificação de pixels acima ou abaixo em relação a esse valor limítrofe. Os autores demonstram isso em termos matemáticos, da seguinte forma (Eq. 1):

$$Im\,(x,y) = \{0 \quad se \quad Im(x,y) < T\ 1 \quad se\ Im(x,y) \geq T\ \} \tag{1}$$

Em que x e y são as coordenadas do pixel, T corresponde ao limiar e $Im(x,y)$ é uma imagem binarizada. Portanto, compreende-se a limiarização como a separação dos pixels em função do tom de cinza em relação a um limiar T.

Para auxiliar na limiarização, há o histograma, que é uma representação estatística dos níveis de cinza de uma determinada imagem em função da intensidade. Através desta técnica, pode-se identificar o valor de T. Como exemplo disso, a Figura 9 ilustra a localização do valor T em um histograma após a segmentação.

Figura 9 - Análise dos picos de um histograma genérico



Fonte: Adaptado de Meira *et al.* (2020)

2.7.5 Método de Otsu

O chamado Método de Otsu foi proposto por Nobuyuki Otsu, que demonstrou que o limiar é essencial para possibilitar que imagens sejam segmentadas nas situações em que é possível que os pixels sejam distinguidos em níveis de cinza. O método se baseia em critério discriminante e envolve a minimização de erros quadráticos médios entre a imagem e a sua forma binarizada (Kurita *et al.*,1992).

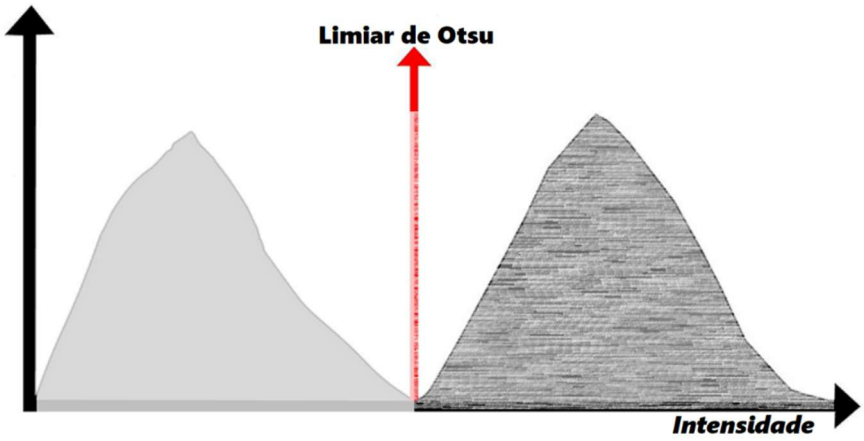
Em termos matemáticos, conforme explicações de Artero e Tommasell (2000), o Método de Otsu se trata de um método de limiarização em que a obtenção do limiar pressupõe que os pixels da imagem se classificam em C_0 e C_1, correspondendo ao objeto da imagem e o fundo desta, respectivamente. Além disso, deve-se levar em conta que as variâncias entre as classes e a total são, nesta ordem, σ_B^2 e σ_T^2. Em termos mais simples, explica-se que os pixels da imagem são biparticionados em *N* níveis que se distribuem em duas classes, correspondentes a 0 ou 1; ou seja, tem-se uma binarização.

Para a binarização, os pixels com valores superiores a determinado limiar se tornam brancos, enquanto os abaixo desse limiar passam para a cor preto. Por isso, imagens binárias são em preto e branco, cujos pixels correspondem a 1 e 0 respectivamente (Gazzoni *et al.*, 2006; Meira *et al.*, 2020).

Araújo, O. (2019) detalha que a essência do Método de Otsu é gerar um valor de limiar que atenue as variâncias entre as classes referentes ao chamado *background* (fundo) e os demais itens da imagem que ficam em primeiro plano. Em suma, a autora cita que o Método de Otsu é uma forma de segmentação de imagem do tipo automática e, também, a mais utilizada no campo de processamento de imagem digital. Os métodos automáticos de limiarização, segundo a autora, são aqueles de implementação relativamente simples e de maior rapidez de realização, que conseguem determinar o limiar dinâmico; ou melhor, um limiar diferente para imagens diferentes.

No contexto do Método de Otsu, Dias *et al.* (2018) complementam que o limiar pode ser obtido por um valor de corte a partir de histograma da imagem, conforme já demonstrado. Ressalta-se que os autores versam sobre segmentação de fraturas em imagem e trazem a Figura 10, em que há um exemplo de imagem segmentada através do método de Otsu.

Figura 10 - Imagem com segmentação realizada pelo Método Otsu



Fonte: Dias *et al.* (2018)

Apesar dos elogios ao Método Otsu, principalmente por gerar limiares satisfatórios em diversas imagens, deve-se ressaltar uma prudência. O método pode indicar um limiar tendencioso para imagens cujas variações de nível de cinza entre primeiro e segundo plano, ou conjuntos de pixels relacionados, sejam muito distintas (Kurita *et al.*, 1992). Portanto, a aplicação do método requer bastante avaliação de viabilidade sobre a imagem a ser analisada e o que é almejado quanto aos resultados. Por isso que no *framework* desta pesquisa foi incluído um botão de ajuste manual, para correção das tendências, como será compreendido no capítulo metodológico.

2.7.6 Algoritmo de Detecção de Borda e Esqueletização

No campo do processamento de imagens digitais, foram criados e aperfeiçoados métodos de detecção de contorno para tornar imagens mais compreensíveis por meios computacionais. Nesse contexto, enfocam-se perímetros, centros, áreas, cantos, segmentos e outros atributos baseados em bordas de objetos (Wagenknech, 2007).

Na detecção de objetos em imagens, conforme já citado, procede-se na verificação de pixels conectados até se ter uma separação adequada entre itens de primeiro e segundo plano, para que estes itens sejam devidamente identificados. Para tanto, o contorno é um recurso fundamental (Chang *et al.*, 2004).

O exposto se contextualiza para o *Contour Tracing Labeling*, ou rastreamento de contorno, que se volta para a verificação de fronteiras em regiões de uma imagem digital para resultar em uma sequência ordenada de pixels de contorno, como explicado por Wagenknech (2007). Nesse aspecto, deve-se buscar regiões de componentes conectados, pois uma imagem pode apresentar um ou mais objetos pertencentes a classes diferentes.

Nessa temática, He *et al.* (2017) aborda sobre o chamado algoritmo baseado em rastreamento de contorno ou algoritmo CTL (*Contour Tracing Labeling*). O mecanismo do algoritmo se baseia em uma varredura em pixels de uma imagem binária para rastrear o contorno. Na interpretação, tem-se um pixel $b(x, y)$, que, se for um pixel de fundo, nada acontece, mas, se for um pixel de objeto, ocorre o processamento do pixel, gerando um novo rótulo. De acordo com os autores, a principal vantagem do algoritmo CTL é que, por meio da rotulagem, são obtidos contornos dos objetos da imagem de forma simultânea.

Há situações em que, quanto menos complexa for uma imagem, mais fácil será o seu uso em processamento computacional. Neste aspecto, surge a esqueletização, que, em termos simples, pode ser explicada como o processo de reduzir um objeto de uma imagem binária à sua forma geral com a mínima quantidade de informação visual. Como o próprio nome conota, a esqueletização destaca o “esqueleto” da imagem binária a partir da verificação de pontos limítrofes em torno de um objeto.

Gerar a “silhueta” de um objeto no campo da imagem digital pode fornecer informações valiosas apesar do princípio da esqueletização se pautar em simplificação da imagem em função de determinado propósito. Nesse sentido, Gouveia *et al.* (2015) explicam que o “esqueleto” ou estrutura básica de um objeto imagético pode ser gerado através da aplicação de determinadas técnicas, dentre as quais está a “Transformada do Eixo Médio” (*Medial Axis Transform*), que é de interesse para o âmbito desta pesquisa.

Com base nas explicações de Ishikawa *et al.* (2010), o “esqueleto” no campo da imagem digital também pode ser abordado como eixo médio, que se refere à forma mais sintética de representar um objeto. Na esqueletização, são considerados apenas os pontos de um conjunto que apresentarem a menor distância quando comparado ao limite do conjunto. Assim, a espessura de objetos pode ser minimizada até estes se tornarem uma linha com 1 pixel.

Conforme abordagens de Mendes e Dal Poz (2011), o entendimento sobre esqueletização foi desenvolvido por Blum, abordando a *Medial Axis Transform* (MAT). No caso, para uma dada região R com borda B , um ponto p desta região possui um adjacente mais próximo nessa borda. Caso exista mais de um ponto adjacente a uma certa distância, que deve ser mínima, p faz parte do eixo médio S da região R . Os autores ressaltam que, para que um vizinho mais próximo de um ponto seja encontrado, deve ser utilizada uma medida de distância que, por sua vez, pode influenciar a MAT.

Atrelado à MAT há o conceito de poda (ou *pruning*), que consiste em um método para remover ramificações de um esqueleto, tal como o termo faz conotação. Assim, são retirados pontos extremos de uma região esqueletizada a fim de reduzir possíveis ruídos de pixels em bordas de objetos que podem modificar o esqueleto em análise.

2.7.7 Morfologia Matemática e Transformada de Hough

No processamento de imagens há uma proximidade bastante considerável com a matemática, como já demonstrado até então nesta pesquisa. Ademais, como outro exemplo dessa proximidade, tem-se a Morfologia Matemática (MM), que se vale do conhecimento da teoria dos conjuntos para análises de formas presentes em imagens. Com a Morfologia Matemática, um conjunto de operações para processamento digital de imagens se baseia em uma grade de pixels e nos valores dos dados da imagem (Koch; Rosolowsky, 2015).

De acordo com Amaral e Andrade (2017), é possibilitada pela MM a verificação de características geométricas de imagens binárias a partir dos chamados operadores morfológicos. Em resumo do descrito pelos autores, tem-se a aplicação de operações do campo da matemática para, sistematicamente, converter uma imagem original em outra a partir do uso de uma imagem auxiliar, denominada elemento estruturante.

Com base no que é lecionado por Ishikawa *et al.* (2010), a aplicação da MM para obtenção de informações sobre a estrutura geométrica de um objeto imagético abrange transformações por meio de operadores elementares. As operações morfológicas, a princípio, enfocaram imagens binárias e, com o tempo, passaram a

valer também para imagens em tons de cinza e coloridas, porém, para este estudo, delimita-se às imagens binárias.

Diversas aplicações de processamento de imagem são favorecidas pelos operadores morfológicos, como, por exemplo, a verificação de componentes conexos, extração de contornos, detecção de padrões, dentre outras ações. Nesta pesquisa, destacam-se os chamados operadores elementares, que são a dilatação e erosão binária.

A dilatação binária combina dois conjuntos gerando uma imagem mais espessa visualmente em seu contorno, pois a operação se baseia na união de conjuntos. Conforme Ishikawa *et al.* (2010), o uso do operador de dilatação binária gera como efeitos visuais o aumento dos objetos, preenchimento de espaços e conexão entre objetos próximos de uma imagem.

Com sentido oposto ao discorrido anteriormente, a erosão binária reduz a espessura da imagem, visto que se baseia em subtração. Portanto, os efeitos decorrentes da aplicação deste operador elementar abrangem a redução de partículas, aumento de aberturas e separação de grãos adjacentes (Ishikawa *et al.*, 2010).

Para a detecção de linhas ou determinados padrões em processamento de imagens para visão computacional, há a chamada Transformada de Hough (TH), que leva o mesmo nome de seu patenteador (Clark *et al.*, 2014). A TH é uma técnica para auxiliar a parametrização de imagens digitais com uma equação ou fórmula matemática já conhecida, como aquelas que versam sobre retas e círculos, por exemplo.

Segundo Nishizima *et al.* (2016), a TH auxilia justamente na resolução do problema para extrair primitivas de uma imagem, como segmentos de reta, elipses, círculos, dentre outras formas gráficas. Os autores destacam, como pontos positivos da aplicação da técnica, a possibilidade de análise sobre quase qualquer tipo de curva e a apresentação de eficiência em processamento de imagens com ruídos significativos. Por outro lado, como ponto negativo principal, os autores citam que a TH demanda grande esforço computacional quando é envolvida uma curva complexa, pois há um maior conjunto de parâmetros a ser considerado.

Como aplicação da Transformada de Hough no campo de estudos de fraturas, Prabhakaran *et al.* (2019) explicam que, através de um sistema de votação, há a

identificação de pixels em imagens binárias que podem ser representantes de fraturas de rochas. Os autores detalham que cada pixel da imagem em preto e branco pode ter uma representação por uma curva senoidal em um espaço paramétrico, que servirá de base para a formação de votos. Assim, as curvas com mais votos serão indicadas com as mais prováveis fraturas devido à maior quantidade de pixels diferentes de zero. Entretanto, os autores alertam para possíveis falsos positivos.

Maiores detalhes de todos os tópicos abordados nesta fundamentação teórica, em especial quanto às fórmulas matemáticas do que foi descrito apenas textualmente, serão apresentados no próximo capítulo, que consiste na metodologia adotada nesta pesquisa. Ressalta-se que há aspectos que não requerem a realização de operações matemáticas manualmente, pois consistem no funcionamento lógico de operações computacionais.

2.8 MÉTODOS DE RECONHECIMENTO DE DESCONTINUIDADES EM MATÉRIA ROCHOSA BASEADO EM IMAGEM DIGITAL

Ao longo das décadas, várias metodologias foram desenvolvidas para o reconhecimento e caracterização de fraturas em afloramentos rochosos e outros materiais geológicos. Estas metodologias variam desde técnicas manuais tradicionais até abordagens automatizadas que utilizam processamento digital de imagens e algoritmos avançados.

Esta revisão bibliográfica aborda os principais métodos existentes para o reconhecimento e caracterização de fraturas em materiais rochosos, destacando suas limitações e a necessidade de soluções mais acessíveis e integradas. Em seguida, há uma comparação com a solução proposta nesta tese, demonstrando suas vantagens e contribuições para a área.

2.8.1 Método Manual de Delineamento de Fraturas

O método manual de delineamento é considerado o padrão-ouro para a identificação e caracterização de fraturas em afloramentos rochosos. Neste método, geólogos ou engenheiros especializados inspecionam diretamente as exposições rochosas ou analisam fotografias e mapas geológicos para identificar e traçar

manualmente as fraturas, bem como as suas características de orientação, comprimento e espaçamento.

Como exemplo de aplicação, Reid e Harrison (2000) utilizaram o delineamento manual como referência para validar metodologias automatizadas de detecção de traços de descontinuidades em imagens digitais de exposições rochosas. Dessa forma, elencam-se como vantagens do método a alta precisão que permite a identificação detalhada de fraturas complexas. Além disso, a flexibilidade proporcionada permite que os especialistas apliquem seu julgamento profissional para interpretar características sutis que algoritmos automatizados podem não captar.

Entretanto, como limitações, destaca-se que o processo é extremamente demorado, especialmente para grandes áreas ou conjuntos de dados extensos, tornando-o intensivo em tempo. Os resultados podem variar entre diferentes operadores devido a interpretações subjetivas, introduzindo uma margem de subjetividade. Além disso, este método requer expertise especializada, o que limita sua aplicabilidade para usuários não treinados, gerando inacessibilidade.

2.8.2 Métodos Baseados em Detecção de Bordas por Gradiente de Cor

Há métodos que se baseiam na detecção de bordas e utilizam gradientes de cor em imagens digitais para identificar transições abruptas de intensidade entre pixels de diferentes cores, correspondentes às bordas das fraturas. Como exemplos de aplicações, Pi *et al.* (2021) desenvolveram uma abordagem que utiliza gradientes de cor para caracterizar descontinuidades em sistemas de fraturas. Ademais, Wang *et al.* (2024) exploraram a detecção de traços de descontinuidades em rochas usando processamento digital de imagens coloridas.

Acerca do método em abordagem, uma das principais vantagens é o detalhamento, com alta precisão em imagens coloridas, capturando detalhes sutis das fraturas. Isso é especialmente aplicável a ambientes geológicos complexos com variações de cor significativas, onde a precisão na captura de informações é crucial. No entanto, existem algumas limitações importantes a serem consideradas. A exigência computacional é significativa, pois o processamento dos três canais de cor (RGB) requer alto poder computacional. Além disso, a sensibilidade à iluminação é um fator crítico; condições de iluminação e contraste afetam significativamente o

desempenho do sistema. Por fim, a complexidade de implementação também é uma limitação, necessitando de conhecimentos avançados em processamento de imagens e programação, o que pode dificultar o uso por profissionais não especializados.

2.8.3 Métodos Baseados em Detecção de Bordas em Escala de Cinza

Os métodos que se baseiam na detecção de bordas por escala de cinza convertem imagens coloridas em tons de cinza e aplica operadores de gradiente para identificar bordas. Esse método foi aplicado na pesquisa de Pi *et al.* (2021), que utilizaram este método para simplificar a análise em superfícies homogêneas.

Sobre o método em descrição, uma das principais vantagens é o menor custo computacional, que reduz a complexidade ao eliminar canais de cor redundantes. Além disso, a simplicidade é um ponto forte, tornando a implementação mais fácil em comparação com métodos baseados em cor.

No entanto, há algumas limitações a serem consideradas. A perda de informações de cor pode ser significativa, pois pode não capturar detalhes importantes presentes nas variações de cor. A sensibilidade a ruídos também é um fator, pois superfícies heterogêneas ou com texturas complexas podem introduzir ruídos significativos. Por fim, a implementação técnica ainda requer programação e ajustes finos de parâmetros, o que pode ser um desafio para alguns usuários.

2.8.4 Métodos Baseados em Detecção de Bordas em Imagens Binárias

A detecção de bordas em imagens binárias (preto e branco) considera a conversão com aplicação de algoritmos de detecção de bordas. Uma aplicação desse método foi descrita por Wang *et al.* (2024), que indicam este método em contextos em que a eficiência computacional é priorizada.

O método que envolve imagens binárias tem como uma das principais vantagens a alta eficiência computacional, que proporciona um processamento rápido devido à simplicidade dos dados binários. Além disso, a facilidade de implementação é um ponto forte, pois é menos complexo em termos dos algoritmos utilizados.

Por outro lado, há algumas limitações a serem consideradas. A binarização pode resultar em perda significativa de detalhes, eliminando informações importantes.

Além disso, a suscetibilidade a ruídos é um fator crítico, pois pequenas variações podem ser interpretadas erroneamente, levando a resultados imprecisos. Por fim, a acessibilidade é limitada, pois, apesar da simplicidade, ainda requer conhecimentos em processamento de imagens.

2.8.5 Métodos Baseados em Análise Morfológica e Textura

Os chamados métodos que baseiam em análise morfológica e textura utilizam operações morfológicas e análise de textura para identificar padrões característicos das fraturas em imagens digitais. Aplicações desse tipo de método são abordadas nos estudos de Soille (2003), que apresentou princípios de análise morfológica aplicáveis à detecção de estruturas complexas em imagens. Além desse autor, Wang *et al.* (2024) integraram técnicas morfológicas em seus processos de detecção.

Nesse caso, uma das principais vantagens é a capacidade de detecção de estruturas complexas, sendo capaz de identificar fraturas com diversas formas e texturas. Além disso, a flexibilidade é um ponto forte, permitindo ajustes para diferentes tipos de imagens e condições.

Em contrapartida, existem algumas limitações a serem consideradas. A complexidade algorítmica é significativa, exigindo parametrização cuidadosa e conhecimentos avançados em processamento de imagens. A sensibilidade a ruídos também é um fator crítico, pois texturas complexas podem introduzir ruídos que dificultam a detecção precisa. Por fim, a necessidade de programação é uma limitação, já que a implementação geralmente é realizada em ambientes de programação especializados.

2.8.6 Métodos Baseados em Aprendizado de Máquina e Redes Neurais

Os métodos baseados em aprendizado de máquina e redes neurais utilizam algoritmos de aprendizado de máquina, especialmente redes neurais convolucionais (CNNs), para detectar e caracterizar fraturas em imagens. A implementação desses métodos é abordada por Pham *et al.* (2023), que desenvolveram um método automatizado usando *deep learning* para detecção de fraturas em imagens de massas

rochosas. Em soma, Alzubaidi *et al.* (2022) aplicaram redes neurais profundas para segmentação de fraturas em imagens de alta resolução.

Um dos principais pontos positivos relacionados a esses métodos é a alta precisão, com a capacidade de aprender padrões complexos e melhorar a detecção em ambientes heterogêneos. Além disso, a automação reduz a necessidade de intervenção manual na detecção, tornando o processo mais eficiente.

Entretanto, há alguns aspectos desafiantes a serem considerados. Primeiramente, são necessários grandes conjuntos de dados anotados para um treinamento eficaz, o que pode ser um desafio. Além disso, os recursos computacionais elevados são uma exigência, necessitando de *hardware* potente tanto para treinamento quanto para inferência. Por fim, a complexidade técnica é uma limitação significativa, pois a implementação e o ajuste requerem conhecimentos especializados em ciência de dados e aprendizado de máquina.

2.8.7 Baseados em Fotogrametria e Modelagem 3D

Há métodos que utilizam técnicas de fotogrametria digital para criar modelos tridimensionais de afloramentos rochosos, permitindo análise detalhada das fraturas em 3D. Aplicações do método podem ser encontradas nos estudos de Sturzenegger e Stead (2009), que demonstraram o uso de fotogrametria de curto alcance e varredura a laser terrestre para caracterização de descontinuidades em cortes rochosos. Riquelme *et al.* (2015) também aplicaram fotogrametria digital, mas para obter modelos 3D de alta resolução de superfícies rochosas.

Sobre esses métodos, uma das vantagens de maior destaque é a análise tridimensional, que permite a avaliação das fraturas em seu contexto espacial completo. Além disso, a alta resolução é uma característica importante, capturando detalhes geométricos finos das fraturas.

Entretanto, existem algumas limitações a serem apontadas. A necessidade de equipamentos especializados é um desafio, exigindo câmeras calibradas e *software* específico. O processamento complexo também é uma limitação significativa, pois a reconstrução e análise dos modelos 3D demandam tempo e recursos computacionais significativos. Por fim, a curva de aprendizado elevada é uma barreira, necessitando de conhecimentos em fotogrametria e modelagem 3D.

2.8.8 Métodos Baseados em Varredura Laser Terrestre (LiDAR)

Os métodos LiDAR (*Light Detection and Ranging*) utilizam scanners a laser terrestres para obter nuvens de pontos de alta resolução de afloramentos, permitindo a análise detalhada das fraturas. Aplicações deles são encontradas nas pesquisas de Lato *et al.* (2013), que utilizaram LiDAR para mapeamento da espessura de concreto projetado em obras de engenharia. Outra pesquisa é a de kemeny *et al* (2008), que aplicaram LiDAR para caracterização de descontinuidades em taludes rochosos.

Sobre os métodos baseados em LiDAR, um dos principais fatores positivos é a alta precisão e resolução, que permite a captura de dados com precisão milimétrica. Além disso, a segurança é um ponto forte, pois possibilita a coleta de dados em áreas inacessíveis ou perigosas, aumentando a segurança dos operadores.

No entanto, entre as limitações há o custo elevado como uma barreira significativa, já que os equipamentos e *softwares* necessários são caros. O processamento de dados também é complexo, pois grandes volumes de dados requerem gerenciamento e processamento avançados. Além disso, a acessibilidade é limitada, tornando essa abordagem inviável para projetos com orçamentos restritos ou para usuários que não têm acesso a equipamentos especializados.

2.8.9 Limitações Gerais dos Métodos Existentes

Quanto aos métodos descritos nos tópicos anteriores, convém realçar a limitação da dependência de conhecimentos técnicos avançados. A maioria dos métodos automatizados requer habilidades em programação, processamento de imagens ou ciência de dados, dificultando o uso por profissionais de campo sem essa formação.

Outro ponto de atenção é a ausência de interfaces amigáveis. Muitos métodos são implementados em ambientes de programação sem interfaces gráficas, tornando-os inacessíveis para usuários não técnicos.

Adicionalmente, deve-se pontuar a falta de integração de funcionalidades. Soluções existentes frequentemente abordam apenas partes específicas do processo, sem oferecer uma abordagem integrada desde a aquisição de dados até a análise e visualização dos resultados.

Deve-se chamar à atenção para as limitações na caracterização completa das fraturas. Isso porque a maioria se concentra na detecção de bordas ou contornos, sem fornecer informações detalhadas sobre propriedades internas, como abertura e área das fraturas, essenciais para análises geomecânicas e hidráulicas. Outro aspecto limitante consiste na implementação personalizada. Muitos estudos apresentam metodologias desenvolvidas para casos específicos, sem disponibilizar ferramentas ou *software* que possam ser facilmente adotados por outros profissionais.

2.8.10 Necessidade de Soluções Acessíveis e Integradas

A análise crítica dos métodos existentes evidencia a lacuna entre as metodologias avançadas de detecção e caracterização de fraturas e a usabilidade prática dessas técnicas por profissionais que não possuem expertise em programação ou processamento de imagens. Há uma demanda clara por ferramentas que cumpram os seguintes requisitos:

- Possuam Interfaces Gráficas de Usuário (GUI): facilitando a interação e operação por usuários sem conhecimentos técnicos avançados.
- Sejam integradas: capazes de conduzir todo o processo, desde a aquisição e pré-processamento de imagens até a análise e visualização dos resultados.
- Sejam acessíveis: disponíveis para uso sem a necessidade de equipamentos caros ou *softwares* proprietários.
- Possam caracterizar completamente as fraturas: incluindo propriedades internas como abertura, área, orientação e distribuição espacial.

2.8.11 Nossa Solução: FRAMFRAT

Reconhecendo as necessidades descritas anteriormente, esta tese propõe o FRAMFRAT (Ferramenta de Análise de Fraturas), uma ferramenta integrada para detecção, caracterização e análise de fraturas em materiais rochosos. As vantagens do sistema desenvolvido estão dispostas nos próximos parágrafos.

O FRAMFRAT foi desenvolvido com foco na usabilidade, apresentando uma interface gráfica intuitiva que permite a profissionais sem conhecimento em programação utilizarem todas as funcionalidades do sistema de forma eficiente. Ele

integra todas as etapas do processo, desde o pré-processamento das imagens até a detecção, caracterização detalhada e análise estatística das fraturas.

Além da detecção de bordas e área das fraturas, o sistema calcula métricas detalhadas, como abertura mínima, média e máxima, área, porosidade, permeabilidade, orientação e dimensão fractal. Para facilitar a interpretação dos resultados, o FRAMFRAT gera visualizações gráficas avançadas, como diagramas de roseta, histogramas, estereogramas, box plots e matrizes de correlação.

Disponível no GitHub, o FRAMFRAT promove a colaboração e personalização, permitindo que a comunidade científica e profissional contribua para o aprimoramento contínuo da ferramenta. Isso é possível graças ao seu código aberto e personalizável. O projeto pode ser acessado através do link do FRAMFRAT no GitHub: https://github.com/Muchanga-dev/FRAMFRAT.

Ademais, o FRAMFRAT também é otimizado para funcionar em computadores pessoais sem a necessidade de *hardware* especializado ou *software* proprietário, tornando-o acessível para uma ampla gama de usuários.

Em comparação do FRAMFRAT com os métodos existentes, quando se trata de usabilidade, o FRAMFRAT se destaca por ser projetado com uma interface gráfica intuitiva. Em contrapartida, os métodos existentes geralmente requerem habilidades técnicas avançadas e são implementados sem interfaces amigáveis.

No que diz respeito às funcionalidades, o FRAMFRAT oferece uma solução completa e integrada, cobrindo todas as etapas do processo de caracterização de fraturas. Já os métodos existentes tendem a focar em etapas específicas, sem integrar plenamente as funcionalidades necessárias.

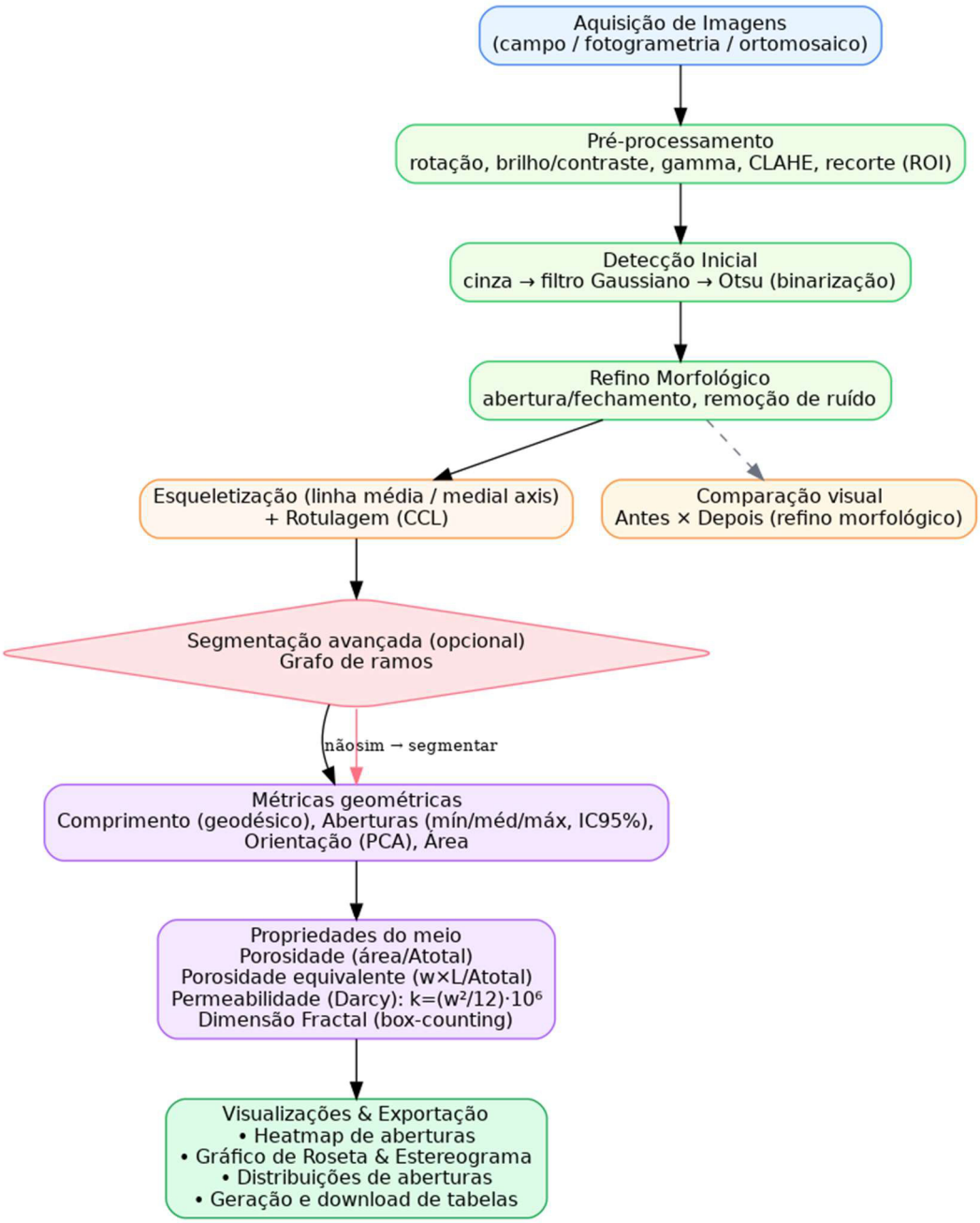
A caracterização detalhada é outra área em que o FRAMFRAT se destaca, fornecendo uma análise abrangente das fraturas, incluindo propriedades internas críticas para análises geomecânicas e hidráulicas. Os métodos existentes, muitas vezes, se limitam à detecção de bordas, sem acesso a informações internas detalhadas.

Adicionalmente, a flexibilidade e personalização do FRAMFRAT são significativas, graças ao seu código aberto, que permite personalização e adaptação para necessidades específicas. Em contraste, os métodos existentes geralmente não são disponibilizados para uso ou modificação, sendo implementações específicas para estudos individuais.

3 METODOLOGIA

Ao possibilitar a extração quantitativa de parâmetros como comprimento, abertura, orientação e distribuição espacial das descontinuidades, a análise de fraturas fornece subsídios essenciais para compreender o comportamento mecânico e hidráulico de formações rochosas ou de materiais estruturais. Voltada para isso, na Figura 11 há a estrutura metodológica do FRAMFRAT.

Figura 11 – Estrutura metodológica do FRAMFRAT



Fonte: O autor (2025)

Acerca das siglas e abreviaturas presentes no fluxograma anterior, é importante esclarecer os seguintes significados:

- ROI - Região de Interesse (recorte da imagem analisada);
- CLAHE - *Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization* (equalização adaptativa com limite de contraste);
- Otsu - Método de limiarização de Otsu (binarização automática);
- CCL - *Connected Component Labeling* (rotulagem de componentes conectados);
- ATotal - Área total da imagem;
- área - Área da fratura;
- IC95% - Intervalo de confiança de 95% (para a abertura média);
- NLM - *Non-Local Means* (remoção de ruído);
- RGB/BGR - Espaços de cor (OpenCV usa BGR internamente);
- *Box-counting* - Método de contagem de caixas para estimar a Dimensão Fractal.

De antemão, sintetiza-se que o processo se inicia com a aquisição de imagens, que podem ser fotos de campo, produtos fotogramétricos ou ortomosaicos, importados como entrada do sistema. Em seguida, realiza-se o pré-processamento, no qual a imagem é ajustada por meio de rotação, brilho/contraste e correções gamma ou CLAHE, além de ser recortada para a região de interesse (ROI). Essas etapas visam melhorar o contraste das fraturas e minimizar artefatos antes da segmentação.

A detecção inicial das fraturas envolve a conversão da imagem para tons de cinza, aplicação de suavização com filtro Gaussiano e binarização automática por limiarização de Otsu, separando os pixels de interesse do fundo. Posteriormente, o refino morfológico é realizado por meio de operações de abertura e fechamento, além da remoção de ruído, o que consolida traços contínuos e elimina pontos isolados, estabilizando os contornos.

Na etapa de esqueletização e rotulagem, calcula-se o eixo medial (skeleton) de cada traço e aplica-se a rotulagem por componentes conectados (CCL), permitindo tratar cada fratura como um objeto individual. Opcionalmente, pode-se realizar uma segmentação avançada, onde um grafo de ramos é construído sobre o esqueleto para decompor fraturas complexas em segmentos quase retilíneos, preservando conexões e bifurcações.

Com os traços segmentados, são extraídas métricas geométricas como comprimento ao longo do esqueleto, estatísticas de abertura (mínima, média, máxima e intervalo de confiança de 95%), orientação (por análise das direções dominantes) e área ocupada. A partir dessas métricas, derivam-se propriedades do meio, como indicadores de porosidade (fração de área ocupada), estimativas de permeabilidade de referência e dimensão fractal por contagem de caixas, sintetizando a rugosidade multiescala do padrão de fraturas.

Por fim, o sistema gera visualizações e exportações, incluindo heatmaps de aberturas, gráficos de roseta, estereogramas de distribuição direcional e distribuições estatísticas das aberturas.

No que diz respeito às imagens utilizadas no estudo de caso de Itapuama, elas foram obtidas por meio de procedimentos, que envolveram desde a aquisição dos dados até o processamento fotogramétrico e a geração dos produtos finais. A coleta das imagens foi realizada com o uso de um veículo aéreo não tripulado (UAV) do modelo DJI Phantom 4 Pro V2, equipado com uma câmera RGB de 20 megapixels. O sistema de navegação do equipamento conta com integração GPS e GLONASS, o que possibilitou o georreferenciamento preciso das imagens capturadas.

O planejamento dos voos foi conduzido na plataforma Pix4D, permitindo a execução automática das missões com altura constante de 10 metros. As imagens foram capturadas com uma sobreposição aproximada de 70% entre os fotogramas, garantindo uma cobertura homogênea e adequada para a reconstrução tridimensional do afloramento por meio de técnicas fotogramétricas.

O processamento das imagens foi realizado no software Agisoft Metashape, utilizando a técnica Structure-from-Motion (SFM). O fluxo de trabalho seguiu etapas padrão, incluindo o alinhamento das imagens, geração da nuvem de pontos densa, criação da malha triangular, aplicação de texturização e produção do ortomosaico. Esse processo resultou na construção de um Modelo de Afloramento Virtual (VOM), a partir do qual foi gerado um ortomosaico RGB com resolução espacial aproximada de 2 milímetros.

Sobre esse ortomosaico de alta resolução foi realizada a interpretação geológica, com vetorização manual da rede de fraturas presente no afloramento. Esse produto final permitiu uma análise detalhada da geometria e distribuição das

estruturas, contribuindo significativamente para os objetivos do estudo. Demais informações a cerca desse caso constam em Correia Filho *et al.* (2024).

Com essas considerações preliminares, esta seção apresenta uma metodologia sistemática para a detecção e caracterização dessas fraturas, detalhando, ao longo do texto, as equações, conceitos teóricos e algoritmos empregados. A seguir, detalha-se o passo a passo de cada componente e processo envolvido no desenvolvimento do sistema, incluindo as equações matemáticas utilizadas. O foco está nas etapas de pré-processamento, detecção, caracterização e visualização das fraturas, com ênfase nas bases matemáticas e algoritmos utilizados.

3.1 AQUISIÇÃO E PRÉ-PROCESSAMENTO DA IMAGEM

A primeira etapa envolve a aquisição das imagens geológicas ou do material rochoso a serem analisadas. As imagens devem possuir alta resolução e clareza para permitir uma detecção precisa das fraturas. O topo da imagem deve estar em um norte geográfico, mas, se não estiver, deve fornecer o ângulo de inclinação em relação ao referencial norte geográfico.

Para obter uma imagem digital representativa da superfície ou seção de interesse contendo as fraturas a serem analisadas, os procedimentos envolvem a utilização de câmera digital, scanner ou microscópio para capturar a imagem. Nesse aspecto, destaca-se que deve ser garantida a iluminação uniforme e foco adequado para minimizar distorções e ruídos.

Na sequência, deve-se proceder na rotação da imagem. A rotação permite alinhar a imagem de forma que as fraturas estejam orientadas de maneira consistente, facilitando a análise subsequente. A rotação é realizada utilizando uma matriz de rotação $R(\theta)$ onde θ é o ângulo de rotação (Eq. 2):

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \tag{2}$$

Aplicando a rotação a cada ponto (x, y) da imagem tem-se a Eq. 3:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = R(\theta) \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \tag{3}$$

Pela ordem, deve haver o ajuste de brilho e contraste, que é realizado para melhorar a visibilidade das fraturas. O brilho é ajustado adicionando um valor constante b a cada pixel, enquanto o contraste é ajustado multiplicando cada pixel por um fator c (Eq. 4):

$$I_{ajustado} = c \cdot I + b \tag{4}$$

Onde I é a intensidade original do pixel e $I_{ajustado}$ intensidade ajustada.

Esta etapa também envolve a Correção Gamma, que é aplicada para ajustar a luminância da imagem, permitindo melhor visualização de detalhes em diferentes regiões de brilho. A transformação é dada por (Eq. 5):

$$I_{corrigido} = 255 \times \left(\frac{I}{255}\right)^{\gamma} \tag{5}$$

onde γ é o fator de correção.

O próximo passo consiste na equalização de histograma, que redistribui os níveis de intensidade da imagem de forma a obter um histograma mais uniforme, melhorando o contraste global da imagem. A equalização é realizada através da função de distribuição cumulativa (CDF) do histograma (Eq. 6):

$$I_{equalizado}(x, y) = CDF(I(x, y)) \times (L - 1) \tag{6}$$

Onde L é o número de níveis de intensidade.

Nesse contexto, deve ocorrer a aplicação de CLAHE, abordada por Zuiderveld (1994), que é uma técnica de equalização de histograma adaptativa que limita o contraste para evitar a ampliação excessiva de ruídos em regiões homogêneas. A técnica divide a imagem em blocos ($tiles$) e aplica a equalização em cada bloco individualmente, com um limite de contraste $clipLimit$ (Eq. 7):

$$CLAHE(I) = Equalização_{tile}(I_{\ tile})\ com\ clipLimit \tag{7}$$

No âmbito do recorte da imagem, o recorte interativo permite ao usuário selecionar e isolar a área de interesse na imagem, focando nas regiões relevantes

para a análise de fraturas. Este passo reduz o ruído e elimina áreas irrelevantes, otimizando os processos subsequentes de detecção e caracterização.

3.2 DETECÇÃO DE FRATURAS

A detecção de fraturas envolve conversão de imagem para escala de cinza, para qual as técnicas principais são o filtro gaussiano, a binarização por Método de Otsu e operações morfológicas. Reitera-se que a conversão para escala de cinza em como propósito simplificar a imagem reduzindo-a a um único canal de intensidade, facilitando o processamento subsequente. Nesse processo, converte-se a imagem RGB original para escala de cinza usando a Eq. 8:

$$I_{cinza} = 0.299 * R + 0.587 * G + 0.114 * B \tag{8}$$

Onde $R, G\ e\ B$ são as intensidades dos canais vermelho, verde e azul, respectivamente.

Por sua vez, o filtro gaussiano é uma técnica fundamental em processamento de imagens utilizada para suavizar imagens, reduzindo o ruído e facilitando a segmentação de estruturas como fraturas geológicas. Este método baseia-se na convolução da imagem original com um kernel gaussiano, o que resulta em uma imagem suavizada onde detalhes de alta frequência são atenuados (Gonzalez; Woods, 2008).

A convolução de uma imagem I com um kernel gaussiano $G(x, y)$ é matematicamente expressa pela Eq. 9:

$$I_{suavizada}(x, y) = (I \times G) = \sum_{u=-k}^{k} \sum_{v=-k}^{v} I(x + u, y + v) \cdot G(u, v) \tag{9}$$

Onde $G(u, v)$ é o kernel gaussiano representado por Eq. 10.

$$G(u, v) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{u^2+v^2}{2\sigma^2}} \tag{10}$$

Onde há os seguintes fatores:

- $I(x, y)$: Intensidade do pixel na posição (x, y) na imagem original;
- $I_{suavizada}(x, y)$: Intensidade do pixel na posição (x, y) na imagem após a aplicação do filtro gaussiano;
- $G(u, v)$**:** Valor do kernel gaussiano na posição (u, v);
- u, v: Deslocamentos em relação ao pixel central (x, y) utilizados na convolução.
- k: Determina o tamanho do kernel, sendo o kernel de tamanho $(2k + 1) \times (2k + 1)(2k\ +\ 1)$;
- σ: Desvio padrão da distribuição gaussiana, que controla a largura do kernel e a quantidade de suavização aplicada. Valores maiores de σ resultam em uma maior suavização.

Destaca-se que a binarização é um processo essencial no processamento de imagens que converte uma imagem em escala de cinza em uma imagem binária, onde os pixels são classificados em duas categorias distintas: fratura e fundo. O Método de Otsu é uma técnica amplamente utilizada para determinar automaticamente o limiar TTT que segmenta a imagem de forma otimizada, minimizando a variância intraclasse e maximizando a variância interclasse. Este método foi proposto por Nobuyuki Otsu em 1979 e permanece relevante devido à sua eficácia e simplicidade (Otsu, 1979).

O método de Otsu busca encontrar o limiar T que melhor separa os pixels da imagem em duas classes distintas: fratura (classe 1) e fundo (classe 0). A segmentação é feita de modo que a variância intraclasse combinada das duas classes seja minimizada, o que implica que os pixels dentro de cada classe sejam o mais homogêneos possível.

A variância intraclasse total $\sigma^2(T)\ \ T$ é definida pela Eq. 11:

$$\sigma^2(T) = \omega_0(T)\sigma_0^2(T) + \omega_1(T)\sigma_1^2(T) \tag{11}$$

Onde $\omega_i(T)$ equivale à proporção de pixels na classe i ($i = 0$ para fundo e $i = 1$ para fratura) para o limiar T (Eq. 12).

$$\omega_i(T) = \frac{N_i(T)}{N} \tag{12}$$

Onde: $N_i(T)$ é o número de pixels na classe i para o limiar T, N é o número total de pixels na imagem, e $\sigma_i^2(T)$ e a variância dos pixels na classe i para o limiar T dada por Eq. 13.

$$\sigma_i^2(T) = \frac{1}{N_i(T)} \sum_{x \in C_i(T)} (I(x) - \mu_i(T))^2 \tag{13}$$

Onde há os seguintes itens:

- $I(x)$: Intensidade do pixel na posição x
- $C_i(T)$: Conjunto de pixels pertencentes à classe i para o limiar T
- $\mu_i(T)$: Média das intensidades dos pixels na classe i para o limiar T.

Em síntese, o objetivo do método de Otsu é encontrar o limiar T^* que minimiza $\sigma^2(T)$ (Eq. 14):

$$T^* = \arg\min_T \sigma^2(T) \tag{14}$$

3.2.1 Passos para a Determinação do Limiar T

O primeiro passo consiste no cálculo do histograma e probabilidades de ocorrência. Dessa forma, inicialmente, calcula-se o histograma da imagem $h(I)$ que conta o número de pixels para cada nível de intensidade $k(k = 0,1,2, \dots, L-1)$, onde L é o número de níveis de intensidade (normalmente 256 para imagens de 8 bits). A probabilidade de ocorrência de cada nível de intensidade é então calculada pela Eq. 15:

$$p(k) = \frac{h(k)}{N} \tag{15}$$

O próximo passo é o cálculo das probabilidades de cada classe para cada limiar T. Para cada possível limiar $T(T = 0,1,2, \dots, L-1)$, calcula-se a probabilidade de cada classe (Eqs. 16 e 17).

$$\omega_0(T) = \sum_{k=0}^{T} p(k) \tag{16}$$

$$\omega_1(T) = \sum_{k=T+1}^{L-1} p(k) \tag{17}$$

O terceiro passo é o cálculo das médias de cada classe para cada limiar T. As médias das intensidades para cada classe são calculadas pelas Eqs. 18 e 19:

$$\mu_0(T) = \frac{\sum_{k=0}^{T} k \times p(k)}{\omega_0(T)} \tag{18}$$

$$\mu_1(T) = \frac{\sum_{k=T+1}^{L-1} k \times p(k)}{\omega_1(T)} \tag{19}$$

O quarto passo é o Cálculo da Variância Intra-classe para Cada Limiar T. Com as médias calculadas, a variância intraclasse é determinada pela fórmula mencionada anteriormente (Eq. 20).

$$\sigma^2(T) = \omega_0(T)\sigma_0^2(T) + \omega_1(T)\sigma_1^2(T) \tag{20}$$

O quinto passo é a seleção do limiar ótimo T^*. O limiar T^* é aquele que minimiza $\sigma^2(T)$, proporcionando a melhor separação entre as classes de fratura (descontinuidade) e fundo (continuidade).

Deve-se proceder para o ajuste potencializado, que visa permitir o ajuste fino do limiar obtido pelo método de Otsu. Para isso, aplica-se um ajuste ΔT ao limiar T (Eq. 21):

$$T_{ajustado} = T^* - \Delta T \tag{21}$$

E, para a aplicação do limiar, tem-se a Eq. 22.

$$I_{binário(x,y)} = \begin{cases} 255, & se\ I_{cinza}(x,y) \geq T_{ajustado} \\ 0, & caso\ contrário \end{cases} \tag{22}$$

3.2.2 Operações Morfológicas

Após a binarização da imagem utilizando o Método de Otsu, aplicam-se operações morfológicas para refinar a segmentação das fraturas. Essas operações são essenciais para melhorar a qualidade da segmentação, removendo ruídos indesejados e preenchendo lacunas nas estruturas detectadas. As principais operações morfológicas empregadas são a Abertura (*Opening*) e o Fechamento (*Closing*), que combinam erosão e dilatação de maneiras específicas para atingir os objetivos desejados (Haralick; Shapiro, 1992; Gonzalez; Woods, 2008).

As operações morfológicas são técnicas baseadas na forma dos objetos na imagem e utilizam um elemento estruturante S para interagir com a imagem binária I. O elemento estruturante é uma matriz binária que define a vizinhança e a forma das operações. As operações principais são:

- Erosão (*Erosion*): Reduz o tamanho dos objetos na imagem, eliminando pixels nas bordas onde o elemento estruturante não se encaixa completamente.
- Dilatação (*Dilation*): Expande o tamanho dos objetos na imagem, adicionando pixels nas bordas onde o elemento estruturante se encaixa parcialmente.

As operações de Abertura e Fechamento são combinações dessas operações básicas:

- Abertura (*Opening*): Erosão seguida de dilatação.
- Fechamento (*Closing*): Dilatação seguida de erosão.

A operação de abertura é utilizada para remover pequenos objetos indesejados do fundo da imagem, preservando a forma e o tamanho dos objetos maiores, como as fraturas de interesse, isto é (Eq. 23):

$$Opening(I) = Dilation(Erosion(I)) \tag{23}$$

Onde:

- I: Imagem binária original após a binarização por Otsu.
- $Erosion(I)$: Resultado da erosão da imagem I com o elemento estruturante S.
- $Dilation(\cdot)$: Resultado da dilatação da imagem resultante da erosão.

A dilatação de uma imagem I com um elemento estruturante S é definida pela Eq. 24.

$$I \oplus S = \{(x, y) | \, S \cap I_{(x,y)} \neq \emptyset\} \tag{24}$$

A dilatação expande os objetos na imagem, preenchendo pequenas lacunas e conectando regiões próximas.

Por sua vez, a erosão de uma imagem I com um elemento estruturante S é definida como pela Eq. 25.

$$I \oplus S = \{(x, y) | \, S \cap I_{(x,y)} \neq \emptyset\} \tag{25}$$

Esclarece-se que a erosão retrai os objetos expandidos pela dilatação, restaurando sua forma original enquanto mantém as áreas preenchidas.

Quanto ao efeito do fechamento, há o preenchimento de pequenos buracos, em que pequenas lacunas e buracos nas fraturas são preenchidos, garantindo que as estruturas sejam contínuas. Também ocorre a suavização das bordas, isto é, as bordas das fraturas são suavizadas, reduzindo irregularidades e tornando as estruturas mais uniformes.

No âmbito das operações morfológicas deve-se chamar a atenção para o elemento estruturante S, que é uma matriz binária que define a forma e o tamanho das operações morfológicas. A escolha do elemento estruturante é crucial para o sucesso das operações de abertura e fechamento. normalmente, elementos estruturantes comuns incluem um elemento estruturante quadrado (Eq. 26) e elemento estruturante circular (Eq. 27).

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \tag{26}$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{27}$$

A escolha entre um elemento estruturante quadrado ou circular depende das características das fraturas e dos ruídos na imagem. Elementos estruturantes maiores ou de formas mais complexas podem ser utilizados para operações mais agressivas de remoção ou preenchimento.

Quanto ao processo de refinamento da segmentação utilizando abertura e fechamento pode ser descrito por três passos. O primeiro é a aplicação da abertura, que tem o objetivo de remover ruídos pequenos e objetos indesejados do fundo da imagem binária. Para isso, aplica-se a erosão seguida de dilatação com o elemento estruturante S (Eq. 28).

$$I_{abertura} = Opening(I) = Dilation(Erosion(I)) \tag{28}$$

O segundo passo é a aplicação do fechamento, que visa preencher pequenos buracos e lacunas nas fraturas detectadas, além de suavizar as bordas das estruturas. Para isso, aplica-se a dilatação seguida de erosão com o mesmo elemento estruturante S (Eq. 29).

$$I_{fechamento} = Closing(I_{abertura}) = Erosion(Dilation(I_{abertura})) \tag{29}$$

Por fim, o terceiro passo abrange o resultado de detecção. A imagem resultante $I_{fechament}$ apresenta fraturas segmentadas com menos ruídos e buracos, proporcionando uma base mais robusta para as etapas subsequentes de caracterização e análise estatística.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS FRATURAS

A caracterização das fraturas envolve a extração de métricas quantitativas que descrevem suas propriedades geométricas e físicas. As principais métricas calculadas são comprimento, abertura, orientação, área das fraturas, porosidade e permeabilidade, que são descritas nos próximos parágrafos.

3.3.1 Cálculo de Comprimento

O comprimento da fratura é calculado a partir da transformada de distância e do esqueleto da estrutura binarizada. A transformada de distância $D(x, y)$ de uma imagem binária é definida como a menor distância de cada pixel de fundo (parte

contínua de imagem) ao pixel de frente (parte descontinua de imagem) mais próximo (Eq. 30).

$$D(x,y) = \min\{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} \quad (30)$$

Onde (x_i, y_i) são as coordenadas dos pixels das fraturas.

A distância transformada é uma técnica fundamental no processamento de imagens que atribui a cada pixel de uma imagem binária o valor da distância até o pixel mais próximo pertencente a uma determinada classe (geralmente o fundo ou o objeto de interesse). Este método é amplamente utilizado em diversas aplicações, como segmentação de imagens, análise de formas, reconhecimento de padrões e, especificamente neste estudo, na caracterização de fraturas geológicas (Borgefors, 1986).

Neste aspecto, o esqueleto $S(x,y)$ da fratura é uma representação de largura única que preserva a conectividade e a topologia da estrutura original. É obtido por algoritmos de esqueletização, como o algoritmo de Zhang-Suen (Zhang; Suen, 1984).

O comprimento total L da fratura é calculado como o número de pixels no esqueleto multiplicado pelo tamanho do pixel s (Eq. 31).

$$L = N_s \times s \quad (31)$$

Onde N_s é o número de pixels no esqueleto.

3.3.2 Cálculo de Abertura

A abertura mínima ($A_{mínima}$), média ($A_{média}$), máxima ($A_{máxima}$) e desvio padrão (Std) são calculadas utilizando a transformada de distância aplicada à imagem binarizada da fratura. Dessa forma, a abertura $A(x,y)$ em cada ponto do esqueleto é definida como duas vezes a distância transformada (Eq. 32).

$$A(x,y) = 2 \times D(x,y) \quad (32)$$

A definição da abertura $A(x, y)$ em cada ponto (x, y) do esqueleto como duas vezes a distância transformada $D(x, y)$ é fundamentada na geometria e na representação centralizada das fraturas geológicas. O esqueleto S de uma fratura é uma representação de largura única que preserva a conectividade e a topologia da estrutura original. Ele serve como a linha central da fratura, permitindo uma análise simplificada e eficiente de suas propriedades geométricas (Babadagli; develi, 2001; Zhang; Suen, 1984).

As métricas são então calculadas como (Eqs. 33, 34, 35 e 36):

$$A_{mínima} = \min A(x, y) \tag{33}$$

$$A_{média} = \frac{1}{N_s} \sum_{(x,y) \in S} A(x, y) \tag{34}$$

$$A_{máxima} = \max A(x, y) \tag{35}$$

$$Std = \sqrt{\frac{1}{N_s} \sum_{(x,y) \in S} (A(x, y) - A_{média})^2} \tag{36}$$

3.3.3 Cálculo de Orientação

A orientação das fraturas é determinada utilizando a Análise de Componentes Principais (PCA), que identifica a direção principal de dispersão dos pontos que compõem a fratura. A PCA é uma técnica estatística amplamente utilizada para redução de dimensionalidade e extração de características em conjuntos de dados de alta dimensão. No contexto da análise de imagens geológicas, PCA é empregada para determinar a orientação principal das fraturas, facilitando a quantificação de suas direções e facilitando a identificação de padrões direcionalmente dominantes.

A PCA transforma um conjunto de variáveis possivelmente correlacionadas em um conjunto de variáveis não correlacionadas chamadas componentes principais**.** Essas componentes são ordenadas de modo que a primeira componente retém a maior parte da variância dos dados, a segunda componente retém a segunda maior parte da variância sob a condição de ser ortogonal à primeira, e assim por diante (Jolliffe, 2002; Shlens, 2014).

Destaca-se que a PCA é aplicada às coordenadas $X = \{(x_i, y_i)\}$ dos pixels do esqueleto, de acordo com os seguintes passos:

Passo 1: Centralização dos dados (Eq. 37), onde μ é o vetor média das coordenadas;

Passo 2: Cálculo da matriz de covariância C (Eq. 38);

Passo 3: Cálculo dos autovalores e autovetores de C;

Passo 4: A orientação θ é dada pelo ângulo do autovetor principal isto é (Eq. 39),

Onde $V = [v_1, v_2]$ é o autovetor correspondente ao maior autovalor.

$$X' = X - \mu \tag{37}$$

$$C = \frac{1}{N_s - 1} X'^T X' \tag{38}$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{v_2}{v_1}\right) \tag{39}$$

3.3.4 Área da Fratura $(A_{fraturas})$

A área da fratura é calculada pelo número de pixels na fratura multiplicado pelo tamanho do pixel em milímetro quadrado mm^2 (Eq. 40).

$$A_{fraturas} = N_p \times s^2 \tag{40}$$

Onde N_p é o número de pixels na fratura e s é o tamanho do pixel.

3.3.5 Porosidade (∅)

A porosidade é definida como a razão entre a área da fratura e a área total da imagem (Eq. 41).

$$\emptyset = \frac{A_{fraturas}}{A_{total}} \tag{41}$$

3.3.6 Permeabilidade (k)

A permeabilidade é estimada a partir da abertura média das fraturas (Eq. 42).

$$k = \frac{A_{média}^2}{12} \tag{42}$$

Onde $A_{média}$ é a abertura média.

A permeabilidade é uma propriedade física fundamental que mede a capacidade de um meio poroso, como uma rocha fraturada, em permitir o fluxo de fluidos através de suas fissuras. Na caracterização de fraturas geológicas, a permeabilidade fornece insights cruciais sobre o potencial de fluxo de fluidos subterrâneos, sendo essencial para aplicações em hidrogeologia, engenharia de reservatórios e geotécnica

A relação $k = \frac{A_{média}^2}{12}$ baseia-se na Lei de Hagen-Poiseuille adaptada para fraturas geológicas, frequentemente referida como a Lei do Fluxo entre Placas Paralelas. Essa lei descreve o fluxo de um fluido viscoso entre duas superfícies planas separadas por uma distância $A_{média}$ (a abertura da fratura) (Burns; Toksoz, 2004; Zhu; Khirevich; Patzek, 2021).

3.4 CÁLCULO DA DIMENSÃO FRACTAL

A dimensão fractal das fraturas é calculada utilizando o método de contagem de caixas (*Box-Counting*), que avalia a complexidade geométrica das estruturas. Pelo Método de Contagem de Caixas, para uma estrutura Z, a dimensão fractal D_f é calculada por (Eq. 43):

$$D_f = \lim_{\epsilon \to 0} \frac{\log N(\epsilon)}{\log(1/\varepsilon)} \tag{43}$$

Onde $N(\epsilon)$ é o número de caixas de tamanho ϵ necessárias para cobrir a estrutura.

O cálculo é realizado para diferentes tamanhos de caixas e a relação $\log N(\epsilon)$ versus $\log(1/\varepsilon)$ é ajustada por regressão linear. A inclinação da linha ajustada corresponde à dimensão fractal D_f (Charkaluk; Bigerelle; Iost, 1998).

3.5 SEGMENTAÇÃO AVANÇADA

Quando ativada, a segmentação avançada modela o esqueleto da fratura como um grafo, identificando ramos e subdivisões dentro da estrutura principal. Essa modelagem permite uma análise mais detalhada das complexidades estruturais das fraturas. Para a esqueletização, o algoritmo de Zhang-Suen é utilizado para reduzir a estrutura da fratura a um esqueleto de largura única, preservando a conectividade e topologia. O algoritmo opera iterativamente, removendo pixels de borda sem alterar a conectividade (Zhang; Suen, 1984). No FRAMFRAT, a identificação dos ramos lineares a partir do grafo do esqueleto é realizada por meio de um algoritmo de percurso personalizado, que segue os seguintes passos:

1º passo: Identificação de Nós Terminais e de Bifurcação:

- Terminais (grau 1): Nós que possuem apenas uma conexão, representando os pontos de início ou fim dos ramos;
- Bifurcações (grau >2): Nós com múltiplas conexões, indicando pontos onde a fratura se divide em múltiplos ramos.

2º passo: Percurso e Identificação de Ramos:

- Para cada nó terminal, o algoritmo inicia um percurso que segue sequencialmente os nós adjacentes;
- O percurso continua até que um outro nó terminal ou uma bifurcação seja alcançada;
- Durante o percurso, os nós visitados são registrados como pertencentes ao ramo atual;
- Este processo é repetido para todos os nós terminais, garantindo que todos os ramos sejam identificados.

3º passo: Cálculo das Métricas:

- Comprimento: Contagem dos pixels no ramo multiplicada pelo tamanho de cada pixel.

- Abertura: Utilização da transformada de distância para determinar a abertura em cada ponto do ramo.
- Orientação: Ajuste de uma linha reta aos pontos do ramo para determinar seu ângulo predominante.

Este processo detalhado de segmentação avançada permite uma caracterização quantitativa robusta das fraturas, facilitando a compreensão de sua influência nas propriedades mecânicas e hidráulicas dos reservatórios estudados (Abu-Ain *et al.*, 2013). A combinação de esqueletização, modelagem de grafo e análise de ramos assegura que as complexidades estruturais das fraturas sejam capturadas de forma eficiente e precisa.

3.6 VISUALIZAÇÃO E ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados das análises são apresentados por meio de diversas visualizações gráficas, facilitando a interpretação dos dados e a identificação de padrões nas fraturas. Desta forma, são utilizados o diagrama de roseta histogramas, distribuição do tamanho das fraturas, estereograma das orientações, *box plot* das aberturas, *scatter plot* abertura vs. comprimento e matriz de correlação das métricas.

O diagrama de roseta representa a distribuição das orientações das fraturas, permitindo identificar padrões direcionalmente dominantes. Cada orientação é expressa graficamente em coordenadas polares, com a frequência de cada *bin* representando a magnitude no diagrama.

Histogramas das aberturas e comprimentos das fraturas fornecem *insights* sobre a distribuição dessas métricas. Cada histograma exibe a frequência de ocorrência em intervalos específicos, facilitando a identificação de tendências e *outliers*.

A análise da distribuição do tamanho das fraturas, incluindo regressão linear em escala logarítmica, auxilia na compreensão da variabilidade e da tendência das estruturas detectadas. A regressão linear na escala log-log permite a estimativa da dimensão fractal e a análise de escalas de distribuição.

O estereograma visualiza as orientações tridimensionais das fraturas, considerando o ângulo de mergulho. Essa visualização facilita a análise espacial das orientações das fraturas em relação à geografia local.

Os *box plots* das aberturas mínimas, médias e máximas oferecem uma visão resumida das variações nas aberturas das fraturas, destacando a mediana, quartis e possíveis *outliers*. Por sua vez, o *scatter plot* correlaciona a abertura média com o comprimento das fraturas, identificando possíveis relações entre essas métricas. A análise de correlação linear pode ser aplicada para quantificar a força dessa relação.

A matriz de correlação exibe as relações lineares entre diferentes métricas das fraturas, auxiliando na identificação de padrões e dependências. Nesse contexto, valores próximos a *+1* ou *-1* indicam forte correlação positiva ou negativa, respectivamente.

Além das visualizações gráficas, análises estatísticas são realizadas para quantificar as características das fraturas, a saber:

- Estatísticas Descritivas: Média, mediana, desvio padrão, mínimo e máximo das métricas;
- Correlação: Coeficientes de correlação de Pearson para avaliar a relação entre diferentes métricas;
- Regressão Linear: Modelagem das relações entre métricas, como abertura e comprimento das fraturas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A presente seção tem como objetivo apresentar e discutir os resultados obtidos com a implementação e aplicação do sistema FRAMFRAT para a caracterização de fraturas em superfícies rochosas. Este capítulo está estruturado para fornecer uma visão abrangente dos desempenhos do sistema, desde a sua apresentação detalhada, passando pela validação rigorosa dos métodos empregados, até a aplicação prática em casos reais de afloramentos.

4.1 APRESENTAÇÃO DO SISTEMA

Como o FRAMFRAT é de código aberto, isso permite que usuários e desenvolvedores colaborem na expansão da ferramenta, personalizando-a para necessidades específicas e contribuindo para melhorias contínuas. A disponibilização do código fomenta a transparência, a replicabilidade dos resultados e a integração com outras ferramentas e metodologias utilizadas na comunidade científica e industrial.

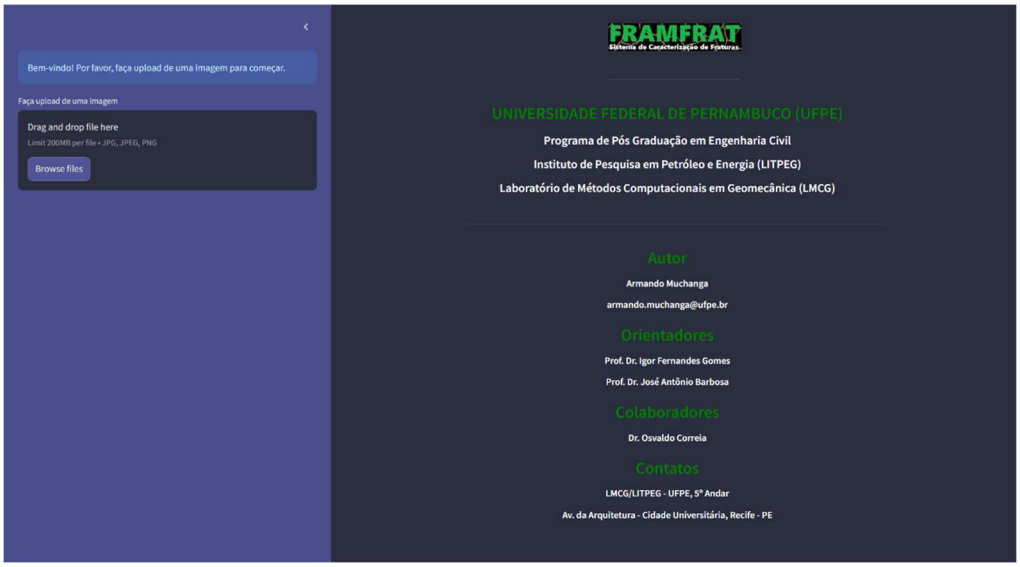
O sistema opera em etapas principais, tais como as seguintes:

- Upload e Importação de Imagens: O usuário realiza o *upload* de imagens de afloramentos, testemunhos de rocha ou outras estruturas fraturadas diretamente pela interface do FRAMFRAT. A Figura 12 mostra a tela inicial do sistema, onde as opções de importação são apresentadas de forma clara e acessível.
- Pré-Processamento da Imagem: Após a importação, o sistema oferece diversas opções de pré-processamento para aprimorar a qualidade da imagem. Essas opções incluem rotação, ajustes de brilho, contraste, gamma, equalização do histograma, aplicação de CLAHE e recorte de áreas específicas da imagem (Figura 13). Esses ajustes são fundamentais para reduzir ruídos e melhorar a detecção das fraturas.
- Detecção e Segmentação das Fraturas: Utilizando o método de Otsu para limiarização adaptativa, o sistema segmenta automaticamente as fraturas na imagem binarizada (Figuras 13). A segmentação avançada transforma o esqueleto das fraturas em um grafo, identificando ramos lineares e subdivisões complexas. Algoritmos personalizados de busca em profundidade (DFS) e largura (BFS) são aplicados para

identificar componentes conexos no grafo, permitindo a caracterização detalhada de cada ramo fraturado.

- Caracterização e Cálculo de Métricas: O sistema calcula atributos como comprimento, abertura e orientação das fraturas. Além disso, realiza o dimensionamento fractal utilizando o método de *Box Counting*, refletindo a complexidade e heterogeneidade do sistema de fraturas (Figura 13). As métricas calculadas são essenciais para avaliar propriedades hidráulicas como permeabilidade e porosidade das formações fraturadas.
- Visualização e Exportação de Resultados: Os resultados das análises são apresentados através de gráficos e diagramas interativos, como histogramas, estereogramas, diagramas e outros. A Figura 14 mostra todas as funcionalidades de visualização disponível. Além disso, os dados podem ser exportados em formatos como Excel e CSV para análises adicionais e integração com outras ferramentas de modelagem.

Figura 12 – FRAMFRAT Página Inicial



Fonte: Acervo do autor (2024)

Figura 13 – Funções de Pré-processamento (A), Detecção de Fraturas (B), e Caracterização (C)

Fonte: Acervo do autor (2024)

Figura 14 – Interface com visualização avançada e análise estatística

Fonte: Acervo do autor (2024)

Outro recurso importante é a Distribuição do Tamanho das Fraturas, que permite a análise da distribuição cumulativa das aberturas médias. Este recurso inclui ajuste por regressão linear, indicando a relação matemática e a dimensão fractal associada. Adicionalmente, o Box Plot das Aberturas fornece uma representação

estatística dos valores de abertura mínima, média e máxima das fraturas, identificando variações e dispersões nas dimensões das descontinuidades. A Matriz de Correlação das Métricas visualiza as relações entre parâmetros como comprimento, aberturas e porosidade, destacando interdependências críticas para a análise de fraturas.

Por fim, a visualização avançada, oferece *overlays* das fraturas detectadas diretamente na imagem original, facilitando a validação e revisão das análises. Esse recurso visual aprimorado assegura que as interpretações sejam claras e compreensíveis, aumentando a confiança nos dados analisados e nas conclusões derivadas.

4.2 VALIDAÇÃO DO SISTEMA FRAMFRAT

A validação do sistema FRAMFRAT foi realizada com o objetivo de avaliar sua eficácia e precisão na parametrização automática de sistemas de fraturas em superfícies rochosas, utilizando processamento de imagem digital. Este processo envolveu a comparação dos resultados obtidos pelo FRAMFRAT com medições manuais realizadas em condições controladas, assegurando a confiabilidade e a robustez do sistema desenvolvido.

Destaca-se que a validação da ferramenta é uma etapa crucial para demonstrar sua eficácia e precisão na parametrização automática de sistemas de fraturas em superfícies rochosas por meio de processamento de imagem digital.

4.2.1 Coleta de Dados para Validação

Quanto ao ambiente de teste e equipamentos utilizados, para garantir a consistência e a precisão das medições, os testes foram conduzidos em um ambiente controlado, onde fatores como iluminação, ângulo de captura e estabilidade da câmera foram cuidadosamente gerenciados. As imagens foram capturadas utilizando a câmera de um smartphone de alta resolução, posicionada perpendicularmente à superfície rochosa para minimizar distorções e assegurar que as fraturas fossem claramente visíveis.

Os seguintes equipamentos e ferramentas foram utilizados:

- Smartphone com câmera de alta resolução: Para captura das imagens das fraturas;
- Medidor de Fratura: Instrumento específico para medir as aberturas das fraturas com maior precisão (Figura 15A);
- Fita métrica: Para medições precisas das aberturas e comprimentos das fraturas (Figura 15B);
- Esquadro Régua: Esta ferramenta permitiu traçar linhas perpendiculares e assegurar que as medições de abertura e comprimento realizadas manualmente estivessem corretas (Figura 15C);
- Scanline: método utilizado para traçar linhas perpendiculares e seguir as fraturas, garantindo medições precisas
- Ambiente Controlado: Local com iluminação uniforme e estabilidade para evitar variações nas imagens capturadas.

Figura 15 - Elementos utilizados para a coleta dos dados de fratura em campo.

Fonte: Acervo do autor (2024)

4.2.2 Procedimento de Medição Manual

As medições manuais das fraturas foram realizadas seguindo uma sequência de etapas cuidadosamente planejadas para garantir a precisão e a confiabilidade dos dados coletados. A seguir, descrevem-se detalhadamente os procedimentos adotados:

- Delimitação da Área de Estudo: Inicialmente, uma área de 60 cm x 60 cm foi traçada na superfície rochosa a ser analisada. Esta delimitação padronizada permitiu

uma amostragem consistente das fraturas presentes, facilitando comparações precisas entre diferentes regiões e imagens capturadas. A delimitação da área assegurou que todas as medições subsequentes fossem realizadas dentro de um espaço controlado e uniforme, minimizando variações causadas por inconsistências na seleção da área de interesse;

- Captura das Imagens das Fraturas: Após a delimitação da área, as fraturas foram fotografadas utilizando a câmera de um smartphone com alta resolução. Para assegurar a precisão das medições subsequentes, foi fundamental que a imagem capturada estivesse alinhada perpendicularmente à superfície. Esse alinhamento minimiza distorções e garante que as dimensões medidas reflitam com exatidão as características reais das fraturas;
- Medida das Aberturas das Fraturas: Após a captura das imagens, foram utilizadas ferramentas específicas para medir as aberturas das fraturas: fita métrica, utilizada para obter medições lineares precisas das aberturas; e medidor de fratura, instrumento especializado que permite a medição das aberturas com maior exatidão, capturando variações sutis que poderiam passar despercebidas com o uso apenas da fita métrica. Para garantir que as medições das aberturas fossem realizadas de forma consistente e próxima da realidade, foram traçadas linhas perpendiculares (*scanlines*) às fraturas com ajuda de esquadro régua. Essas linhas auxiliam na determinação do ponto exato onde as aberturas devem ser medidas, evitando erros de alinhamento e proporcionando uma referência visual clara durante o processo de medição.
- Medida dos Comprimentos das Fraturas: Os comprimentos das fraturas foram medidos seguindo a trajetória das fraturas na superfície rochosa. Utilizando as *scanlines* traçadas anteriormente, a fita métrica foi posicionada ao longo das linhas das fraturas para obter medidas lineares precisas. Esse método assegura que as medições considerem a extensão real das fraturas, capturando tanto os comprimentos máximos quanto as variações ao longo de suas trajetórias.
- Registro e Organização dos Dados: Todas as medições realizadas foram registradas em uma planilha estruturada (conforme apresentado na Tabela 1). Este registro sistematizado facilita a comparação direta entre os dados obtidos manualmente e os resultados gerados pelo sistema FRAMFRAT. A organização dos dados em formato tabular permite uma análise eficiente, identificando rapidamente discrepâncias e validando a precisão do software.

Tabela 1 – Dados de medição manual das fraturas

Área	Comprimento Fratura (mm)	Abertura mínima (mm)	Abertura Máxima (mm)	Figura
1	600	14	38	Figura 14: Area 1
2	872	13	50	Figura 14: Area 2
3	770	10	35	Figura 14: Area 3
4	800	9	30	Figura 14: Area 4

Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Para garantir consistência e comparabilidade, todas as áreas de coleta (Figura 16) foram padronizadas. Cada área analisada corresponde a uma região quadrada de 60 cm (600 mm) de lado, resultando em uma área total de 3600 cm² (36000 mm²). As imagens capturadas possuem resolução uniforme de 600 x 600 pixels, proporcionando uma base homogênea para a análise e minimizando potenciais vieses relacionados à escala ou qualidade das imagens.

Figura 16 – Áreas consideradas para medição manual de fraturas

Fonte: Dados da pesquisa (2024)

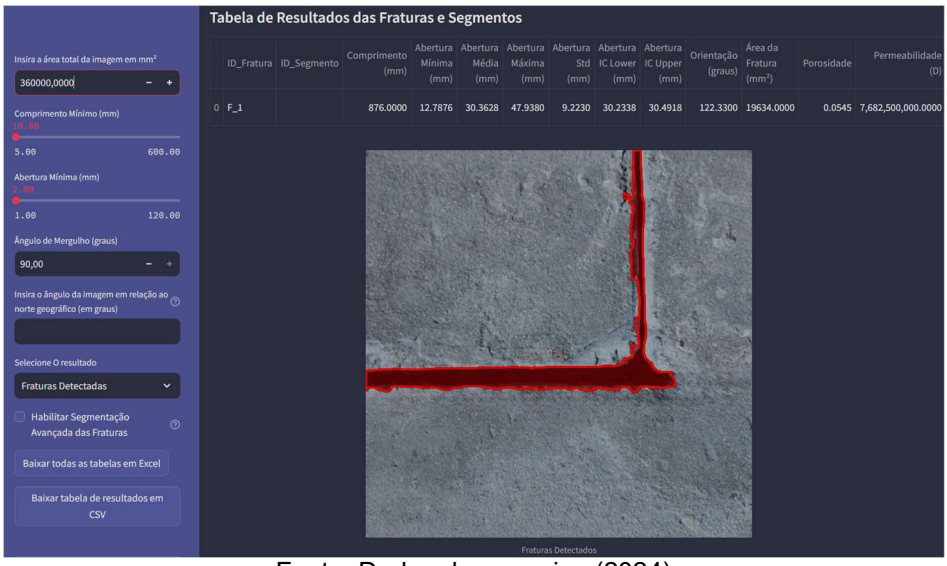
4.2.3 Resultados do FRAMFRAT

Após a coleta das imagens e das medições manuais, o sistema FRAMFRAT foi aplicado para realizar a parametrização automática das fraturas presentes nas imagens capturadas, onde o sistema calculou diversos parâmetros para cada fratura detectada. Esses parâmetros incluem comprimento, abertura mínima, média e máxima, desvio padrão das aberturas, intervalos de confiança e orientação, conforme ilustrado nas Figuras 17, 18, 19 e 20.

Figura 17 – Cálculo de parâmetros para a Área 1

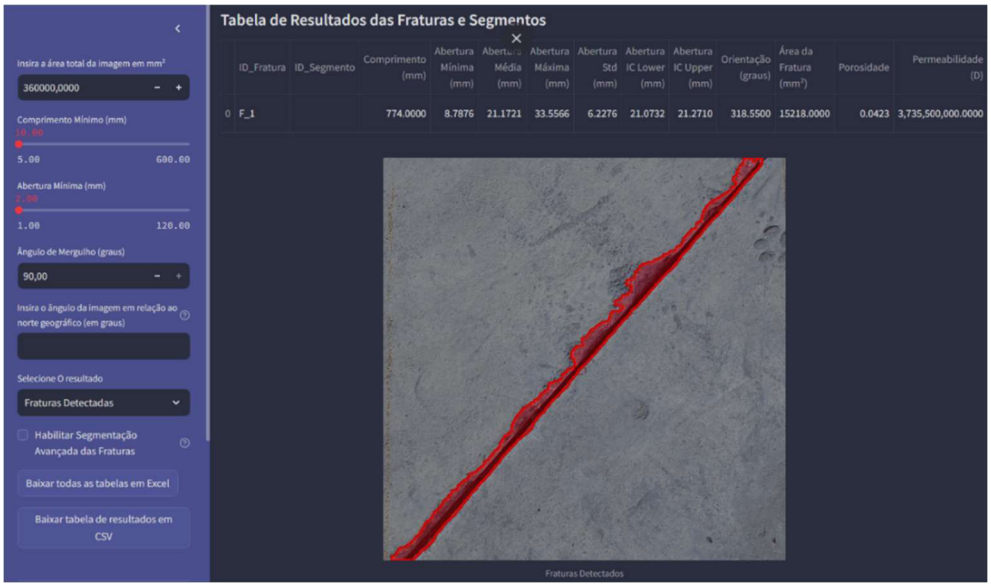
Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Figura 18 – Cálculo de parâmetros para a Área 2



Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Figura 19 – Cálculo de parâmetros para a Área 3



Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Figura 20 - Cálculo de parâmetros para a Área 4

Fonte: Dados da pesquisa (2024)

A Tabela 2 sintetiza os resultados gerados pelo FRAMFRAT conforme demonstrado nas imagens anteriores.

Tabela 2 – Resultados do FRAMFRAT

Comp. (mm)	Abertura Mínima (mm)	Abertura Média (mm)	Abertura Máxima (mm)	Abertura Desvio Padrão	Abertura Intervalo de Confiança mínimo	Abertura Intervalo de Confiança Máximo	Orientação (graus)	Área
610	12,79	23,4	34	7,7	23,27	23,52	359,75	1
876	12,78	30,36	47,9	9,22	30,23	30,49	122,33	2
774	8,79	21,17	33,55	6,22	21,07	21,27	318,55	3
753	7,19	22,38	37,56	5,11	22,29	22,47	43,9	4

Fonte: Dados da pesquisa (2024)

4.2.4 Análise Comparativa entre FRAMFRAT e Medições Manuais

As Tabela 3 e 4 apresentam os resultados obtidos pelo sistema FRAMFRAT para as quatro áreas, comparando-os com as medições manuais. Esta análise visa avaliar a precisão e a confiabilidade do FRAMFRAT na caracterização de fraturas em superfícies rochosas.

Tabela 3 - Tabela comparativa dos resultados manuais e do FRAMFRAT

Área	Comprimento Manual (mm)	Comprimento FRAMFRAT (mm)	Abertura Mínima Manual (mm)	Abertura Mínima FRAMFRAT (mm)	Abertura Máxima Manual (mm)	Abertura Máxima FRAMFRAT (mm)
Área 1	600	610	14	12,79	38	34
Área 2	872	876	13	12,78	50	47,9
Área 3	770	774	10	8,79	35	33,55
Área 4	800	753	9	7,19	30	37,56

Fonte: Dados da pesquisa (2024)

A análise dos comprimentos das fraturas revela uma proximidade significativa entre as medições manuais e as obtidas pelo FRAMFRAT, indicando uma alta precisão do sistema automatizado. Esses resultados demonstram que o FRAMFRAT é capaz de detectar e medir o comprimento das fraturas com pequenas variações em relação às medições manuais.

As diferenças absolutas observadas (Tabela 4), como 10 mm na Área 1 e 4 mm nas Áreas 2 e 3, confirmam a capacidade do sistema de replicar com exatidão os valores medidos manualmente, mesmo em fraturas de comprimentos variados. No entanto, na Área 4, a diferença absoluta foi mais pronunciada (47 mm), sugerindo que

fatores como características específicas da fratura ou limitações na captação da imagem podem influenciar os resultados.

Tabela 4 - Tabela das diferenças absolutas dos resultados manuais e do FRAMFRAT

Área	Diferença Absoluta Comprimento (mm)	Diferença Absoluta Abertura Mínima (mm)	Diferença Absoluta Abertura Máxima (mm)	Diferença Percentual Comprimento (%)	Diferença Percentual Abertura Mínima (%)	Diferença Percentual Abertura Máxima (%)
Área 1	10	1,21	4	1,67	8,64	10,53
Área 2	4	0,22	2,1	0,46	1,69	4,2
Área 3	4	1,21	1,45	0,52	12,1	4,14
Área 4	47	1,81	7,56	5,88	20,11	25,2

Fonte: Dados da pesquisa (2024)

A comparação das aberturas das fraturas também apresentou uma boa correspondência entre os métodos de medição. A análise das aberturas mínimas e máximas mostra uma relação significativa entre os resultados manuais e os gerados pelo FRAMFRAT. As diferenças absolutas foram geralmente pequenas, como 1,21 mm na abertura mínima da Área 1 e 2,1 mm na abertura máxima da Área 2. No entanto, na Área 4, as maiores diferenças foram observadas na abertura mínima (1,81 mm) e na abertura máxima (7,56 mm). Esses resultados indicam que o sistema pode enfrentar desafios em situações específicas, como em aberturas menores ou em fraturas com características atípicas.

Apesar dessas discrepâncias, as diferenças gerais permanecem dentro de uma faixa aceitável para estudos geológicos e mecânicos, destacando a eficácia do FRAMFRAT em automatizar a medição de fraturas. Isso reduz a dependência de métodos manuais, possibilitando análises mais rápidas, consistentes e adequadas para diferentes aplicações práticas.

4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para uma avaliação mais rigorosa da precisão do FRAMFRAT, foram calculados indicadores estatísticos como o Erro Médio Absoluto (MAE), o Erro Quadrático Médio (RMSE), o Coeficiente de Determinação (R^2), o Erro Médio Percentual Absoluto (MAPE) e o Coeficiente de Correlação de Pearson (Tabela 5). É importante salientar que, dado o número limitado de amostras (quatro áreas), o cálculo

de R^2 e Pearson Correlation deve ser interpretado com cautela, servindo apenas para ilustrar a tendência geral de correlação.

Tabela 5 - Indicadores Estatísticos

Parâmetro	R^2	Pearson Correlation	MAE (mm)	RMSE (mm)	MAPE (%)
Comprimento (mm)	0,94	0,96	16,25	24,19	2,13
Abertura Mínima (mm)	0,63	0,80	1,11	1,25	10,64
Abertura Máxima (mm)	0,63	0,80	3,78	4,46	11,02

Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Os valores elevados de R^2 para o parâmetro comprimento (0,91) indicam uma forte correlação linear entre as medições manuais e as automatizadas pelo FRAMFRAT, corroborando a precisão do sistema para este parâmetro. Complementarmente, o Coeficiente de Correlação de Pearson para o comprimento (0,96) reforça essa forte relação linear, demonstrando que as medições do FRAMFRAT estão altamente alinhadas com as medições manuais.

No entanto, para as aberturas mínima e máxima das áreas do cenário analisado neste estudo, os valores de R^2 foram inferiores (0,63), sugerindo que o sistema pode apresentar maior variabilidade na medição desses parâmetros. O Coeficiente de Correlação de Pearson para ambas as aberturas foi de 0,80, indicando uma correlação forte, mas inferior à observada no comprimento. Essa menor correlação pode ser atribuída à maior sensibilidade das medições de abertura e à variabilidade intrínseca das fraturas, além do pequeno tamanho da amostra, que limita a robustez estatística das métricas.

O MAE reflete diferenças absolutas médias pequenas entre os métodos, com destaque para o comprimento das fraturas (16,25 mm) e a abertura mínima (1,11 mm). O RMSE, que mede a magnitude dos erros, apresenta resultados consistentes, sendo 24,19 mm para o comprimento das fraturas e menores para as aberturas. O MAPE, por sua vez, revela que o erro percentual médio foi baixo para o comprimento (2,11%), mas maior para as aberturas mínima (10,64%) e máxima (11,02%), indicando maior sensibilidade do sistema às medições de abertura.

Esses resultados demonstram a eficácia do FRAMFRAT na medição do comprimento das fraturas, com pequenas discrepâncias nas aberturas. As métricas

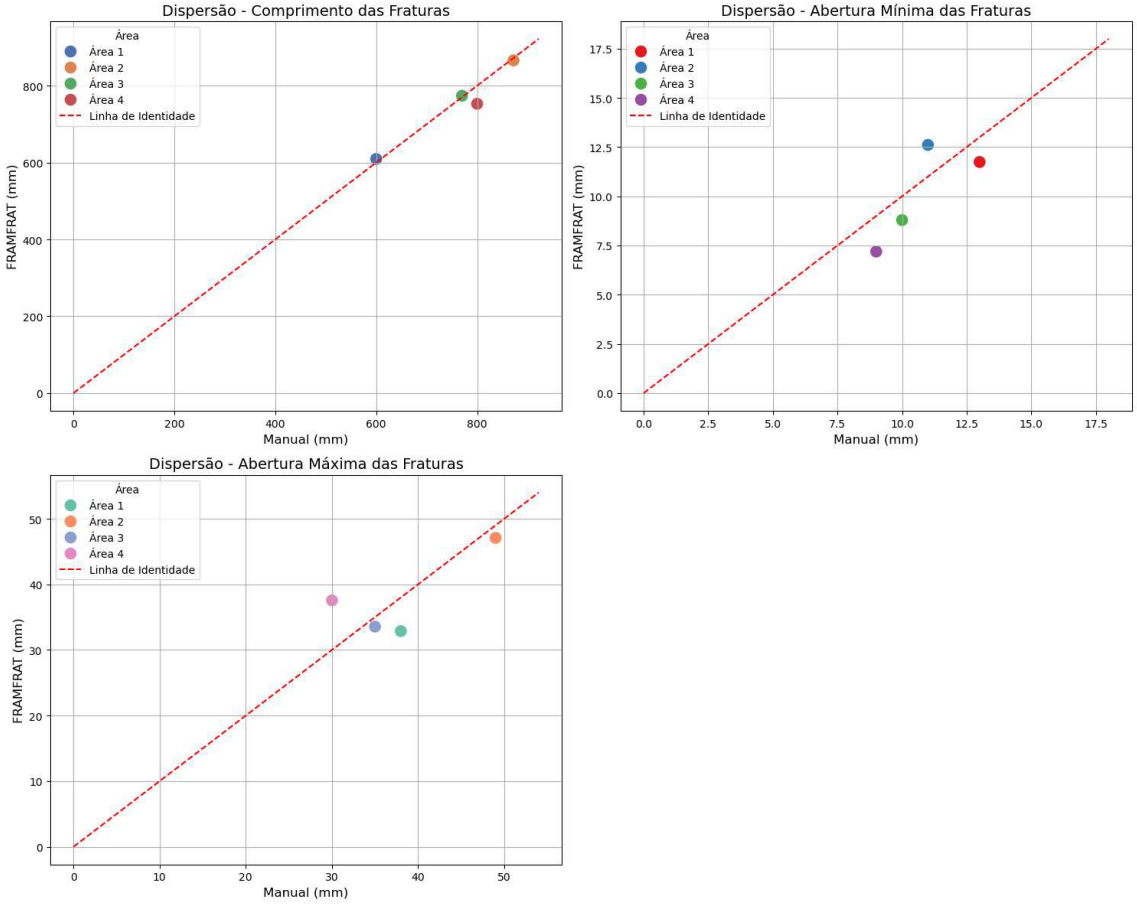
indicam que o sistema é robusto e confiável para aplicações em que a precisão relativa das medições é suficiente para atender às demandas práticas.

No entanto, para uma melhor compreensão das medições de abertura, validou-se a precisão e a confiabilidade do FRAMFRAT por meio da comparação das medições manuais com as obtidas pelo sistema automatizado, utilizando Gráficos de Dispersão (*Scatter Plots*) e a Análise de Bland-Altman.

4.4 ANÁLISE DOS GRÁFICOS DE DISPERSÃO

Os Gráficos de Dispersão são ferramentas visuais essenciais na análise de dados, utilizadas para investigar a relação entre duas variáveis quantitativas (Preacher *et al.*, 2005). No presente estudo, eles foram utilizados para comparar os comprimentos e as aberturas das fraturas medidas manualmente com as obtidas pelo FRAMFRAT (Figura 21).

Figura 21 - Comparação gráficos de dispersão (*Scatter Plots*)



Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Cada ponto no gráfico representa uma fratura específica, com eixo X indicando a métrica medida manualmente; e o eixo Y, a medida automaticamente. A presença de forte correlação linear, evidenciada pela proximidade dos pontos à linha de identidade (linha vermelha tracejada), indica que o FRAMFRAT está replicando com precisão as medições manuais.

A análise dos Gráficos 1, 2 e 3 da Figura 21 permite identificar os seguintes aspectos que devem ser destacados:

- Alta Correlação: A maioria dos pontos se aproxima da linha de identidade, indicando que o FRAMFRAT captura com precisão os comprimentos, as aberturas mínimas e as máximas das fraturas;
- Discrepâncias Mínimas: Foram observadas pequenas variações entre as medições manuais e automatizadas, que podem ser atribuídas a diferenças metodológicas ou à precisão dos equipamentos utilizados;
- Confiança nas Medições: O alinhamento geral dos pontos com a linha de identidade reforça a eficácia do FRAMFRAT na parametrização das aberturas mínimas e máximas, essenciais para análises subsequentes.

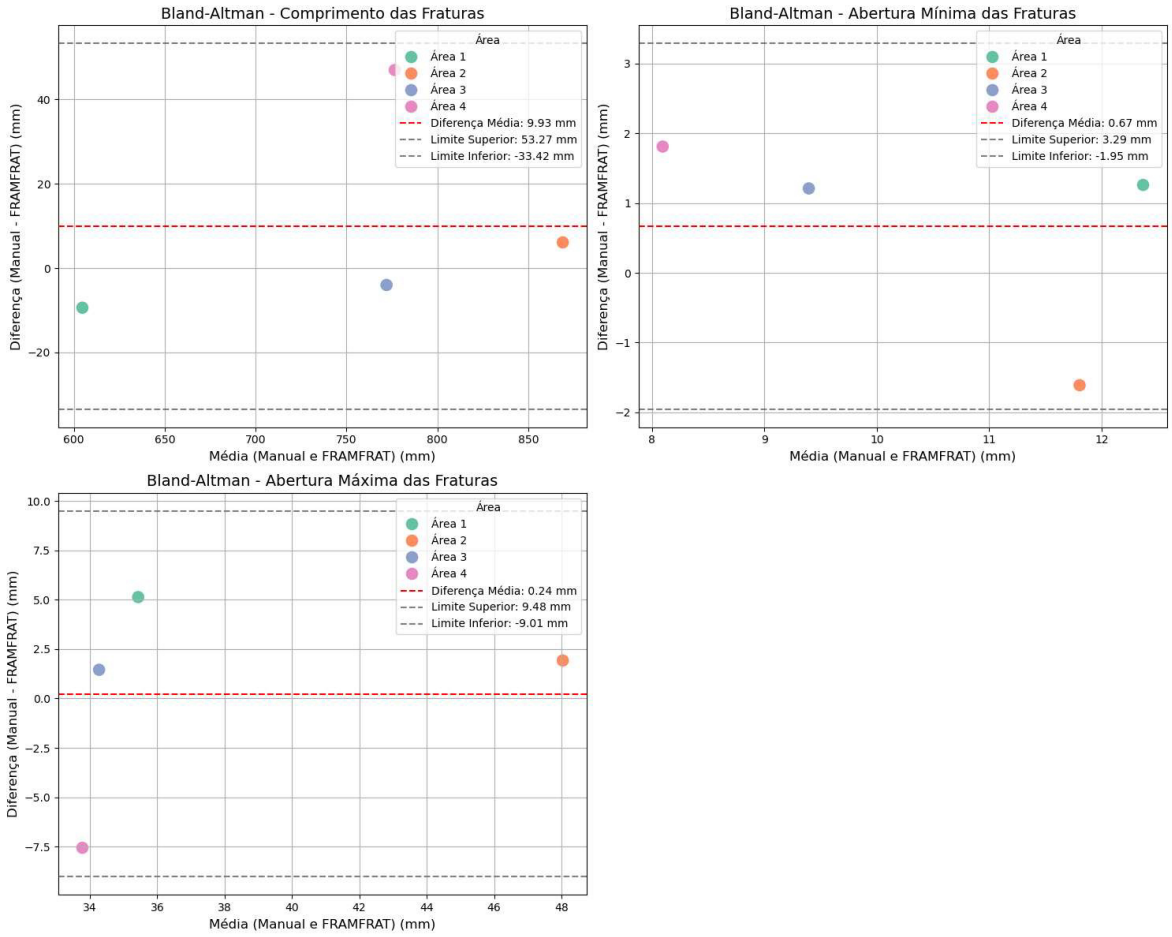
Esses resultados destacam a capacidade do FRAMFRAT de reproduzir as medições manuais com alta fidelidade, confirmando sua utilidade para estudos geológicos e mecânicos.

4.5 ANÁLISE DE BLAND-ALTMAN

A Análise de Bland-Altman é uma metodologia estatística amplamente utilizada para avaliar a concordância entre dois métodos de medição, identificando possíveis vieses e limites de acordo (Bland; Altman, 1986). Neste estudo, a análise foi aplicada tanto para os comprimentos quanto para as aberturas das fraturas.

Os resultados indicam que, no Gráfico 1 de Comprimento (Figura 22), a diferença média foi de 9,93 mm, com limites de acordo entre -33,42 mm e 53,27 mm. No Gráfico 2 de Abertura Mínima (Figura 22), a diferença média foi de 0,67 mm, com limites de acordo entre -1,95 mm e 3,29 mm. Já no Gráfico 3 de Abertura Máxima (Figura 22), a diferença média foi de 0,24 mm, com limites de acordo entre -9,01 mm e 9,48 mm.

Figura 22 – Análise de Bland-Altman



Fonte: Dados da pesquisa (2024)

É importante destacar que todos os pontos medidos estão dentro dos limites de acordo estabelecidos, confirmando a confiabilidade do FRAMFRAT. Embora as diferenças médias indiquem a presença de um pequeno viés sistemático, os limites de acordo mostram que as discrepâncias estão dentro de uma faixa aceitável para a maioria das aplicações práticas.

Esses resultados da validação do FRAMFRAT demonstram sua eficácia na parametrização automática de fraturas em superfícies rochosas. A alta correlação entre as medições manuais e automáticas reforça que o sistema replica com precisão os métodos tradicionais, com discrepâncias mínimas atribuídas, em sua maioria, a possíveis limitações nas técnicas de captura e processamento de imagem.

4.6 PONTOS POSITIVOS E LIMITAÇÕES

Diante do abordado até então, podem ser elencadas as seguintes vantagens do FRAMFRAT:

- Automatização e Eficiência: Redução significativa do tempo necessário para análises manuais;
- Consistência nas Medições: Eliminação da subjetividade inerente às medições manuais;
- Capacidade de Processar Grandes Conjuntos de Dados: Facilita estudos de larga escala em geologia e geomecânica;
- Geração de Relatórios Detalhados: Enriquecimento da análise das fraturas com tabelas e visualizações avançadas;

Por outro lado, como limitações observadas, listam-se as seguintes:

- Precisão em Fraturas com Aberturas Pequenas: Diferenças mais significativas observadas em casos específicos, possivelmente devido à resolução da imagem ou à sensibilidade do algoritmo;
- Qualidade das Imagens: Influencia diretamente a precisão das medições automáticas; imagens de baixa resolução ou iluminação inadequada podem comprometer os resultados.

De toda forma, a implementação do FRAMFRAT facilita a análise de fraturas em escalas macro e micro, abrindo novas possibilidades para a modelagem de reservatórios, avaliação de estabilidade de taludes e outras aplicações industriais, contribuindo significativamente para estudos geológicos e geomecânicos.

4.7 ANÁLISE COMPARATIVA COM OUTROS MODELOS

A análise da dimensão fractal das fraturas em rochas tem se mostrado uma ferramenta poderosa para a caracterização e quantificação das características das fraturas. Através dessa análise, é possível obter informações valiosas sobre a rugosidade, a conectividade e a distribuição de tamanhos das fraturas, bem como a permeabilidade. Essas informações são essenciais para entender o comportamento do fluxo de fluidos em reservatórios naturalmente fraturados, o que tem impacto direto na produção de petróleo e gás. Além disso, a aplicação da dimensão fractal na

caracterização de fraturas em rochas pode auxiliar no desenvolvimento de modelos mais precisos para a simulação de fluxo em meio poroso.

Para teste e análise dos resultados da ferramenta, foi realizada uma comparação usando as imagens digitais e os resultados do trabalho de Pi *et al.* (2021), por se tratar de um estudo recente que faz comparação de vários métodos de reconhecimento automático de bordas de fraturas com o método de delineamento manual. Os autores propuseram uma técnica baseada em gradiente de cor para reconhecimento automático das bordas de fraturas, fragmentos e partículas de rocha. Posteriormente, os autores determinaram a dimensão fractal e realizaram uma análise comparativa com os métodos baseados em gradiente de cinza, gradiente binária, imagem colorida, imagem de cinza, imagem binária e delineamento manual.

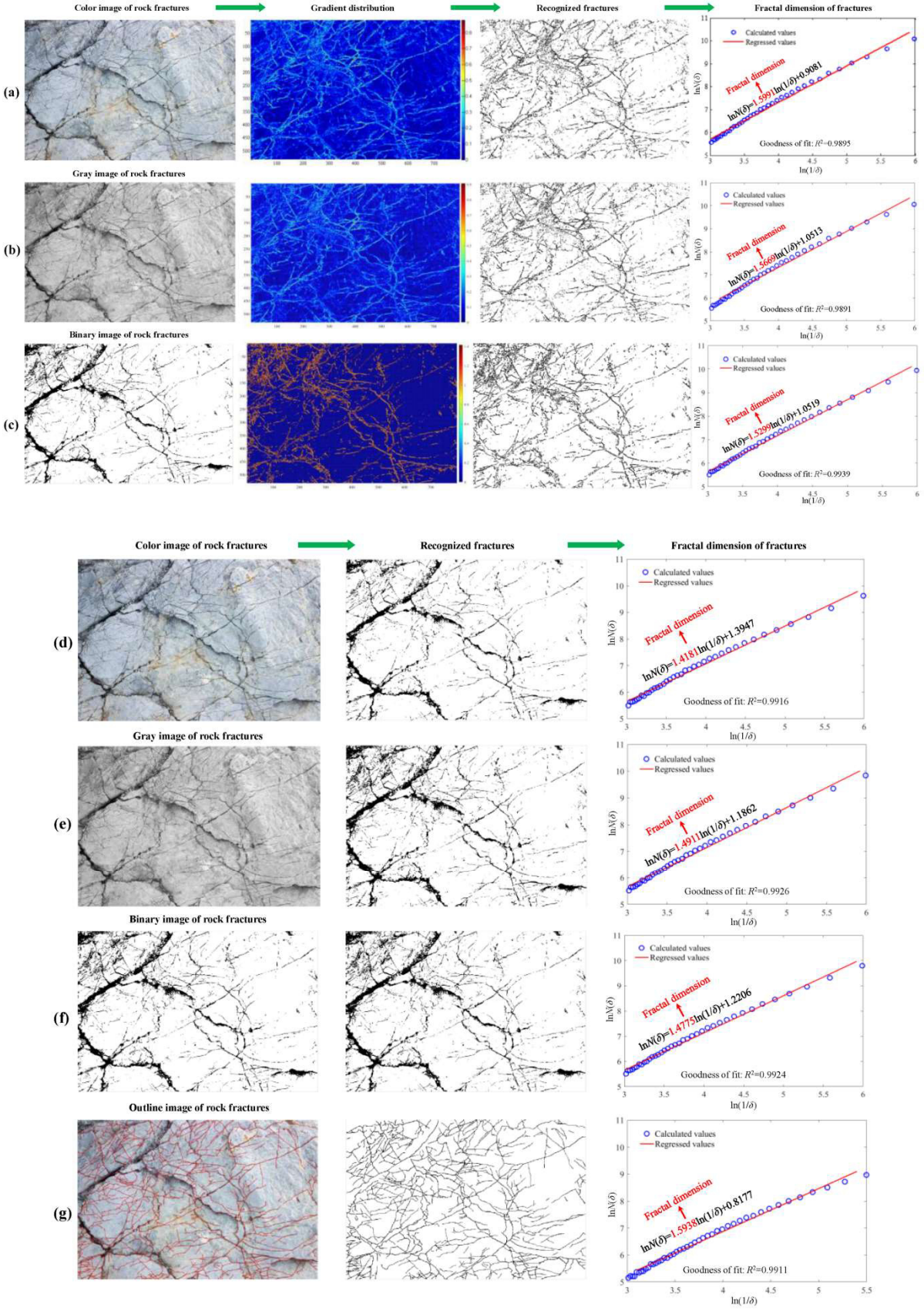
Na Tabela 6 há os resultados do experimento com base nas imagens de Pi *et al.* (2021) (Figura 23).

Tabela 6 - Resultados do experimento do Pi *et al.* (2021)

Método	**Tempo de cálculo para identificação de fratura e dimensão fractal/ms**	**Dimensão Fractal**	**Taxa de diferença da dimensão fractal em relação ao resultado por esboço manual/%**
Método baseado em gradiente de cor proposto neste estudo	1490.733	1,5991	0,33
Método baseado em gradiente de cinza	1003.207	1,5669	1,69
Método baseado em gradiente binário	1187.949	1,5299	4,01
Método baseado em imagem colorida (projetado neste estudo para comparação)	196.739	1,4181	11,02
Método baseado em imagem cinza	143.722	1.4911	6,44
Método baseado em imagem binária	155.167	1,4775	7,3
Método de esboço manual e baseado em cores (projetado neste estudo para comparação)	157.846 (Antes disso, o tempo de contorno era de 4 h)	1,5938	--

Fonte: Pi *et al.* (2021)

Figura 23 – Experimento do estudo do Pi *et al.* (2021)

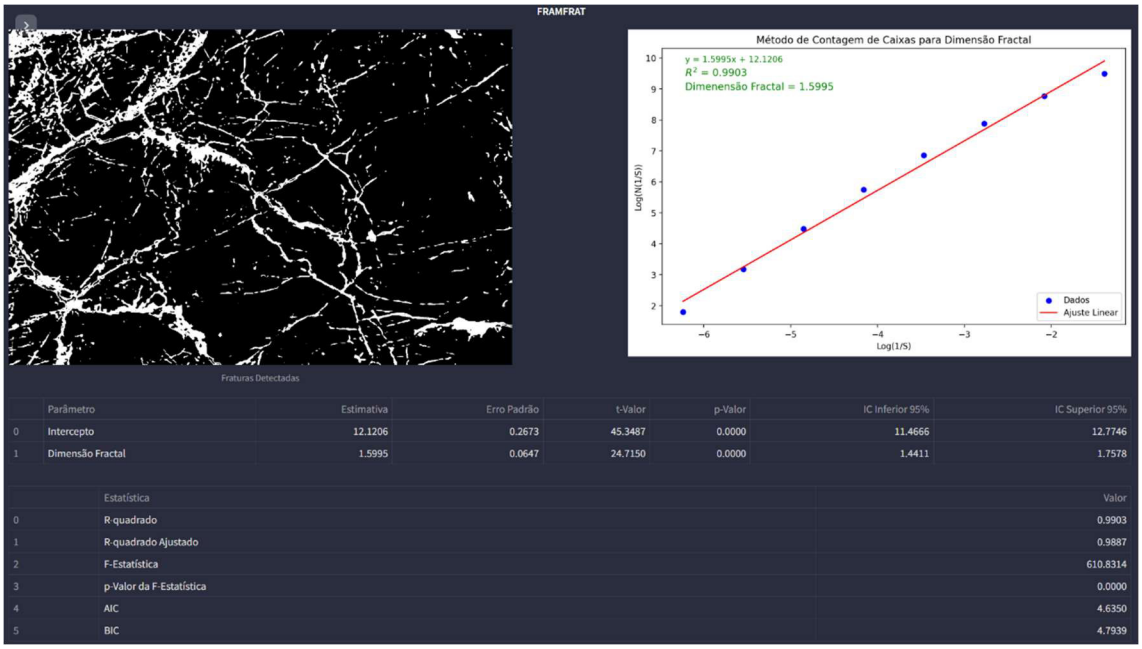


Fonte: Pi *et al.* (2021)

Como é possível visualizar, na Figura 24 há resultados do cálculo da dimensão fractal de uma rede de fraturas por diferentes métodos experimente do Pi *et al.* (2021), incluindo (a) o método baseado em gradiente de cor proposto neste estudo, (b) um método baseado em gradiente de cinza, (c) um método baseado em gradiente binário, (d) um método baseado em imagem colorida, (e) um método baseado em imagem cinza, (f) um método baseado em imagem binária e (g) um método de contorno manual e baseado em cor.

A Figura 24, apresetada os resultados de FRAMFRAT.

Figura 24 - Resultado do FRAMFRAT



	Parâmetro	Estimativa	Erro Padrão	t-Valor	p-Valor	IC Inferior 95%	IC Superior 95%
0	Intercepto	12.1206	0.2673	45.3487	0.0000	11.4666	12.7746
1	Dimensão Fractal	1.5995	0.0647	24.7150	0.0000	1.4411	1.7578

	Estatística	Valor
0	R-quadrado	0.9903
1	R-quadrado Ajustado	0.9887
2	F-Estatística	610.8314
3	p-Valor da F-Estatística	0.0000
4	AIC	4.6350
5	BIC	4.7939

Fonte: Dados da pesquisa (2024)

4.7.1 Cálculo da Taxa de Diferença para o FRAMFRAT

A taxa de diferença da dimensão fractal é calculada em relação ao resultado obtido pelo método de esboço manual, considerado como referência (Eq. 44).

$$Taxa\ de\ Diferença\ (\%) = \left(\frac{D_{f(Método)} - D_{f(Manual)}}{D_{f(Manual)}}\right) \times 100\% \qquad (44)$$

Para o FRAMFRAT (Eq. 45):

$$Taxa\ de\ Diferença\ (\%) = \left(\frac{1{,}5995 - 1{,}5938}{1{,}5938}\right) \times 100\% \approx 0{,}36\% \quad (45)$$

4.7.2 Análise dos Resultados

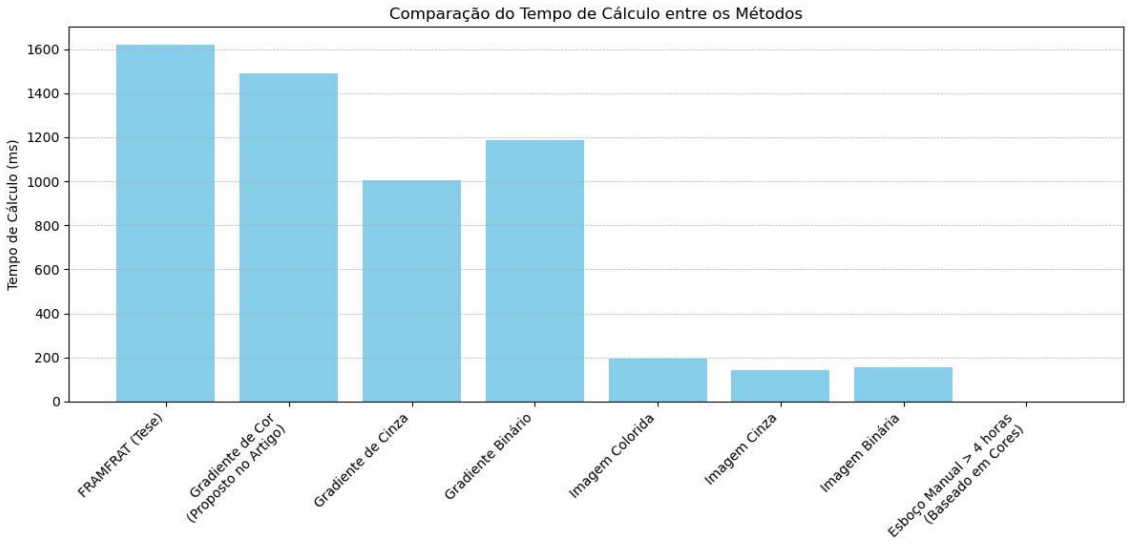
Quanto à precisão, o FRAMFRAT apresenta uma taxa de diferença de 0,36% em relação ao método manual, indicando alta precisão na estimativa da dimensão fractal. Este resultado é comparável ao melhor método do artigo, que possui uma taxa de diferença de 0,33%.

No aspecto do tempo de execução, o tempo de cálculo do FRAMFRAT é de 1620 ms, ligeiramente inferior ao do método manual mais de 4h. No entanto, é importante destacar que o método manual requer um tempo de contorno de 4 horas antes do processamento computacional, enquanto o FRAMFRAT automatiza todo o processo, incluindo a identificação das fraturas.

Sobre o método do estudo de Pi *et al.* (2021), é importante apontar que ele considera as bordas e contornos das fraturas, o que pode ser sensível a ruídos e requer um processamento mais detalhado das linhas de fratura. Por sua vez, o FRAMFRAT se baseia na área da fratura, o que é aceitável, pois captura a complexidade geométrica completa das fraturas. Isso torna o método robusto contra ruídos e variações na definição das bordas. E, quanto ao intervalo de confiança, o FRAMFRAT fornece intervalos de confiança para as estimativas dos parâmetros, indicando a precisão e confiabilidade dos resultados estatísticos.

Passando para a interpretação gráfica, sobre o tempo de cálculo, o FRAMFRAT e o método baseado em gradiente de cor têm tempos de cálculo semelhantes e relativamente altos, devido ao processamento mais complexo. O método manual tem mais de 4 horas, incluindo o tempo significativo gasto no contorno manual das fraturas (Figura 25).

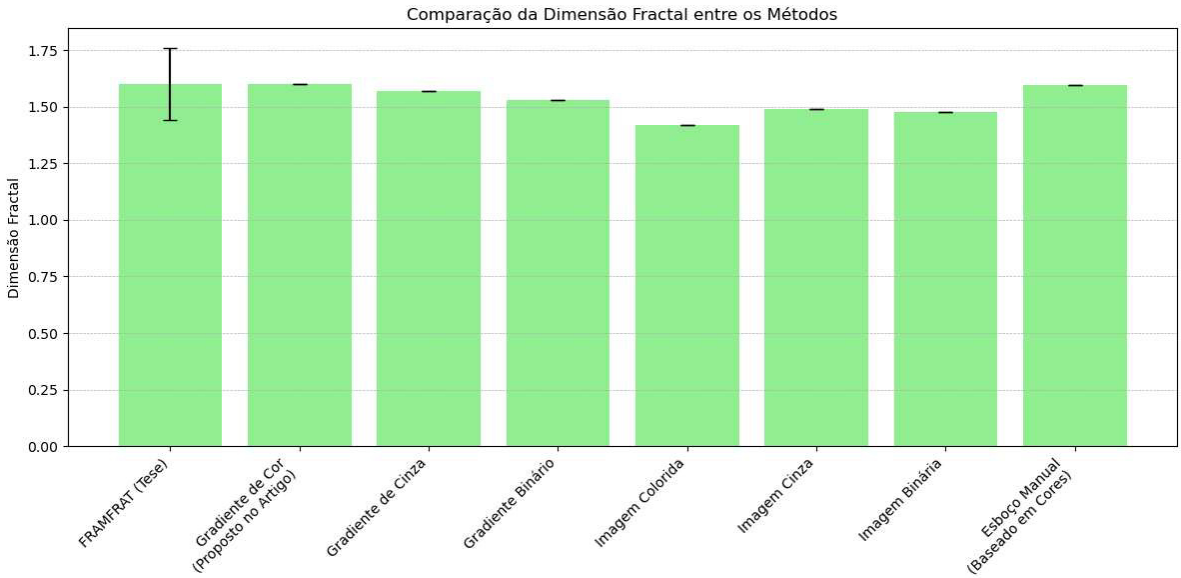
Figura 25 – Gráfico do tempo de cálculo entre os Métodos



Fonte: Dados da pesquisa (2024)

No que tange à Dimensão Fractal com intervalos de confiança, o FRAMFRAT apresenta uma dimensão fractal muito próxima à do método manual, com intervalos de confiança que incluem a estimativa do método manual, indicando alta precisão. Os demais métodos apresentam dimensões fractais mais distantes da referência e não possuem intervalos de confiança informados (Figura 26).

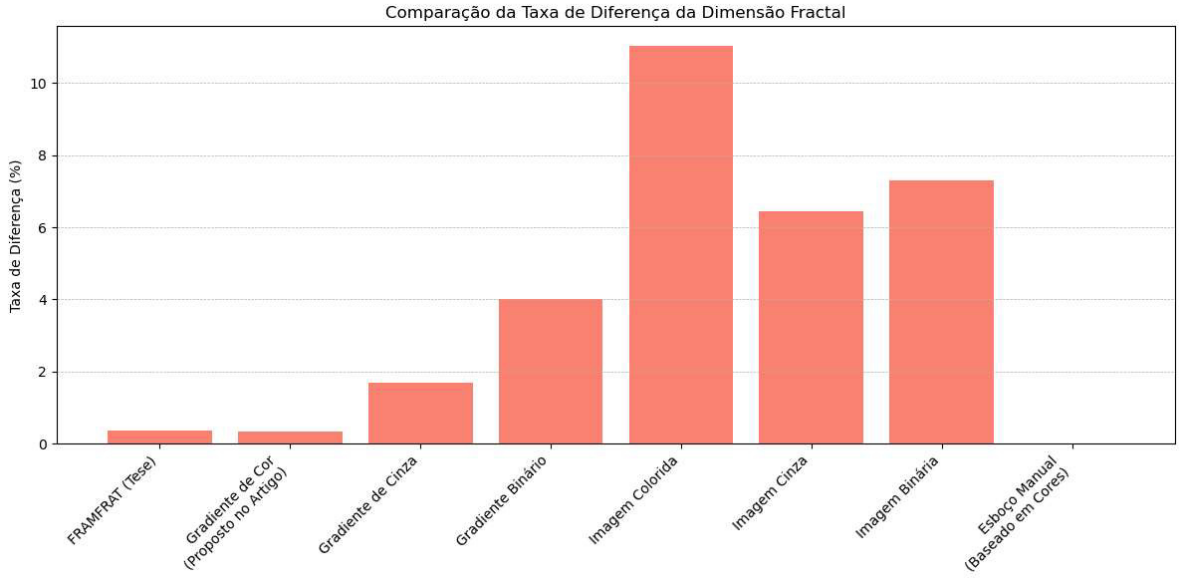
Figura 26 – Gráfico da Dimensão Fractal com intervalos de confiança



Fonte: Dados da pesquisa (2024)

E, sobre a taxa de diferença, o FRAMFRAT e o método baseado em gradiente de cor apresentam as menores taxas de diferença, indicando maior precisão em relação ao método manual. Os métodos baseados em imagens simplificadas (colorida, cinza, binária) apresentam taxas de diferença maiores, indicando menor precisão (Figura 27).

Figura 27 – Gráfico da taxa de diferença da Dimensão Fractal



Fonte: Dados da pesquisa (2024)

4.7.3 Considerações sobre os Métodos

Em termos metodológicos, o Método do Artigo (Gradiente de Cor) considera as bordas e contornos das fraturas, o que pode ser influenciado por ruídos e requer um processamento detalhado das linhas de fratura. Já o FRAMFRAT se baseia na área total da fratura, o que é aceitável e apropriado, pois captura toda a complexidade geométrica das fraturas, incluindo irregularidades internas e variações de espessura.

No que diz respeito à aceitabilidade dos resultados, o FRAMFRAT, apesar de ter um tempo de execução um pouco maior, automatiza todo o processo e oferece alta precisão, tornando-o aceitável para aplicações que exigem resultados confiáveis sem intervenção manual. A consideração da área da fratura pelo FRAMFRAT é vantajosa, pois pode ser mais robusta contra variações locais e ruídos nas bordas. E, sobre intervalos de confiança, a disponibilização pelo FRAMFRAT acrescenta valor ao método, permitindo avaliar a precisão estatística das estimativas.

Diante do exposto até aqui, sintetiza-se que a validação realizada confirma que o sistema FRAMFRAT é comparável aos melhores métodos disponíveis na literatura em termos de precisão na estimativa da dimensão fractal de redes de fraturas. Embora tenha um tempo de cálculo ligeiramente maior, oferece alta precisão e confiabilidade nos resultados, tornando-o adequado e aceitável para aplicações que exigem análises detalhadas e robustas.

4.8 APLICAÇÃO: ESTUDO DE CASO

O FRAMFRAT pode ser usado para várias aplicações de análise e estudos de rochas naturalmente fraturadas. Neste caso, para demonstrar a usabilidade, foi feito o levantamento de dados no campo do ortomosaico do traquito que aflora na Praia de Itapuama, na Bacia Pernambuco.

Esta Bacia apresenta sua evolução geológica ligada à abertura do Oceano Atlântico Sul, que ocorreu durante a ruptura do Gondwanna (Barremiano-Meso-Albiano) (Barbosa *et al.*, 2014; Matos *et al.*, 2019, 2021). É formada por dois domínios distintos representados pela Bacia Interna e Platô de Pernambuco (Buarque *et al.*, 2016). O preenchimento sedimentar da região emersa é representado por sequências vulcânicas-sedimentares com uma restrita influência marinha (Almeida, 2003; Correia Filho, 2017; Lima Filho, 1998; Tomé *et al.*, 2006).

Durante a fase de abertura da Bacia (Barremiano-Meso-Albiano), foram depositadas sequências siliciclásticas relacionadas aos leques aluviais da Formação Cabo (Almeida, 2003; Lima Filho, 1998; Polonia, 1997). Sobre a Formação Cabo, ocorrem os depósitos vulcano-sedimentares da Formação Suape. A Formação Suape é intercalada a rochas intrusivas e extrusivas da Suíte Magmática Ipojuca (Barbosa *et al.*, 2014; Correia Filho, 2017; Maia, 2012).

A Suíte magmática Ipojuca apresenta uma idade de aproximadamente 102 M.a., marcada pelo seu pulso principal, e ocorre tanto na região *onshore*, quanto *offshore* da Bacia Pernambuco (Almeida, 2003; Buarque *et al.*, 2016; Lima Filho, 1998; Nascimento, 2003; Santana, 2016). As rochas da Suíte Magmática Ipojuca apresentam uma ampla variação composicional que compreende basaltos, andesitos e riolitos, e ocorrem associadas à Formação Suape como soleiras, diques e derrames (Nascimento, 2003). Além disso, ainda faz parte da Suíte Magmática Ipojuca o carpo

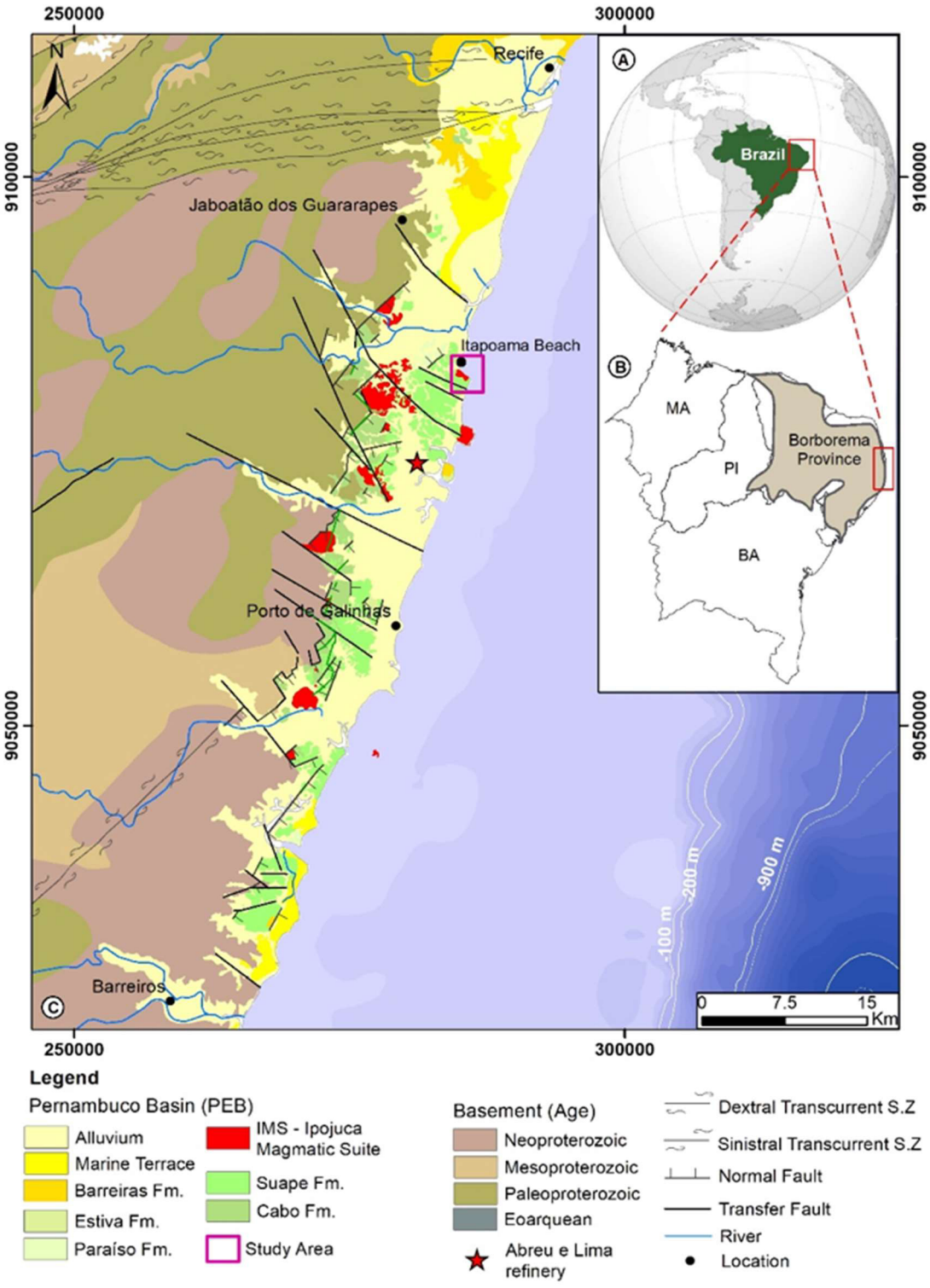
granítico localizado na região do município do Cabo de Santo Agostinho/PE e um depósito que marca a atividade de um vulcanismo explosivo relacionado aos ignimbritos do Engenho Saco, localizados em Ipojuca/PE (Nascimento, 2003; Santana, 2016).

A área de estudo está posicionada sobre os afloramentos de traquito (Suíte Magmática Ipojuca), localizados na linha de costa que envolve o trecho da Praia de Itapoama, Cabo de Santo Agostinho/PE. Estes traquitos são porfiríticos, os fenocristais são definidos pelo feldspato e com menor frequência quartzo. Os traquitos apresentam feições indicativas de forte atuação de agentes do intemperismo e erosão, o que produz uma forte oxidação dos minerais primários, dissolução dos fenocristais e dos planos da rede de fratura que corta estes depósitos.

A Formação Paraíso foi depositada sobre os depósitos vulcano-sedimentares da Formação Suape, e compreende a sedimentos fluvio-deltaicos-lacustres da Bacia Pernambuco (Maia, 2012; Maia *et al.*, 2012). Após o último estágio de fragmentação do Gondwanna, a Bacia Pernambuco experimentou as primeiras fases de influência marinha em seu preenchimento sedimentar que culminou com a deposição da Formação Estivas (Alexandre *et al.*, 2022; Tomé *et al.* 2006). O último registro encontrado na coluna sedimentar da Bacia Pernambuco é a ocorrência da Formação Barreiras e sedimentos Pós-Barreiras (Correia Filho, 2017).

Na Figura 28, há o detalhe para a distribuição das rochas vulcânicas na região *onshore* da Bacia Pernambuco e para os traquitos que ocorrem no trecho que envolve a praia de Itapoama (Retângulo destacado).

Figura 28 - Localização da Bacia Pernambuco em relação a região nordeste do Brasil



Fonte: Correia Filho *et al*. (2024)

Uma aplicação notável do FRAMFRAT é que pode auxiliar no mapeamento e análise de sistemas de fraturas naturais em superfícies de afloramentos de rochas, de forma prática e robusta. Aqui é apresentado um caso de mapeamento de sistemas de

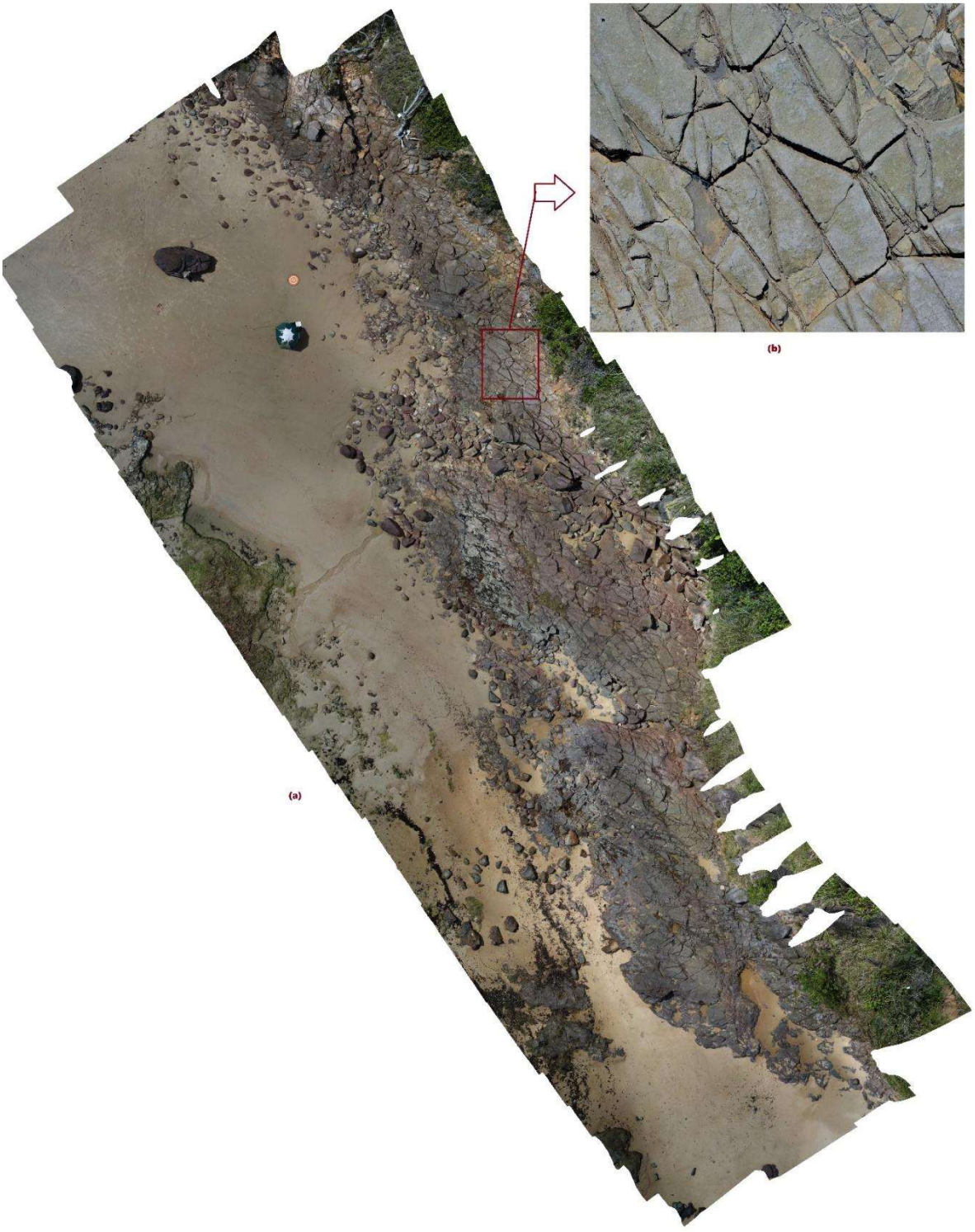
fraturas realizados em um afloramento de rochas vulcânicas no litoral sul de Pernambuco, conforme a descrição anterior do campo. A imagem da Figura 29 corresponde a um fotomosaico construído a partir de imagens adquiridas por uma plataforma não tripulada (UAV) de modelo DJI Phanton 4 Pro V2, com uma câmera com resolução 20Mpx, sensor CMOS “1”, à uma altitude aproximadamente 10 metros.

Figura 29 - Imagem do Afloramento

Fonte: Acervo pessoal do autor (2022)

As imagens foram pré-processadas para compor mosaicos ortoretificados com extensão de 75 metros (Figura 30a). A imagem após o processamento ficou com uma resolução espacial de aproximadamente 2 milímetros.

Figura 30 - Imagem do ortomosaico do traquito que aflora na Praia de Itapoama (a); Recorte de Imagem para estudo (b)



Fonte: Acervo pessoal do autor (2022)

Devido à exposição subaérea e alterações superficial, essas rochas apresentam uma grande quantidade de fraturas que formam duas famílias principais

de fraturas: uma primária com direção NE–SW; e outra secundária com direção W–SW (Bontempo Filho *et al.*, 2022; Nascimento, 2003; Somenzi *et al.*, 2021). Em vários locais do planeta, rochas vulcânicas e sub-vulcanicas naturalmente fraturadas são reservatórios comerciais de óleos e gás, sendo que sua exploração tem atraído especial atenção na China (Liu *et. al*., 2022; Wu *et. al*., 2006).

Recortou-se a imagem em uma pequena área correspondente à 8,34 metros quadrados (8340000 milímetros quadrado) com resolução de 1283 x 998 pixels (Figura 28b), onde as fraturas eram nítidas e com bom contraste. Ressalta-se que o reconhecimento das fraturas na imagem depende da textura e de quanto homogênea for, para lindar com isso a ferramenta conta com um pré-processamento de imagem com ajuste manual para ajudar nos ajustes das texturas.

4.8.1 Pré-processamento de Imagem

O pré-processamento das imagens é uma etapa crucial para assegurar que as fraturas sejam detectadas com precisão e que as características das texturas estejam otimizadas. No caso do estudo não aplicamos nenhum ajuste no pré-processamento, mas para demostrar as funcionalidades do FRAMFRAT, aplicamos os seguintes ajustes na imagem:

1. Equalização de Histograma:

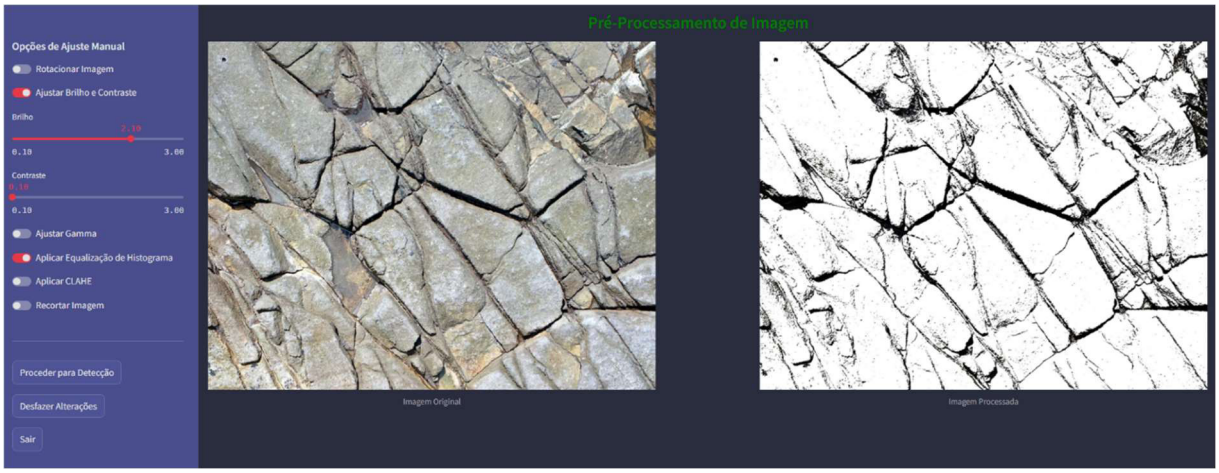
- Esta técnica redistribui a intensidade dos pixels para aumentar o contraste geral da imagem, enfatizando os detalhes das fraturas e reduzindo os efeitos de iluminação irregular.

2. Ajuste de Brilho e Contraste:

- Brilho: Aumentado para 2.10, permitindo que áreas mais escuras da imagem sejam mais visíveis.
- Contraste: Ajustado para 0.10, enfatizando diferenças sutis entre as texturas.

Esses ajustes foram aplicados manualmente utilizando ferramentas do FRAMFRAT, resultando na imagem final apresentada na Figura 31. Essa etapa não apenas melhora a visibilidade das fraturas, mas também facilita as etapas subsequentes, como detecção e caracterização.

Figura 31 – Demonstração do Pré-processamento de imagem no FRAMFRAT (Ajuste equalização de Histograma, Brilho=2.10 e Contraste=0.10)



Fonte: Dados da pesquisa pelo FRAMFRAT (2024)

4.8.2 Detecção das Fraturas

A etapa de detecção das fraturas no sistema FRAMFRAT é responsável por identificar a área e as bordas que correspondem às fraturas naturais presentes na superfície das rochas. Para isso, o FRAMFRAT utiliza algoritmos robustos de processamento de imagens, integrados ao sistema, que permitem ajustar parâmetros para otimizar os resultados com base nas características específicas de cada imagem.

O processo de detecção foi realizado em duas abordagens distintas para ilustrar a eficiência do sistema, sendo elas as seguintes:

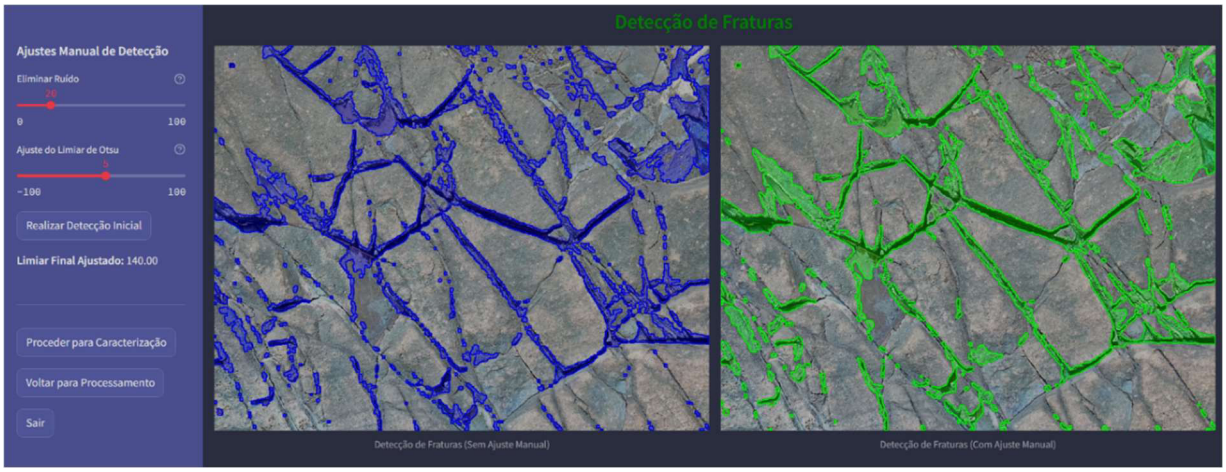
a) Sem Ajuste Manual (Figura 32, Imagem 1):

- A imagem foi processada diretamente utilizando os parâmetros padrão do sistema.
- Não foi aplicada nenhuma remoção de ruído ou ajuste prévio.
- O limiar inicial foi definido automaticamente ($limiar = 135$) utilizando o método de Otsu.

b) Com Ajuste Manual (Figura 27, Imagem 2):

- Aplicou-se uma eliminação de ruído utilizando um filtro com intensidade 20, que suaviza irregularidades e remove padrões espúrios na imagem.
- O limiar de Otsu foi ajustado manualmente com um incremento de 5, otimizando a segmentação para destacar as fraturas.

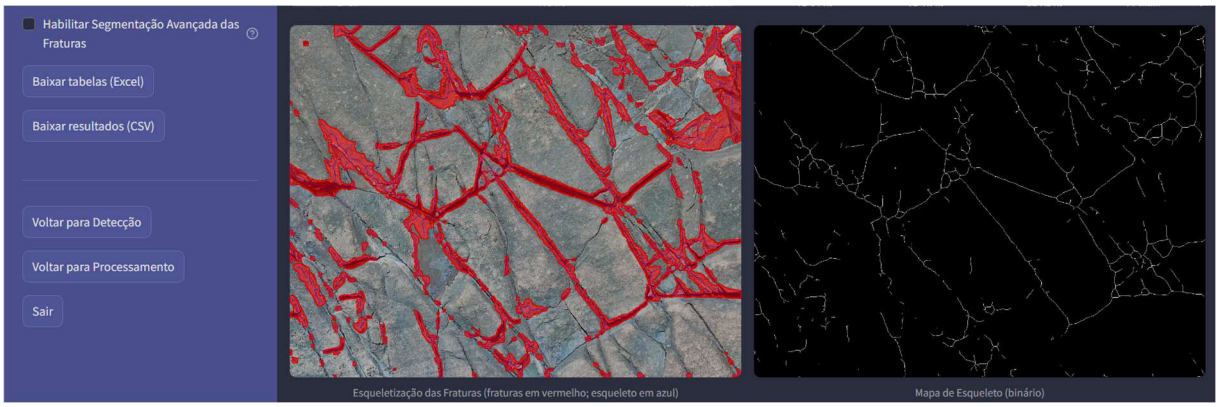
Figura 32 – Detecção de Fraturas sem ajuste e com ajuste manual



Fonte: Dados da pesquisa pelo FRAMFRAT (2025)

Quanto à representação das fraturas em forma esqueletizada com linha média, tem-se a Figura 33.

Figura 33 – Fraturas em forma esqueletizada com linha média



Fonte: Dados da pesquisa pelo FRAMFRAT (2025)

Quanto aos resultados obtidos, na Figura 32 são apresentados os resultados comparativos entre as duas abordagens de detecção. É possível observar que no procedimento sem ajuste manual, as fraturas foram detectadas, mas alguns ruídos superficiais e texturas não relacionadas interferiram no resultado. Já no procedimento com ajuste manual, após a remoção de ruídos e ajustes de limiar, o sistema destacou com maior precisão as fraturas, reduzindo artefatos e destacando as principais famílias de fraturas identificadas.

A detecção eficaz das fraturas é um passo crítico no sistema FRAMFRAT, pois ela fornece a base para as análises de caracterização, como cálculo de abertura,

orientação e dimensões fractais das fraturas. A abordagem integrada do sistema permite flexibilidade nos ajustes para lidar com diferentes condições de textura e contraste, otimizando o reconhecimento das fraturas. Em síntese, as etapas de detecção seguem a Figura 34;

Figura 34 - Etapas de Deteção

Fonte: Dados da pesquisa pelo FRAMFRAT (2025)

4.8.3 Caracterização das Fraturas

Este estudo de análise de fraturas resultou na detecção de 34 fraturas principais e 53 segmentos lineares; isto é, as 34 fraturas principais foram recortadas em 53 segmentos lineares para facilitar os estudos e análise. O sistema foi essencial para lidar com a complexidade das fraturas presentes, oferecendo uma abordagem robusta e detalhada para a segmentação, medição e análise das características geométricas e físicas das fraturas (Figura 35).

Figura 35 – Resultado da Caracterização das fraturas

Fonte: Dados da pesquisa pelo FRAMFRAT (2024)

No âmbito das configurações e parâmetros do sistema, para garantir a qualidade dos resultados e minimizar interferências de ruídos, foram definidos os seguintes parâmetros de detecção (Tabela 7):

- Comprimento Mínimo: 100 mm;
- Abertura Mínima: 1 mm.

Além disso, a função de análise avançada foi ativada, permitindo que as fraturas fossem decompostas em segmentos lineares. Essa abordagem foi fundamental para capturar com precisão os ângulos de orientação e os comprimentos individuais de cada segmento.

Tabela 7 - Dados das fraturas detectadas pela FRAMFRAT

ID_Fratura	Comprimento (mm)	Abertura Mínima (mm)	Abertura Média (mm)	Abertura Máxima (mm)	Porosidade Equivalente	Permeabilidade (D)
F_1	18104,88	25,5056	85,1465	144,7874	0,090375	604160000
F_3	227,14	18,3596	43,3705	68,3815	0,000599	156750000
F_6	285,84	18,3596	37,7638	57,1679	0,001185	118840000
F_7	3141,68	50,5165	178,1809	305,8453	0,023892	2645700000
F_8	801,37	15,3128	30,0836	44,8544	0,002578	75419000
F_10	158,23	25,5214	51,5137	77,5059	0,000558	221140000
F_22	140,37	15,3128	31,1282	46,9435	0,000491	80747000
F_25	132,71	14,292	23,9664	33,6408	0,000417	47866000
F_27	763,09	20,4171	47,9723	75,5275	0,003442	191780000
F_35	370,06	22,4272	55,605	88,7828	0,001633	257660000
F_39	127,61	15,3128	28,0498	40,7868	0,00041	65566000
F_41	132,71	15,3128	28,0498	40,7868	0,000531	65566000
F_45	160,78	11,2136	22,4272	33,6408	0,000516	41915000
F_46	140,37	11,2136	19,3725	27,5315	0,000449	31275000
F_50	107,19	10,2086	21,4221	32,6357	0,000282	38242000
F_61	359,85	11,2136	23,4718	35,73	0,000908	45910000
F_64	227,14	18,3596	38,753	59,1463	0,000749	125150000
F_67	364,96	21,438	42,326	63,2139	0,001851	149290000
F_68	354,75	18,3596	37,7558	57,1521	0,001756	118790000
F_70	125,05	10,2086	19,8909	29,5732	0,000297	32971000
F_72	362,4	29,5732	53,5316	77,4901	0,002771	238800000
F_73	122,5	10,2086	15,8233	21,438	0,000277	20865000
F_75	150,58	18,3596	36,7192	55,0787	0,000702	112360000
F_84	303,7	16,3179	36,1929	56,0679	0,001115	109160000
F_85	257,77	22,4272	46,3936	70,3599	0,001473	179360000
F_86	696,73	15,3128	39,2634	63,2139	0,002484	128470000
F_88	390,48	22,4272	47,4065	72,3858	0,001708	187280000
F_92	541,05	14,292	28,5681	42,8443	0,00157	68012000
F_97	145,47	22,4272	44,3598	66,2923	0,000762	163980000
F_101	127,61	10,2086	17,865	25,5214	0,000316	26596000

F_104	112,29	10,2086	16,3179	22,4272	0,000273	22189000
F_106	206,72	18,3596	40,7868	63,2139	0,000822	138630000
F_110	193,96	15,3128	29,5811	43,8493	0,000658	72920000
F_112	586,99	18,3596	44,3598	70,3599	0,00207	163980000

Fonte: Dados da pesquisa (2025)

Uma das funcionalidades mais relevantes do FRAMFRAT é a visualização individual das fraturas, que permite analisar com precisão as características geométricas e físicas de cada fratura detectada. A Figura 36 apresenta um exemplo dessa visualização, onde as fraturas são identificadas individualmente e destacadas sobre a imagem original. Esse tipo de saída facilita não apenas a interpretação visual, mas também a análise quantitativa das fraturas.

Figura 36 – Visualização de Fraturas segmentadas Individuais (Fratura F_1 e F_7)

Fonte: Dados da pesquisa pelo FRAMFRAT (2025)

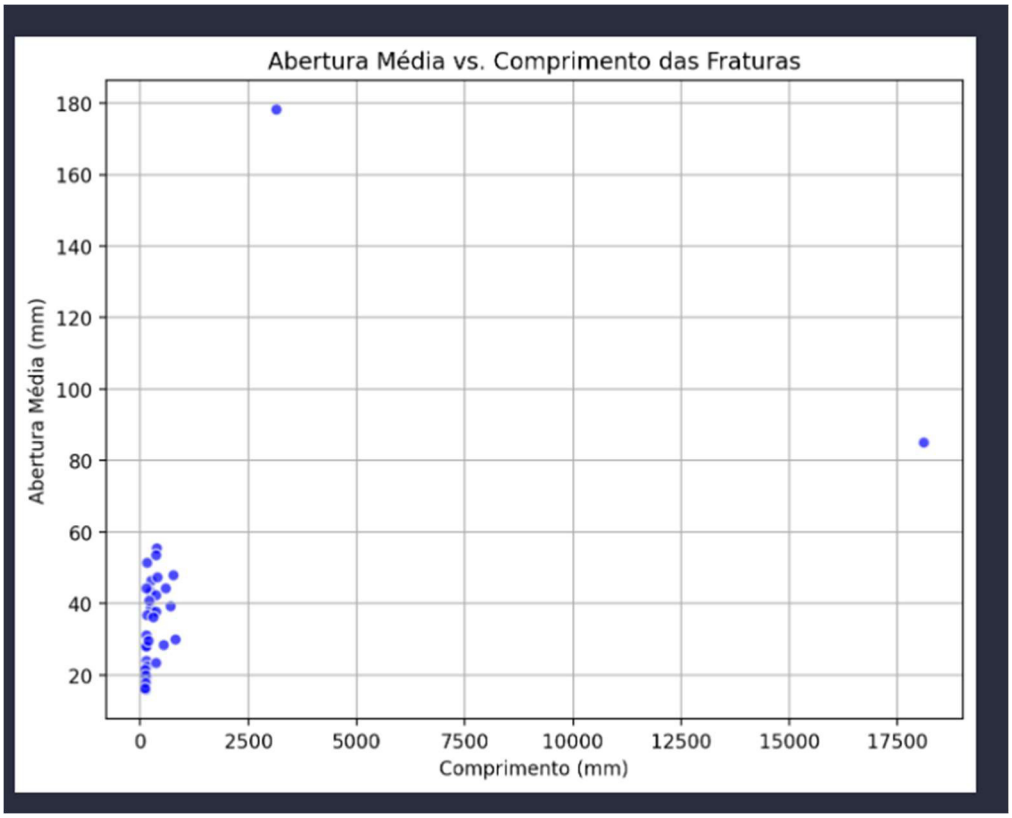
A Tabela 7 apresenta os dados resumidos das fraturas principais detectadas, incluindo parâmetros essenciais como comprimento, abertura mínima, abertura média, abertura máxima, desvio padrão das aberturas, porosidade e permeabilidade. Esses parâmetros fornecem uma visão detalhada das fraturas e permitem compreender o comportamento do meio fraturado analisado.

Quanto ao comprimento das fraturas detectadas pelo FRAMFRAT, esses variam significativamente, evidenciando a presença de estruturas de múltiplas escalas no meio analisado:

- O comprimento mínimo identificado foi de 107,19 mm (fratura F_50), representando pequenas descontinuidades que podem estar associadas a processos de relaxamento estrutural local ou a fraturas secundárias menos desenvolvidas;
- O comprimento máximo observado foi de 18104,9 mm (fratura F_1), destacando-se como uma estrutura de grande extensão, que provavelmente reflete zonas de maior concentração de esforços tectônicos e intensa deformação, podendo atuar como condutos principais para a circulação de fluidos no meio rochoso.

A variação dos comprimentos, de 107,19 mm a 18104,9 mm (Figura 37), revela a complexidade estrutural do sistema fraturado estudado. A presença de fraturas de múltiplas escalas é fundamental para os seguintes aspectos: modelagem geológica e hidráulica do meio; identificação de zonas de alta conectividade e maior potencial de fluxo; e entendimento dos processos tectônicos e deformacionais que atuaram na região.

Figura 37 - Variação dos Comprimento em relação as aberturas medias



Fonte: Dados da pesquisa pelo FRAMFRAT (2025)

No que concerne às aberturas das fraturas, essas são um parâmetro fundamental para avaliar a conectividade e o comportamento hidráulico do meio

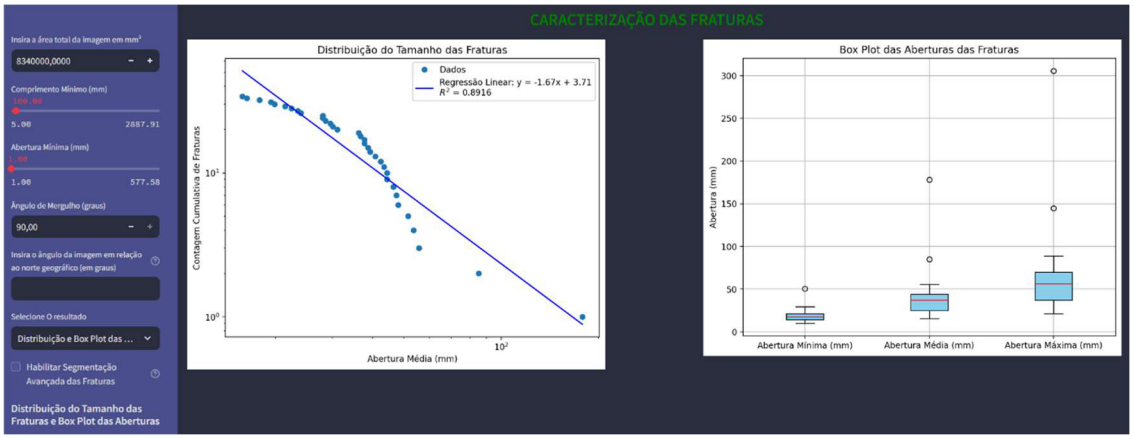
rochoso. Os resultados indicam uma variação significativa nas aberturas, destacando a heterogeneidade do sistema fraturado.

Para a abertura média, houve uma variação entre 15,82 mm (F_73) e 178,18 mm (F_7), com valores máximos alcançando até 305,85 mm (F_7). Fraturas com altas aberturas médias sugerem regiões de alta conectividade, favorecendo a circulação de fluidos e atuando como vias preferenciais para migração.

O primeiro gráfico da Figura 38 se refere à distribuição dos tamanhos das fraturas. Ele apresenta a contagem cumulativa das fraturas em função da abertura média em escala log-log. Uma regressão linear foi ajustada aos dados, com a Eq. (46):

$$y = -1.67x + 3.71 \tag{46}$$

Figura 38 – Distribuição dos Tamanho das Fraturas



Fonte: Dados da pesquisa pelo FRAMFRAT (2025)

A tendência observada indica que à medida que a abertura média aumenta, a frequência das fraturas diminui, comportamento típico em sistemas fraturados controlados por processos tectônicos.

Por sua vez o segundo gráfico da Figura 34 traz o box plot das aberturas. O box plot apresenta a distribuição das aberturas mínimas, médias e máximas. As principais observações incluem que a abertura máxima apresenta uma dispersão maior, com valores extremos indicando a presença de fraturas dominantes. Já a abertura mínima é mais uniforme, refletindo a base do sistema fraturado, enquanto a abertura média fornece um equilíbrio entre as características extremas.

A distribuição das aberturas evidencia a heterogeneidade do sistema fraturado, onde fraturas com grandes aberturas desempenham um papel central na

conectividade hidráulica. A relação inversa entre abertura média e frequência cumulativa reforça a importância das fraturas dominantes na condução de fluidos.

Os gráficos apresentados demonstram a capacidade do FRAMFRAT em fornecer uma análise robusta e visual das características das fraturas, auxiliando na interpretação detalhada do meio geológico.

A orientação das fraturas foi analisada com base nos dados segmentados apresentados na Tabela 8, onde cada fratura foi decomposta em segmentos lineares, permitindo a medição detalhada dos ângulos ao longo do seu percurso. Essa segmentação foi essencial para capturar as variações locais de orientação, fornecendo uma representação mais realista da geometria complexa das fraturas.

Tabela 8 - Dados dos segmentos das fraturas detectadas pela FRAMFRAT

ID_Segmento	ID_Fratura	Comprimento (mm)	Orientação (graus)
S_1_1	F_1	112,58	146,57
S_1_2	F_1	302,45	145,76
S_1_3	F_1	126,84	115,24
S_1_4	F_1	148,75	239,4
S_1_5	F_1	153,31	90,78
S_1_6	F_1	129,13	53,08
S_1_7	F_1	213,43	170,65
S_1_8	F_1	125,34	171
S_1_9	F_1	657,63	125,02
S_1_10	F_1	365,53	30,24
S_1_11	F_1	102,45	100
S_1_12	F_1	461,85	61,22
S_1_13	F_1	104,38	84,08
S_1_14	F_1	114,15	82,32
S_1_15	F_1	135,81	265,21
S_1_16	F_1	259,11	170,71
S_1_17	F_1	176,64	190,71
S_7_1	F_7	163,19	155
S_7_2	F_7	100,7	160,31
S_7_3	F_7	136,43	41,09
S_7_4	F_7	144,88	256,3
S_8_1	F_8	315,98	77,69
S_8_2	F_8	245,14	233,77
S_25_1	F_25	111,96	143,75
S_27_1	F_27	136,17	47,09
S_27_2	F_27	281,05	227,02
S_27_3	F_27	100,95	261
S_35_1	F_35	105,18	70,71
S_41_1	F_41	138,62	172,94
S_41_2	F_41	138,62	49,41
S_45_1	F_45	139,42	253,12
S_46_1	F_46	163,19	70
S_46_2	F_46	163,19	250
S_64_1	F_64	100,52	72,79
S_67_1	F_67	164,86	217,36
S_68_1	F_68	417,74	71,74
S_68_2	F_68	417,74	191,74

S_72_1	F_72	236,25	54,47
S_75_1	F_75	119,62	271,15
S_84_1	F_84	153,05	39,27
S_85_1	F_85	121,55	72,44
S_85_2	F_85	120,68	237,69
S_86_1	F_86	171,46	60,27
S_86_2	F_86	131,94	191,51
S_88_1	F_88	123,3	176
S_92_1	F_92	234,57	63,12
S_92_2	F_92	138,8	258,06
S_101_1	F_101	115,21	265,61
S_104_1	F_104	124,54	167,44
S_104_2	F_104	124,54	96,28
S_106_1	F_106	122,35	49,74
S_110_1	F_110	105,62	116,25
S_112_1	F_112	161,69	36,51

Fonte: Dados da pesquisa (2025)

As fraturas presentes no meio analisado possuem trajetos complexos e irregulares, exibindo múltiplas orientações ao longo de seu comprimento total. Isso é especialmente evidente em fraturas como a F_1, onde a segmentação revelou 17 segmentos lineares com orientações que variam de 30,24° a 265,21°. Essas variações refletem processos tectônicos múltiplos, além da presença de contornos sinuosos e reorientações locais ao longo do percurso da fratura.

Quanto à permeabilidade (D), verifica-se a coerência com a fórmula de Darcy (Eqs. 47 e 48), pois os valores da tabela anterior são convergentes aos obtidos, havendo apenas diferenças mínimas por arredondamento.

$$k_{mm^2} = \frac{w^2 média}{12} \tag{47}$$

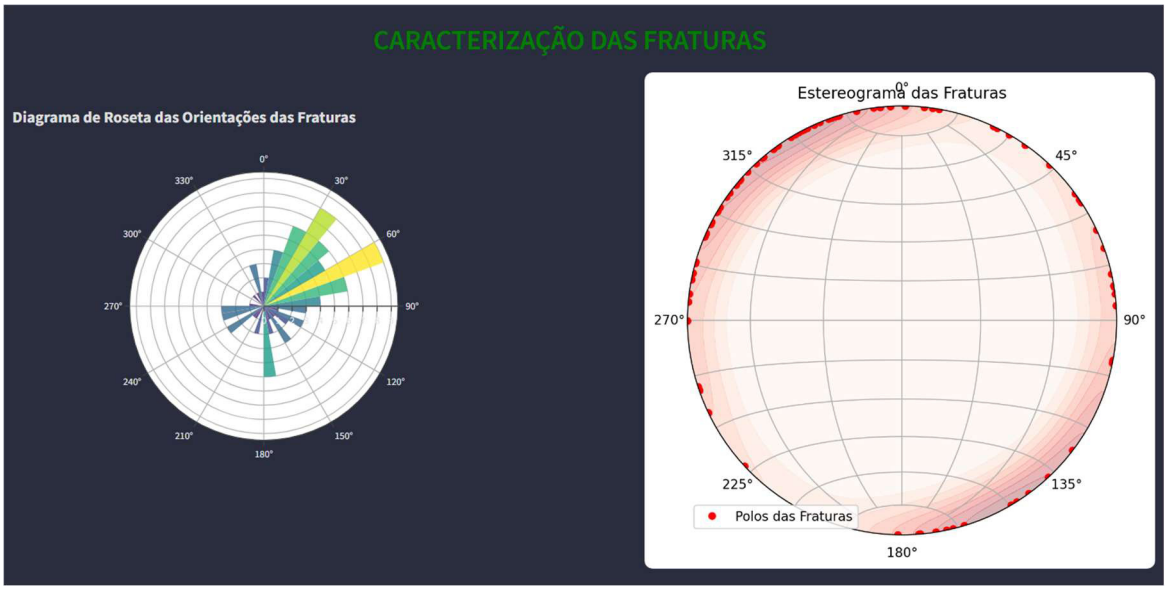
$$k_D = k_{mm}^2 \quad \mathrm{X} \quad 10^6 \tag{48}$$

Para exemplificar o exposto, tem-se as seguintes resoluções:

- F_1: w = 85,1465 mm -> $\frac{w^2}{12} \approx$ 604,16 mm² -> $k \approx$ 604 160 000 D
- F_73: w = 15,8233 mm -> $\frac{w^2}{12} \approx$ 20,865 mm² -> $k \approx$ 20 865 000 D

Ademais, a interpretação das orientações foi complementada pela geração do diagrama de roseta (Figura 39).

Figura 39 – Diagrama de Roseta e Estereograma



Fonte: Dados da pesquisa pelo FRAMFRAT (2024)

O diagrama de roseta sintetiza as direções preferenciais das fraturas e seus segmentos. Ele revela que as fraturas principais seguem duas direções dominantes, a saber:

- NE–SW (aproximadamente 45° a 70° Az): vinculada aos esforços tectônicos primários;
- W–SW (aproximadamente 250° a 265° Az): atribuída a eventos tectônicos subsequentes ou à reativação de estruturas pré-existentes.

Ressalta-se que, quanto a variações secundárias, orientações em torno de 175° e 90° aparecem com menor frequência, indicando fraturas localizadas ou ajustes secundários devido à heterogeneidade estrutural.

A análise das orientações das fraturas foi complementada com a criação de um estereograma, produzido pelo sistema FRAMFRAT, utilizando um ângulo de mergulho de 90° para todas as fraturas. Esse valor reflete a configuração predominante de fraturas verticais no meio analisado. Contudo, o FRAMFRAT permite ajustes manuais do ângulo de mergulho, tornando a ferramenta versátil para explorar fraturas com diferentes inclinações e complexidades geométricas.

Os resultados, apresenta a distribuição espacial das fraturas em um plano esférico, destacando as variações de orientação tridimensionais. A dispersão dos dados no estereograma confirma a complexidade estrutural do meio fraturado, onde

as fraturas não são perfeitamente lineares, mas apresentam ajustes locais devido à heterogeneidade do meio.

A porosidade e a permeabilidade são propriedades fundamentais para avaliar a capacidade de armazenamento e condução de fluidos em sistemas fraturados. A análise realizada com o FRAMFRAT revelou variações significativas nesses parâmetros, destacando a influência das fraturas dominantes no comportamento hidráulico do meio.

A porosidade total, que mede a fração do volume do meio rochoso ocupado pelas fraturas, apresentou valores notavelmente elevados em fraturas de grande extensão e aberturas mais amplas, como:

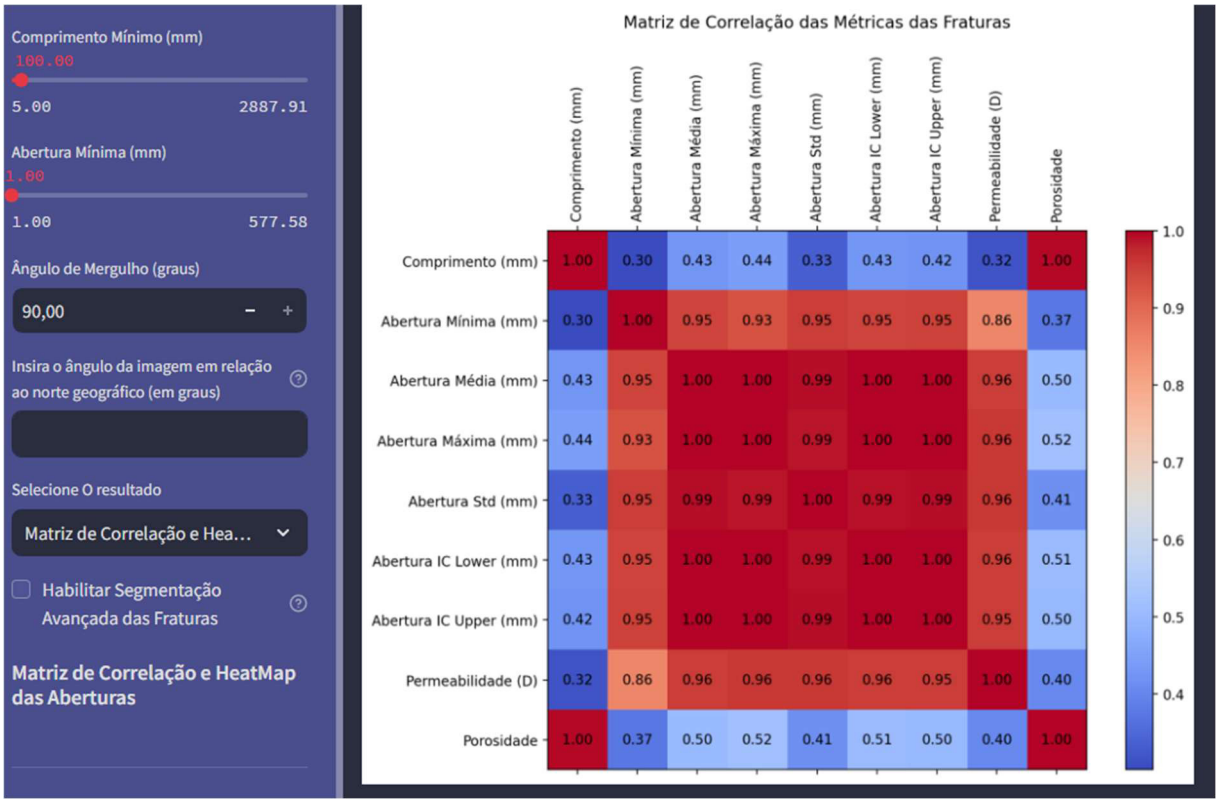
- F_1: Porosidade de 0,090375 (9,04%), a maior no conjunto analisado, refletindo sua grande contribuição para condução de fluidos.
- F_7: Porosidade de 0,023892 (2,39%), destacada como uma das fraturas principais, com significativa influência no sistema.

Por outro lado, fraturas menores exibiram valores de porosidade mais baixos, contribuindo localmente para a capacidade de armazenamento do meio, mas com menor impacto no sistema global.

A permeabilidade, calculada em Darcy (D), reflete a facilidade com que os fluidos podem fluir pelas fraturas. Os valores obtidos demonstram fraturas dominantes, como a F_7, possuem permeabilidade extremamente alta: $2{,}65 \times 10^{11} D$. Esse valor indica um potencial expressivo para condução de fluidos, especialmente em fraturas de grandes dimensões e aberturas amplas. Em contraste, fraturas menores apresentam permeabilidades mais baixas, como F_50 $(3{,}82 \times 10^{9})$, mas ainda relevantes para contribuir com a conectividade hidráulica local.

Em soma, o FRAMFRAT permite uma análise aprofundada das métricas geradas na caraterização das fraturas através da Matriz de Correlação, representada graficamente na Figura 40. Essa funcionalidade é fundamental para compreender as relações lineares entre os parâmetros geométricos e hidráulicos das fraturas.

Figura 40 – Matriz de Correlação das métricas das Fraturas



Fonte: Dados da pesquisa pelo FRAMFRAT (2024)

A matriz de correlação apresenta os coeficientes de correlação de Pearson entre as principais métricas das fraturas, como comprimento, abertura mínima, média e máxima, desvio padrão das aberturas, permeabilidade e porosidade. Os valores variam entre -1 e 1, sendo:

- 1: Correlação positiva perfeita (quanto maior um valor, maior o outro).
- 0: Sem correlação.
- -1: Correlação negativa perfeita (quanto maior um valor, menor o outro).

Na matriz apresentada, podemos destacar as seguintes relações:

a) Aberturas e Permeabilidade: Existe uma correlação muito alta entre abertura média e permeabilidade $(r = 0{,}96)$. Isso indica que fraturas com aberturas maiores têm maior permeabilidade, facilitando a circulação de fluidos no meio.

b) Abertura Média e Máxima: Correlação quase perfeita $(r = 1)$ entre abertura média e abertura máxima, refletindo a consistência das medições e a tendência de que fraturas mais abertas possuem amplitudes similares.

c) Comprimento das Fraturas: O comprimento apresenta correlação moderada com as aberturas: $r = 0{,}43$ com abertura média e $r = 0{,}44$ com abertura máxima. Isso

sugere que fraturas mais longas tendem a apresentar aberturas maiores, mas a relação não é perfeita, refletindo a complexidade estrutural do meio.

d) Porosidade: a porosidade mostra uma correlação moderada com abertura média ($r = 0{,}50$) e abertura máxima ($r = 0{,}52$). A relação com o comprimento é forte ($r = 1$), indicando que fraturas de grande extensão contribuem diretamente para o aumento da porosidade total.

e) Abertura Mínima e Permeabilidade: a abertura mínima apresenta alta correlação com permeabilidade ($r = 0{,}86$), sugerindo que mesmo pequenas aberturas influenciam o fluxo no sistema fraturado.

Com o apresentado, verifica-se que a geração da matriz de correlação pelo FRAMFRAT oferece diversas vantagens, como a identificação de relações críticas, ao permitir identificar os parâmetros mais influentes no comportamento estrutural e hidráulico das fraturas. No contexto da modelagem hidráulica, verifica-se que relações fortes, como as observadas entre aberturas e permeabilidade, são fundamentais para a modelagem de fluxo em meios fraturados. E, para a validação dos resultados, a alta correlação entre abertura média e abertura máxima garante a consistência dos dados extraídos.

4.8.4 Aspectos conclusivos do Estudo de Aplicação do FRAMFRAT

O presente estudo demonstrou a eficácia e robustez do FRAMFRAT na detecção, segmentação e caracterização de sistemas de fraturas em rochas vulcânicas, a partir de imagens ortoretificadas de alta resolução. A aplicação foi conduzida em uma área de 8,34 m², destacando a capacidade da ferramenta em lidar com a complexidade estrutural e a heterogeneidade geométrica do meio fraturado. Os parágrafos seguintes compilam os principais resultados.

A detecção e segmentação das fraturas permitiram identificar 34 fraturas principais e 53 segmentos lineares, viabilizando medições precisas de comprimentos e orientações. A segmentação automatizada capturou ajustes locais e variações de orientação ao longo dos trajetos fraturais, destacando a complexidade estrutural do afloramento.

Na análise das dimensões das fraturas, observou-se que os comprimentos variaram de aproximadamente 107,19 mm (como as fraturas F_50 e F_104) até cerca

de 18.100 mm (como a fratura F_1), com predominância de fraturas de grandes extensões. As aberturas médias oscilaram entre cerca de 10 mm (como as fraturas F_73 e F_70) e entre 85 e 178 mm (como as fraturas F_1 e F_7), atingindo valores máximos de até 305,85 mm nas fraturas dominantes. Essas variações demonstram que fraturas mais extensas tendem a apresentar aberturas maiores, ressaltando sua relevância na definição das propriedades do meio.

Quanto às propriedades hidráulicas, evidenciaram-se fraturas dominantes, como F_1 e F_7, apresentaram porosidades equivalentes de 9,04% e 2,39%, respectivamente, demonstrando sua significativa contribuição para a conectividade do sistema. A permeabilidade, calculada por meio de expressões específicas, apresentou valores entre 2×10^{7} e 6×10^{9} Darcy. Apesar de os valores absolutos parecerem elevados em comparação a reservatórios convencionais, refletem a alta condutividade de sistemas intensamente fraturados, corroborando os achados de Wu *et al.* (2006) e Liu *et al.* (2022), que reportaram permeabilidades de centenas a milhares de Darcy em ambientes vulcânicos ou carbonáticos com alta intensidade de fraturamento.

No que diz respeito às orientações das fraturas, a análise dos ângulos dos segmentos fraturais possibilitou a construção de um Diagrama de Roseta e de um Estereograma. O diagrama de roseta revelou duas direções dominantes de fraturas: NE–SW (45°–70° Az), associadas aos esforços tectônicos primários vinculados à abertura do Atlântico Sul (Barbosa et al., 2014; Matos et al., 2019), e W–SW (250°–265° Az), atribuídas a eventos tectônicos subsequentes ou à reativação de estruturas pré-existentes. Orientações secundárias, em torno de 175° e 90° Az, sugerem fraturas locais ou ajustes relacionados à heterogeneidade estrutural, em consonância com estudos regionais (Buarque et al., 2016; Matos et al., 2021).

Por fim, a análise de correlação revelou, por meio da matriz gerada pelo FRAMFRAT, uma forte relação entre a abertura média e a permeabilidade ($r = 0,96$), indicando que fraturas com aberturas maiores favorecem significativamente o fluxo de fluidos. Além disso, correlações moderadas entre comprimento e aberturas ressaltam a complexidade estrutural e a variabilidade dos parâmetros fraturais.

Adicionalmente, em uma análise comparativa e balizamento dos resultados, houve a comparação entre os resultados obtidos pelo FRAMFRAT e os de estudos clássicos e recentes. Dentre o verificado, é importante destacar as seguintes discussões:

a) Fraturas em Sistemas Vulcânicos e Carbonáticos: Nelson (2001) e Berkowitz (2002) demonstraram que a presença de fraturas abertas pode elevar a permeabilidade para valores muito superiores aos padrões convencionais de μD a mD. Em ambientes intensamente fraturados, como os estudados por Wu *et al.* (2006) e Liu *et al.* (2022), é comum encontrar permeabilidades que podem atingir valores da ordem de 10^8 a 10^9 Darcy, em consonância com os dados de fraturas de grande abertura (85–178 mm) obtidos neste trabalho.

b) Variação de Abertura e Conectividade: Miranda *et al.* (2018) e Palamakumbura *et al.* (2019) destacam que as variações nas aberturas refletem a influência de tensões locais e processos de dissolução. Fraturas pequenas (~10 mm) podem apresentar baixa contribuição para a conectividade, enquanto fraturas maiores, como F_1 e F_7, com porosidades de 9,04% e 2,39%, respectivamente, são fundamentais para o fluxo de fluidos.

c) Porosidade Equivalente: Apesar de os valores de porosidade serem baixos (0,0002–0,0904), estudos de Laubach *et al.* (2019) e Santos *et al.* (2015) indicam que mesmo pequenas frações de porosidade fraturada podem ser decisivas para a conectividade hidráulica. Os resultados aqui apresentados são compatíveis com as porosidades fraturais de 1–5% observadas em sistemas similares.

d) Orientações das Fraturas: Os padrões de orientação identificados (NE–SW e W–SW) encontram respaldo em estudos regionais (Buarque *et al.*, 2016; Matos *et al.*, 2021) e internacionais, confirmando a existência de múltiplas fases tectônicas que influenciaram a evolução da Bacia Pernambucana.

Portanto, a integração dos resultados do FRAMFRAT com as interpretações da literatura demonstra que os parâmetros medidos – aberturas, porosidade, permeabilidade e orientações – estão em consonância com o comportamento esperado para sistemas fraturados intensos em rochas vulcânicas e carbonáticas. O FRAMFRAT se mostra uma ferramenta robusta e automatizada que minimiza a subjetividade das medições manuais, fornecendo dados quantitativos precisos que podem ser utilizados para modelagem geológica e hidráulica.

A partir do estudo de aplicação desenvolvido, verifica-se que, entre as contribuições técnicas do FRAMFRAT, destacam-se:

- Automatização e Precisão: A ferramenta identifica e segmenta fraturas mesmo em imagens complexas, garantindo resultados consistentes.

- Integração de Métricas Avançadas: A combinação de técnicas de processamento digital, análise fractal e avaliação estatístico-hidráulica permite uma caracterização abrangente do sistema fraturado.
- Visualização Interativa: Diagramas de Rosa e Estereogramas facilitam a interpretação das orientações e reforçam a compreensão da história tectônica da região.

Para somar a essas vantagens do FRAMFRAT, as perspectivas para futuras contribuições incluem a integração com análise tridimensional, a aplicação de inteligência artificial para aprimorar a detecção de fraturas em condições adversas, e a exportação de resultados para plataformas de SIG, ampliando a aplicabilidade do sistema em estudos interdisciplinares.

Em suma, os resultados do FRAMFRAT, corroborados por estudos de Nelson (2001), Berkowitz (2002), Wu *et al.* (2006), Santos *et al.* (2015), Miranda *et al.* (2018), Keane *et al.* (2018), Leahy *et al.* (2003), Ghassemi *et al.* (2015), Oliveira *et al.* (2017) e Liu *et al.* (2022), confirmam a robustez e relevância da ferramenta para a caracterização de sistemas fraturados em afloramentos vulcânicos, como o da Bacia Pernambucana, contribuindo para avanços significativos na modelagem de reservatórios e na avaliação de propriedades hidráulicas.

Ressalta-se que o FRAMFRAT foi desenvolvido com o objetivo principal de propor e validar um método de extração de métricas de fraturas a partir de imagens já adquiridas, assumindo que estas estejam dentro de um padrão mínimo de qualidade estabelecido no protocolo de aquisição. Assim, destaca-se que:

- A variação de resolução, iluminação, ruído e distorções pode alterar significativamente os resultados, mas a quantificação sistemática desse impacto exigiria experimentos controlados, com múltiplos níveis de qualidade e diferentes geometrias, o que configuraria um estudo independente, de grande escopo.
- Na prática, as condições de aquisição variam muito conforme o ambiente e o equipamento utilizado; portanto, qualquer análise de sensibilidade ficaria restrita a um conjunto específico de casos e não seria generalizável para todas as aplicações.
- Para contornar esses efeitos, a ferramenta oferece ajustes interativos (como suavização, limiarização e operações morfológicas) que permitem ao usuário compensar parcialmente problemas de qualidade ou variações geométricas, de forma adaptativa.

Dessa forma, a decisão foi concentrar os esforços na definição, implementação e validação das métricas do FRAMFRAT, deixando a análise de sensibilidade para trabalhos futuros, em contextos em que as condições de aquisição e os parâmetros geométricos possam ser controlados e avaliados de maneira sistemática.

Outro ponto de ressalva consiste no impacto da suavização nas medições. No FRAMFRAT, a suavização envolve filtros de desfoque, remoção de ruído e operações morfológicas (abertura/fechamento). Esses passos são aplicados antes da binarização e, portanto, influenciam toda a cadeia de resultados.

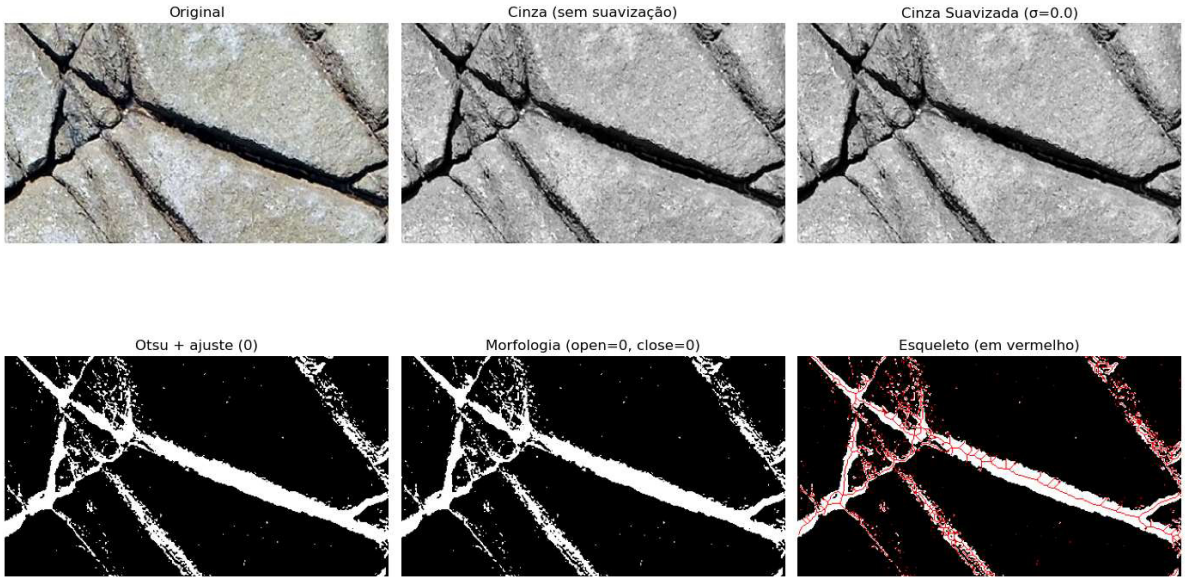
Como o efeito visual e métrico da suavização depende fortemente do tipo de imagem e das características das fraturas, o ajuste desses parâmetros é uma etapa interativa e subjetiva. O usuário realiza testes manuais, alterando sigma, intensidade de abertura/fechamento e ajustes do limiar, até constatar visualmente que as fraturas estão devidamente realçadas e detectadas, sem perda significativa de informação relevante. Essa abordagem prática justifica a ausência, nesta tese, de um estudo ou exemplo padronizado sobre o tema, já que o impacto varia conforme cada caso de aplicação. Como principais efeitos da suavização, há os seguintes:

- Detecção e contornos: Reduz “granulação” e pequenas irregularidades; fraturas muito finas podem deixar de ser detectadas; contornos tornam-se mais simples.
- Aberturas: Bordas mais lisas diminuem a dispersão das amostras de abertura. Excesso de abertura morfológica tende a reduzir valores (ao remover saliências); excesso de fechamento pode aumentá-los (ao preencher lacunas).
- Comprimento (esqueleto): Redução de reentrâncias e “ziguezagues” deixa o traçado mais retilíneo, resultando em comprimentos ligeiramente menores.
- Orientação: Perfis mais lisos produzem orientações mais estáveis, mas a perda de segmentos finos pode alterar a distribuição direcional.
- Porosidade e permeabilidade: Dependem da área e da espessura aparente; abertura morfológica tende a reduzi-las, enquanto fechamento ou desfoque leve podem aumentá-las ao engrossar regiões estreitas.
- Dimensão fractal: A atenuação de detalhes de alta frequência pela suavização geralmente diminui discretamente a dimensão fractal estimada.

Em síntese, recomenda-se que o operador registre os parâmetros finais adotados, garantindo que resultem de um equilíbrio entre remoção de ruído e

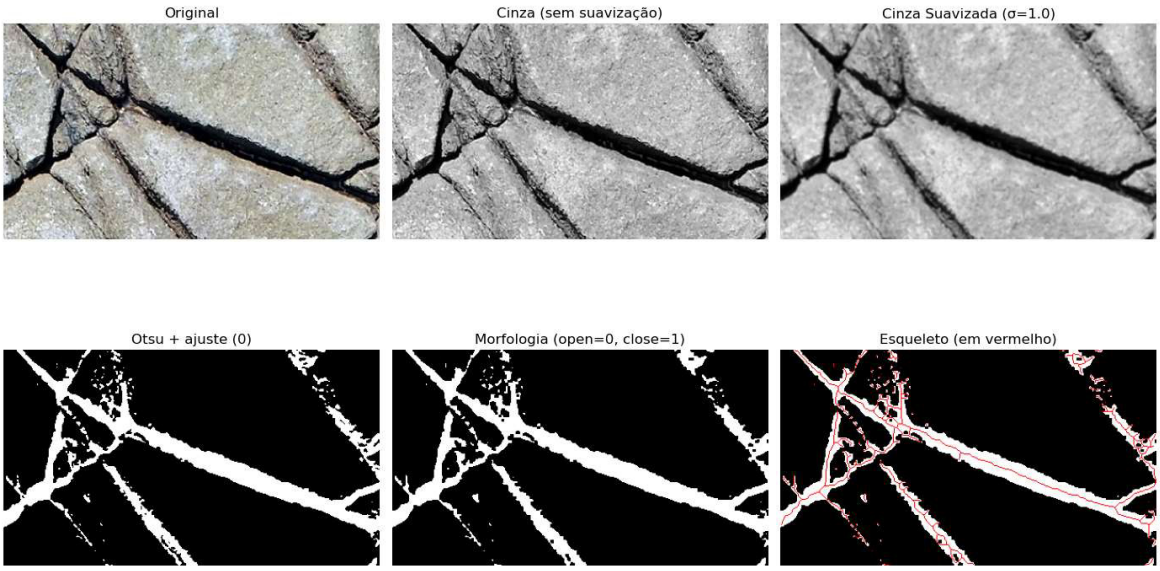
preservação de microfraturas, conforme a finalidade da análise. Um exemplo sem a suavização consta na Figura 41, enquanto com suavização consta na Figura 42.

Figura 41 – Exemplo sem a suavização



Fonte: Acervo do autor (2025)

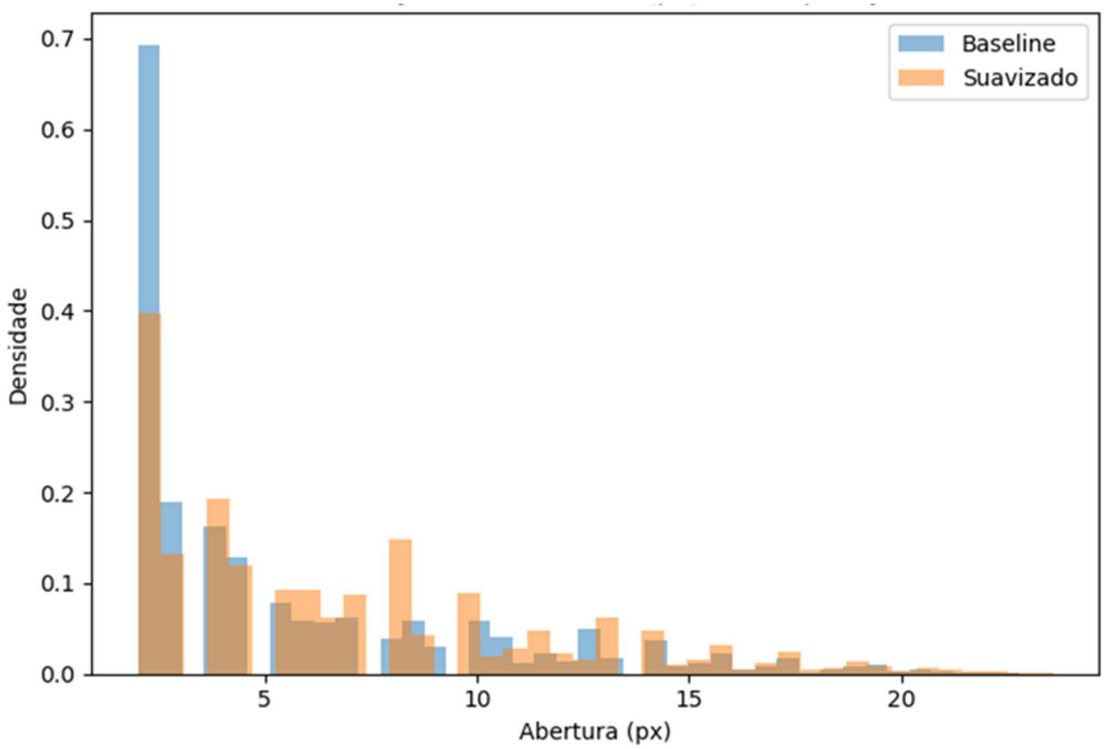
Figura 42 – Exemplo sem suavização



Fonte: Acervo do autor (2025)

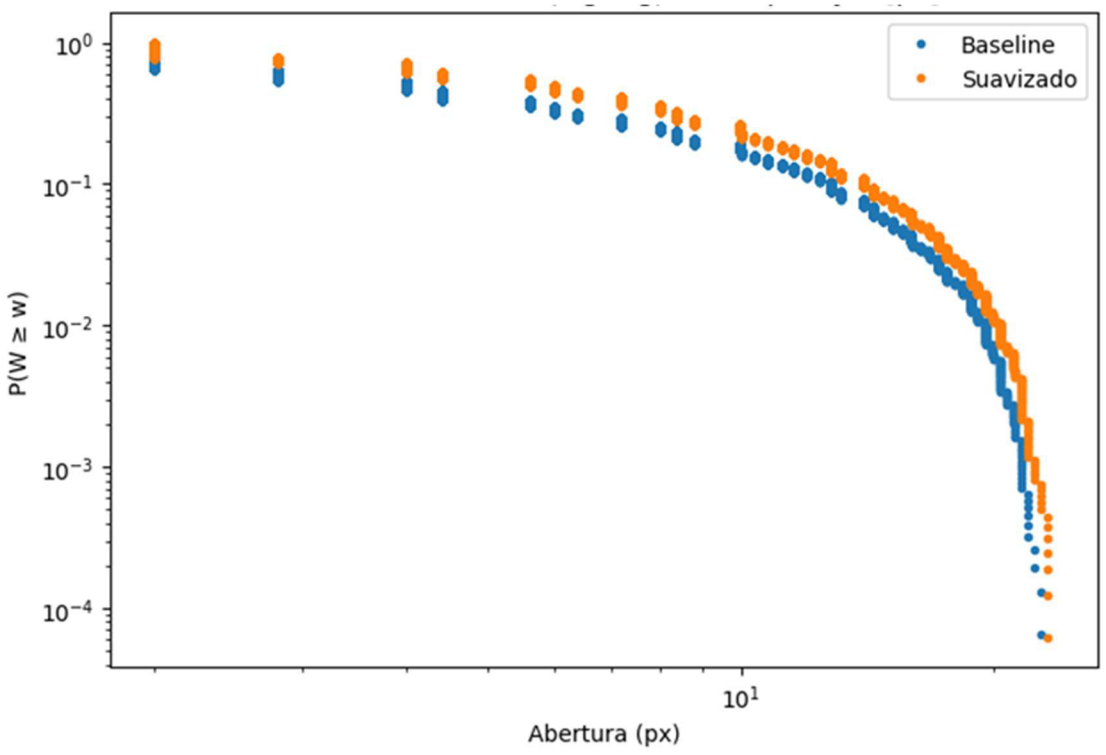
Acrescenta-se a apreciação dos gráficos das Figuras 43 e 44 para fins de comparação acerca da suavização.

Figura 43 – Distribuição das aberturas (px) - comparação



Fonte: Dados da pesquisa (2025)

Figura 44 – CCDF (Função de Distribuição Acumulada Complementar) log-log – comparação [px]



Fonte: Dados da pesquisa (2025)

No que tange a rugosidade e tortuosidade, esclarece-se que a primeira descreve o grau de irregularidade dos contornos das fraturas e a variação de curvatura ao longo da sua linha média. Em termos práticos, contornos muito recortados e traçados com mudanças frequentes de direção indicam maior rugosidade. Por sua vez, a tortuosidade expressa o quanto a fratura serpenteia entre seus extremos. Traçados com muitos desvios e meandros apresentam maior tortuosidade; traçados próximos a uma linha reta apresentam valores mais baixos.

Esses índices não foram estimados nesta pesquisa, porque a quantificação robusta de rugosidade e tortuosidade exige etapas adicionais complexas: reconstrução de contornos em precisão sub-pixel, cálculo multiescala de curvatura ao longo do esqueleto, separação consistente de ramos e tratamento de efeitos introduzidos pelos filtros de suavização. Além disso, são métricas muito sensíveis aos parâmetros de pré-processamento e demandam calibração metrológica específica. Esses requisitos extrapolam o escopo desta entrega, de modo que optamos por não reportar rugosidade e tortuosidade nesta versão para preservar a confiabilidade dos resultados.

5 CONCLUSÕES

A presente tese desenvolveu e validou o FRAMFRAT, uma ferramenta computacional de código aberto voltada para a parametrização automática de sistemas de fraturas em superfícies rochosas. O sistema integra técnicas de processamento de imagem digital, geometria fractal e análise estatística, superando limitações presentes em metodologias tradicionais, como a subjetividade das medições manuais, o alto custo operacional e a dificuldade de integrar diferentes etapas do processo de caracterização de fraturas. Os avanços alcançados ao longo do trabalho destacam-se tanto pelo impacto tecnológico quanto pela ampliação do conhecimento geológico e geomecânico.

Os resultados obtidos evidenciam a eficácia e a robustez do FRAMFRAT na detecção, segmentação e caracterização de fraturas, oferecendo alta precisão e consistência. A validação realizada por meio de comparações com medições manuais e outros métodos automatizados confirmou que o sistema é capaz de replicar e, em alguns casos, superar as abordagens tradicionais. Métricas como comprimento, abertura, orientação, permeabilidade e porosidade apresentaram alto grau de confiabilidade.

Entre os diferenciais do FRAMFRAT, destacam-se:

- Soluções Integradas e Automatizadas: O sistema abrange desde o pré-processamento de imagens até a exportação de resultados em formatos como Excel ou CSV, consolidando-se como uma solução completa e acessível.
- Cálculo de Métricas Avançadas: Inclui análises detalhadas, como o cálculo da dimensão fractal das fraturas e métricas hidráulicas, essenciais para a compreensão do comportamento mecânico e hidrodinâmico de reservatórios naturalmente fraturados.
- Disponibilidade em Código Aberto: A ferramenta promove a democratização do conhecimento técnico, permitindo personalização e adaptação a diferentes contextos geológicos.

A aplicação prática em estudos reais demonstrou a viabilidade do sistema, como evidenciado no estudo do afloramento de traquitos da Praia de Itapoama. O FRAMFRAT revelou-se eficaz para mapear padrões de fraturas em diferentes escalas,

fornecendo subsídios essenciais para modelagem e simulação de fluxo de fluidos em meios porosos.

Apesar dos avanços, algumas limitações foram identificadas, como a sensibilidade a imagens de baixa qualidade, que pode comprometer a detecção de fraturas com pequenas aberturas. Essas limitações apontam para direções futuras de aprimoramento, incluindo:

- Integração de algoritmos de aprendizado de máquina e redes neurais profundas para detecção mais precisa em condições adversas.
- Expansão para análise tridimensional (3D), utilizando dados de modelos digitais de terreno, nuvens de pontos LiDAR e imagens de tomografia de rochas.
- Maior compatibilidade com softwares de modelagem hidráulica e SIG, ampliando as possibilidades de estudos interdisciplinares.

A relevância desta pesquisa transcende a aplicação técnica do sistema, contribuindo para avanços teóricos na caracterização de sistemas fraturados. O uso da dimensão fractal, por exemplo, aprofundou a compreensão das propriedades geométricas das fraturas e suas implicações em estudos de permeabilidade e conectividade. Ao integrar conceitos de estatística, geologia estrutural e ciência computacional, a tese adota uma abordagem interdisciplinar para resolver problemas complexos de forma inovadora.

Em uma perspectiva mais ampla, o FRAMFRAT apresenta potencial estratégico em áreas como: exploração e produção de hidrocarbonetos; gestão de recursos hídricos; avaliação de riscos geotécnicos; e caracterização de sistemas porosos em aplicações industriais. Sua capacidade de processar grandes volumes de dados com eficiência e flexibilidade o posiciona como uma ferramenta versátil para atender às demandas crescentes da comunidade científica e industrial.

Reitera-se que neste estudo, foca-se em métricas já implementadas e validadas no FRAMFRAT, como comprimento, aberturas mínima/média/máxima (com intervalo de confiança), orientação, porosidade, permeabilidade em Darcy e dimensão fractal, além das visualizações e exportação correspondentes. Contudo, para trabalho futuro, planeja-se incorporar estimativas de rugosidade e tortuosidade de forma controlada e reprodutível, acompanhadas de análise de sensibilidade e validação com dados de referência.

Por fim, espera-se que esta tese contribua para a consolidação de metodologias automatizadas na análise de fraturas, promovendo maior precisão e eficiência em estudos aplicados. O FRAMFRAT atende lacunas críticas do campo, estabelecendo uma base sólida para futuras inovações e se destacando como uma solução poderosa e sustentável para o avanço do conhecimento sobre sistemas naturalmente fraturados.

REFERÊNCIAS

ABU-AIN, W. *et al.* Skeletonization algorithm for binary images. **Procedia Technology**, v. 11, p. 704-709, 2013. https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.248

ALEXANDRE, W. *et al.* Applying spectral tools in a mixed siliciclastic-carbonate environment: An integrative sedimentological case study from the Estiva Formation, Pernambuco Basin, Northeast Brazil. **Journal Of South American Earth Sciences**, 116:103831, 2022.

ALMEIDA, C. B. **Mapeamento geológico-estrutural na região do Engenho Sibiró-Porto de Galinhas, Sub-bacia de Pernambuco**. (Monografia) - Programa de Formação em Geologia, Geofísica e Informática no Setor Petróleo & Gás, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2003.

ALZUBAIDI, F. *et al.* Automatic fracture detection and characterization from unwrapped drill-core images using mask R–CNN. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 208, p. 109471, 2022.

AMARAL, L. D.; ANDRADE, A. O. Uso da Morfologia Matemática Fuzzy no Processamento de Imagens para Reconhecimento de Placas de Veículos. **Revista de Computação**, v. 2, n. 1, 2017.

ANDERS, M. H.; LAUBACH, S. E.; SCHOLZ, C. H. Microfractures: A review. **Journal of Structural Geology**, 69, p.377-394. 2014.

ARAÚJO, A. I. P. **Simulação de geração e propagação de fraturas em rochas empregando técnicas especiais em elementos finitos**. 2019. 139 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. Recife – PE, 2019.

ARAÚJO, O. M. O. **Metodologia para análise de rochas por meio digital utilizando microct e simulações de fluxo de fluidos**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Nuclear) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

ARTERO, A. O.; TOMMASELLI, A. M. G. Limiarização Automática de Imagens Digitais. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 6, n. 1, p. 38-48, 2000.

ASSIS, D. C. A. **Simulação hidromecânica 3D em análogo de reservatório carbonático naturalmente fraturado**. 2019. 196 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. Recife – PE, 2019.

BABADAGLI, T. Fractal analysis of 2-D fracture networks of geothermal reservoirs in south-western Turkey. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v 112, n. 1–4, 2001.

BARBOSA, I. A. **Fluxo de fluído através de um meio poroso fractal desordenado.** Análise das tensões de cisalhamento e efeito de escala na estimativa das forças viscosas. 180f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Petróleo) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

BARBOSA, J. A. *et al.* **Seismic stratigraphy of the onshore portion of Pernambuco Basin:** evidence of break up during Middle Albian for the South Atlantic Rift in Northeast 120 Brazil. In: AAPG Annual Exhibition And Convention, Houston. Search and Discovery Article #30324, 2014.

BERKOWITZ, B. Characterizing flow and transport in fractured geological media: A review. **Advances in Water Resources**, v. 25, Issues 8–12, 2002.

BLAND, J. M.; ALTMAN, D. G. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. **The Lancet**, v. 327, n. 8476, p. 307-310, 1986. https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.248

BONTEMPO FILHO, E. B. *et al.* Temporal monitoring of contamination in three sandy beaches from the 2019 oil spill near Cabo de Santo Agostinho, Northeastern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 94, 2022.

BORGEFORS, G. Distance transformations in digital images. **Computer vision, graphics, and image processing**, v. 34, n. 3, p. 344-371, 1986.

BUARQUE, B. V. *et al.* Post-rift volcanic structures of Pernambuco Plateau, Northeastern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 70, p. 250-261, 2016.

BURNS, D. R.; TOKSOZ, M. Nafi. **Characterization of In-Situ Stress and Permeability in Fractured Reservoirs**. Massachusetts Institute of Technology (US), 2004.

CABALLERO, C. B. *et al.* Dimensão fractal e análise geomorfológica de bacias hidrográficas brasileiras. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 17, n. 2020, 2020.

CALVO, E.; BROX, P.; SANCHEZ-SOLANO, S. **Un algoritmo en tiempo real para etiquetado de componentes conectados en imágenes**. In: XVIII International IBERCHIP Workshop Playa del Carmen (México): Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica; Universidad de Sevilla, 2012.

CHANG, F.; CHEN, C.; LU, C. A linear-time component-labeling algorithm using contour tracing technique. **Computer Vision and Image Understanding**, v. 93, 2004.

CHARKALUK, E.; BIGERELLE, M.; IOST, A. Fractals and fracture. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 61, n. 1, p. 119-139, 1998. https://doi.org/10.1016/S0013-7944(98)00035-6

CHIOSSI, N. J. **Geologia de Engenharia**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

CHUNG, C. L. **Simulação numérica do escoamento monofásico em reservatórios de óleo com poço hidraulicamente fraturado**. 2019. 79 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) - Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2019.

CLARK, S. E.; PEEK, J. E. G.; PUTMAN, M. E. Magnetically aligned H I fibers and the Rolling Hough Transform. **The Astrophysical Journal**, v. 789, n. 1, p. 82, 2014.

CORREIA FILHO, O. J. **Análise de estruturas compressionais na região onshore da bacia Pernambuco, NE do brasil - possíveis influências no potencial petrolífero**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017

CORREIA FILHO, O. J. et al. Volcanic weathered crust reservoir analog: Insights from fault-controlled fracture permeability in the trachytic rocks of the Pernambuco Basin, NE Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 148, p. 105140, 2024.

COSTA, W. D. **Geologia de barragens**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

DIAS, L. O. *et al.* Comparação de métodos de Segmentação de Fraturas em Imagem Acústica de Perfilagem Petrofísica. **Notas Técnicas**, v. 8, n. 3, 2018.

DUQUE NETO, O. A. *et al.* **Estudo do escoamento de suspensões na perda de carga em fraturas**. In: VI Encontro Nacional de Hidráulica de Poços de Petróleo e Gás, 10-13 ago., 2015.

FATAH, T. Y. A. **Análise de zonas de fraturas através de perfis de imagem em poços do pré-sal da Bacia de Santos**. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geofísica) - Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra, Universidade Federal Fluminense, Niterói – RJ, 2020.

FIGUEIREDO, H. G. **Caracterização dos depósitos fluviais da formação São Sebastião (Bacia do Tucano-BA) como análogo de reservatório**. 2017. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

FOSSEN, H. **Geologia Estrutural**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

FOSSEN, H. **Geologia estrutural**. Tradução: Fábio R. D. de Andrade. 2. ed. atual e ampl. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

GALINDO, D. C.; ASSIS, D. C. A.; DA SILVA, N. V. S. **Modelagem numérica de fluxo de fluido em reservatório de petróleo naturalmente fraturados submetidos a injeção contínua de água:** Campo B de Abu Dhabi, Emirados Árabes. In: XI Congresso de Engenharia Ciência e Tecnologia, 2018.

GAZZONI, J. C. *et al.* Limiarização e binarização na análise de objetos em imagens digitais. **Synergismus scyentifica UTFPR**, v. 1, n. 1, p. 685-695, 2006.

GHASSEMI, H. *et al.* Fractal analysis of fracture networks in volcanic rocks. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 295, p. 13-22, 2015.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital Image Processing**. 3. ed. Upper Saddle River: Pearson/Prentice Hall, 2008.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento de Imagens Digitais**. São Paulo: Blucher, 2000.

GOUVEIA, L. T. *et al.* Esqueletização multiescala para análise de forma de agregados. **Transportes**, v. 23, n. 2, p. 14-21, 2015.

GÜREL, E.; COŞKUNER, Y. B.; AKIN, S. **Fractal Modeling of Outcrop Fracture Patterns in Alasehir Geothermal Reservoir Turkey**. In: 41st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, February 22-24, 2016.

HARALICK, R. M. *et al.* **Computer and robot vision**. Reading: Addison-wesley, 1992.

HE, L. *et al.* The connected-component labeling problem: A review of state-of-the-art algorithms. **Pattern Recognition**, v. 70, 2017.

ISHIKAWA, A. S.; SILVA, E. A.; NÓBREGA, R. A. A. Detecção de rodovias em imagens digitais de alta resolução com o uso da teoria de morfologia matemática. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 01, n. 63, p.131-140, 2010.

JOLLIFFE, I. T. **Principal component analysis for special types of data**. Springer New York, 2002.

KEANE, D. *et al.* Characterization of Fractured Carbonate Reservoirs: Connectivity and Flow Behavior. **Marine and Petroleum Geology**, v. 101, p. 29-39, 2018.

KEMENY, J. *et al.* **Ground-based lidar:** rock slope mapping and assessment. United States. Federal Highway Administration. Central Federal Lands Highway Division, 2008.

KHARRAT, R.; OTT, H. A Comprehensive Review of Fracture Characterization and Its Impact on Oil Production in Naturally Fractured Reservoirs. **Energies**, v. 16, n. 8, p. 3437, 2023.

KOCH, E. W.; ROSOLOWSKY, E. W. Filament identification through mathematical morphology, **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 452, n. 4, p. 3435–3450, Out., 2015.

KURITA, T.; OTSU, N.; ABDELMALEK, N. Maximum likelihood thresholding based on population mixture models. **Pattern recognition**, v. 25, n. 10, p. 1231-1240, 1992.

LATO, M. *et al.* Mapping shotcrete thickness using LiDAR and photogrammetry data. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 634–641, 2013.

LAUBACH, S. E. *et al.* The role of chemistry in fracture pattern development and opportunities to advance interpretations of geological materials. **Reviews of Geophysics**, v. 57, n. 3, p.1065-1111, 2019.

LEAHY, D. J. *et al.* Review of Fracture Network Characterization in Carbonate Reservoirs. **SPE Reservoir Evaluation & Engineering**, v. 6, n. 1, p. 2-10, 2003.

LI, J. Z. *et al.* Quantifying opening-mode fracture spatial organization in horizontal wellbore image logs, core and outcrop: application to Upper Cretaceous Frontier Formation tight gas sandstones, USA. **Journal of Structural Geology**, 108, p.137-156. 2018.

LI, S. *et al.* Flow Characterization in Fractured Shale Oil Matrices Using Advanced Nuclear Magnetic Resonance Techniques. **Processes**, v. 12, n. 5, p. 879, 2024.

LIMA FILHO, M. F. **Análise Estrutural e Estratigráfica da Bacia Pernambuco**. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

LIU, R.; LI, B.; JIANG, Y. A fractal model based on a new governing equation of fluid flow in fractures for characterizing hydraulic properties of rock fracture networks. **Computers and Geotechnics**, v. 75, 2016.

LIU, T. *et al.* Volcanic reservoirs lacking a paleoweathering crust in Carboniferous deposits of the Junggar Basin, western China: Characteristics, controlling factors and hydrocarbon potential. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 111119, 2022.

MAIA, D; TRINDADE, R. Face detection and recognition in color images under matlab. **International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition**, v. 9, n. 2, p. 13-24, 2016.

MAIA, M. F. B. *et al.* Características petrográficas e geoquímicas das formações siliciclásticas (Aptiano-Albiano) da Bacia Pernambuco, NE do Brasil. **Estudos Geológicos**, v. 22, n. 1, p. 55-75. 2012.

MAIA, M. F. B. **Revisão estratigráfica do intervalo Aptiano-Albiano da Bacia de Pernambuco, Nordeste do Brasil**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

MARTINS, A. M. S. M.; LIBRANTZ, A. F. H. A geometria fractal e suas aplicações em arquitetura e urbanismo. **Exacta**, v. 4, n. Esp, p. 91-93, 2006.

MATOS, R. M. D. *et al.* **An orthogonal zone between the Equatorial and South Atlantic margins:** relevance and control in the evolution of the Afro-Brazilian basins. In: Anais do Sixteenth International Congress of the Brazilian Geophysical Society. 2019.

MATOS, R. M. D. *et al.* The fundamental role of the Borborema and Benin–Nigeria provinces of NE Brazil and NW Africa during the development of the South Atlantic Cretaceous Rift system. **Marine and Petroleum Geology**, v. 127, 104872, 2021.

MEIRA, S. A. *et al.* Análise da porosidade de concreto por processamento de imagem: uma visão da sensibilidade do Threshold na binarização. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 3, p. 16449-16459, 2020.

MENDES, T. S. G.; DAL POZ, A. P. Extração de vias combinando métodos de detecção de regiões e linhas em imagens de intensidade de pulso laser. **Pesquisas em Geociências**, v. 38, n. 3, p. 235-250, 2011.

MILANI, E. J. *et al.* Petróleo na margem continental brasileira: geologia, exploração, resultados e perspectivas. **Revista Brasileira de Geofísica**, 18, 352-396. 2000.

MIRANDA, T. S. **Caracterização geológica e geomecânica dos depósitos carbonáticos e evaporíticos da Bacia do Araripe, NE Brasil**. 267f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, 2015.

MIRANDA, T. S. *et al.* Aplicação da técnica de scanline à modelagem geológica/geomecânica de sistemas de fraturamento nos depósitos carbonáticos e evaporíticos da Bacia do Araripe, NE do Brasil. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 20, p. 305-326, 2012.

MIRANDA, T. S. *et al.* Quantifying aperture, spacing and fracture intensity in a carbonate reservoir analogue: Crato Formation, NE Brazil. **Marine And Petroleum Geology**, v. 97, p. 556-567, 2018.

NASCIMENTO, M. A. L. **Geologia, Geocronologia, Geoquímica e Petrogênese das rochas ígneas cretácicas da Província Magmática do Cabo e suas relações com as unidades sedimentares da Bacia de Pernambuco (NE do Brasil)**. 2003. 302 f. Tese (Doutorado em Geodinâmica; Geofísica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2003.

NELSON, M. **A imagem digital na editoração**. São Paulo: SENAC, 2019.

NELSON, R. A. **Geologic Analysis of Naturally Fractured Reservoirs**. 2. ed. Houston: Gulf Professional Publishing, 2001.

NISHIZIMA, J. *et al.* Robô autônomo móvel seguidor de símbolo. **Colloquium Exactarum**, v. 8, n. 1, p. 48–55, 2016.

NUNES, R. S. R. **Geometria Fractal e aplicações**. 78f . Tese (Mestrado em Ensino da Matemática) - Departamento de Matemática Pura, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto, 2006.

NURSHAL, M. E. M. *et al.* Automatic and manual fracture-lineament identification on digital surface models as methods for collecting fracture data on outcrops: Case study on fractured granite outcrops, Bangka. **Frontiers in Earth Science**, v. 8, p. 560596, 2020.

OLIVEIRA, R. B., *et al.* Fracture Characterization in Naturally Fractured Reservoirs: Integrating Field Measurements and Digital Image Processing. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 156, p. 10-20, 2017.

OLSON, J. E.; LAUBACH, S. E.; LANDER, R. H. Natural fracture characterization in tight gas sandstones: Integrating mechanics and diagenesis. **AAPG bulletin**, v. 93, n. 11, p. 1535-1549, 2009.

ORTEGA, O. J.; MARRETTT, R. A.; LAUBACH, S. E. A scale-independent approach to fracture intensity and average spacing measurement. **AAPG Bulletin, Tulsa**, v. 90, n. 2, p. 193-208, fev., 2006.

OTSU, N. **A threshold selection algorithm from gray-level histograms**. In: IEEE Trans. Syst. Man Cybern., v. SMC-9, n. 1, p. 62–66, 1979.

OTSU, N. A threshold selection method from graylevel histograms. **Automatica**, v. 11, n. 285296, p. 2327, 1975

PADMAVATHI, K.; THANGADURAI, K. Implementation of RGB and grayscale images in plant leaves diseasedetection–comparative study. **Indian Journal of Science and Technology**, v. 9, n. 6, p. 1-6, 2016.

PAIVA, H. P. **Simulação da recuperação de petróleo em reservatórios naturalmente fraturados**. 204f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo) - Universidade Estadual de Campinas, Campinhas – SP, 2012.

PALAMAKUMBURA, R. *et al.* A review and evaluation of the methodology for digitising 2D fracture networks and topographic lineaments in GIS. **Solid Earth Discussions**, v. 2019, p. 1-21, 2019.

PASSOS, N. C. S. T. *et al.* **Análise de procedimento numérico alternativo aos métodos clássicos de simulação de escoamento bifásico em meios porosos heterogêneos**. In: XXXIV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Pirenópolis, GO, 2013.

PAULA, T. L. F.; CAMPOS, J. E. G. Aquíferos com fluxos controlados simultaneamente por porosidade intergranular e planar: aplicação a rochas metassedimentares do Alto Paraguai, MT. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, p. 11-24, 2016.

PI, Z. *et al.* Digital Image Processing Method for Characterization of Fractures, Fragments, and Particles of Soil/Rock-Like Materials. **Mathematics**, v. 9, 2021.

PHAM, C. *et al.* Automatic fracture characterization in CT images of rocks using an ensemble deep learning approach. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 170, p. 105531, 2023. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2023.105531

POLONIA, J. A. P. **Geometria e cinemática do Rifte do Cabo, litoral sul do Estado de Pernambuco**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, UFRJ, Rio de Janeiro, 1997.

PRABHAKARAN, R. *et al.* An automated fracture trace detection technique using the complex shearlet transform. **Solid Earth**, v. 10, n. 6, p. 2137-2166, 2019.

PREACHER, K. J. *et al.* Use of the extreme groups approach: a critical reexamination and new recommendations. **Psychological methods**, v. 10, n. 2, p. 178, 2005.

RAITZ G. JR. *et al.* **Caracterização de um reservatório carbonático naturalmente fraturado das coquinas da formação Morro do Chaves (Bacia SE-AL)**. In: 49º Congresso Brasileiro de Geologia, Rio de Janeiro, 20-24 ago. 2018.

REID, T. R.; HARRISON, J. P. A semi-automated methodology for discontinuity trace detection in digital images of rock mass exposures. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 37, n. 7, p. 1073-1089, 2000.

REIS, A.; ALAMY FILHO, J. E. Desenvolvimento de um gerador estocástico de fraturas para modelagem de aquíferos fraturados–módulo I da ferramenta Fratcond. **Águas Subterrâneas**, v. 32, n. 2, p. 181-190, 2018.

RIQUELME, A. *et al.* Semi-automatic characterization of fractured rock masses using 3D point clouds: discontinuity orientation, spacing and SMR geomechanical classification. In: **EGU General Assembly Conference Abstracts**. 2015. p. 15459.

ROCHA, A. C. B. **A geoestatística aplicada à avaliação e caracterização de reservatórios petrolíferos**. 2005. 84 f. (Dissertação de Mestrado Acadêmico em Matemática), Programa de Pós-graduação em Matemática, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande – Paraíba – Brasil, 2005.

ROSOT, M. A. D.; DISPERATI, A. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. Medição da área de anéis de crescimento usando imagens digitais. **Revista Árvore**, v.1., n. 1, jan./mar., 2001.

SAALFELD, R. Q. **Simulação de reservatórios naturalmente fraturados utilizando modelos equivalentes de porosidade simples**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo) – Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 2016.

SANTANA, F. R. **Análise dos Depósitos da Sequência Vulcanoclástica Albiana da Bacia Pernambuco**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geociências PPGEOC, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

SANTOS, D. T. *et al.* Algorítmo s para estudos de limiar de percolação através da dimensão fractal em hiper-redes. **Holos**, v. 5, p. 67-87, 2017.

SANTOS, I. C. A. B. A. *et al.* **Análise Estrutural em Mesoescala de Bandas de Deformação na Bacia do Rio do Peixe**. In: 10º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, UFRN, 2019.

SANTOS, R. F. *et al.* Characterization of natural fracture systems: Analysis of uncertainty effects in linear scanline results. **AAPG Bulletin**, v. 99, n. 12, p. 2203-2219, 2015

SHLENS, J. A tutorial on principal component analysis. **arXiv preprint arXiv:1404.1100**, 2014.

SHEN, X. *et al.* Improvement of fractal model for porosity and permeability in porous materials. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 121, p. 1307-1315, 2018.

SILVA, L. S. *et al.* Mapeamento virtual de fraturas para análise estrutural quantitativa em análogo de reservatório carbonático. **Geologia USP. Série Científica**, v. 24, n. 2, p. 3-21, 2024.

SO, G. B.; SO, H. R.; JIN, G. G. Enhancement of the box-counting algorithm for fractal dimension estimation. **Pattern Recognition Letters,** v. 98, p. 53-58, 2017.

SOILLE, P. **On the morphological processing of objects with varying local contrast**. In: Discrete Geometry for Computer Imagery: 11th International Conference, DGCI 2003, Naples, Italy, November 19-21, 2003. Proceedings 11. Springer Berlin Heidelberg, 2003. p. 52-61.

SOMENZI, C. S. *et al.* **Uso de drones na criação de modelos digitais de encostas:** Aplicação na avaliação de um costão rochoso contaminado por óleo. VIII Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas, Porto de Galinhas, Pernambuco, 2021

STURZENEGGER, M.; STEAD, D. Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. **Engineering Geology**, v. 106, n.3-4, p. 163–182, 2009.

TIAN, J. *et al.* An effective stress-dependent dual-fractal permeability model for coal considering multiple flow mechanisms. **Fuel**, v. 334, p. 126800, 2023.

TOMÉ, M. E. R.; LIMA FILHO, M. F.; NEUMANN, V. H. M. L. Análise Estratigráfica do Albiano-Turoniano da Bacia Pernambuco: Considerações sobre a Paleogeografia e Geração de Hidrocarbonetos. **Geociências UNESP**, v. 25, n. 1, p. 49-58. 2006.

VERSCHEURE, M. **Inversion conjointe des propriétés géométriques et hydrauliques d'un modèle stochastique de réservoirs faillés et fracturés**. 147f. Tese (Doutorado em Geoestatística) - École Nationale Supérieure des Mines de Paris, Fontainebleau, 2010.

VOLATILI, T. *et al.* Outcrop-scale fracture analysis and seismic modelling of a basin-bounding normal fault in platform carbonates, central Italy. **Journal of Structural Geology**, v. 155, p. 104515, 2022.

WAGENKNECHT, G. A contour tracing and coding algorithm for generating 2D contour codes from 3D classified objects. **Pattern Recognition**, v. 40, 2007.

WANG, F. CHENG, H. A fractal permeability model for 2D complex tortuous fractured porous media. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 188, 2020.

WANG, S. *et al.* Automatic detection and characterization of discontinuity traces and rock fragment size distribution using a digital image processing method. **Measurement**, v. 228, p. 114343, 2024.

WU, C. *et al.* Formation mechanisms of hydrocarbon reservoirs associated with volcanic and subvolcanic intrusive rocks: Examples in Mesozoic–Cenozoic basins of eastern China. **AAPG bulletin**, v. 90, n. 1, p. 137-147, 2006.

YU, J.; ARMSTRONG, R. T.; MOSTAGHIMI, P. Image-based fracture pipe network modelling for prediction of coal permeability. **Fuel**, v. 270, 2020.

ZANG, D. **Stochastic Methods for Flow in Porous Media:** Coping with Uncertainties. Elsevier, 2002.

ZERFASS, H.; CHEMALE JÚNIOR, F. Geologia estrutural em ambiente rúptil: fundamentos físicos, mecânica de fraturas e sistemas de falhas naturais. **Terræ Didatica**, v. 7, n. 1, p. 75-85, 2011.

ZHANG, T. Y.; SUEN, C. Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns. **Communications of the ACM**, v. 27, n. 3, p. 236-239, 1984.

ZHU, W.; KHIREVICH, S.; PATZEK, T. W. Impact of fracture geometry and topology on the connectivity and flow properties of stochastic fracture networks. **Water Resources Research**, v. 57, n. 7, e2020WR028652, 2021.

ZUIDERVELD, K. J. *et al.* Contrast limited adaptive histogram equalization. **Graphics gems**, v. 4, n. 1, p. 474-485, 1994.

ANEXOS

ANEXO A - DESCRIÇÃO DOS CÓDIGOS E INSTALAÇÃO DO SISTEMA FRAMFRAT

FRAMFRAT é uma ferramenta avançada para **detecção e caracterização de fraturas** em materiais geológicos por meio de **processamento de imagem digital**. Desenvolvida em Python, a ferramenta possibilita o carregamento de imagens, aplicação de ajustes de pré-processamento e análises geométricas detalhadas de fraturas. Também oferece recursos de **visualização interativa** e **exportação** de dados, auxiliando estudos em geologia, engenharia de petróleo, mineração e áreas afins.

A.1. Destaques

- **Detecção Automática:** Identificação das fraturas em imagens digitais a partir de segmentação baseada em limiarização adaptativa (thresholding).
- **Segmentação Avançada:** Rotulagem das fraturas e esqueletização para análise individual de seus comprimentos, aberturas e conectividade.
- **Visualização Interativa:** Geração de diagramas de orientação, estereogramas, histogramas, boxplots e outros gráficos estatísticos.
- **Análise Geométrica Completa:** Cálculo de abertura, comprimento, porosidade, permeabilidade, conectividade e intensidade de fraturas.
- **Dimensão Fractal Integrada:** Cálculo automático da dimensão fractal para avaliar a complexidade das fraturas.
- **Exportação de Resultados:** Possibilidade de salvar dados em formatos como CSV e Excel, facilitando a análise posterior.

A.2 Estrutura do Código

O sistema é organizado de maneira modular para facilitar a manutenção e a escalabilidade. A estrutura do código segue o padrão de boas práticas em desenvolvimento de software, utilizando diretórios dedicados a recursos estáticos, módulos de funções principais e scripts auxiliares.

```
FRAMFRAT/
├── assets/                  # Recursos visuais estáticos(ícones e logos)
│   └── image/               # Imagens usadas na interface
├── utils/                   # Biblioteca de funções principais
│   ├── config.py            # Configurações globais
│   ├── characterization.py  # Caracterização de fraturas
│   ├── core.py              # Algoritmos centrais de processamento
│   ├── detection.py         # Detecção de fraturas
│   ├── home.py              # Página inicial do sistema
│   ├── preprocessing.py     # Pré-processamento de imagens
│   └── visualization.py     # Visualização de resultados
├── app.py                   # Arquivo principal do sistema
├── run.py                   # Fxecução (run) do sistema
├── requirements.txt         # Dependências do projeto
├── README.md                # Documentação inicial
└── LICENSE                  # Licença do projeto
```

A.3 Descrição dos Módulos

app.py

- Gerencia a navegação entre páginas e conecta os módulos do sistema.
- Implementa a interface gráfica

A.3.2 characterization.py

- Extrai parâmetros geométricos das fraturas, como abertura, comprimento, porosidade e permeabilidade.
- Implementa algoritmos para cálculo da dimensão fractal e análise de conectividade.

core.py

- Contém algoritmos fundamentais para o processamento de imagens:
    - **Esqueletização**.
    - **Overlay de imagens**.
    - **Aplicação de thresholding adaptativo**.

detection.py

- Realiza a detecção automática de fraturas em imagens segmentadas.
- Integra ajustes manuais e interatividade no processo de detecção.

preprocessing.py

- Realiza operações como:

- **Rotação**.
- **Ajuste de brilho e contraste**.
- **Recorte de imagens**.

- Implementa métodos interativos com suporte à interface gráfica.

visualization.py

- Gera gráficos para análise das fraturas:
  - Diagramas de orientação (Rosa dos Ventos).
  - Histogramas e estereogramas.
- Utiliza bibliotecas como **Matplotlib** e **Plotly**.

A.4 Fluxo de Trabalho

1. **Upload da Imagem**: O usuário carrega uma imagem para análise.
2. **Pré-processamento**: Ajustes interativos para melhoria da qualidade da imagem.
3. **Detecção de Fraturas**: Identificação automática das fraturas.
4. **Caracterização**: Extração de métricas e propriedades geométricas.
5. **Visualização**: Geração de gráficos e exportação dos resultados.

A.5 Pré-Requisitos

1. **Python 3.10 ou Superior**
   - Verifique a versão instalada:
   - Caso não possua, faça o download em python.org.
2. **Bibliotecas Python**
   - Todas as dependências necessárias estão listadas no arquivo requirements.txt.

A.6 Instalação

1. **Clone o Repositório**

Copiar código: *git clone https://github.com/Muchanga-dev/FRAMFRAT.git*

cd FRAMFRAT

2. **Crie e Ative um Ambiente Virtual (Recomendado)**

 # Criar o ambiente virtual:

Copiar código: *python3 -m venv venv*

 # Em Windows, ative com:

Copiar código: *venv\Scripts\activate*

 # Em Linux ou macOS, ative com:

Copiar código: *source venv/bin/activate*

3. **Instale as Dependências**

Copiar código: *pip install -r requirements.txt*

4. **Executando a Aplicação**

Copiar código: *python run.py*

ou

Copiar código: *streamlit run app.py*

- A interface do FRAMFRAT será iniciada no endereço *http://localhost:8501*, pronta para carregar imagens e analisar fraturas.

A.7 Como Usar

2. **Carregando Imagens**
   - Na interface, clique em **"Upload de Imagens"** e selecione os arquivos nos formatos suportados (por exemplo, PNG ou JPG).
3. **Pré-Processamento**

- Ajuste brilho, contraste, recorte e rotação na aba de pré-processamento.
- Utilize também **equalização de histograma** ou **CLAHE** (se disponível) para melhorar a qualidade da imagem antes da detecção de fraturas.

4. **Detecção de Fraturas**
   - Selecione o método de limiarização (thresholding) e aplique o algoritmo de segmentação automática.
   - O FRAMFRAT exibirá as regiões binárias correspondentes às fraturas detectadas.
5. **Análise Geométrica Avançada**
   - Calcule propriedades como **abertura mínima, média e máxima**, **comprimento**, **porosidade**, **intensidade de fraturas**, **permeabilidade** e **dimensão fractal**.
   - A **transformada do eixo medial** (esqueletização) ajuda a determinar a conectividade e a extração de métricas com alta precisão.
6. **Visualização e Exportação**
   - Visualize gráficos de distribuição de aberturas, comprimentos, orientações (rosetas, estereogramas, histogramas, boxplots etc.).
   - Exporte resultados em formatos como **Excel (XLSX)** e **CSV** para análise posterior.

A.8 Funcionalidades Principais

1. **Detecção Avançada**
   - Segmentação automática por thresholding adaptativo.
   - Esqueletização para análise de conectividade e quantificação das fraturas.
2. **Análises Estatísticas**
   - Dimensionamento fractal (método de Box-Counting).
   - Estatísticas detalhadas de abertura (mínima, média, máxima) e comprimentos.
   - Cálculo de porosidade e permeabilidade a partir dos dados de fraturas.
3. **Visualizações Interativas**

- **Diagramas de Orientação (Rose Diagram):** Identifica direções dominantes das fraturas.
- **Estereogramas:** Visualiza ângulos de mergulho (quando aplicável) e distribuição espacial.
- **Histogramas e Boxplots:** Mostram a variabilidade das aberturas e comprimentos.

4. **Exportação Personalizável**
   - Geração de relatórios e planilhas personalizadas em **CSV** ou **XLSX**.
   - Overlay das fraturas detectadas diretamente sobre a imagem original, facilitando a conferência dos resultados.

A.9 Resolução de Problemas

1. **Erros no Carregamento de Arquivos**
   - Verifique se as imagens estão em formato compatível (PNG, JPG).
   - Confira se há permissões de leitura na pasta.
2. **Falhas em Dependências**
   - Reinstale as bibliotecas:
   - Verifique se o ambiente virtual está corretamente ativado.
3. **Problemas de Desempenho**
   - Imagens muito grandes podem exigir mais memória. Tente reduzir a resolução ou recortar a área de interesse.
4. **Outras Dúvidas**
   - Abra uma issue no GitHub ou entre em contato com o autor e colaboradores.

A.10 Contribuindo com o FRAMFRAT

Sinta-se à vontade para contribuir com melhorias, correções de bugs ou novas funcionalidades.

1. **Faça um Fork do Repositório**
2. **Crie uma Nova Branch**

3. **Implemente suas Mudanças** e faça o commit.
4. **Abra um Pull Request** no repositório original.

A.11 Licença

FRAMFRAT é disponibilizado sob a licença Apache 2.0. Consulte o arquivo LICENSE para mais detalhes