

ESTUDO COMPARATIVO DE *SCANLINES* DE ÁREA ANALISADAS EM AFLORAMENTO E EM IMAGENS DE VANT NA BACIA RIO DO PEIXE, BRASIL

Gabriel de Brito Honório ¹
Francisco César Costa Nogueira ²

RESUMO

O estudo de afloramentos análogos é uma técnica constantemente aplicada na pesquisa de reservatórios de petróleo, visto que, carrega consigo informações de propriedades petrofísicas e estruturais que são correlacionadas com rochas acumuladoras de água e hidrocarbonetos em sub-superfície. Uma dessas aplicações de analogia é feita para reservatórios fraturados e influenciados por zona de falhas, que são compostas por núcleo e zona de dano, pelo fato desta última poder ser composta por bandas de deformação. Dessa forma, essas estruturas podem afetar negativamente o reservatório reduzindo os valores de propriedades, como a porosidade e a permeabilidade. Logo, uma maneira de analisar a frequência das bandas de deformação em zonas de dano é aplicar técnicas de *scanlines* lineares e/ou de área. Dessa maneira, o trabalho buscou correlacionar duas diferentes escalas de observação: a análise de campo e análise através de imagens de VANT (Veículo Aéreo Não-Tripulado). Assim, para os afloramentos em estudo, a metodologia adotada foi a técnica de *scanline* de área através do P21, realizando o mapeamento estrutural da região do *scanline* e um processamento desse mapeamento. A partir disso, obtivemos um valor que representou o P21 da área do *scanline*. O resultado obtido revelou valores próximos aos dados de campo. Portanto, notou-se que a análise do P21 através do imageamento de VANT é uma alternativa eficiente e representativa, para auxiliar o estudo de campo em regiões em que a visita é impossibilitada ou de difícil acesso.

Palavras-chave: Bandas de deformação, *scanline*, VANT, P21.

INTRODUÇÃO

Ao longo dos tempos se procurou entender o comportamento de um reservatório de petróleo, pelo fato de está localizado a alguns quilômetros em sub-superfície e em alguns casos, devido a intensidade de deformação, encontram-se influenciados por falhas, podendo favorecer o fluxo de fluidos ou afetando negativamente o reservatório. Diante disso, a descrição de parâmetros se faz necessário para o entendimento das propriedades de fluxo de um reservatório

¹ Graduando do Curso de Engenharia de Petróleo da Universidade Federal de Campina Grande - PB, gbh.honorio@gmail.com;

² Professor Orientador: Pós-Doutor em Geologia, Universidade Federal de Campina Grande - PB, aulascezar@gmail.com.

presente em zonas de falha, como por exemplo: a porosidade e a permeabilidade. Além disso, a frequência de estruturas é um fator importante a ser estudado, visto que é de grande importância para a modelagem de reservatório fraturados e/ou com zona de falha presente, pois poderá localizar áreas com maior ou menor intensidade de estruturas, regiões de barreira para o fluido, estudo de tensões e parâmetros de resistência da rocha.

A limitação nas escalas de análise, associadas principalmente a janela escalar entre a sísmica, perfis de poços e testemunhos, induz a utilização de técnicas complementares, na mesoescala, através do estudo de afloramentos análogos. Sendo assim, o *scanline* se torna um método de caracterização utilizado no estudo de afloramentos análogos e aplicado também ao estudo de zonas de danos de falhas. Através desse método, pode-se utilizar técnicas para análise de parâmetro de estruturas tectônicas pela investigação linear ou realizado por área. Esta análise objetiva a coleta de dados estruturais, como frequência, espessamento, espessura e direção das estruturas, com a finalidade de compreender o comportamento do objeto de estudo. Geralmente, a metodologia é aplicada à fratura, mas também podem ser aplicadas a bandas de deformação.

Essa técnica foi introduzida à pesquisa inicialmente por Dershowitz e Herda (1992) com a metodologia de P11 (contagem de estruturas por um segmento), P21 (contagem de estruturas por área), e P31 (contagem de estruturas por volume), dentre outras, que se aplicam em uma área pré-estabelecida. A partir dessa metodologia, procurou-se incorporar em *scanlines* circulares, proposta por Mauldon (2001), que restringe a análise a uma área circular, visto que essa forma geométrica fornece uma forma mais eficiente de medir valores e de estimar a dados. Porém, ambos autores abordam a frequência de bandas de deformação em determinada área pré-estabelecida, dada por Bds/m² (bandas de deformação por metro quadrado), e possuem o papel de permitir a caracterização da rocha analisada.

À vista disso, cada vez mais cresce o uso dos *scanlines* em afloramentos análogos nas pesquisas e estudos para caracterizar reservatório e zonas de dano de falhas. Reafirmando a importância da metodologia para compreender o comportamento e a influência das bandas de deformação e/ou fraturas, como abordado Ortega (2010) e Mauldon (2001) que utilizaram essa técnica para investigar zonas de fraturas. E outros pesquisadores, como Pontes et al (2019), Miranda et al (2018), Torabi et al (2018), e, Schueller et al (2013), aplicaram a metodologia de P21 no entendimento da influência e o comportamento das bandas de deformações em zonas de dano de falhas.

Nesse trabalho, as estruturas presentes em campo para análise são as bandas de deformação (BD's). As BD's são estruturas que impactam nas propriedades petrofísicas e

microestruturais do reservatório em zona de falhas, podendo diminuir a porosidade e reduzir a permeabilidade em até seis ordens de magnitude da *host rock* (Pontes et al, 2019; Shipton, 2005; Torabi, 2007; Fossen 2007). Além disso, podem aparecer isoladamente, denominada *single*, ou de forma agrupada, denominada *cluster* (Araújo Netto et al, 2012), variam de milímetros a centímetro de espessura (Fossen, 2007; Schueller, 2013), e, alguns centímetros a metros de comprimento, por esse motivo, não aparecessem em alguns métodos de prospecção, como a sísmica. Sendo assim, são de grande relevância para o estudo dos reservatórios, pois a presença de bandas de deformação pode significar barreiras naturais no fluxo de fluido (Antonellini, 1994) e influenciar negativamente as propriedades petrofísicas do reservatório. Por essa possibilidade de influência, torna-se necessário o aprofundamento de estudos e análises para a investigação da interferência das bandas de deformação na rocha.

Para a realização das análises das bandas de deformação em zona de dano, através da metodologia de *scanline* circular, faz-se necessário frequentes idas à campo. Portanto, apesar de ser eficiente para o estudo da deformação no afloramento, traçar alternativas para coletar dados de afloramento é um ponto a ser trabalhado, pois poderá auxiliar a construção de modelos geológicos e possuir um adensamento de informações.

Todavia, com o avanço da tecnologia, principalmente pelo uso da aquisição de imagem de VANT (Veículo Aéreo Não-Tripulado), a correlação entre escalas de observação para uma mesma metodologia aplicada em campo ficou susceptível a estudos, pois, o uso do VANT é algo crescente nos últimos tempos e trata-se de uma ferramenta que possibilita aquisição de dados em locais de difícil acesso (Ridolfi, 2017). Além disso, há um campo de visão maior, e ainda pode-se ter a visualização do afloramento completo por uma compilação das imagens adquiridas, a qualquer momento que o observador desejar analisar. Assim, a qualquer momento poderá realizar diversas análises em laboratório em cima da mesma imagem e mesmo local de estudo sem necessitar ir ao campo, logo, cada vez mais é incorporada para estudos geológicos (Peacock & Corke, 2020).

Dessa forma, este trabalho busca correlacionar dados levantados em *scanline* de área obtidos em em campo e através de imagens de VANT. Possibilitando uma alternativa à aquisição de dados estruturais, como o P21, quando a visita ao afloramento for impossibilitada ou em áreas de difícil acesso. Destarte, o dado gerado pode orientar trabalhos de campo e fornecer dados estruturais concisos que podem ser dados de entrada para a modelagem geológica (Oliveira et al, 2009).

1.1. Contexto Geológico

A Bacia Rio do Peixe é uma bacia intracontinental que faz parte do sistema de riftes localizado no interior nordeste brasileiro (de Castro et al., 2007), é formada sob um sistema de tensão distensivo que devido à fragmentação do continente Pangeia que resultou na separação dos continentes africano e sul-americano. A Bacia Rio do Peixe é composta de três falhas principais, a Falha Portalegre (direção NE-SW), a Falha Malta (direção E-W) e pela Falha Rio Piranhas (direção NE-SW) que controlam três sub-bacias sedimentares, respectivamente: Brejo das Freiras, Sousa e Pombal (Figura 1). O preenchimento sedimentar dessa bacia consiste em três formações geológicas (Sénant e Popoff, 1991): (1) Formação Antenor Navarro composta por arenitos e conglomerados finos à grossos, característicos de ambiente de sedimentação fluvial entrelaçado, sendo considerada a sedimentação mais antiga, advindas de paleocorrentes com direção Noroeste-Sudeste; em contato interdigitado (idades similares) com a Formação Antenor Navarro, existe a (2) Formação Sousa, que são sedimentos de ambiente lacustre raso com a presença de siltitos e folhelhos verdes a vermelho; além desse, ocorre a (3) Formação Rio Piranhas que corresponde a unidade mais recente, consistindo de conglomerados e arenitos grossos intercalados com lamitos arenosos.

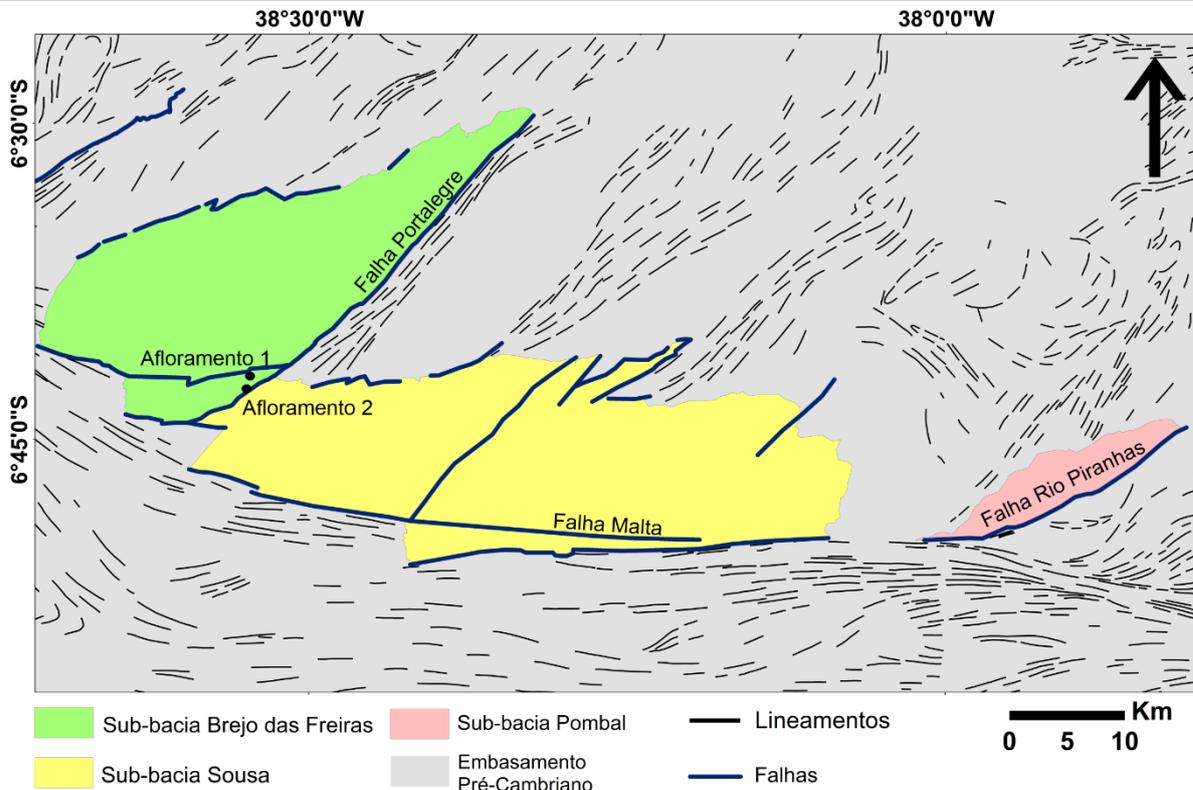


Figura 1: Mapa estrutural da Bacia Rio do Peixe, com a indicação das falhas de borda e lineamentos estruturais e sub-bacias que compõem a Bacia.

Dessa forma, o trabalho foi desenvolvido sobre a Formação Antenor Navarro em um arenito conglomerático de matriz fina, em que ocorrem *singles* e *clusters*. Sendo assim, o afloramento 1 tem uma intensidade de deformação inferior ao afloramento 2, tem uma coesão moderada com superfície de deslizamento presentes. Por outro lado, o afloramento 2 é intensamente deformado, com vários núcleos de falha, com superfícies de deslizamento e arenitos de alta coesão (Pontes et al, 2019).

METODOLOGIA

A metodologia adotada no trabalho ficou organizada em duas partes, o trabalho de campo (1) e o trabalho laboratorial (2), atendendo ao seguinte fluxograma resumido:

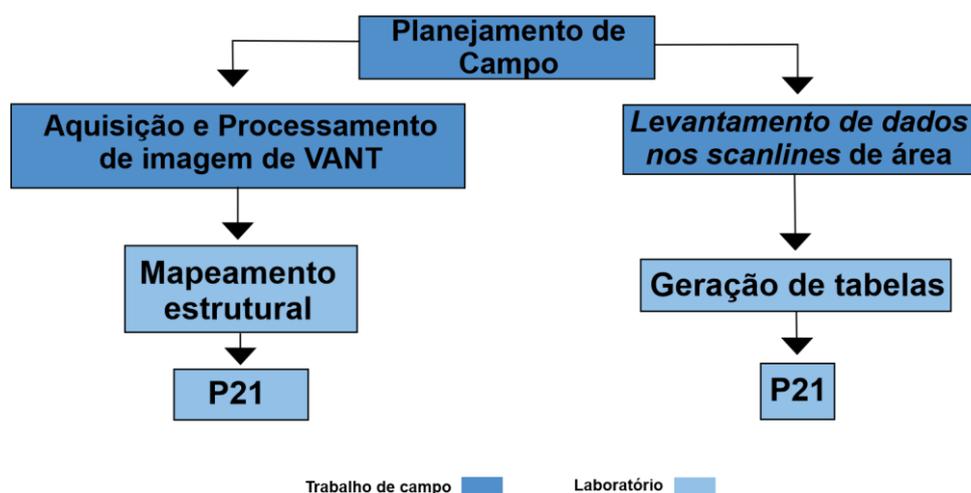


Figura 2: Fluxograma resumido das atividades desenvolvidas para a realização do estudo desde a fase de planejamento, separados em duas escalas de observação: VANT e *Scanline* Circular (observação em campo), até os resultados obtidos em laboratório através dos dados de VANT e dados de campo.

Durante a atividade de campo, realizou-se quatro *scanlines* de área, sendo dois de área quadrada para o afloramento 1, com 25 m² cada (Scan A e Scan B), e dois *scanlines* circulares para o afloramento 2, com 1,25m de raio para cada (NE-15 e NW-02). Para a aplicação dos métodos, usou-se: bússola, trena, *comparator*, régua milimétrica, e, um formulário de preenchimento de dados (Figura 3).

Além disso, usou-se um VANT (Veículo Aéreo Não-Tripulado), dotado de uma série de sensores e câmeras de alta resolução que fazem a captura e mapeamento de um objeto em

análise. O voo pode ser feito manualmente ou automatizado por uma conexão entre o VANT e o aplicativo de voo, que percorre uma rota pré-estabelecida no planejamento de campo.

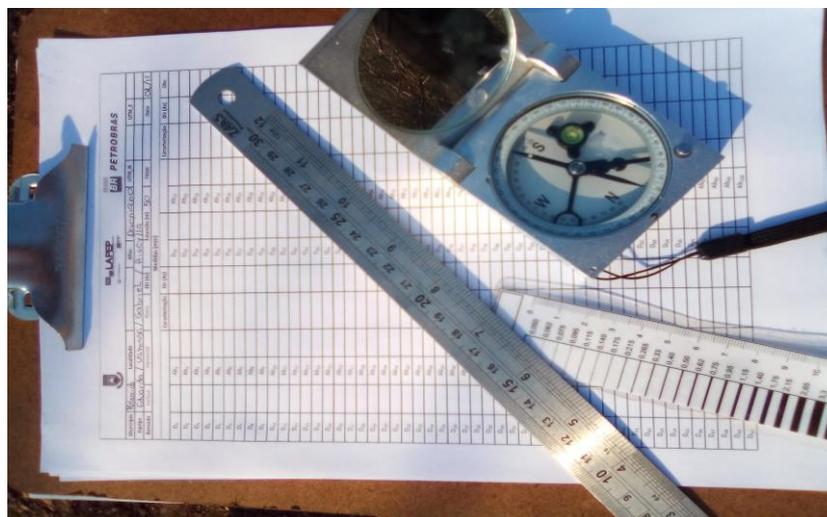


Figura 3: Materiais utilizados no trabalho de campo: a régua milimétrica ao centro, o *comparator* à direita da régua, acima desses está a bússola, e ao fundo o formulário.

A partir desses materiais, foram definidas áreas para o estudo utilizando trena (Figura 4), permitindo com isso, a extração de atributos das estruturas investigadas. Nós realizamos as medições de direção, espessamento e espessura das bandas de deformação. Com a bússola, mediu-se a direção das estruturas, e posteriormente, usou-se o *comparator* para medir a espessura das bandas. Para a medição do comprimento das estruturas e espessamento entre elas, utilizou-se a trena. Por fim, todos os dados coletados foram anotados em uma tabela. Paralelamente a isso, houve o imageamento do afloramento por VANT, através de voos em trechos lineares em faixas paralelas, a fim de mapear a região aflorante desejada. Para o afloramento 1, o VANT capturou as imagens a uma altura de 10 metros, já para o afloramento 2, 30 metros.



Figura 4: *Scanline* circular para o levantamento de atributos no afloramento 2, em uma região do afloramento com uma grande intensidade de deformação.

Dessa forma, a partir dos *scanlines* em campo, foi gerado uma planilha de dados levantados das *scanlines* e, aplicou-se a metodologia proposta por Dershowitz e Herda (1992), para encontrar o valor do P21 para a área em estudo, através da fórmula:

$$P21 = \frac{n^{\circ} \text{ de bandas de deformação}}{\text{Área do scanline}}$$

As imagens de VANT adquiridas foram compiladas e transformadas em ortomosaico para cada afloramento, posteriormente, selecionou-se áreas dos *scanlines* de campo e realizamos o mapeamento estrutural das bandas de deformação nos *scanlines* através do Software ArcMap™ por meio de shapefiles. Na ferramenta *Line Density* do ArcMap™, as shapefiles foram usadas como dado de entrada e gerou-se isolinhas que nos permitiu encontrar um valor médio de P21 para a região do *scanline*, dadas por BD's/m².

RESULTADOS

No ArcMap™, conseguimos mapear as bandas de deformação nas áreas em estudos para os afloramentos, chegando ao seguinte mapa da figura 5. Após o mapeamento das bandas de deformação, através da ferramenta *Line Density*, alcançamos um valor que representa a densidade média na região de estudo, o *scanline* de área. Esse dado pode ser tomado como o valor de P21, pelo fato de ambas medidas resultarem em um valor da razão da quantidade de estruturas pela área de estudo (tabela 1).

Dessa forma, para o afloramento 1, fizemos dois *scanlines* de 25m², Scan A e Scan B. Para o Scan A, obtivemos 5,56 BD/m² e 5,39 BD/m², respectivamente para P21 realizado em campo e P21 a partir de imagem VANT. No Scan B o valor obtido para o P21 realizado em campo foi 5,04 BD/m² e para P21 a partir de imagem VANT, 5,0358 BD/m².

No afloramento 2, também realizamos dois *scanlines* circulares de 9,81m², o NE-15 e o NW-02. Para o NE-15, tivemos como resposta para o P21 feito em campo, um valor de 6,62 BD/m², e, 4,71 BD/m² para o P21 baseado nas imagens de VANT. No *scanline*, NW-02, encontramos 7,75 BD/m² e 4,40 BD/m², respectivamente para dado de campo e dado a partir da imagem VANT.

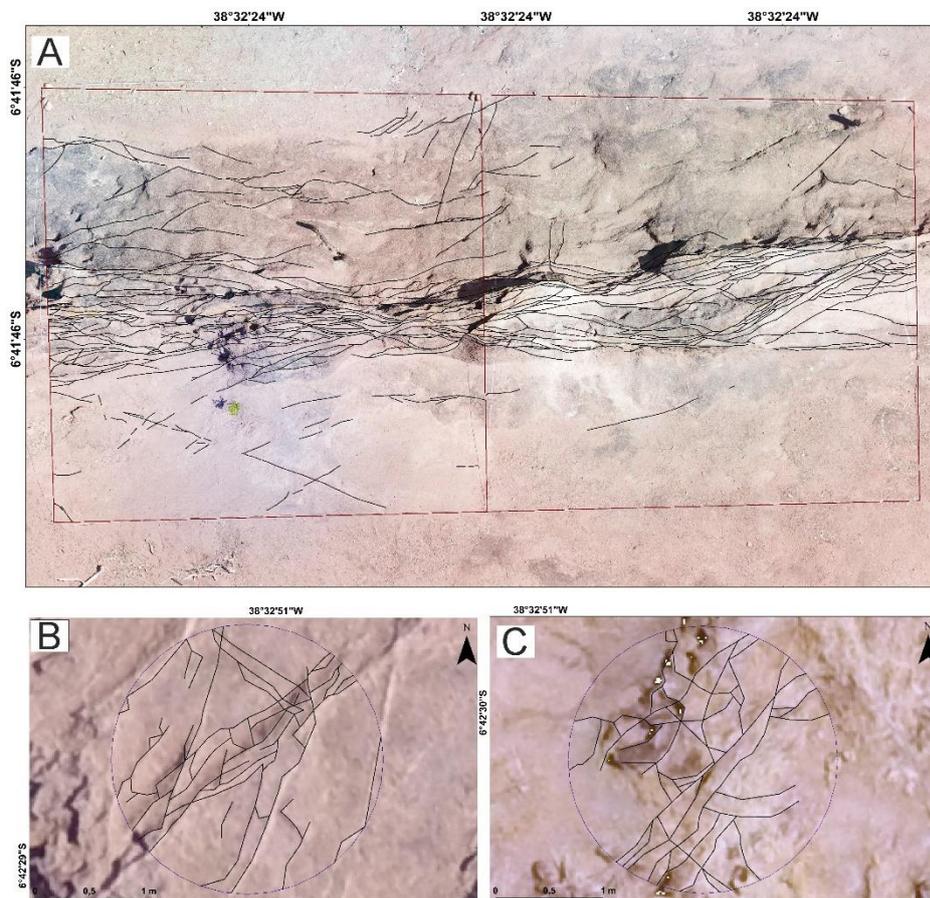


Figura 5: Mapeamento estrutural do *scanlines* de área dos afloramentos em estudo. Em (A), temos os dois *scanlines* quadrados localizados no afloramento 1, à esquerda temos o Scan A e à direita o Scan B. Já as figuras B e C, temos o mapeamento das bandas de deformação para os *scanlines* circulares do afloramento 2, sendo: (B) a área NE-15. Em (C) a área NW-02.

Área	Afloramento 1		Afloramento 2	
	Scan A	Scan B	NE-15	NW-02
P21 Campo (BD's/m ²)	5,560	5,040	6,620	7,750
P21 VANT (BD's/m ²)	5,390	5,036	4,710	4,400

Tabela 1: Resultados da metodologia dos *scanlines* de área para os afloramentos em estudo, explicitando os valores de campo e os valores obtidos através da interpretação das imagens de VANT.

DISCUSSÃO

Nota-se que o estudo desenvolvido para correlacionar os dados de campo e os através de VANT, para a realização do P21, se aproxima aos dados *in situ* do afloramento, visto que os resultados se diferenciam um de outro por alguns décimos ou unidades de densidade, mostrando a relevância da alternativa de imageamento de VANT para a finalidade de estudar o comportamento das bandas de deformação em zonas de danos em reservatório afetados por falhas geológicas.

Por outro ponto de análise, é notório perceber a diferença entre os valores de campo e de VANT entre os afloramentos estudados. Isso se deve ao fato da altura de voo ser diferente, pois, a um voo de dez metros de altura observaremos uma quantidade de detalhes maior que um voo a trinta metros de altura, como foi para o afloramento 2.

Assim, como as bandas de deformação variam de centímetros a milímetros de espessura, alguns fatores são decisivos para um sucesso da análise e visualização das mesmas, que são: altura de voo, resolução da câmera, precisão no processamento das imagens, e a sobreposição de shapefiles durante a interpretação.

CONCLUSÕES

O dado estatístico da média dos valores no software para representar determinada região estudada (o P21 através de VANT), sustenta a ideia de correlacionar diferentes formas de observação, sendo então, uma alternativa para a realização da técnica de *scanline*, isso porque os resultados se aproximam da metodologia que é aplicada no afloramento, tornando os dados representativos à área.

Dessa forma, a alternativa estudada se torna uma solução interessante para ser aplicada em análogos aflorantes que são de difícil acesso e/ou distantes da sede de estudos, visto que a proposta necessita apenas de uma visita para realizar o sensoriamento remoto para as análises laboratoriais.

Devido as imagens precisas e de alta resolução, o dado de VANT carrega consigo uma gama de dados representativos do local de investigação, logo, podendo servir de dado complementar à modelagem geológica de reservatórios influenciados por falhas. Isso porquê as falhas geram zonas de dano, região onde há a maior parte da ocorrência de bandas de deformação

A correlação é indicada para arenitos onde há a ocorrência das estruturas em estudo, onde a visualização das mesmas seja clara e nítida. Pois, minimizará a interferência do ambiente da captura das imagens, evitando a perda de dados.

Por fim, sendo uma alternativa nova, abrem-se frentes de estudos para o estudo de zonas de falhas de afloramentos análogos, incorporando o sensoriamento remoto e a interpretação estrutural das imagens adquiridas. Por exemplo, aplicar outras metodologias para densidades, utilizar outras ferramentas ou outros programas para caracterizar zonas afetadas por falhas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me capacitar com sabedoria para realização desse trabalho; à minha família por me dá o suporte necessário para essa caminhada; ao meu professor orientador e a toda equipe do Laboratório de Pesquisa em Exploração Petrolífera (LAPEP) por me auxiliar e orientar na realização dessa pesquisa; e, a Petrobras por tornar esse estudo possível.

REFERÊNCIAS

ANTONELLINI, Marco; *et al.* Microstructure of deformation bands in porous sandstone at Arches National Park, Utah. *Journal of Structural Geology*, v.16, n.7, p.(941-959), 1994.

CASTRO, David; *et al.* On the tectonics of the Neocomian Rio do Peixe Rift Basin, NE Brazil: Lessons from gravity, magnetics and radiometric data. *Journal of South American Earth Sciences*, v.24, p.(184-202), Outubro, 2007.

DERSHOWITZ, William; HERDA, Hans. Interpretation of fracture spacing and intensity. *Rock Mechanics*, Rotterdam, p.(757-766), 1992.

FOSSEN, Haakon; BALE, Arthur. Deformation bands and their influence on fluid flow. AAPG Bulletin, v.91, n.12, p.(1685-1700), Dezembro, 2007. American Association of Petroleum Geologists AAPG/Datapages.

FOSSEN, Haakon; *et al.* Deformation bands in sandstone: a review. Journal of the Geological Society, v.164, p.(755-769), Londres, 2007.

MAULDON, M; *et al.* Circular *scanlines* and circular windowns: new tools for characterizing the geometry of fracture traces. Journal of Structural Geology. v.23, p.(247-258), Fevereiro, 2001.

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), Agosto, 2018.

NETTO, João Marculino de Araújo; *et al.* Caracterização meso e microscópica de bandas de deformação em arenitos porosos: um exemplo na tecnossequências Peleozoica, Pré- e Sin-rifte da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. Geologia USP, Série Científica, São Paulo, v.12, n.1, p.(83-98), Abril, 2012.

OLIVEIRA, Daniel; *et al.* Elaboração de um mapa de lineamento estrutural e densidade de lineamento através de imagem SRTM, em uma área ao norte do rio Doce, ES. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, INPE, Natal, p.(4157-4163), Abril, 2009.

ORTEGA, Orlando J.; *et al.* Quantifying diagenetic and stratigraphic controls on fracture intensity in platform carbonates: An example from the Sierra Madre Oriental, northeast Mexico. Journal of Structural Geology, v.32, p.(1943-1959), Julho, 2010.

PEACOCK, D; CORKE, Elliott. How to use a drone safely and effectively for geological studies. Universidade de Bergen, Fevereiro, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/339311157_How_to_use_a_drone_safely_and_effectively_for_geological_studies. Acesso em: 13 de Janeiro de 2021.

PONTES, Cayo; *et al.* Petrophysical properties of deformation bands in high porous sandstones across fault zones in the Rio do Peixe Basin, Brazil. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v.114, p.(153-163), Janeiro, 2019.

RIDOLFI, Elena; *et al.* Accuracy Analysis of a Dam Model from Drone Surveys. Sensors, v.17, n.1777, 2017.

SCHUELLER, Sylvie; *et al.* Spatial distribution of deformation bands in damage zones of extensional faults in porous sandstones: Statistical analysis of field data. Journal of Structural Geology, v.52, p.(148-162), Abril, 2013.

SÉNANT, J.; POPOFF, M. Early Cretaceous extension in northeast Brazil related to the South Atlantic opening. Tectonophysics. v.198. p.(35-46), Novembro, 1991.

SHIPTON, Z.; *et al.* The geometry and thickness of deformation-band fault core and its influence on sealing characteristics of deformation-band fault zones. AAPG Memoir, v.85, p.(181-195), 2005.

TORABI, A. Deformation Bands in porous sandstones: their microstructure and petrophysical properties. Tese (doutorado) – Department of Earth Science, University of Bergen, Bergen. 2007.