



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 10, nº 2 (2024)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2024v10n2ID37398>



Análise de Atributos Sísmicos Aplicada à Interpretação Sismoestrutural: Estudo de Caso na Bacia do Rio do Peixe, NE do Brasil

Seismic Attribute Analysis Applied to Seismostructural Interpretation: Case Study in the Rio do Peixe Basin, NE Brazil

João Victor Freire Pereira¹; Alex Francisco Antunes²

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Natal/RN, Brasil. Email: joavictorfp@ufrn.edu.br.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1844-0719>

² Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Geologia – Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Natal/RN, Brasil. Email: alex.antunes@ufrn.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3292-4190>

Resumo: Este trabalho investiga os atributos sísmicos utilizados para a interpretação de feições estruturais na Bacia do Rio do Peixe (BRP). Empregando o *software* OpendTect, foi conduzida uma análise sísmica abrangente que incluiu condicionamento de dados e a aplicação de vários atributos sísmicos para melhorar a visualização de estruturas geológicas, como falhas e dobras. A metodologia envolveu o carregamento de dados sísmicos originais, a aplicação de filtros estruturalmente controlados e a utilização de atributos como similaridade, pseudorrelevo e probabilidade de falha para identificar descontinuidades. As análises revelaram que atributos como similaridade, pseudorrelevo, probabilidade de falhas e curvatura melhoram significativamente a interpretação de complexidades estruturais na BRP. Esses atributos sísmicos auxiliaram no mapeamento de falhas normais e dobras associadas, juntamente com a definição do arcabouço estrutural do embasamento na área estudada, que é caracterizada por uma geometria em *semi-graben*. Este estudo contribui para a compreensão da estrutura geológica da BRP, mostrando a eficácia de técnicas avançadas de processamento sísmico pós-*stack* na elucidação de estruturas geológicas. Em última análise, os resultados obtidos com esta pesquisa têm implicações para futuras explorações geológicas e gestão de recursos na região.

Palavras-chave: Falhas; Semi-Graben; Bacia Ríft.

Abstract: This research investigates the seismic attributes utilized for the interpretation of structural features within the Rio do Peixe Basin (RPB). Employing the OpendTect software, we conducted a comprehensive seismic analysis that included data conditioning and the application of various seismic attributes to enhance the visualization of geological structures such as faults and folds. The methodology involved loading original seismic data, applying dip-steered median and diffusion filters, and utilizing attributes like similarity, pseudorelief, and thinned fault likelihood to identify discontinuities. Our findings reveal that seismic attributes such as similarity, pseudorelief, thinned fault likelihood and curvature significantly improve the interpretation of structural complexities in the RPB, highlighting fault surfaces with notable continuity and scale. These seismic attributes helped in mapping normal faults and associated folds, together with the definition of the structural framework of the basement in the studied area, which is characterized by a semi-graben geometry. This study contributes to the understanding of the RPB's geological framework, showcasing the effectiveness of advanced post-stack seismic processing techniques in elucidating subsurface structures. Ultimately, the results gained from this research have implications for future geological explorations and resource management in the region.

Keywords: Faults; Half-Graben; Rift Basin.

1. Introdução

A Bacia do Rio do Peixe (BRP) corresponde a uma feição geológica significativa, caracterizada por uma estruturação complexa e rica história sedimentar. Situada no contexto mais amplo da zona de cisalhamento de Patos, a BRP foi moldada por uma série de eventos tectônicos que influenciaram sua formação e evolução. Este artigo de pesquisa visa a explorar os atributos sísmicos que facilitam a visualização e interpretação de características estruturais dentro da BRP, focando particularmente em falhas e dobras.

A análise sísmica é uma importante ferramenta em geociências, permitindo o exame não invasivo de estruturas em subsuperfície. Particularmente para a Bacia do Rio do Peixe, a análise e interpretação de dados sísmicos de reflexão tornou possível caracterizar seu arcabouço tectono-estrutural em subsuperfície, especialmente por meio da caracterização 3D de falhas e dobras associadas. Nesse contexto, a análise de atributos sísmicos é uma técnica poderosa porque permite realçar estruturas que podem não ser prontamente reconhecidas em dados sísmicos, que são convencionalmente apresentados em amplitude o que, por sua vez, está relacionada a variações na impedância acústica do meio atravessado por ondas sísmicas. A aplicação de técnicas avançadas de processamento sísmico, como aquelas implementadas no *software* OpendTect, permite o aprimoramento da qualidade do sinal e a extração de informações geológicas significativas. Por meio do condicionamento de dados sísmicos e da aplicação de vários atributos, este estudo busca elucidar as complexidades geológicas da BRP, fornecendo informações importantes a respeito de suas características estruturais e os processos que moldaram sua geometria atual.

Este artigo detalha a metodologia empregada na análise sísmica, incluindo o condicionamento de dados e a aplicação de atributos sísmicos específicos que destacam estruturas geológicas. Além disso, discute o contexto geológico regional da BRP, examinando a interação de esforços tectônicos e padrões de sedimentação que contribuíram para seu desenvolvimento. Ao integrar dados sísmicos com interpretação geológica, esta pesquisa visa a avançar na compreensão da estrutura geológica da BRP, adicionando importantes contribuições para os campos da geologia e geofísica.

2. Metodologia

2.1. Base de Dados e Software

A área estudada está localizada na porção sudoeste da Bacia do Rio do Peixe (BRP), mais especificamente ao longo da margem falhada da sub-bacia do Sousa (Figura 1). Neste estudo, foi utilizado um volume sísmico 3D correspondente ao levantamento 0314_3D_RIOP_T_55_56, obtido do banco de dados da Agência Brasileira de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP). O volume sísmico é migrado em tempo, cobre uma área de 152 km² e tem um tempo total de registro de 2,0 s, com uma taxa de amostragem de 0,004 s. É composto por 283 *inlines* com direção 330°Az e espaçamento de 50 m, e 537 *crosslines* com direção 060°Az e espaçamento de 20 m. A polaridade dos dados sísmicos segue o padrão normal da Society of Exploration Geophysists (SEG), em que um aumento descendente na impedância acústica é representado por um evento de reflexão positivo, enquanto uma diminuição na impedância acústica representa um evento negativo (BROWN, 2011). A análise e interpretação sísmica foram realizadas com o *software* OpendTect desenvolvido pela dGB Earth Sciences.

2.2. Condicionamento do Dado Sísmico

O primeiro estágio do condicionamento de dados envolveu a criação de cubos de *steering*, que armazenam as informações de mergulho e sentido de mergulho dos refletores do volume sísmico original (Figura 2). O valor de mergulho do evento sísmico é computado para cada ponto de amostragem dentro desses cubos, correspondendo ao ponto central de uma janela de amostragem 3D (BROUWER; HUCK, 2011).

Após a criação dos cubos de *steering*, dois tipos de filtros estruturalmente orientados foram aplicados aos dados originais (Figura 2), a fim de suprimir ruído aleatório, e ambos aumentando a continuidade lateral das reflexões e enfatizando falhas (ODOH et al., 2014; BROUWER; HUCK 2011). O filtro mediana direcionado por mergulho (*dip-steered median filter* – DSMF) substitui o valor de amplitude de uma amostra pelo valor da mediana calculada a partir das amplitudes circundantes dentro de um subvolume especificado. O filtro de difusão direcionado por mergulho (*dip-steered diffusion filter* – DSDF) opera comparando segmentos vizinhos de dois traços sísmicos para identificar o menor grau de continuidade entre esses segmentos, que é interpretado como a menor similaridade. Os valores máximos de similaridade mínima são escolhidos dentro de uma janela de amostra definida pelo usuário. Esses valores indicam descontinuidades nos

dados, normalmente falhas e fraturas. Uma combinação desses filtros, o filtro de realce de falhas (*fault enhancement filter* – FEF) é baseado em uma relação condicional entre o DSMF e o DSDF, dado um valor limite especificado, que representa o grau de similaridade em uma amostra, com valores mais baixos indicando uma maior probabilidade de falhas ou fraturas. Portanto, o DSDF é usado para faixas abaixo do valor limite, mas o DSMF é usado para faixas acima do valor limite. O resultado primário desse filtro é um aprimoramento na representação de falhas, acompanhado por uma filtragem dos dados sísmicos, mantendo um nível substancial de confiabilidade, uma vez que tende a evitar a geração de artefatos.

O filtro de diferenciação centralizada vertical (Figura 2) foi aplicado no volume DSMF para melhorar a resolução vertical dos dados sísmicos, atenuar eventos incoerentes (independentemente da frequência) e melhorar a continuidade e a resolução dos refletores ao realçar eventos de alta frequência. Este filtro corresponde a uma aproximação da primeira derivada da amplitude em relação ao tempo calculada pelo método de diferenças finitas.

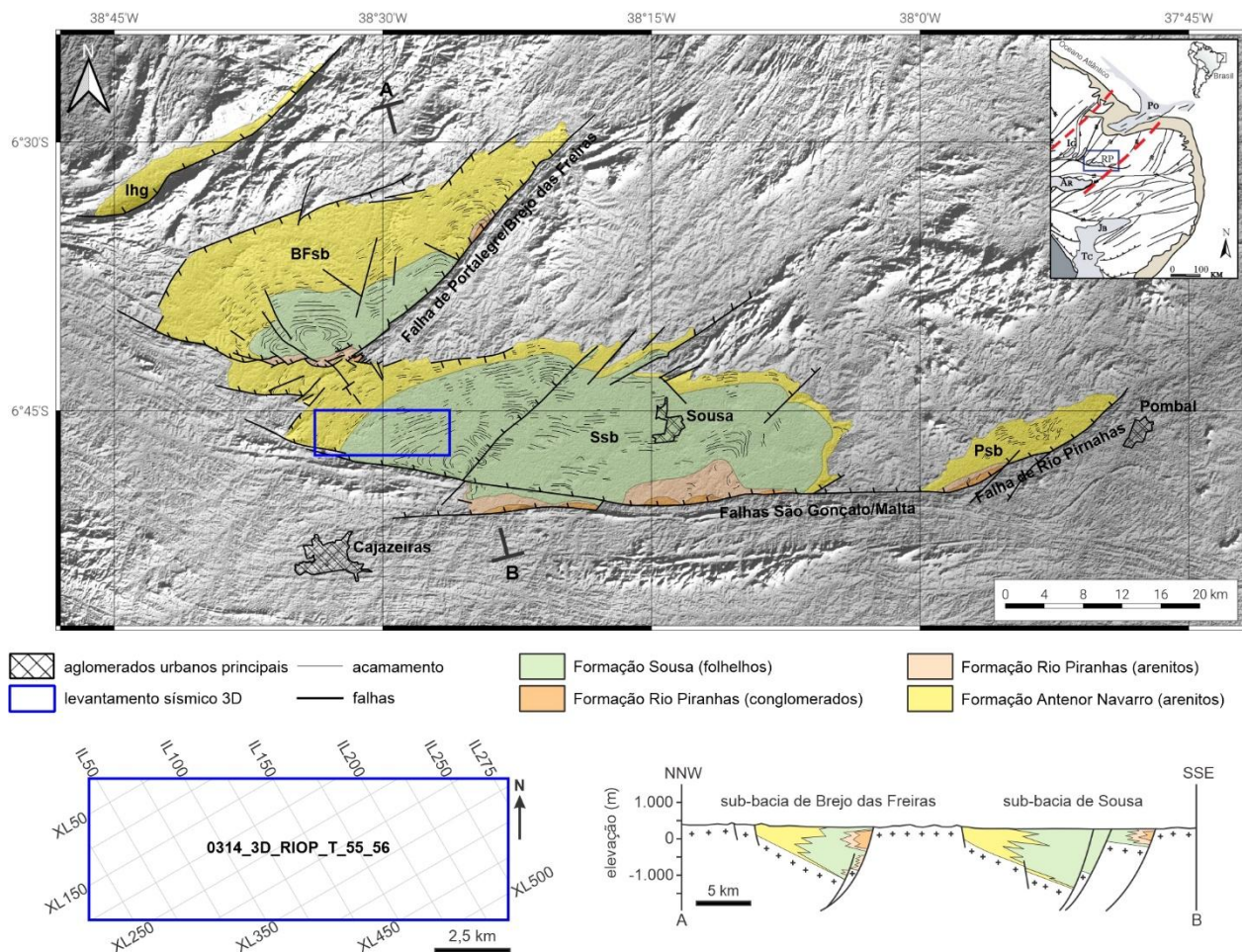


Figura 1 – Mapa geológico da Bacia do Rio do Peixe e suas sub-bacias sobreposto à imagem SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission).

Legenda: Ihg – semi-graben de Icozinho, BFSb – sub-bacia Brejo das Freiras, Sss – sub-bacia de Sousa, Psb – sub-bacia de Pombal. A seção transversal “A–B” atravessa os principais depocentros da bacia (BFSb e Sss) exibindo sua geometria de semi-graben, o preenchimento da bacia e a distribuição das unidades do Grupo Rio do Peixe.

Fonte: Compilado de Françolin (1992), Córdoba et al., (2008) e Rapozo, Córdoba e Antunes, (2021).

2.3. Aplicação de Atributos Sísmicos

Uma vez que os dados sísmicos foram condicionados, o estágio de análise de atributos sísmicos foi iniciado. O propósito primário da aplicação dos atributos é enfatizar estruturas geológicas, particularmente falhas e dobras. Apenas os atributos que produziram resultados úteis na pesquisa conduzida serão apresentados aqui.

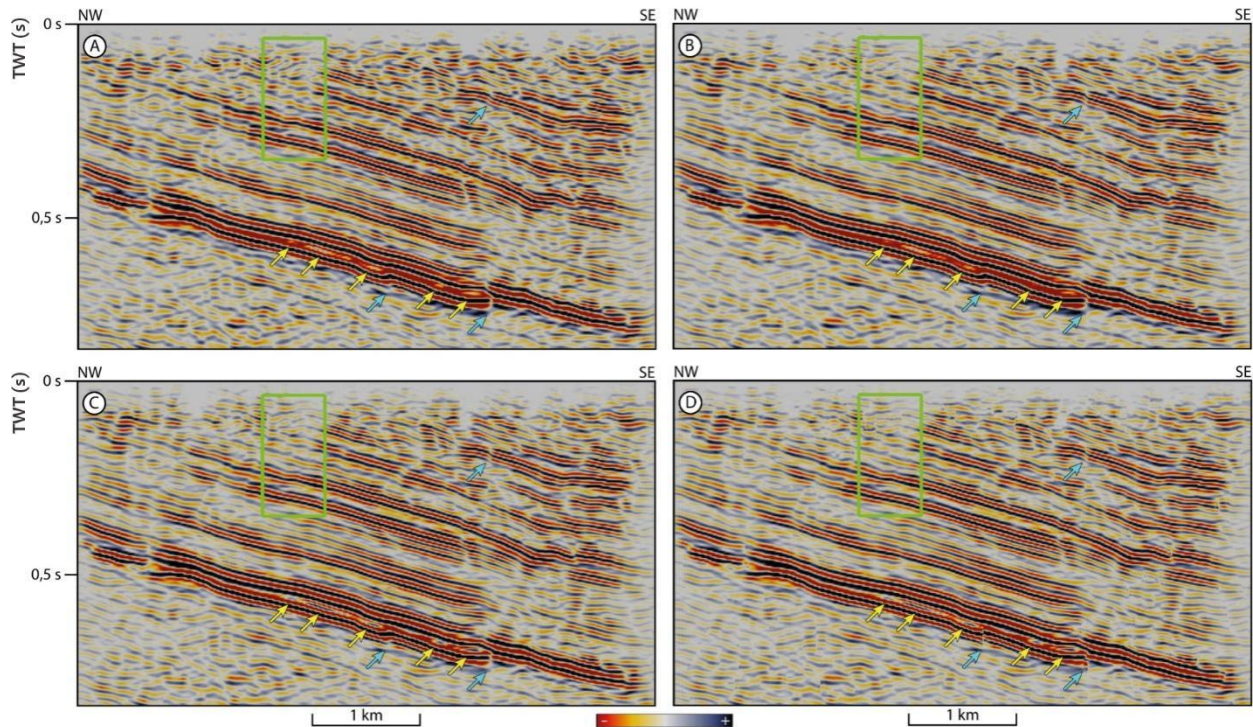


Figura 2 – Resultados do condicionamento de dados sísmicos: (A) volume sísmico original; (B) filtro mediana direcional por mergulho (DSMF) aplicado ao dado original; (C) filtro de diferenciação centralizado no dado com DSMF. (D) filtro de realce de falhas (FEF) resulta em resolução vertical aprimorada (setas amarelas). O polígono verde indica a área de atenuação de ruídos. As setas azuis denotam estruturas destacadas pelo filtro. Inline 142.

Fonte: Autores (2024).

2.3.1. Similaridade

O atributo de similaridade apresenta significativa relevância para a interpretação sismo-estrutural. Sua aplicação reside na avaliação do fator de coerência entre dois segmentos de traços sísmicos comparando suas formas de onda e amplitudes. Esse fator varia de 0 a 1, em que um valor de 1 indica similaridade completa entre as amostras e um valor de 0 indica dissimilaridade completa. O OpendTect fornece várias maneiras de utilizar o atributo de similaridade, com os dois métodos mais frequentemente empregados sendo “All Positions” e “Full Block”. A opção “All Positions” examina os traços em todas as posições concebíveis em relação ao traço inicial. Por outro lado, a opção “Full Block” foca em oito posições primárias ao redor da amostra central, cada uma posicionada em um ângulo de 45° uma da outra. O resultado dos dois métodos é bastante semelhante, com a única distinção sendo o tempo necessário de processamento para cada um. Assim, a seleção de “All Positions” foi baseada em seu processamento mais veloz. Quando esse atributo foi aplicado às *inlines*, produziu o destaque de descontinuidades no dado, mas não impactou a continuidade geral dessas feições. Portanto, é evidente que ele define os limites de seções defeituosas, mas não cria um plano de falha suficientemente ininterrupto. Alternativamente, a utilização de similaridade em fatias de tempo produziu um resultado altamente vantajoso (Figura 3). Dentro desses planos horizontais, o atributo aprimorou a detecção de descontinuidades que cruzam os refletores, ao mesmo tempo em que destacou feições que não eram aparentes em outros atributos.

2.3.2. Pseudorrelevo

O atributo pseudorrelevo, inicialmente chamado de tecVA (técnica volume de amplitudes) por Bulhões e Amorim (2005), é calculado aplicando-se a transformada de Hilbert, que rotaciona a fase dos dados em -90° , à amplitude RMS. O principal resultado da implementação desse atributo é a criação de um efeito tridimensional, em que o nível de visualização do relevo é diretamente proporcional ao contraste na impedância acústica naquela interface. Essa abordagem permite a identificação clara de níveis de alta energia e das descontinuidades dentro do volume, melhorando significativamente a interpretação de falhas e fraturas.

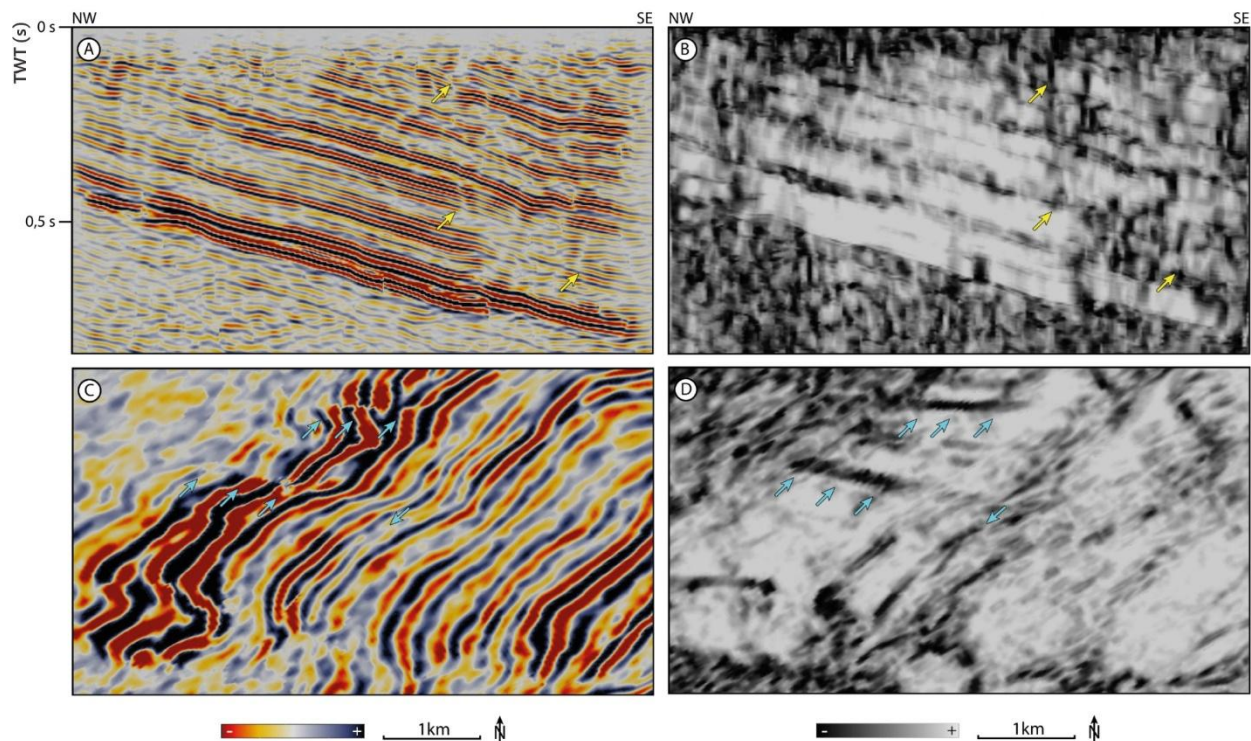


Figura 3 – Comparação de atributo de similaridade e filtro de realce de falhas (FEF): (A) e (B) comparação na inline 142; (C) e (D) comparação de fatias de tempo. As setas amarelas e azuis indicam feições estruturais e respostas de atributos.

Fonte: Autores (2024).

2.3.3. Probabilidade de Falhas (*Thinned Fault Likelihood*)

O atributo de probabilidade de falhas (Figura 4), referido como *thinned fault likelihood* (TFL) no OpendTect, é uma técnica de processamento que é projetada para visualizar estruturas frágeis presentes nos dados sísmicos. Quando atributos de coerência, como similaridade, são usados para analisar essas estruturas, elas geralmente apresentam uma forte assinatura de descontinuidade. Após identificar as zonas de baixa coerência, o *software* adiciona um filtro de atenuação restrito àquela área específica, o que ajuda a enfatizar uma falha ou fratura potencial presente naquele local. A aplicação do TFL aos dados sísmicos da Bacia do Rio do Peixe produziu ótimos resultados. O atributo foi particularmente notável por sua capacidade de visualizar descontinuidades em áreas com altos níveis de ruído. Nessas regiões, as descontinuidades destacadas apareceram como um padrão contínuo, particularmente quando visualizadas em *inlines* e *time-slices*. Uma desvantagem identificada foi a criação de traços de falhas não confiáveis, que foram encontrados tanto próximo à superfície como nas partes mais profundas do embasamento. É importante observar que a interpretação dessas estruturas exigiu validação cruzada entre os diferentes atributos calculados, para aumentar a confiabilidade dos planos de falha identificados.

2.3.4. Curvatura

Curvatura, no contexto da interpretação sísmica, refere-se à medição precisa do grau de fechamento de uma curva de um determinado refletor. O valor da curvatura é determinado medindo o desvio angular entre uma linha perpendicular ao plano que está sendo analisado e uma linha vertical. Outra característica crucial é a classificação da curva como positiva (curvaturas côncavas) ou negativa (curvaturas convexas), que é determinada pela convergência ou divergência de linhas normais vizinhas. A associação entre atributos de curvatura e a identificação de dobras é evidente. Curvaturas positivas são associadas a antiformes, enquanto curvaturas negativas são associadas a sinformes. Além disso, propriedades de curvatura máxima podem ser empregadas na análise de falhas, bem como outras discontinuidades estruturais. Neste estudo, a utilização do atributo de curvatura máxima produziu resultados favoráveis para detectar dobras e falhas (Figura 5).

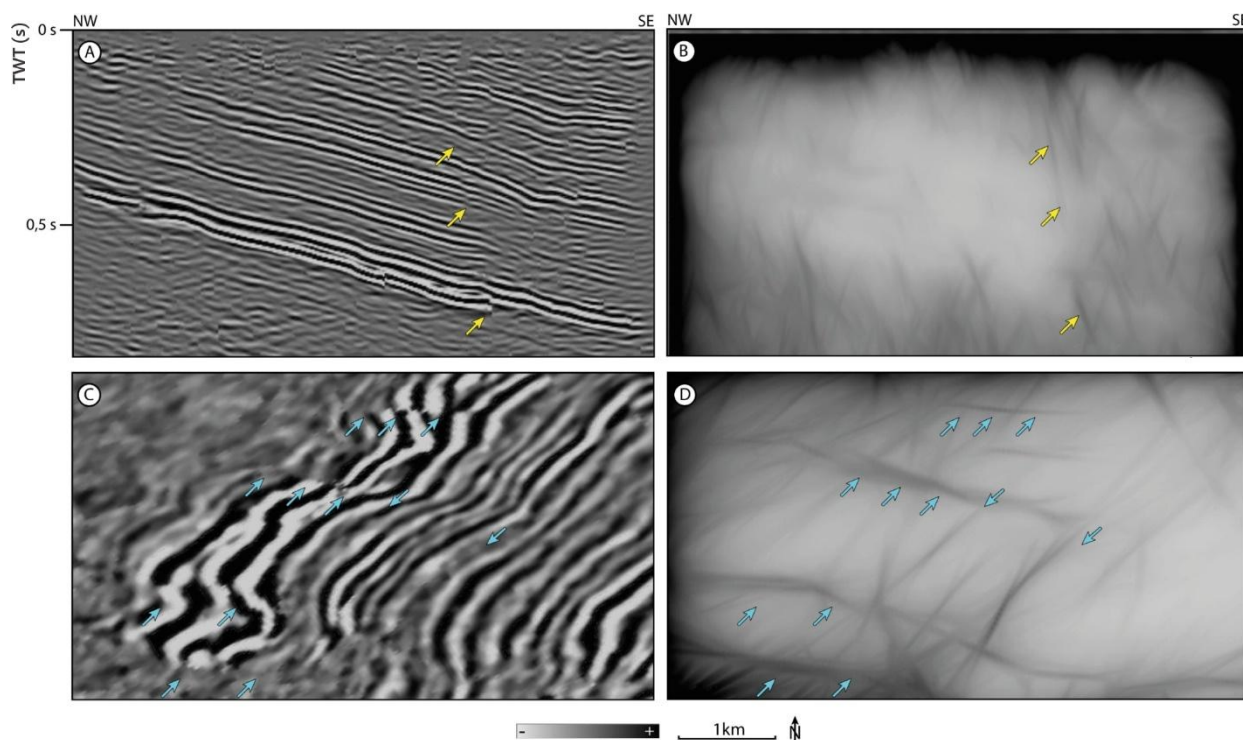


Figura 4 – Comparação entre os dados de amplitude com FEF e o atributo thinned fault likelihood (TFL): (A) e (B) comparação na inline 142; (C) e (D) comparação em fatias de tempo. As setas amarelas e azuis indicam feições estruturais e suas diferentes respostas para cada atributo.

Fonte: Autores (2024).

2.4. Interpretação Sismo-Estrutural

Quando ocorrem falhas, o processo de interpretação é semelhante à conversão de objetos de uma imagem em vetores. Neste cenário, a imagem se refere às *inlines* ou *crosslines*, enquanto o objeto representa a linha de falha. As falhas foram traçadas com precisão usando várias *inlines* e/ou *crosslines*. O *software* interpola essas linhas, resultando na geração de uma superfície de falha.

Quando se trata de dobras, um objeto tridimensional não é criado. No entanto, certas características fornecem informações sobre a curvatura dos refletores, que por sua vez enfatizam antiformes e sinformes.

A interpretação de horizontes envolve a criação de uma representação tridimensional de uma camada, permitindo uma visualização abrangente e destacando seu arranjo espacial. O *software* OpendTect permite a extração da superfície de forma semiautomatizada. Isso significa que o usuário pode traçar manualmente áreas específicas do refletor em que está interessado, em diferentes pontos ao longo das *inlines* e *crosslines*. Com base nessas informações, o *software* detecta segmentos comparáveis, preferencialmente localizados dentro do refletor, e estende a área da superfície. Posteriormente,

o intérprete tem a capacidade de incorporar pontos de correlação adicionais (sementes), ampliando assim a superfície ou completando quaisquer lacunas existentes.

O mecanismo de correlação é altamente responsivo a discontinuidades nos dados. Essa característica permite a delimitação indireta de falhas e fraturas.

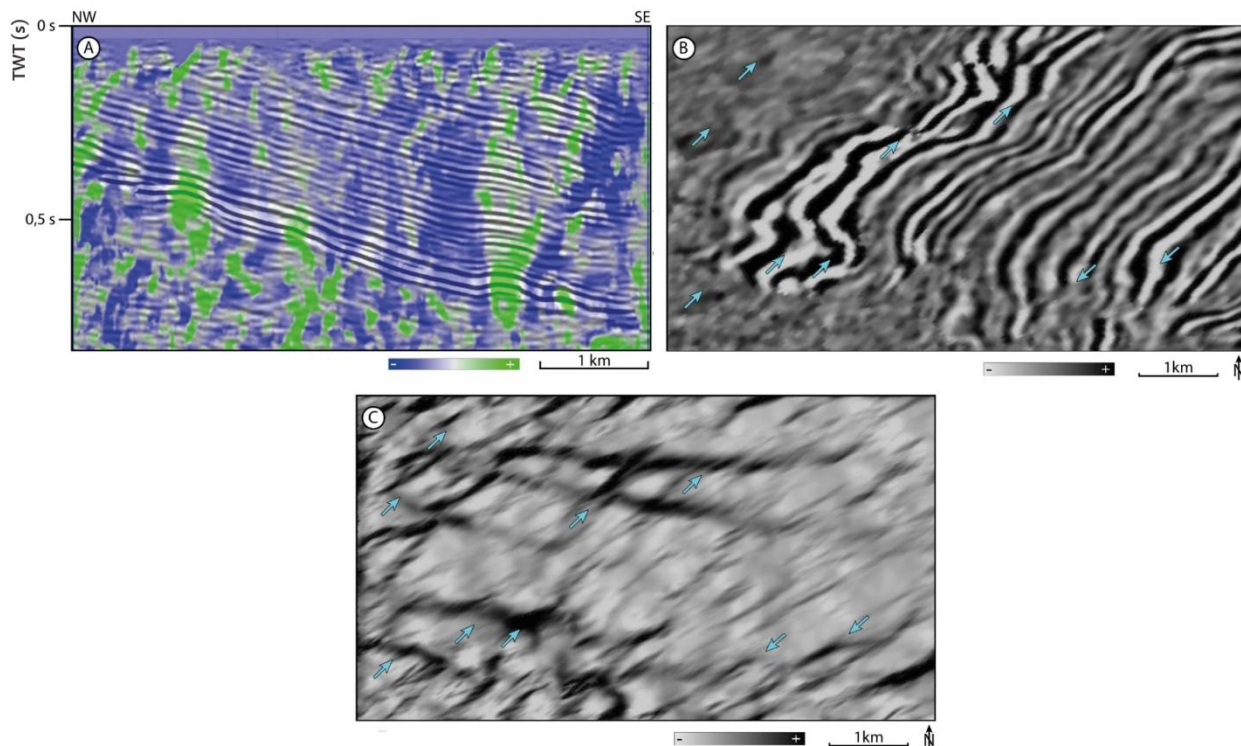


Figura 5 – Resultados da aplicação do atributo de curvatura: (A) atributo de curvatura na linha 142 sobreposto com transparência sobre dados de amplitude FEF. As zonas verdes correspondem a curvaturas positivas relacionadas a antiformes, enquanto as zonas azuis são curvaturas negativas relacionadas a sinformes; (B) fatia de tempo 360 com dados de amplitude FEF; (C) fatia de tempo 360 com atributo de curvatura. As estruturas e respostas de atributo são indicadas por setas azuis.

Fonte: Autores (2024).

3. Contexto Geológico Regional

A Bacia do Rio do Peixe (BRP) está situada ao norte da zona de cisalhamento Patos, de direção E-W, na intersecção com a zona de cisalhamento Portalegre, de direção NE. A bacia pertence a um conjunto de riftes abortados do Cretáceo Inferior conhecida como *trend* Cariri-Potiguar (MATOS, 1992). O *trend* Cariri-Potiguar contém bacias com geometria em *semi-graben*, cuja origem foi controlada por uma distensão horizontal NW-SE. Françaolin, Cobbold e Szatmari, (1994) estabelecem uma conexão entre a BRP e a reativação frágil de zonas de cisalhamento dúcteis pré-cambrianas.

A BRP consiste em três sub-bacias (Pombal, Sousa e Brejo das Freiras) dispostas em uma geometria *semi-graben* (Figura 1). As sub-bacias possuem configurações estruturais muito semelhantes, caracterizadas por uma margem falhada e uma flexural. A geometria e a cinemática desses depocentros são fortemente influenciadas pela estrutura do embasamento e as estruturas principais seguem as *trends* subjacentes do embasamento pré-cambriano (PICHEL et al., 2023; RAMOS et al., 2024).

3.1. O Embasamento Pré-Cambriano

O embasamento da BRP está situado em meio aos domínios Jaguaribeano e Rio Piranhas-Seridó, que são segmentos proeminentes da Província Borborema. O Domínio Jaguaribeano está situado a oeste da zona de cisalhamento Portalegre e compreende principalmente biotita-gnaisses bandados, frequentemente apresentando migmatização, pertencentes ao Complexo Jaguaretama (SÁ *et al.*, 2013), recobertos por uma sequência metavulcanossedimentar (Grupo Serra de São José), que consiste em xistos de biotita e paragnaisses com intercalações de anfíbolito (CHAGAS, SOUZA e MOREIRA, 2018). O Domínio Rio Piranhas-Seridó é limitado a leste pela zona de cisalhamento Picuí-João Câmara e a oeste pelo Domínio Jaguaribeano. É constituído por rochas metamórficas de alto grau, paleoproterozoicas, do Complexo Caicó (гнаisses bandados, *augen* gnaisses e ortognaisses) (COSTA, 2015) e pelas rochas metavulcanossedimentares do Grupo Seridó, datadas do Neoproterozoico. O Domínio Rio Piranhas-Seridó é caracterizado por dois eventos plutônicos significativos: o primeiro, datado do Stateriano, envolve a intrusão da Suíte Poço da Cruz nas rochas do Complexo Caicó; o segundo, ocorrendo durante o Ediacarano-Cambriano, envolve a intrusão de material plutônico tanto no Complexo Caicó quanto no Grupo Seridó.

3.2. O Preenchimento Sedimentar Fanerozoico

O preenchimento sedimentar da BRP é composto por um remanescente de uma sequência de sinéclise devoniana (Grupo Santa Helena), sobre a qual repousa uma sequência sinrife do Cretáceo Inferior (Grupo Rio do Peixe).

O Grupo Santa Helena foi proposto por Silva *et al.*, (2014) e compreende as formações Pilões, na base, e Triunfo, no topo. A Formação Pilões é essencialmente composta por uma sequência de argilitos e siltitos, localmente laminados, com arenitos quartzosos a arcoseanos subordinados. Por sua vez, a Formação Triunfo é composta principalmente por arenitos de granulação grossa a conglomeráticos, eventualmente calcíferos, com intercalações locais de siltitos e argilitos (SILVA, CÓRDOBA e CALDAS, 2014; SILVA, 2014).

A sequência principal da BRP, o Grupo Rio do Peixe, é dividida em três unidades cronocorrelatas. A Formação Antenor Navarro é composta por arenitos de granulação grossa a conglomeráticos, intercalados localmente com conglomerados e brechas, todos depositados em sistemas fluviais entrelaçados associados a um sistema fluvial distributário (LIMA FILHO 1991, 2002; CÓRDOBA *et al.*, 2008; SILVA, 2009; SILVA, 2014). A Formação Sousa, por sua vez, é composta principalmente por siltitos e folhelhos, depositados por rios meandrantés em um lago, com intercalações subordinadas de arenitos de granulação fina (LIMA FILHO 1991, 2002; CÓRDOBA *et al.*, 2008; SILVA, 2009; SILVA, 2014). Por fim, a Formação Rio Piranhas aflora ao longo das margens falhadas da BRP e é composta principalmente por conglomerados e brechas, além de arenitos de granulação grossa a conglomeráticos (LIMA FILHO 1991, 2002; CÓRDOBA *et al.*, 2008; SILVA, 2009; SILVA, 2014).

4. Resultados

4.1. Identificação e Realce de Falhas e Dobras

Dentre os atributos calculados, foram observadas respostas muito diferentes dependendo do objeto no qual o atributo é implementado. Assim, para a visualização de falhas em *inlines* e *crosslines*, as melhores respostas foram obtidas utilizando os atributos FEF, pseudorrelevo e TFL (Figura 6). Por outro lado, no caso de fatias de tempo, os atributos curvatura e similaridade apresentaram melhores resultados, com o FEF ocasionalmente utilizado.

A melhor visualização das falhas permitiu uma interpretação mais precisa dessas estruturas, resultando no mapeamento de 19 superfícies de falhas (Figura 6), referentes às estruturas de escala e continuidade razoáveis. Predominantemente, essas falhas apresentam perfil lítrico em seções verticais e direção principal WSW-ENE. A maioria dos mergulhos tende para o quadrante SE, porém, uma parcela considerável das superfícies mergulha para NW.

As interpretações realizadas a partir das fatias de tempo não apresentaram bons resultados quanto à caracterização das superfícies de falhas. Entretanto, diversas estruturas puderam ser mapeadas com o auxílio dos atributos já mencionados (Figura 7). Essa abordagem resultou em um conjunto de dados mais amplo (Figura 7) que, além de estar em linha com as superfícies de falhas mapeadas, também possibilitou a coleta de informações em zonas mais complexas do volume sísmico.

O uso do atributo FEF revelou separações direcionais consideráveis. Esse efeito, observado nas fatias de tempo, pode ser interpretado como um resultado visual dos deslocamentos normais de falhas atuando sobre os refletores inclinados. Tal interpretação, no entanto, não exclui a possibilidade de rejeito direcional subordinado para essas estruturas. Uma possível interpretação, assumindo que esses regimes cinemáticos coexistem, é dada na Figura 7. Nessa hipótese, falhas em direções

próximas a E-W (predominantes no volume) apresentariam cinemática sinistral, enquanto cinemática dextral seria mais frequente em falhas na direção NW-SE.

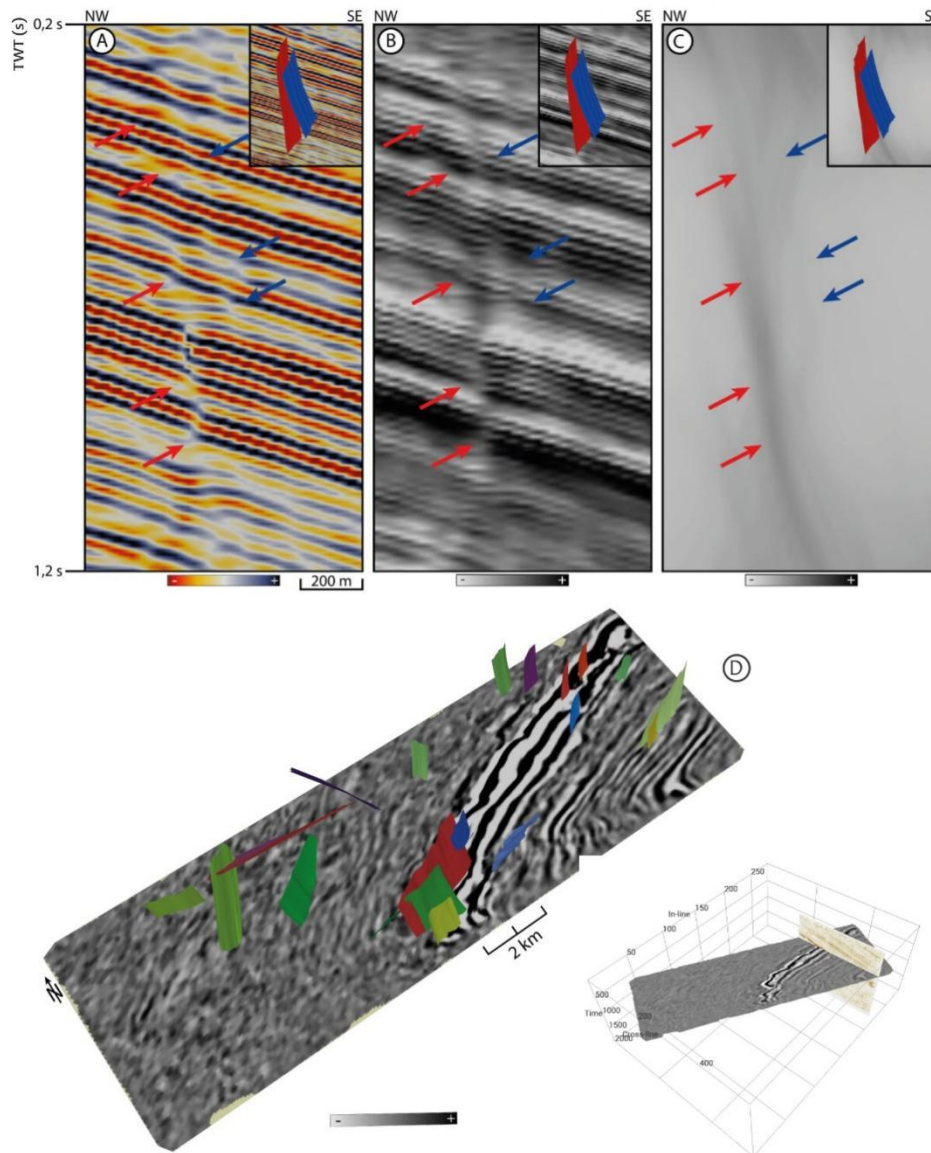


Figura 6 – Detalhes do inline 221 exemplificando a aplicação de atributos para realce e mapeamento subsequente de estruturas, e vista em perspectiva do posicionamento geral dos planos de falha interpretados: (A) atributo FEF; (B) atributo pseudorrelevo; (C) atributo TFL; (D) superfícies de falha interpretadas em vista oblíqua. Setas vermelhas e azuis indicam as expressões das respectivas falhas nas imagens. Recortes em perspectiva dos planos mapeados são mostrados nos cantos superiores direitos de (A), (B) e (C).

Fonte: Autores (2024).

Dessa forma, é possível delimitar um grupo de estruturas sintéticas à falha de borda (falha de São Gonçalo) e outro grupo de estruturas antitéticas. Entretanto, algumas inconsistências podem ser notadas, sugerindo a influência de outras macroestruturas no controle estrutural da área. Nesse contexto, é possível identificar falhas cujo arranjo se assemelha a estruturas em flor negativa (Figura 8), embora deva ser considerado o forte exagero vertical das seções. Quanto às falhas reversas, tais estruturas não são incomuns e podem ser observadas principalmente nas linhas transversais do volume

sísmico (Figura 8). Entretanto, essas estruturas apresentam continuidade reduzida, dificultando a caracterização completa de sua geometria. Além disso, pode-se observar a ocorrência dessas falhas conjugadas (Figura 8), algumas vezes com geometria muito semelhante a *pop-ups*. Os planos de falha associados a essas estruturas apresentam, em sua maioria, direção aproximada NW-SE e valores de mergulho médios a baixos; entretanto, estruturas NE-SW também ocorrem.

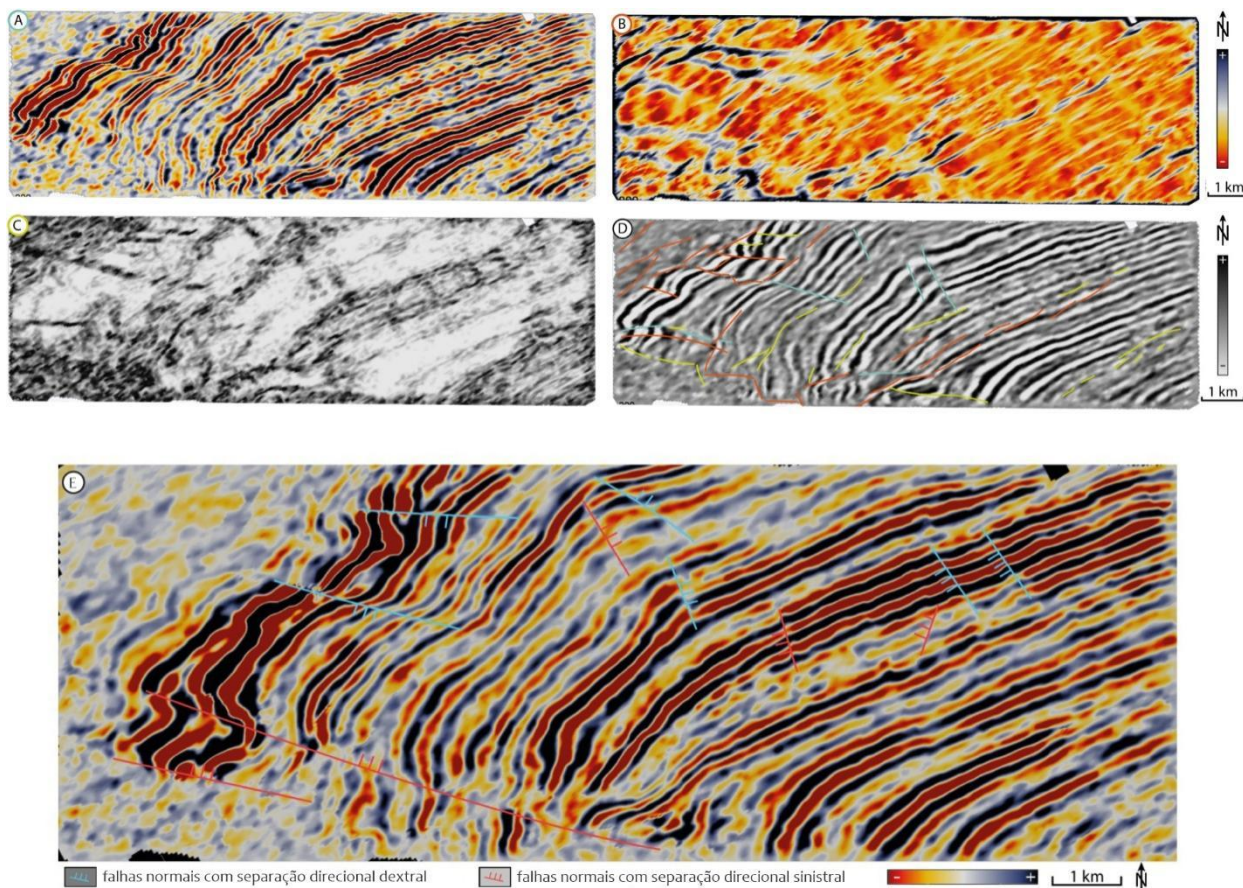


Figura 7 – Aplicação de diferentes atributos visualizados em fatias de tempo: (A) atributo FEF; (B) atributo curvatura com operador mais positivo; (C) atributo similaridade com operador mínimo; (D) resultado da interpretação da seção, com cores de traços relativos a cada atributo, sobrepostas ao atributo FEF em tons de cinza; (E) interpretação de falhas normais com separações direcionais identificadas em fatias de tempo com atributo FEF. (A), (B), (C) e (D) são vistas da fatia de tempo 296; (E) é uma vista da fatia de tempo 360.

Fonte: Autores (2024).

Um número limitado de dobras foi identificado nos dados sísmicos. Em geral, essas estruturas foram descritas a partir de seções de amplitude (Figura 9); no entanto, o atributo curvatura se mostrou eficaz na delimitação dessas feições (Figura 9). A análise qualitativa das estruturas em questão revelou uma orientação predominante das superfícies axiais na direção E-W, geralmente mergulhando fortemente para o norte ou, ocasionalmente, subvertical. Comumente, essas dobras apresentam um perfil suave, bem como linhas de charneira sub-horizontais. Outra ocorrência de dobras ocorre na forma de pequenos monoclinais (Figura 9), bastante comuns no volume.

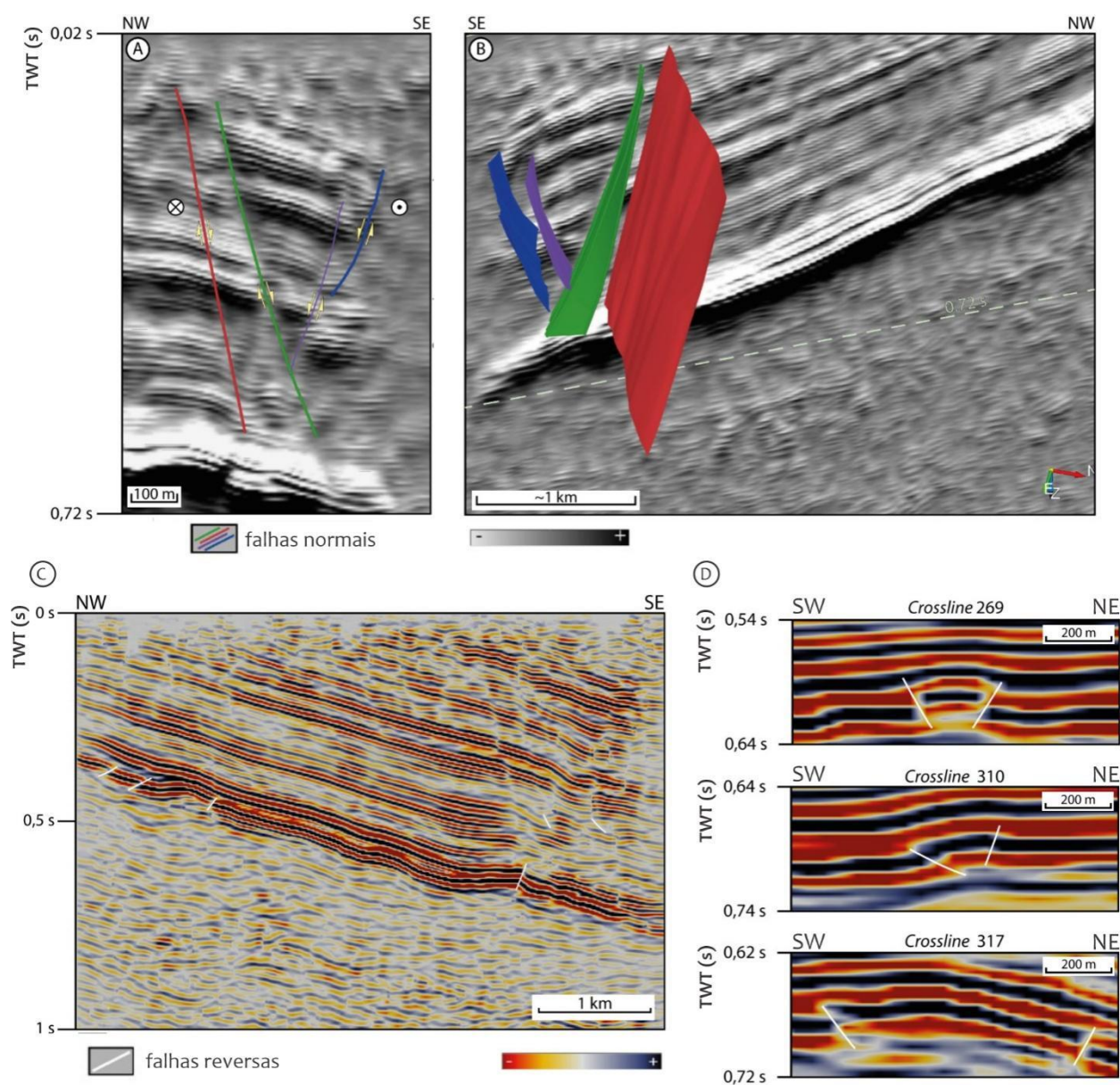


Figura 8 – (A) Detalhe da inline 122 com falhas normais e comportamento cinemático geral interpretados; (B) vista em perspectiva da inline 119, revelando o arranjo espacial dos planos de falha modelados; (C) inline 191 com dados de amplitude, evidenciando uma série de falhas reversas ocorrendo próximo ao embasamento acústico da bacia; (D) detalhe das crosslines mostrando a ocorrência de falhas reversas conjugadas. Planos de falha com direção aproximada NW-SE. Note a ocorrência de dobras suaves associadas aos refletores afetados. (A) e (B) apresentam os dados sísmicos com o atributo pseudorrelevo aplicado; (C) e (D) são seções com o atributo FEF aplicado.

Fonte: Autores (2024).

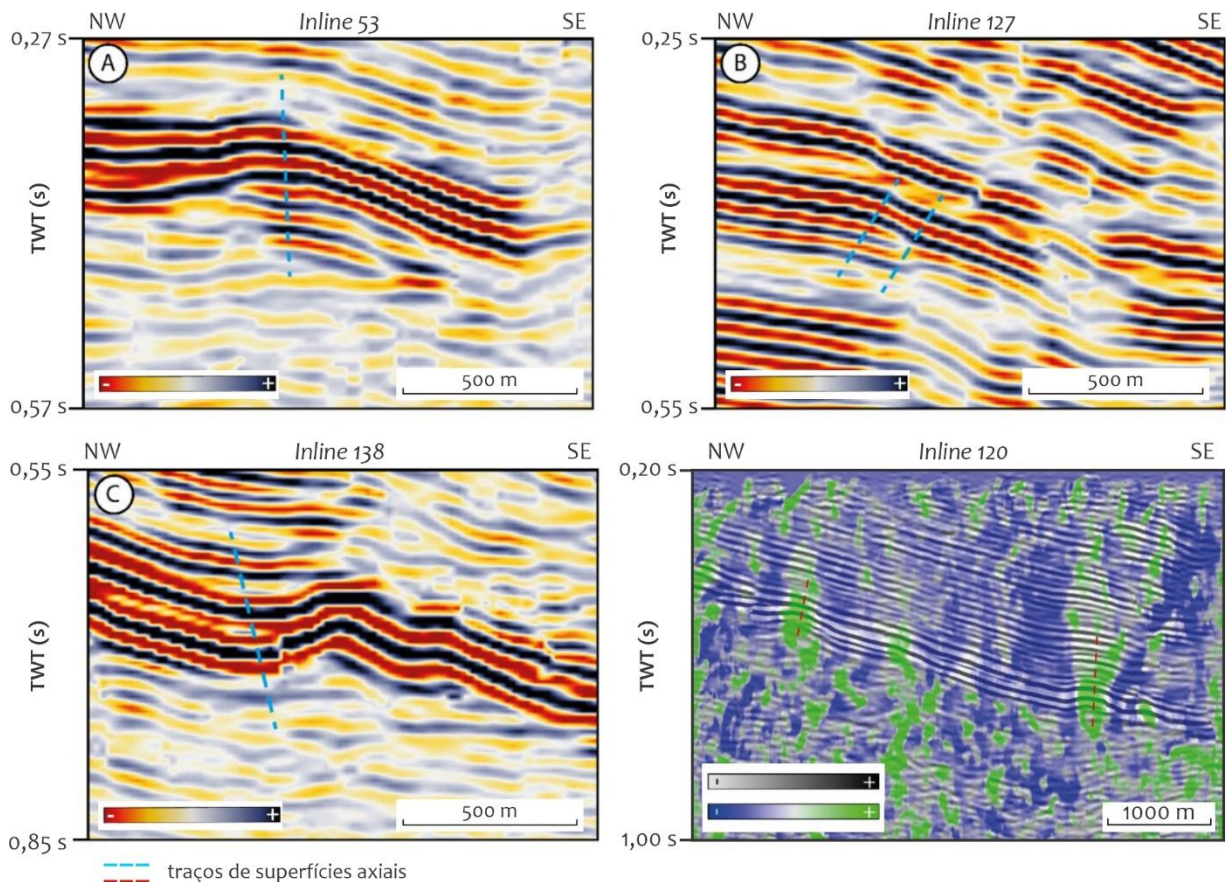


Figura 9 – Seções sísmicas com foco na ocorrência de dobras: (A) detalhe da inline 53 mostrando dobra suave com traço axial subvertical; (B) detalhe da inline 127 mostrando uma série de monoclinais, causadas por falhas normais; (C) detalhe da inline 139 destacando uma dobra causada por propagação de falha. (A), (B) e (C) são seções com o atributo FEF aplicado. (D) detalhe da inline 120 com atributo curvatura sobreposto, com transparência, sobre os dados sísmicos com o atributo FEF aplicado. As áreas verdes referem-se às curvaturas positivas dos refletores, indicando antiformes, enquanto as azuis referem-se às curvaturas negativas, relacionadas a sinformes. Trends podem ser observados na imagem, delineando os traços axiais das respectivas dobras.

Fonte: Autores (2024).

Uma relação genética entre as dobras e o desenvolvimento das falhas da bacia também pode ser notada. O movimento dos blocos falhados induz a flexão dos refletores, caracterizando as estruturas como dobras de propagação de falhas. Em casos menos comuns, tais dobras são afetadas por falhas reversas, como as falhas na Figura 8, sugerindo uma acomodação subsequente sob regimes compressivos.

4.2. Mapeamento de Horizontes Sísmicos

Foram mapeados cinco refletores sísmicos (Figura 10), um dos quais está relacionado ao embasamento acústico da BRP na área estudada. Os outros refletores se destacam como eventos de alta amplitude. Essas superfícies são extremamente importantes para a análise estratigráfica da BRP, mas no presente caso, correlações geológicas mais profundas não puderam ser estabelecidas, uma vez que não há poços estratigráficos na área.

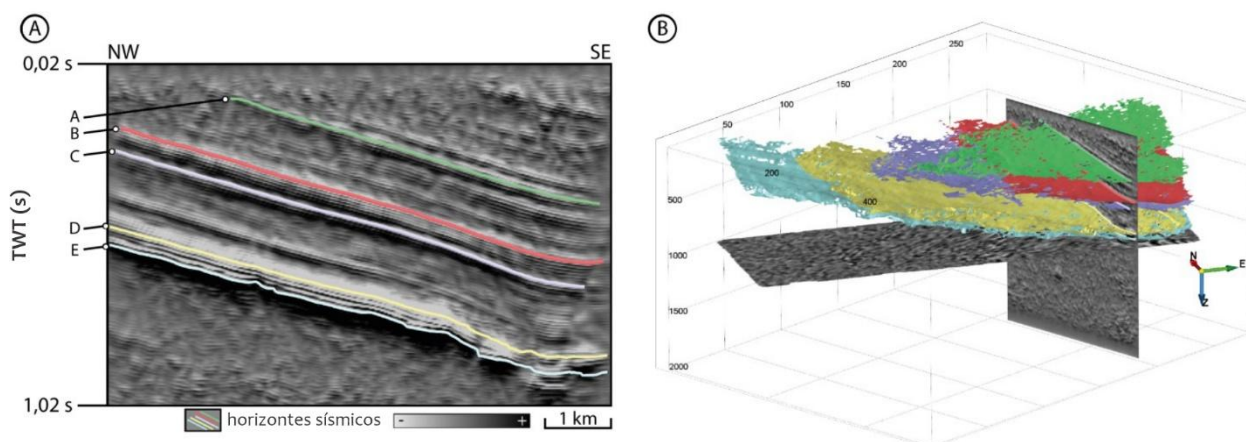


Figura 10 – (A) Representação dos refletores mapeados na inline 204. O horizonte E marca o embasamento acústico da bacia, enquanto os sobrejacentes (D, C, B e A) estão relacionados a refletores intra-rifte de alta energia; (B) arranjo geral dos horizontes interpretados. Como elementos comparativos, são mostrados a inline 204 e a fatia de tempo 1008. Ambas as seções com o atributo pseudorelievo aplicado.

Fonte: Autores (2024).

O *software* utilizado também permite a extração de atributos dos horizontes gerados. No contexto apresentado, as discontinuidades contidas nos dados, que são representadas como lacunas nos horizontes interpretados, podem ser validadas como feições estruturais a partir da aplicação dos atributos. Essa abordagem contribui para uma interpretação sísmicoestrutural mais completa e confiável dos dados sísmicos.

A partir da análise das variações temporais sísmicas dos horizontes mapeados (Figura 10), pode-se observar que eles geralmente mergulham para SE, em direção à falha de São Gonçalo. Esse comportamento é esperado para um semi-*graben* e sugere a existência de um importante depocentro nesse entorno.

Outro ponto importante dessa análise diz respeito à identificação de discontinuidades ao longo dos horizontes mapeados. A partir da aplicação dos atributos FEF e curvatura, é possível notar uma estruturação mais importante dos horizontes basais no volume sísmico, que concentram estruturas mais contínuas. No caso dos horizontes mais superficiais, é possível identificar tendências estruturais mais sutis.

O horizonte E (Figura 11), relacionado ao embasamento acústico da área, apresentou informações mais relevantes. A interface mapeada tem um mergulho geral para SE, com os maiores valores de tempo sísmico localizados próximos à falha de borda, como esperado para um semi-*graben*. A superfície gerada apresenta quatro discontinuidades principais, com tendência aproximadamente E-W e levemente sinuosas, denotadas tanto pelos hiatos quanto pelos atributos. Essas feições referem-se a falhas enraizadas no embasamento, com direção congruente com estruturas mais antigas, como a zona de cisalhamento Patos. A relação descrita sugere o aproveitamento dessas estruturas por deformações mais jovens na bacia, com possíveis reativações. Na interpretação apresentada na Figura 11, é possível notar, ao longo da borda sul, relações de truncamento entre as estruturas mapeadas. Nesse caso, segmentos de falha com direção E-W são conectados por segmentos NE-SW, precisamente no contexto da falha de borda do semi-*graben*. A interação apresentada indica uma possível forma de *hard-linkage* entre os segmentos de falha, com a falha NE-SW sendo uma falha de transferência dentro desse contexto.

5. Discussões

Com base nos resultados apresentados, é possível associar as estruturas identificadas a dois campos de deformação distintos (Figura 12). O primeiro pode ser caracterizado por distensão horizontal NW-SE e compressão vertical (Figura 12A), causando principalmente a formação de falhas de rejeito oblíquo, com componente principal de rejeito normal (com direções E-W a WNW-ESE), configurando o arcabouço estrutural da BRP. O mais jovem pode ser inferido, em particular, a partir de estruturas de menor escala, porém bastante diferente do primeiro campo de deformação sugerido. Exemplos dessas estruturas são dobras compressivas (isto é, não geradas pelo arrasto de falhas normais) com charneiras NE-SW, que ocorrem juntamente com falhas reversas com direção NW-SE. A ocorrência descrita nos permite inferir um campo de deformação cuja orientação do eixo compressivo pode ser aproximada como NE-SW, com distensão vertical (Figura 12B).

Essa linha de pensamento pode ser ainda complementada associando essa inversão de eixos aos contextos geotectônicos globais, dada a concordância da compressão mais recente com as tensões relacionadas à expansão da Dorsal Mesoatlântica, com base no que foi proposto por Assumpção et al., (2016).

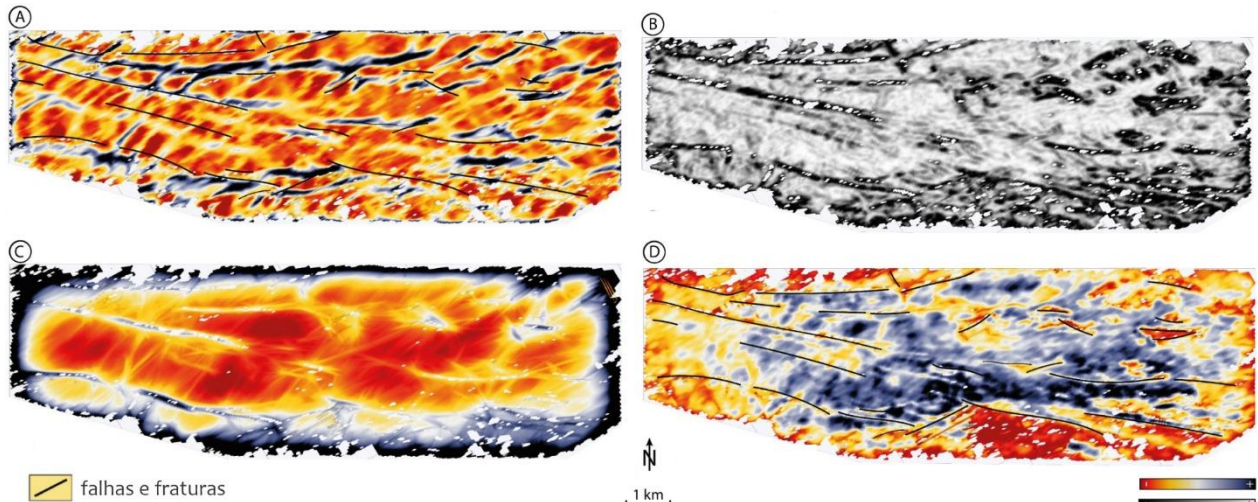


Figura 11 – Horizonte E em perspectiva de mapa com atributos de visualização estrutural aplicados: (A) atributo curvatura; (B) atributo similaridade mínima; (C) atributo TFL; (D) FEF com efeito de transparência.

Fonte: Autores (2024).

Ademais, a hipótese levantada quanto ao condicionamento exercido pelo embasamento na estruturação, fortemente corroborada pela interpretação do horizonte E, está em consonância com os pontos levantados por Araujo et al., (2018).

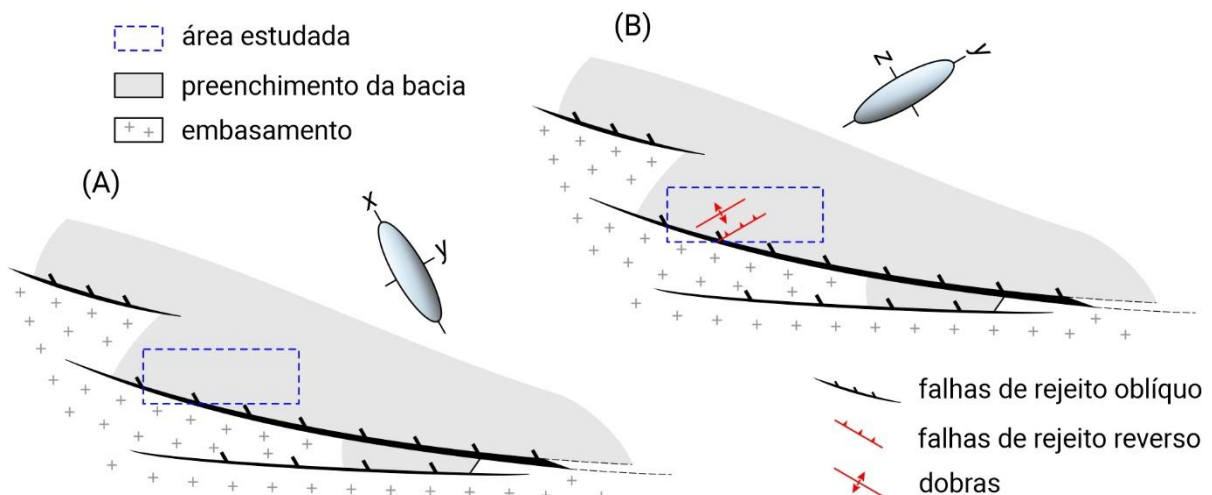


Figura 12 – Modelo cinemático proposto para a área estudada: (A) contexto cinemático relacionado ao primeiro estágio de deformação, caracterizado por distensão NW-SE (x) e compressão vertical; (B) contexto cinemático relacionado ao segundo estágio de deformação, definido pela compressão NW-SE (z) e distensão vertical. x, y e z referem-se aos eixos principais do elipsoide de deformação finita.

Fonte: Autores (2024).

Outro aspecto relevante da caracterização estrutural realizada pode ser abordado sob a ótica da geologia do petróleo, dada a existência de um sistema petrolífero na Bacia do Rio do Peixe, indicado pela ocorrência de óleo em poços de água.

Assim, o entendimento estrutural é crucial para delimitar áreas propensas à acumulação de hidrocarbonetos, como charneiras antiformes, bem como para entender o fluxo dentro do sistema, com base em falhas.

Fossen e Rotevatn (2016) relatam um comportamento ascendente de fluidos ao longo de falhas interligadas por estruturas de revezamento, um efeito do condicionamento do fluxo pela verticalização das estruturas. Na pesquisa, essas relações estruturais foram identificadas ao longo da margem da falha, permitindo deduzir que esse padrão de fluxo é esperado na margem sul da Bacia do Rio do Peixe.

6. Considerações Finais

Em relação ao arcabouço estrutural da área, a interpretação inicial dos dados sísmicos definiu uma estrutura semi-*graben*, evidenciada principalmente pelo mergulho dos refletores para SE, em direção à borda falhada, em linha com os resultados obtidos em trabalhos anteriores, mas com abordagens mais regionais (FRANÇOLIN, 1992; CÓRDOBA et al., 2008; SILVA, 2009; PICHEL *et al.*, 2023). Esse mergulho característico dos refletores é mais bem definido nos horizontes mapeados, que indicam uma zona com maiores tempos de reflexão próximo à falha de São Gonçalo, sugerindo a ocorrência de um importante depocentro e indicando deslocamentos de falhas mais importantes.

Ressalta-se que o arcabouço estrutural observado neste estudo é um reflexo da geometria semi-*graben* característica da sub-bacia do Sousa, controlada pela margem falhada que limita sua borda sul. O limite supracitado é caracterizado pela ocorrência de falhas com direção E-W para ESE-WNW, claramente visíveis ao longo das fatias de tempo, às vezes conectadas por estruturas NE-SW (possivelmente falhas de transferência).

Há predominância de falhas E-W com rejeito normal, que apresentam separações direcionais consideráveis, mas que não confirmam de forma confiável a ação de um rejeito direcional relevante. As falhas reversas interpretadas podem ser distinguidas em dois grupos: um com direção NW-SE e o outro NE-SW. O primeiro grupo apresenta estreita relação com dobras geradas por compressão, sugestivas da ação de um mecanismo de *buckling*, causado por compressões NE-SW. Por outro lado, nem todas as dobras interpretadas são geradas por compressão. A maioria dessas estruturas é originada por propagação de falhas, caracterizando o mecanismo geral como flambagem (*bending*).

A interpretação com base nos horizontes sísmicos e fatias de tempo mapeados permitiu a identificação de feições importantes. Dentre elas, destaca-se uma série de estruturas NE-SW localizadas no extremo NW da área de estudo. Essas estruturas podem ser entendidas como resultantes da influência do alto estrutural de Santa Helena.

A partir do horizonte E, foi possível definir tendências estruturais importantes ao longo da interface bacia/embasamento, consistentes com a estruturação da bacia. Essa interpretação nos permite traçar correlações entre as estruturas do embasamento e as falhas da bacia, corroborando uma hipótese sobre a reativação de estruturas dúcteis em regimes rúpteis posteriores.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Petrobras pelo financiamento da pesquisa (por meio da concessão de bolsa de iniciação científica) e pelo fornecimento de dados sísmicos. Os autores também gostariam de agradecer à dGB Earth Sciences por fornecer licenças acadêmicas para *plugins* comerciais do *software* OpendTect.

Referências

- ARAUJO, R. E.; BEZERRA, F. H.; NOGUEIRA, F. C.; BALSAMO, F.; CARVALHO, B. R.; SOUZA, J. A.; SANGLARD, J. C.; CASTRO, D. L. de; MELO, A. C. Basement control on fault formation and deformation band damage zone evolution in the Rio do Peixe Basin, Brazil. Edição: Elsevier. *Tectonophysics*, v. 745, p. 117–131, 2018.
- ASSUMPÇÃO, M.; DIAS, F. L.; ZEVALLOS, I.; NALIBOFF, J. B. Intraplate stress field in South America from earthquake focal mechanisms. Edição: Elsevier. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 71, p. 278–295, 2016.
- BROUWER F.; HUCK A. An integrated workflow to optimize discontinuity attributes for the imaging of faults. In: *Attributes: New Views on Seismic Imaging—Their Use in Exploration and Production*. Edição: K. J. Marfurt. Houston/Texas: SEPM Society for Sedimentary Geology, 2011. v. 31.
- BROWN A. R. Interpretation of Three-Dimensional Seismic Data. 7th. Tulsa/Oklahoma: Society of Exploration Geophysicists e American Association of Petroleum Geologists, 2011. v. 42, 646p.

- BULHÕES E. M.; AMORIM W. N. Princípio da sismocamada elementar e sua aplicação à técnica volume de amplitudes (tecVA). In: 9TH INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY. Proceedings of the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Salvador/BA: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2005.
- CASTRO D. L.; OLIVEIRA D. C.; BRANCO R. M. G. C. On the tectonics of the Neocomian Rio do Peixe rift basin, NE Brazil: Lessons from gravity, magnetics, and radiometric data. Edição: Elsevier. Journal of South American Earth Sciences, v. 24, n. 2-4, p. 184–202, 2007.
- CHAGAS C. F.; SOUZA Z. S.; MOREIRA J. A. M. Auréola termal provocada pela intrusão do plutão Totoró em micaxistos do Grupo Seridó, Ediacarano da Província Borborema, NE do Brasil. Edição: USP. Geologia USP. Série Científica, v. 18, n. 3, p. 117–139, 2018.
- CÓRDOBA, V. C.; ANTUNES, A. F.; JARDIM DE SÁ, E. F.; SILVA, A. N.; SOUSA, D.; LIRA LINS, F. A. Análise estratigráfica e estrutural da Bacia do Rio do Peixe, Nordeste do Brasil: integração de dados a partir do levantamento sísmico pioneiro 0295_RIO_DO_PEIXE_2D. Edição: Petrobras. Boletim de Geociências da Petrobras, v. 16, n. 1, p. 53–68, 2008.
- COSTA A. P. D. Petrologia e geocronologia U-Pb do plúton granítico Serra da Rajada, porção central do domínio Rio Piranhas-Seridó, Província Borborema, NE do Brasil. 2015. f. 62. 62 f. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN.
- FOSSEN H.; ROTEVATN A. Fault linkage and relay structures in extensional settings – a review. Edição: Elsevier. Earth-Science Reviews, v. 154, p. 14–28, 2016.
- FRANÇOLIN J. B. L. Analyse structurale du bassin du Rio do Peixe. 1992. f. 240. 240 f. Tese (Doutorado) – Centre Armorican d’Etude Structurale des Socles, Université de Rennes I, Rennes.
- FRANÇOLIN J. B. L.; COBBOLD P.; SZATMARI P. Faulting in the Early Cretaceous Rio do Peixe basin (NE Brazil) and its significance for the opening of the Atlantic. Edição: Elsevier. Journal of Structural Geology, v. 16, n. 5, p. 647–661, 1994.
- LIMA FILHO M. F. Evolução tectono-sedimentar da Bacia do Rio do Peixe - PB. 1991. f. 99. 99 f. Diss. (Mestrado) – Departamento de geologia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE.
- LIMA FILHO M. F. Mapa faciológico da Bacia do Rio do Peixe, Estado da Paraíba. In: VI SIMPÓSIO SOBRE O CRETÁCEO DO BRASIL. Boletim do VI Simpósio sobre o Cretáceo do Brasil. São Pedro/SP: [s. n.], 2002. v. 6, p. 103–106.
- MATOS R. M. D. The Northeast Brazilian Rift System. Edição: Wiley. Tectonics, v. 11, n. 4, p. 766–791, 1992.
- MEDEIROS V. C. Geologia e recursos minerais da Folha Sousa SB.24-ZA, Escala 1:250.000. Brasília/DF, 2008. p. 312. 312 p.
- ODOH B. I.; ILECHUKWU J. N.; OKOLI N. I. The Use of Seismic Attributes to Enhance Fault Interpretation of OT Field, Niger Delta. Edição: Scientific Research. International Journal of Geosciences, v. 5, n. 8, p. 826, 2014.
- PICHEL, L. M.; ANTUNES, A. F.; FOSSEN, H.; RAPOZO, B. F.; FINCH, E.; CÓRDOBA, V. C. The interplay between basement fabric, rifting, syn-rift folding, and inversion in the Rio do Peixe Basin, NE Brazil. Edição: Wiley. Basin Research, v. 35, p. 61–85, 2023.
- RAMOS, G. V.; CASTRO, D. L.; VASCONCELOS, D. L.; NOGUEIRA, F. C. C.; BEZERRA, F. H. R.; NICCHIO, M. A. Architectural Rift Geometry of the Rio do Peixe Basin (Brazil): Implications for Its Tectonic Evolution and Precambrian Heritage. Edição: Elsevier. Tectonophysics, v. 871, p. 230173, 2024.

-
- RAPOZO B. F.; CÓRDOBA V. C.; ANTUNES A. F. Tectono-stratigraphic evolution of a cretaceous intracontinental rift: Example from Rio do Peixe Basin, north-eastern Brazil. Edição: Elsevier. *Marine and Petroleum Geology*, v. 126, p. 104899, 2021.
- SÁ, J. M.; GALINDO, A. C.; LEGRAND, J. M.; SOUZA, L.; MAIA, A.; COSTA, L. Dados isotópicos U-Pb e Sm-Nd em granitos ediacaranos no oeste do Rio Grande do Norte. In: XXV SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE. Atas do XXV Simpósio de Geologia do Nordeste. Gravatá/PE: Sociedade Brasileira de Geologia, 2013.
- SILVA A. N. Arquitetura litofácies e evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Rio do Peixe Nordeste do Brasil. 2009. f. 106. 106 f. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN.
- SILVA J. G. F. Análise estratigráfica de subsuperfície do Devoniano Inferior da Bacia do Rio do Peixe, Nordeste do Brasil. 2014. f. 194. 194 f. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN.
- SILVA J. G. F.; CÓRDOBA V. C.; CALDAS L. H. O. Proposta de novas unidades litoestratigráficas para o Devoniano da Bacia do Rio do Peixe, Nordeste do Brasil. Edição: Sociedade Brasileira de Geologia. *Brazilian Journal of Geology*, v. 44, n. 4, p. 561–578, 2014.