

## Análise tectonossedimentar das fases início de rifte e clímax de rifte da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil

### *Tectono-sedimentary analysis of rift initiation and rift climax stages of the Araripe Basin, Northeast Brazil*

Gelson Luís Fambrini<sup>1</sup> , Wellington Ferreira da Silva-Filho<sup>2</sup> , Diógenes Ribeiro de Lemos<sup>3</sup>, Diego da Cunha Silvestre<sup>4</sup>, Jadson Trajano de Araújo<sup>5</sup>, José Acioli Bezerra de Menezes-Filho<sup>3</sup>, Sidney Tesser Junior<sup>6</sup>, Virginio Henrique de Miranda Lopes Neumann<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Departamento de Geologia, Centro de Tecnologia e Geociências, Avenida Acadêmico Hélio Ramos, s/n., sala 510, Cidade Universitária, CEP: 50740-530, Recife, PE, BR (g\_fambrini@yahoo.com, neumann@ufpe.br)

<sup>2</sup>Universidade Federal do Ceará - UFC, Departamento de Geologia, Fortaleza, CE, BR (welfer@ufc.br)

<sup>3</sup>Mineração Caraíba S/A, Distrito de Pilar, Jaguarari, BA, BR (diogenesribeiro@hotmail.com)

<sup>4</sup>Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Programa de Pós-Graduação em Geociências - PPGGeoc, Centro de Tecnologia e Geociências, Recife, PE, BR (diiegocs@hotmail.com)

<sup>5</sup>Petróleo Brasileiro S/A, Petrobras/Exploração e Produção, Unidade de Negócios de Exploração e Produção do Rio Grande do Norte/Ceará, Natal, RN, BR (jadsonaraujo@petrobras.com.br)

<sup>6</sup>Weatherford Brasil, Imboacica, Macaé, RJ, BR (sidtesser@yahoo.com.br)

Recebido em 24 de setembro de 2018; aceito em 12 de junho de 2019

### Resumo

Este trabalho objetivou a caracterização tectonossedimentar das fases início de rifte e clímax de rifte da Bacia do Araripe. As principais estruturas identificadas foram falhas normais, transcorrentes e inversas em ordem de importância. Esse grupo de falhas coloca lateralmente diferentes unidades litoestratigráficas como rochas de unidades início de rifte e clímax de rifte. Exemplo é o contato lateral das formações Missão Velho e Brejo Santo ao longo de falhas normais NNE. É de grande importância a integração entre análise geométrica e cinemática dessas falhas com a evolução estratigráfica para uma evolução global da evolução geológica da Bacia do Araripe. Principais afloramentos de campo utilizados neste trabalho consistem em exposições formadas durante as obras de construção da ferrovia Transnordestina e da transposição do Rio São Francisco. A análise tectônica realizada para este trabalho identificou dois conjuntos principais de falhas: falhas orientadas segundo a direção NE-SW (mais antigas) e falhas orientadas na direção NW-SE e WNW-ESE (mais jovens). Além disso, foram também analisadas falhas transcorrentes e inversas. A tectônica rifte que afetou a Bacia do Araripe (extensional) reativou falhas antigas do embasamento Pré-Cambriano e, por sua vez, forneceu falhas normais de direção NE-SW e também gerou falhas de orientação E-W e NW-SE.

**Palavras-chave:** Bacia do Araripe; Tectônica sedimentar; Início de rifte; Clímax de rifte; Falhas.

### Abstract

This paper described the tectonic-sedimentary infilling that occurred during the rift initiation and rift climax stages of Araripe Basin. The main structures identified were, in order of importance, normal, strike-slip and reverse faults. This group of faults laterally places different lithostratigraphic units such as rift initiation and rift climax rocks. An example is the lateral contact of Missão Velho and Brejo Santo formations along normal NNE faults. The integration between geometric and kinematic analysis of these faults with the stratigraphic evolution is of great importance for an overall evolution of the geological evolution of Araripe Basin. Main field outcrops used in this work consist of exhibitions formed during the construction of the Transnordestina railway and the transposition of São Francisco River. Tectonic analysis performed for this work identified two main sets of faults: faults oriented toward NE-SW direction (older ones), and faults oriented toward NW-SE and WNW-ESE direction (younger ones). Additionally, strike-slip and reverse faults were also analyzed. The rift tectonics that affected Araripe Basin (extensional) reactivated old faults of the Pre-Cambrian basement and, in turn, provided normal NE-SW direction fault and also generated E-W and NW-SE orientation faults.

**Keywords:** Araripe basin; Sedimentary tectonics; Rift initiation; Rift climax; Faults.

## INTRODUÇÃO

As bacias interiores do Nordeste do Brasil (Figura 1) têm recebido maior atenção por conta de relatos de exsudações de petróleo na Bacia Rio do Peixe. Esses indícios motivaram a inclusão de blocos dessa bacia nos leilões de blocos exploratórios promovidos pela Agência Nacional do Petróleo (ANP). No entanto, trabalhos com enfoque tectônico são poucos e sem coleta sistemática de dados cinemáticos (*e.g.*, Ponte e Ponte-Filho, 1996a, 1996b; Camacho e Sousa, 2017; Miranda, 2015).

A associação com grandes zonas de cisalhamento do Pré-Cambriano, notadamente as zonas de Cisalhamento de Patos e de Pernambuco, caracteriza estruturalmente essas bacias (Figura 1). Entre essas duas zonas de cisalhamento destacam-se diversas pequenas bacias e uma maior e mais importante, a Bacia do Araripe, que guardam entre si similaridades quanto à origem e à evolução geológica (Figura 2). Ponte (1992) identificou três sequências tectonoestratigráficas: início de rifte, clímax de rifte e pós-rifte. Neste trabalho, essas fases tectônicas estão sendo, respectivamente, denominadas início de rifte e clímax de rifte (*sensu* Fambrini et al., 2010a, 2011b, 2017).

A Bacia do Araripe (Figura 2) é a maior das chamadas Bacias Interiores do Nordeste do Brasil, cuja área de ocorrência perfaz um total de aproximadamente 9.000 km<sup>2</sup>. A coluna estratigráfica da bacia engloba desde depósitos do Mesopaleozoico até o Mesozoico (Neocretáceo) (Assine, 1992; Neumann et al., 2000). A evolução mesozoica da Bacia do Araripe relaciona-se com os eventos tectônicos que resultaram na ruptura e na fragmentação do Supercontinente Gondwana e na abertura do Oceano Atlântico Sul (Cesero e Ponte, 1997; Asmus e Ponte, 1973; Ponte e Asmus, 1978; Garcia, 1991; Matos, 1992, 1999; Ponte e Ponte-Filho, 1996a, 1996b; Assine, 2007; Fambrini et al., 2007, 2008, 2009a, 2009b, 2011a, 2011b, 2013, 2017, 2019), e seu preenchimento posterior durante o Mesozoico (Petri, 1987). As tectono-sequências pré-rifte e rifte (*e.g.*, Ponte e Asmus, 1978), aqui redefinidas como início de rifte e clímax de rifte, respectivamente, constituem-se em formidável registro tectono-sedimentar da tectônica rifte que afetou essas bacias no Mesozoico, particularmente a Bacia do Araripe. As unidades sedimentares dessas sequências encontram-se preservadas nas sub-bacias do Cariri (aflorante) e de Serrolândia (sub-superfície), que são estruturadas por falhas principalmente de rejeitos normais e separadas pelo Alto de Dom Leme (Figura 3). As camadas sedimentares das fases paleozoica, início de rifte e clímax de rifte encontram-se comumente basculadas por tectônica de blocos, geralmente observáveis nas faixas de afloramentos ao longo do Vale do Cariri, bem como em seções sísmicas.

De acordo com Brito-Neves (1990), as denominadas bacias interiores do Nordeste, das quais a Bacia do Araripe se destaca, acham-se dispostas nos *trends* NE-SW a E-W,

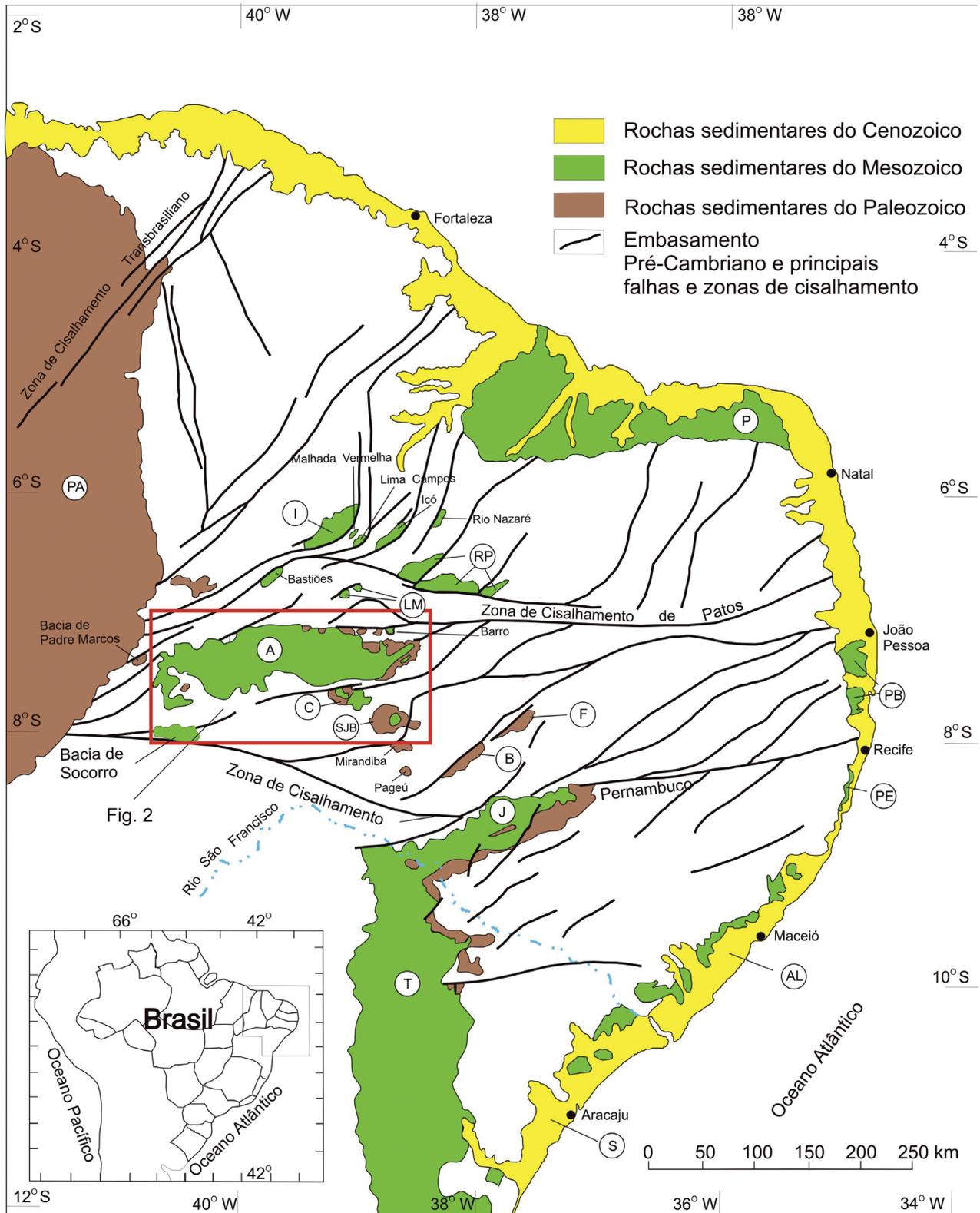
que coincidem com descontinuidades do Pré-Cambriano. Esse fato sugere o aproveitamento dessas estruturas para a instalação e o desenvolvimento das bacias ou, nas palavras do autor, “o estigma de herança tectônica das estruturas do embasamento por todos os estágios evolutivos” (Brito-Neves, 1990, p. 22). Isso fica comprovado pela concordância das direções principais dos falhamentos da bacia com descontinuidades do embasamento (Ponte, 1996; Ponte e Ponte-Filho, 1996a). No entanto, tais estruturas não haviam sido descritas e estudadas em detalhe até o momento, sequer a relação com a evolução estratigráfica da Bacia do Araripe havia sido apresentada em detalhe em artigos completos. Desse modo, este trabalho busca mostrar a integração entre a análise estrutural e a evolução estratigráfica das fases início de rifte e clímax de rifte da Bacia do Araripe, por meio das excelentes exposições propiciadas pela construção da Ferrovia Transnordestina e da obra de transposição do Rio São Francisco. O trabalho reveste-se de maior importância e originalidade em razão da cobertura de grama e/ou concreto da maior parte dos afloramentos aqui ilustrados, impedindo a comunidade geológica de obter acesso e visualização atualmente.

Como exemplo, destacam-se falhas normais com componente direcional associadas aos limites entre grabens e *horsts* que apresentam rejeitos aparentes de grande deslocamento, capazes de justapor rochas de diferentes níveis estratigráficos.

A caracterização geológica de reservatórios petrolíferos análogos tem sido um dos principais enfoques dos estudos tectonoestratigráficos realizados em bacias sedimentares. Desse modo, a distinção do sistema petrolífero das fases início de rifte e clímax de rifte da Bacia do Araripe, por meio de análises estratigráficas, sedimentológicas, estruturais, geométricas e cinemáticas, foi implementada como forma de contribuir para o fomento exploratório da Bacia do Araripe, considerada uma bacia de fronteira. A possibilidade de se correlacionar tais fenômenos com processos análogos de outras bacias sedimentares brasileiras é outro enfoque deste trabalho. O estudo detalhado dessas estruturas e sua relação com possíveis armadilhas de hidrocarbonetos foi o objetivo deste trabalho.

## CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

A Bacia do Araripe situa-se sobre terrenos pré-cambrianos da Zona Transversal da Província Borborema (Brito-Neves et al., 2000; Santos et al., 2004), ao sul da Zona de Cisalhamento de Patos (ZCP) (Figura 1). A Bacia do Araripe está localizada a oeste do Domínio Central ou Zona Transversal, no Terreno Piancó-Alto Brígida, que constitui uma unidade geotectônica que se estende por 200 km desde a cidade de Ouricuri, Pernambuco, até Piancó, Paraíba, com direção NE-SW (Santos et al., 2004).



A: Araripe; AL: Alagoas; B: Betânia; C: Cedro; F: Fátima; I: Iguatu; J: Jatobá; LM: Lavras da Mangabeira; P: Potiguar; PA: Parnaíba; PB: Paraíba; PE: Pernambuco; RP: Rio do Peixe; S: Sergipe; SJB: São José do Belmonte; T: Tucano.

Fonte: Fambrini et al. (2011b, 2013, 2017).

**Figura 1.** Esquema das bacias fanerozoicas da região Nordeste do Brasil com destaque para a Bacia do Araripe (modificada de Assine, 1992).

Os eventos tectônicos que resultaram no rompimento do Supercontinente Gondwana e na abertura do Oceano Atlântico Sul culminaram com a formação de depressões estruturais e seu preenchimento durante o Mesozoico (Petri, 1987). Um exemplo dessas transformações importantes pode ser encontrado na Bacia do Araripe, no Nordeste do Brasil. Esses eventos envolvem a presença de quatro principais seqüências tectônicas (Figura 3), recentemente redefinidas (Fambrini et al., 2010a, 2010b, 2010c, 2011b, 2017, 2019) com base na proposta de Prosser (1993):

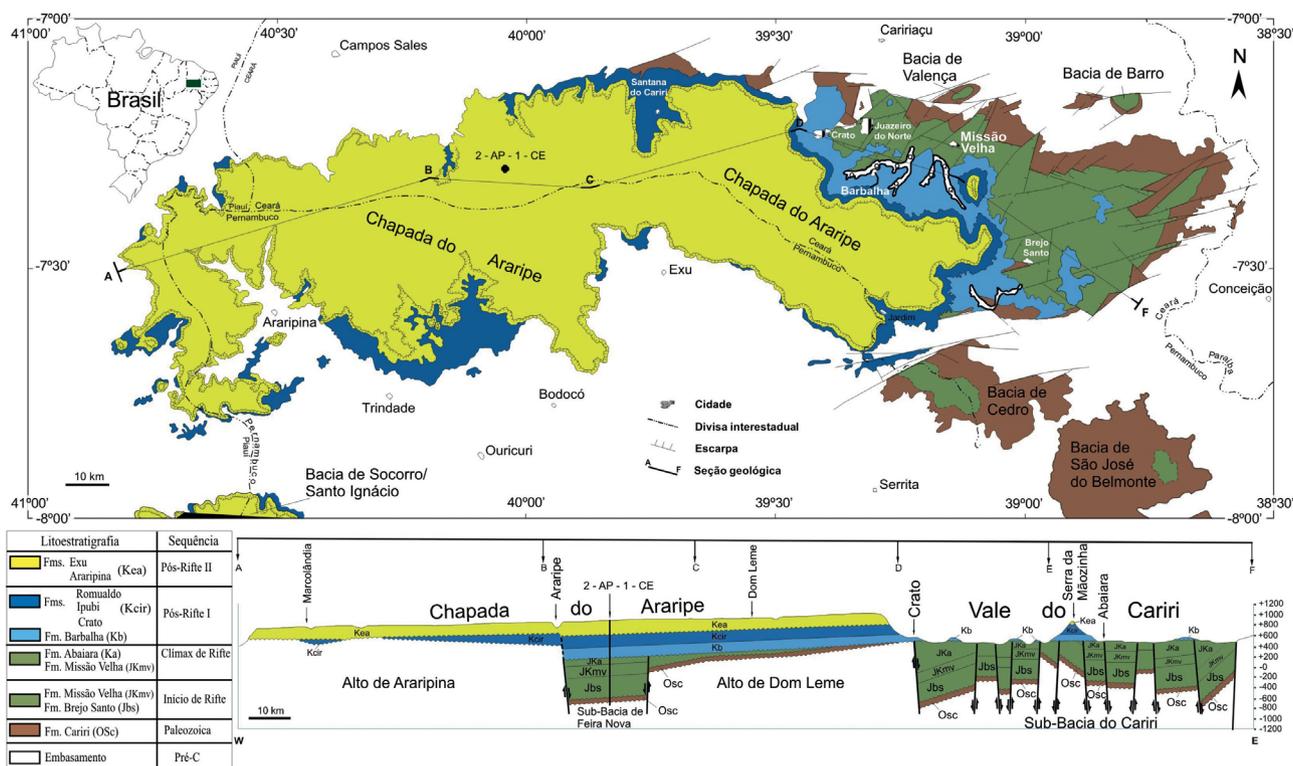
1. seqüência Paleozoica, formada apenas pela Formação Cariri;
2. seqüência Início de Rifte (*Rift Initiation*), composta da Formação Brejo Santo e da porção basal da Formação Missão Velha (Neojurássico?);
3. seqüência Clímax de Rifte (*Rift Climax*), formada pela parte superior da Formação Missão Velha e pela totalidade da Formação Abaiara (Neocomiano);
4. seqüência Pós-Rifte (*Post Rift*), separada em duas seqüências pós-rifte, de acordo com Assine (2007) e Araujo et al. (2008).

A seqüência pós-rifte I (Aptiano-Albiano) é constituída das formações Barbalha, Crato, Ipubi, Romualdo e Araripina

(Fambrini et al., 2015, 2017, 2019), enquanto a seqüência pós-rifte II (Cenomaniano) caracteriza-se exclusivamente pela Formação Exu. Uma das características mais significativas desses eventos é o desenvolvimento de longa e estreita bacia denominada de Depressão Afro-Brasileira, iniciada durante o Neojurássico (Cesero e Ponte, 1997; Kúchle et al., 2011; Fambrini et al., 2017).

A seqüência Início de Rifte (Neojurássico para início do Cretáceo, Andar Dom João) compreende toda a Formação Brejo Santo e a porção basal da Formação Missão Velha, discordantemente disposta sobre a Formação Cariri. A Formação Brejo Santo compõe-se de camadas de folhelhos e argilitos vermelho a vermelho-tijolo, com intercalações decimétricas de arenitos médios e lâminas de calcários argilosos muito ricos em restos de ostracodes, às vezes formando bancos decimétricos de puro ostracodito (Assine, 1992, 2007; Fambrini et al., 2011a). A porção basal da Formação Missão Velha exibe camadas de arenitos médios a finos com estratificações cruzadas tabulares e intercalações heterolíticas decimétricas com laminações cruzadas cavalgantes.

O Andar Dom João é individualizado pela ostracofauna típica da biozona NRT-001 que, na Bacia do Araripe, caracteriza-se pela associação de espécies *Theriosynocum pricei*, *Darwinula cf. oblonga* e *Darwinula leguminella* Jones, 1885



Kea: Cretáceo Formação Exu e Formação Araripina; Kcir: Cretáceo Formações Crato, Ipubi e Romualdo; Kb: Cretáceo Formação Barbalha; Ka: Cretáceo Formação Abaiara; JKmv: Jurássico Cretáceo Formação Missão Velha; Jbs: Jurássico Formação Brejo Santo; Osc: Ordoviciano Siluriano Formação Cariri.

**Figura 2.** Mapa geológico da Bacia do Araripe e seção ENE-WSW (modificada de Assine, 2007).

(Braun, 1966; Coimbra et al., 2002; Arai, 2006; Assine, 2007; Barros et al., 2011; Fambrini et al., 2013; Melo e Carvalho, 2017). As paleocorrentes revelaram um padrão constante de dispersão para SE e SW (Medeiros et al., 1997; Fambrini et al., 2011a, 2011b; K uchle et al., 2011).

A Sequência Clímax de Rifte (Neocomiano) envolve a parte superior da Forma o Missão Velha (conglomerados e arenitos grossos fluviais) e a Forma o Abaiara (folhelhos e siltitos lacustres com arenitos finos lenticulares com estratifica o cruzada tabular fluviais). A Sequência Clímax de Rifte mostra uma desconformidade intraformacional na Forma o Missão Velha, onde conglomerados de seixos areníticos com estratifica o cruzada acanalada e tabular encontram-se dispostos diretamente por contato erosivo sobre arenitos finos estratificados (Fambrini et al., 2011a, 2011b, 2017). Esses conglomerados passam lateralmente e verticalmente para arenitos conglomeráticos amalgamados grossos com estratifica o cruzada acanalada e tabular de média escala contendo abundantes troncos silicificados e madeira f ssil do g nero *Dadoxilum benderii*, que

alcançam até 1,60 m de comprimento na parte superior da Forma o Missão Velha.

De acordo com Fambrini et al. (2011b), proposta seguida neste trabalho, a Forma o Abaiara compreende, na base, folhelhos silticos avermelhados a arroxeados, laminados, e siltitos variegados bem laminados, com intercala es de camadas decimétricas, lateralmente descontínuas, de arenitos finos lenticulares, mostrando estratifica o cruzada tabular e lâminas de calcários argilosos. Na parte superior, intercalados com folhelhos silticos esverdeados, ocorrem lentes de escala métrica de conglomerados e arenitos quartzosos conglomeráticos com estratifica o cruzada acanalada. A unidade culmina com arenitos médios a finos, decimétricos, com estratifica o cruzada tabular e estruturas convolutas comuns, formadas por deforma o penecontempor nea.

Dados de paleocorrentes revelam padrão de dispersão amplo. Esses dados indicam que a Forma o Missão Velha cont m uma desconformidade importante interpretada como o início da fase Clímax de Rifte, em vez de início

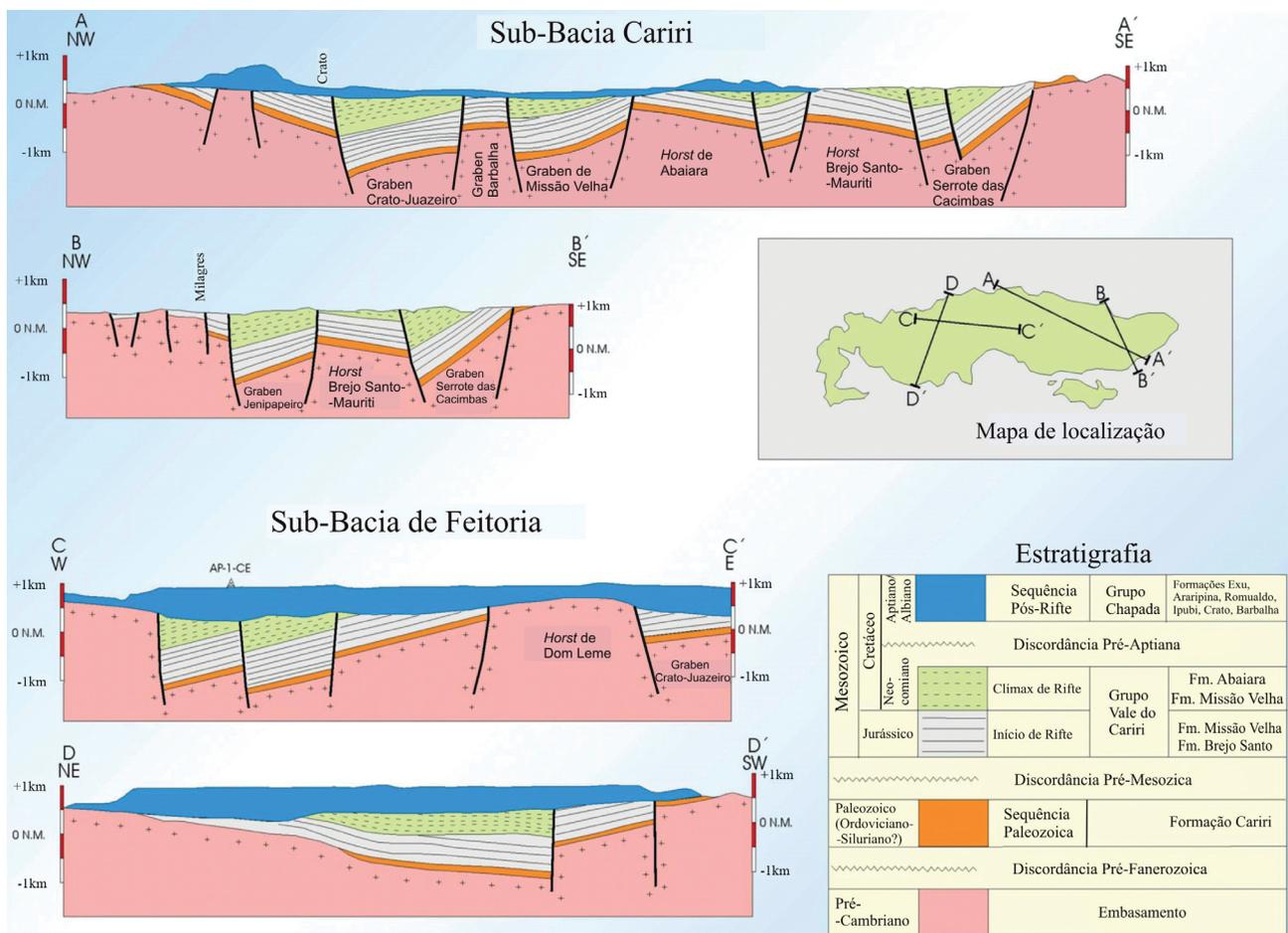


Figura 3. Se es geológicas da Bacia do Araripe com base em linhas sísmicas (modificada de Ponte, 1996).

anteriormente postulado na Formação Abaiara, conforme sugerido por Ponte e Ponte-Filho (1996a, 1996b).

Dados gravimétricos e magnetométricos (Rand e Manso, 1984) permitiram a divisão da Bacia do Araripe em duas sub-bacias (Ocidental e Oriental), que incluem grabens deposicionais delimitados por falhas sin-rifte e sucessões pós-rifte sobrejacentes (Figura 3). A Bacia do Araripe acha-se estruturada segundo as direções NE-SW para E-W e, subordinadamente, NW-SE, que possibilitaram o arranjo em blocos altos (*horsts*) e baixos (grabens) no Vale do Cariri, área principal deste estudo (Figuras 3 e 4).

## MATERIAIS E MÉTODOS

Esta investigação desenvolveu-se por meio de estudo detalhado de afloramentos da região do Vale do Cariri, de mapeamento geológico em escala 1:50.000 de interpretação de imagens de satélite e fotografias aéreas (escala 1:65.000 e 1:40.000). Também foram realizadas seções estratigráficas detalhadas, levantamento de seções medidas, análise e estabelecimento de fácies sedimentares, além da delimitação de elementos arquitetônicos utilizando-se painéis fotográficos. Finalmente, houve a coleta de medidas de paleocorrentes ao longo de cada seção. A interpretação de sistemas deposicionais, o reconhecimento de padrões de empilhamento e a caracterização das principais unidades litoestratigráficas propiciaram a compreensão da evolução tectonossedimentar da Bacia do Araripe, apresentada neste trabalho.

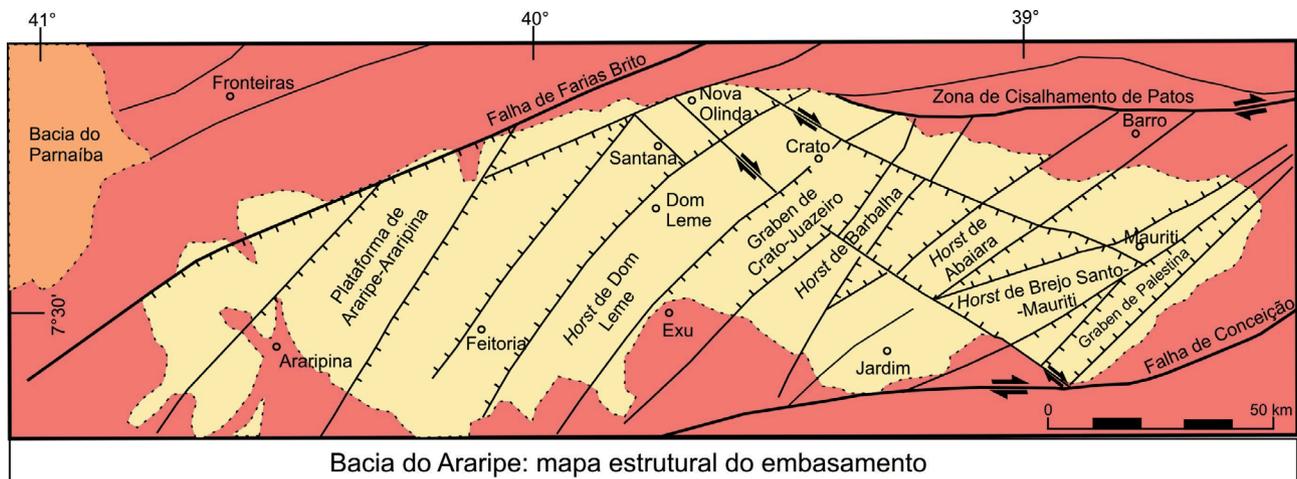
A análise estrutural implementada para as rochas das fases início de rifte e clímax de rifte da Bacia do Araripe consistiu na coleta sistemática de dados qualitativos e quantitativos de feições tectônicas rúpteis no campo, principalmente

falhas, determinando os sentidos de movimento (cinemática). Para tanto, foram úteis os critérios cinemáticos sistematizados em Angelier e Mechler (1977), Petit (1987), Angelier (1989, 1994), Hancock (1994) e Morley (2002), entre outros. Posteriormente, esses dados foram tratados para análise do comportamento dos elipsoides de deformação. À população de falhas estudadas foi aplicado o método numérico/gráfico desenvolvido por Almendiger (1989), para a análise cinemática por meio do Programa FaultkinWin 1.2.2. O Programa Stereonet 3.03 também auxiliou na elaboração dos diagramas das estruturas rúpteis da Bacia do Araripe. Foram utilizados diversos planos de falhas localizados ao longo da área estudada, em arenitos e folhelhos das formações Brejo Santo, Missão Velha e Abaiara, referentes às fases início de rifte a clímax de rifte, respectivamente.

## ESTRATIGRAFIA DAS FASES INÍCIO DE RIFTE E CLÍMAX DE RIFTE

### Formação Brejo Santo

A Formação Brejo Santo apresenta espessura aproximada de 450 m, cujas exposições restringem-se a leste e nordeste da bacia, no Vale do Cariri. A unidade foi definida por Gaspary e Anjos (1964), que a caracterizaram pela presença de folhelhos e argilitos bem estratificados de cor vermelha a marrom e de arenitos calcíferos esverdeados. Essa unidade exibe, predominantemente, pelitos, tais como argilitos e folhelhos calcíferos castanho-avermelhados, mosqueados, manchados e listrados de verde-claro a cinza-esbranquiçado, maciços a laminados; além de siltitos cinza-esbranquiçados a esverdeados e, subordinadamente, arenitos finos a muito finos

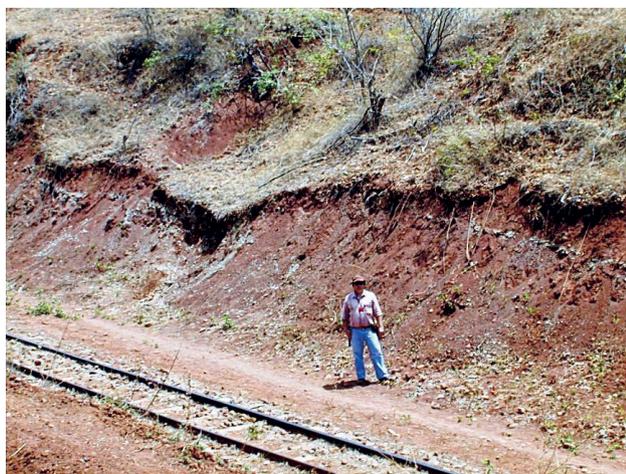


**Figura 4.** Arcabouço estrutural do embasamento da Bacia do Araripe. Notar o predomínio de falhas estruturadas segundo as direções NE (principal) e NW, além de falhas E-W que limitam tanto a bacia como os grabens (baixos estruturais) e *horsts* (altos estruturais) (modificada de Ponte e Ponte-Filho, 1996a, 1996b).

argilosos laminados, por vezes de granulação média, com estratificações cruzadas tabulares (Figura 5). Intercalados nos pelitos ocorrem níveis delgados de calcário argiloso e, principalmente, arenitos calcíferos, abundantes em restos de ostracodes, às vezes formando bancos decimétricos de puro ostracodito, lacustre (Assine, 1992, 2007; Fambrini et al., 2012b, 2013) (Figura 6). Os próprios pelitos são frequentemente ricos em carapaças desses crustáceos, o que os torna comumente calcíferos, achando-se presentes formas típicas do Andar Dom João (Assine, 1992, 2007; Coimbra et al., 2002; Barros, 2010; Barros et al., 2011), como *Bisulcocypriis pricei* PINTO e SANGUINETTI e *Darwinula oblonga* ROEMER, anteriormente constatadas por Braun (1966).

### Formação Missão Velha

De acordo com o trabalho ora apresentado, a Formação Missão Velha compreende uma sucessão sedimentar (~200 m de espessura) dominada por arenitos amalgamados com troncos fósseis na parte superior, com rochas mais finas subordinadas (Figura 7), aflorante no Vale do Cariri, porção leste da Bacia do Araripe (Figura 2). A exposição natural mais conhecida da unidade, famosa pela abundância de troncos fósseis silicificados, a localidade-tipo (Ponte e Appi, 1990) ocorre no sítio geológico da Grota Funda (Figuras 8 e 9). A Formação Missão Velha pode ser separada em duas partes, segundo critérios estratigráficos, informalmente definidas como Formação Missão Velha Inferior e Formação Missão Velha Superior (Figura 10). A Formação Missão Velha Inferior é composta de arenitos finos a médios com estratificações cruzadas tabulares e acanaladas, com intercalações de siltitos portando laminações cruzadas cavalgantes, e até argilitos



**Figura 5.** Folhelhos amarronzados com intercalações de siltitos finos esbranquiçados com laminações plano-paralelas e níveis de arenitos calcíferos. Formação Brejo Santo, corte de estrada de ferro Crato-Missão Velha (UTM 0485549, 9201514).

maciços a laminados. O conjunto foi depositado por canais fluviais efêmeros e, subordinadamente, dunas e lençóis de areia eólicos definindo um padrão progracional com taxa relativamente elevada de criação de espaço de acomodação de sedimentos no início da sequência (Fambrini et al., 2017). Os estratos fluviais apresentam padrão de dispersão consistente para S, SE e SW.

Os depósitos da Formação Missão Velha superior acham-se limitados na base por uma superfície erosiva, sobre um nível de paleossolo de espessura variável e de grande extensão lateral, sendo compostos de arenitos grossos a conglomeráticos portadores de abundantes troncos fósseis depositados por cinturões de canais entrelaçados (Tabela 1), cujos estratos cruzados (tabulares e acanalados) mostram um sentido de paleocorrentes mais variável, para W, SW, S e SE. Nesses conglomerados sobressaem, igualmente, clastos de arenitos e até de conglomerados provenientes da própria sucessão. A existência de troncos fósseis na Formação Missão Velha superior, associada à presença de clastos intraformacionais e ao limite brusco e erosivo, sugere a presença de uma discordância que separa a unidade em seus compartimentos inferior e superior, confirmando a existência do hiato deposicional (ver discussão a seguir).

### Formação Abaiara

A Formação Abaiara possui exposições que se concentram nas proximidades do município homônimo, mas também nas cercanias de Brejo Santo, Milagres e Missão Velha. Os afloramentos estudados apresentam-se em ravinas, cortes de estrada e cortes da Ferrovia Transnordestina (em construção), onde se inferiu essa unidade com base nas descrições de fácies com características litológicas da Formação Abaiara, de acordo com os trabalhos de Ponte e Appi (1990), Ponte-Filho e Ponte (1992) e Assine (1992).

A Formação Abaiara apresenta ampla variação faciológica vertical e lateral, constituindo-se desde folhelhos até conglomerados. Esta distingue-se claramente do registro estratigráfico do estágio início de rifte com relação à variação de fácies e deformação (Fambrini et al., 2012a).

A Formação Abaiara, como proposta neste trabalho e em Fambrini et al. (2012a), compreende intercalações descontínuas entre fácies areníticas e pelíticas (Figura 11). Os arenitos apresentam granulometria variando de fina a muito grossa, na maioria associados a gradações normais, os grãos com alto grau de arredondamento, coloração branca, amarelada e esverdeada, com estratificações cruzadas dos tipos tabular, acanalada e convoluta. Os pelitos são compostos de *red beds* estratigraficamente semelhantes aos da Formação Brejo Santo (Figura 11).

A base da formação apresenta folhelhos avermelhados interestratificados com lâminas de arenitos calcíferos de coloração esverdeada que localmente reagem fortemente ao HCl,

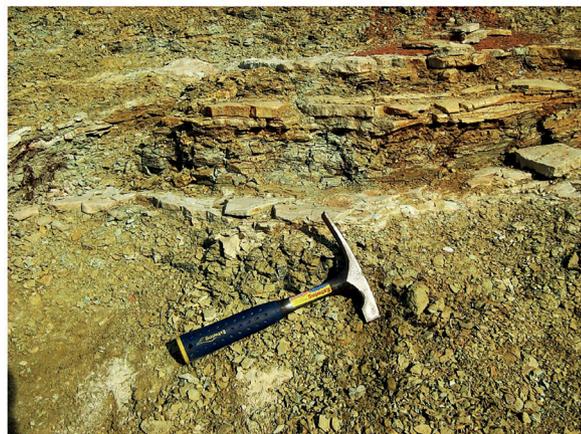


Foto A

-  **encoberto**
-  **gretas de contração**
-  **marcas onduladas**
-  **bioturbação**
-  **laminação cruzada cavalgante**
-  **calcífero**
-  **arenitos calcíferos**
-  **argilitos laminados vermelhos**
-  **siltitos vermelho-mosqueado**
-  **arenitos com laminação plano-paralela e *climbing-ripples***

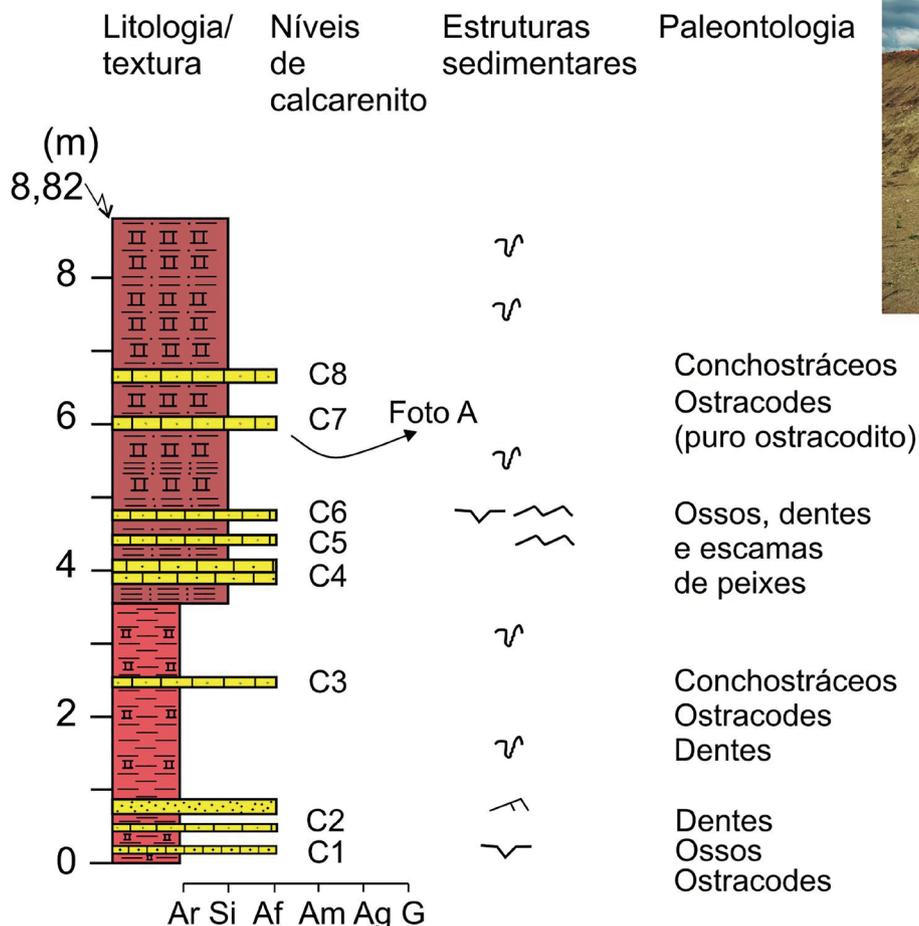
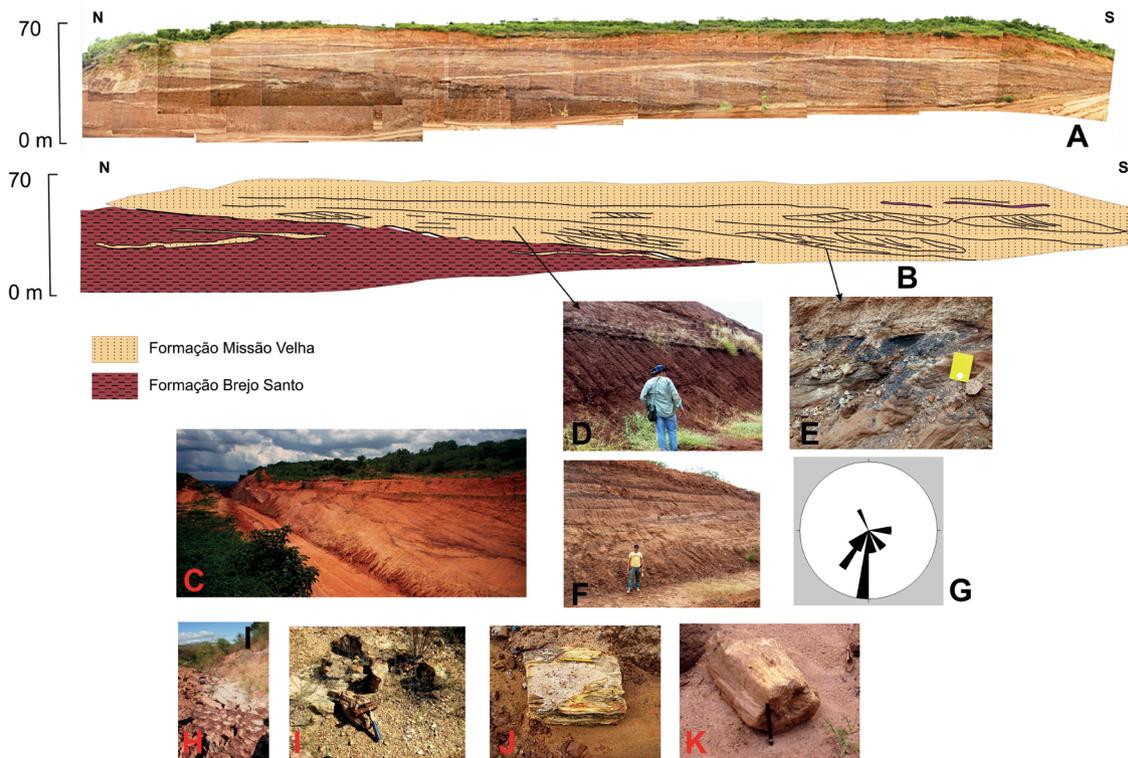


Foto B

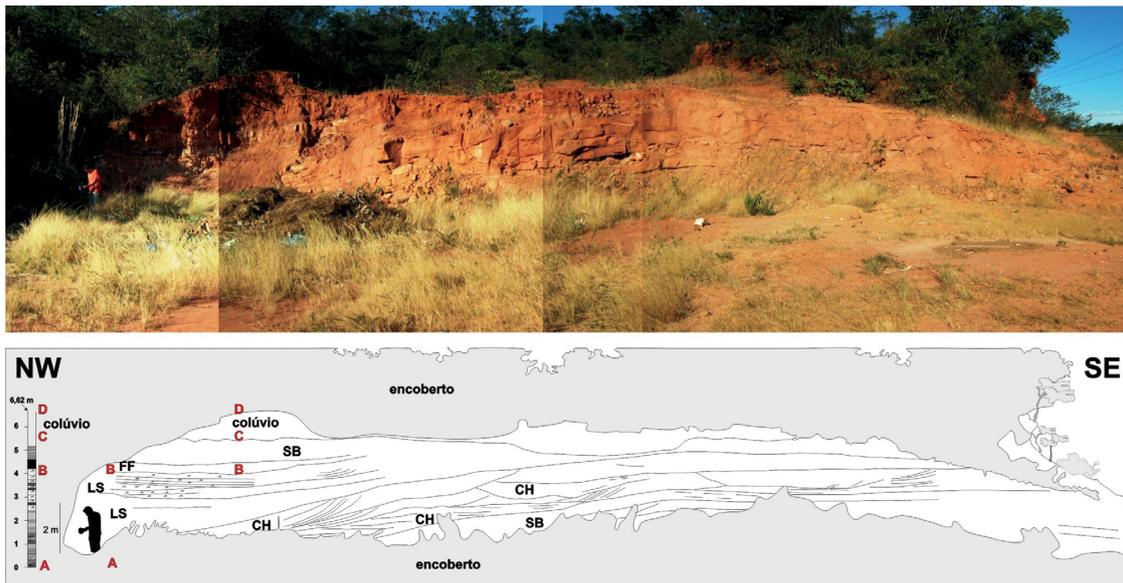
**Granulometria**

- Ar** – argila
- Si** – silte
- Af** – areia fina
- Am** – areia média
- Ag** – areia grossa
- G** – grânulos

**Figura 6.** Seção colunar de detalhe do afloramento na obra de transposição do rio São Francisco, mostrando os locais amostrados de níveis de arenitos calcíferos ricos em ostracodes da Formação Brejo Santo (UTM 0527260, 9174244).



**Figura 7.** (A) e (B) Mosaico do contato das formações Brejo Santo e Missão Velha; (C) detalhe do afloramento; (D) detalhe da passagem brusca entre as unidades; (E) detalhe das estratificações cruzadas da Formação Missão Velha; (F) detalhe das camadas com estratos cruzados, Fm. Missão Velha; (G) roseta com as medidas coletadas nesta exposição que indicam paleofluxo para S e SW; (H) seção estratigráfica contínua (da esquerda para a direita) de detalhe da Formação Missão Velha e o topo da Formação Brejo Santo perfazendo 190 m medidos, mostrando o empilhamento com padrão granodecrescente em cada ciclo fluvial; (I a K) fotos de troncos fósseis encontrados na Fm. Missão Velha (UTM 0497300, 9188860).



Fonte: modificada de Fambrini et al. (2010b, 2010c, 2011b).

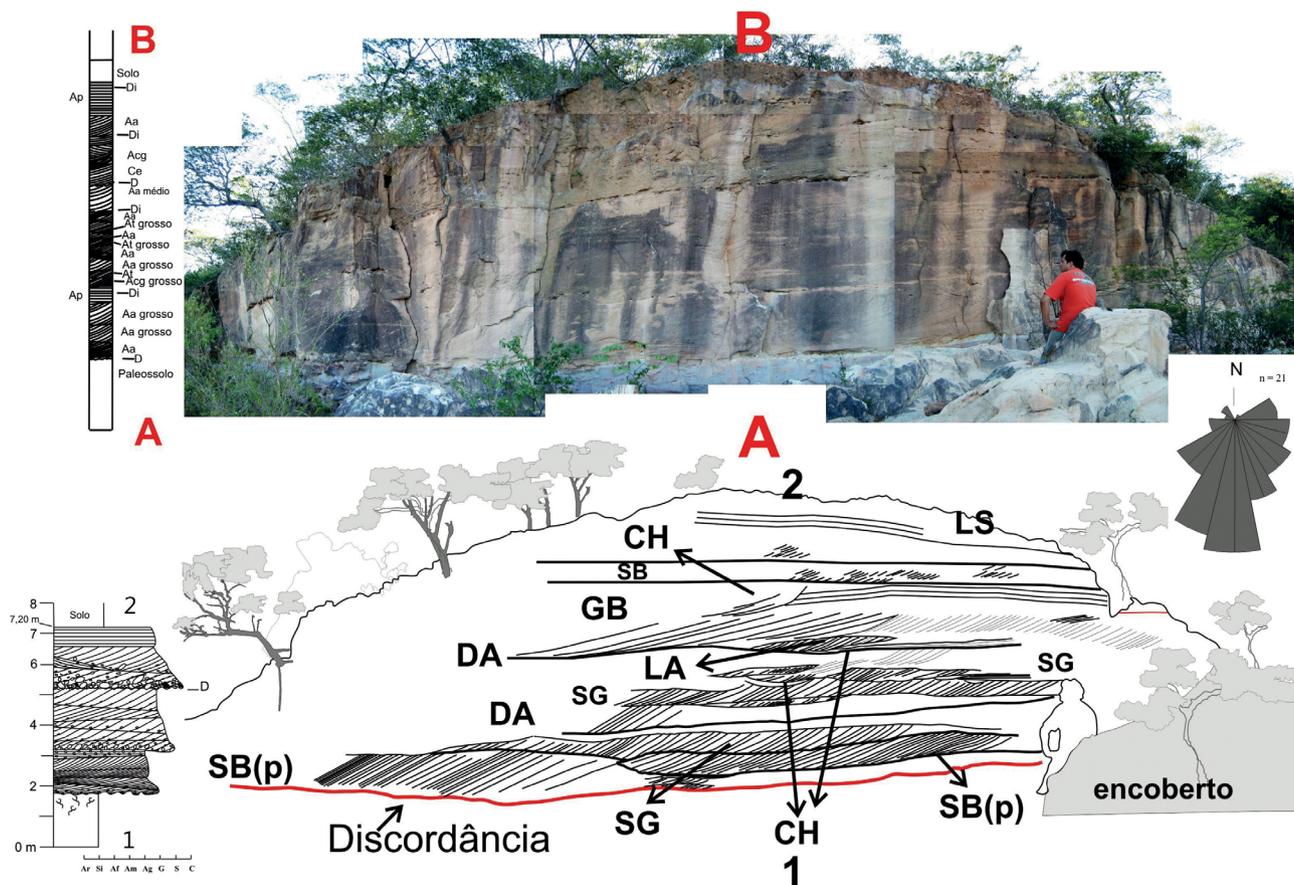
**Figura 8.** Arenitos finos da Sequência 1 da Formação Missão Velha (corte na rodovia CE-293; UTM 0491245, 9196704). Para siglas dos elementos arquitetônicos, vide Tabela 1.

intercalados com pacotes de arenitos com laminações cruzadas cavalgantes e estratificação plano-paralela, e também tem a ocorrência de camada de folhelho verde a amarelado na ordem de alguns metros (Figura 12). Nesse conjunto de folhelhos, há a ocorrência de folhelhos cinza pirobetuminosos. No contato entre as fácies supracitadas, são notados clastos de argila, com tamanhos milimétricos a métricos, acompanhando a estratificação.

Para o topo, há um incremento dos pacotes arenosos, geralmente estratificados e com abundantes feições deformacionais penecontemporâneas, tais como laminações convolutas, contorcidas e até dobras intraestratais. Nas camadas de arenitos não perturbados, destacam-se as estratificações cruzadas acanaladas e tabulares. No topo, aparecem camadas de conglomerados de seixos e até calhaus, com fragmentos de quartzo, gnaisses, granitos, xistos e quartzitos (Figura 13).

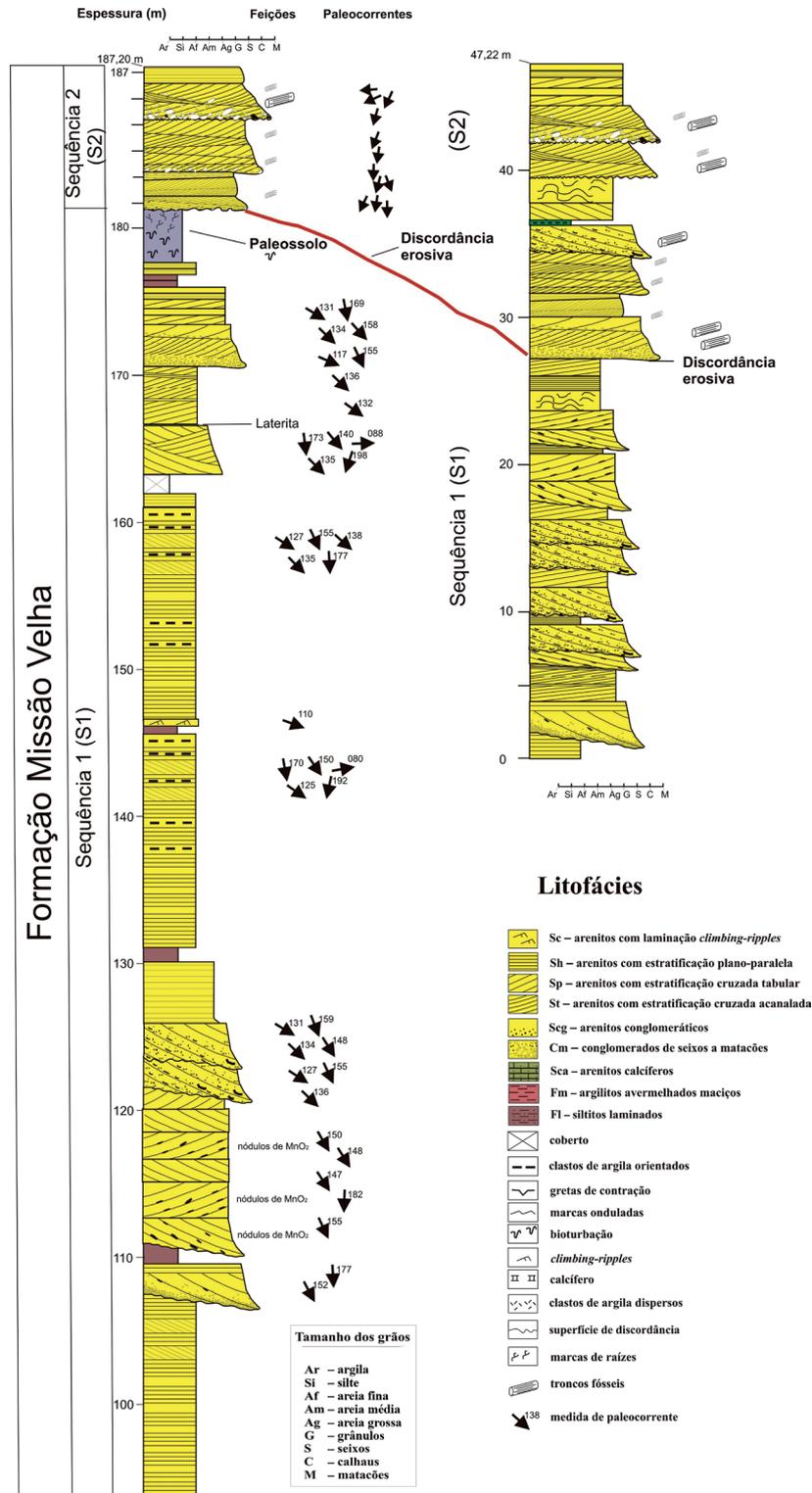
## ANÁLISE ESTRUTURAL

Diversos autores demonstraram nitidamente a estruturação regional da Bacia do Araripe (Rand e Manso, 1984; Ponte e Ponte Filho, 1996a, 1996b) ao dividirem a bacia em duas sub-bacias pré-aptianas menores, uma a oeste e outra a leste, sendo estas separadas por um alto estrutural (Figuras 2, 3 e 14). Rand e Manso (1984), com base em dados gravimétricos e magnetométricos, perceberam, pela primeira vez, a compartimentação da bacia, separando-a em duas sub-bacias: Oeste e Leste. Esses autores também notificaram falhamentos nas bordas da bacia. Castro e Castelo Branco (1999), com base em modelagem gravimétrica 3D, confirmaram a existência das duas sub-bacias, definindo profundidades de até 1.600 m para o topo do embasamento. Segundo esses autores, essas duas sub-bacias, chamadas Feitoria (oeste) e Cariri (leste), são separadas pelo Alto de Dom Leme. Esse alto chega a



Fonte: modificada de Fambrini et al. (2010b, 2010c, 2011a).

**Figura 9.** Exposição da Grotta Funda, seção-tipo da Formação Missão Velha, sequência 2 (porção superior da unidade) (localização UTM 0490983, 9197024). Fotomontagem do afloramento com as principais fácies na seção ao lado. Abaixo, esquema das estruturas sedimentares observadas e interpretadas no mosaico, elementos arquitetônicos e superfícies de diastema (Di) e de discordância acima do nível de paleossolo (linha vermelha); à esquerda, seção colunar de detalhe exibindo as estratificações cruzadas e os níveis conglomeráticos; e no canto direito, diagrama de roseta com as paleocorrentes medidas com padrão de dispersão para S e SE. Para siglas dos elementos arquitetônicos, vide Tabela 1.



**Figura 10.** Seções colunares de detalhe da Formação Missão Velha na exposição da Grota Funda (arredores de Missão Velha) à esquerda, e no Morro do Cruzeiro (município de Abaiara), à direita. Observar os repetidos ciclos granodécrescentes com abundantes estratos cruzados (típicos de sistemas fluviais), as superfícies erosivas delimitando ciclos e a discordância no topo da Fm. Missão Velha, demarcada por nível conglomerático (acima), presença de paleossolo (abaixo da superfície de discordância) e fragmentos de troncos fósseis. Notar, também, o padrão de dispersão dos sedimentos, inicialmente para S/SE, na Sequência 1, e após a discordância, variando para S/SW e W, na Sequência 2.

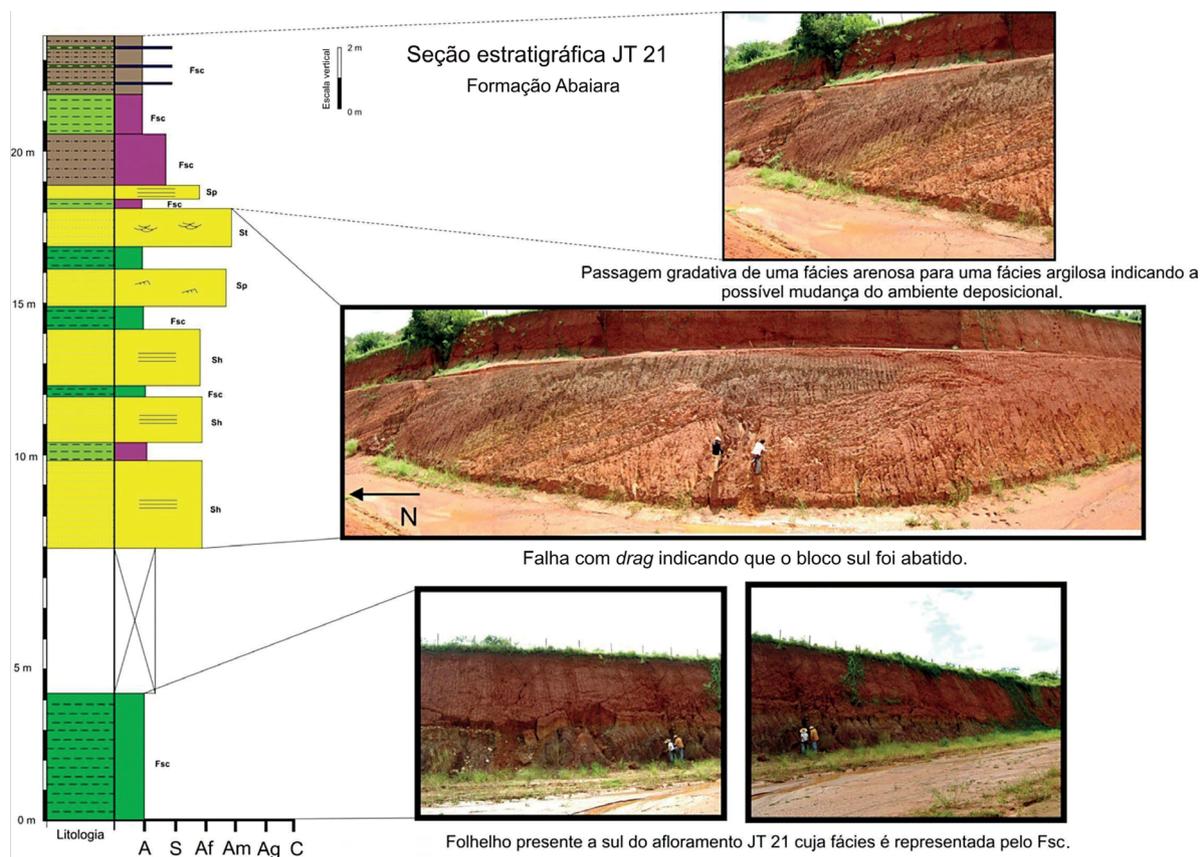
**Tabela 1.** Principais elementos arquitetônicos fluviais da Formação Missão Velha na área-tipo. Código dos elementos arquitetônicos com base em Miall (1985, 1996, 2006).

CH ( <i>Channels</i> ) — canal
DA ( <i>Downstream-accretion macroforms</i> ) — macroformas de acréscimo para jusante
GB ( <i>Gravel bars and bedforms</i> ) — formas de leito cascalhosas (barras)
SB ( <i>Sand bars and bedforms</i> ) — formas de leitos arenosos (barras)
SB (p) ( <i>Sand bed form with planar cross-stratification</i> ) — formas de leitos arenosos com estratificação cruzada tabular (p)
SG ( <i>sediment gravity flows</i> ) — fluxos gravitacionais
OFch [ <i>Overbank flow of channel (levee, crevasse and channel splay)</i> ] — depósitos de transbordamento ( <i>overbank</i> ) como diques, <i>crevasse</i> e <i>channel splays</i>
LS ( <i>Laminated sand sheet</i> ) — lençóis de areia laminada
LA ( <i>Lateral-accretion macroforms</i> ) — depósito de acréscimo lateral
FF ( <i>Floodplain fines</i> ) — depósitos finos de planície de inundação



Fonte: modificada de Fambrini et al. (2012a).

**Figura 11.** Arenitos lenticulares descontínuos com estratificações cruzadas tabulares (fácies Sp — arenitos com estratificação cruzada tabular (planar)) em meio a folhelhos (fácies Fr — folhelhos com marcas onduladas (*ripples*)) da Formação Abaiara. Túnel da Ferrovia Transnordestina próximo do acesso para Abaiara (UTM 0497300, 9193004).



Fsc: argilitos arroxeados intercalados com siltitos laminados; Sp: arenitos com estratificações cruzadas tabulares (planar); St: arenitos com estratificações cruzadas acanaladas; Sh: arenitos com estratificação plano-paralela; A: argila; S: silte; Af: areia fina; Am: areia média; Ag: areia grossa; C: cascalho.

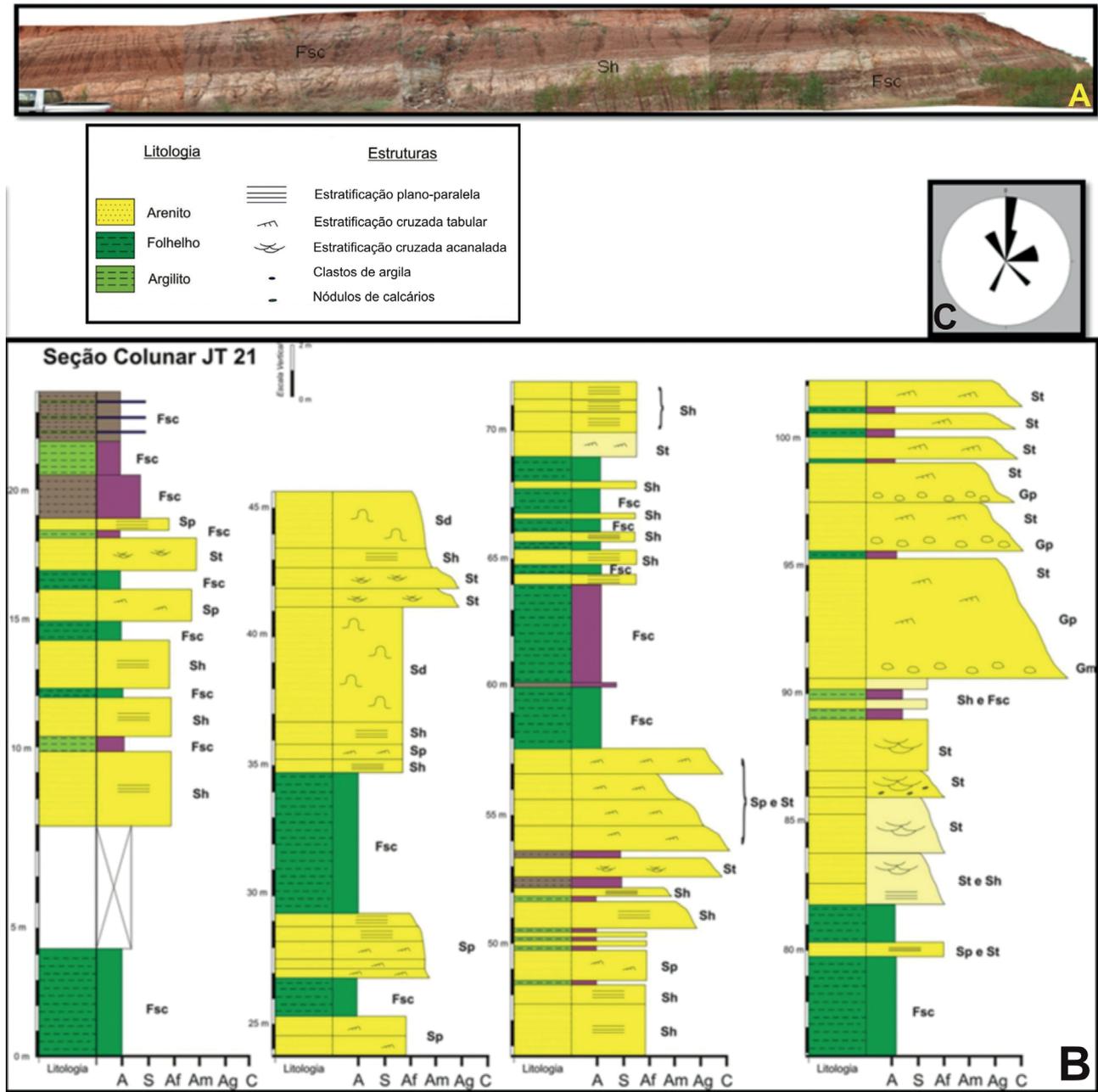
**Figura 12.** Seção estratigráfica de detalhe da base da Formação Abaiara em corte da Ferrovia Transnordestina, detalhe em fotos (UTM 0498910, 9179574). Na figura, notar o padrão de empilhamento de folhelhos intercalados com corpos de arenitos.

ter exposições de rocha granítica em uma pedreira próxima à cidade de Crato.

A partir dos esquemas anteriormente revelados, observa-se que, como já havia sido postulado por Rand e Manso (1984), e corroborado por Camacho e Sousa (2017), a Bacia do Araripe acha-se limitada por falhamentos. A bacia limita-se ao norte pela Zona de Cisalhamento de Patos (Lineamento

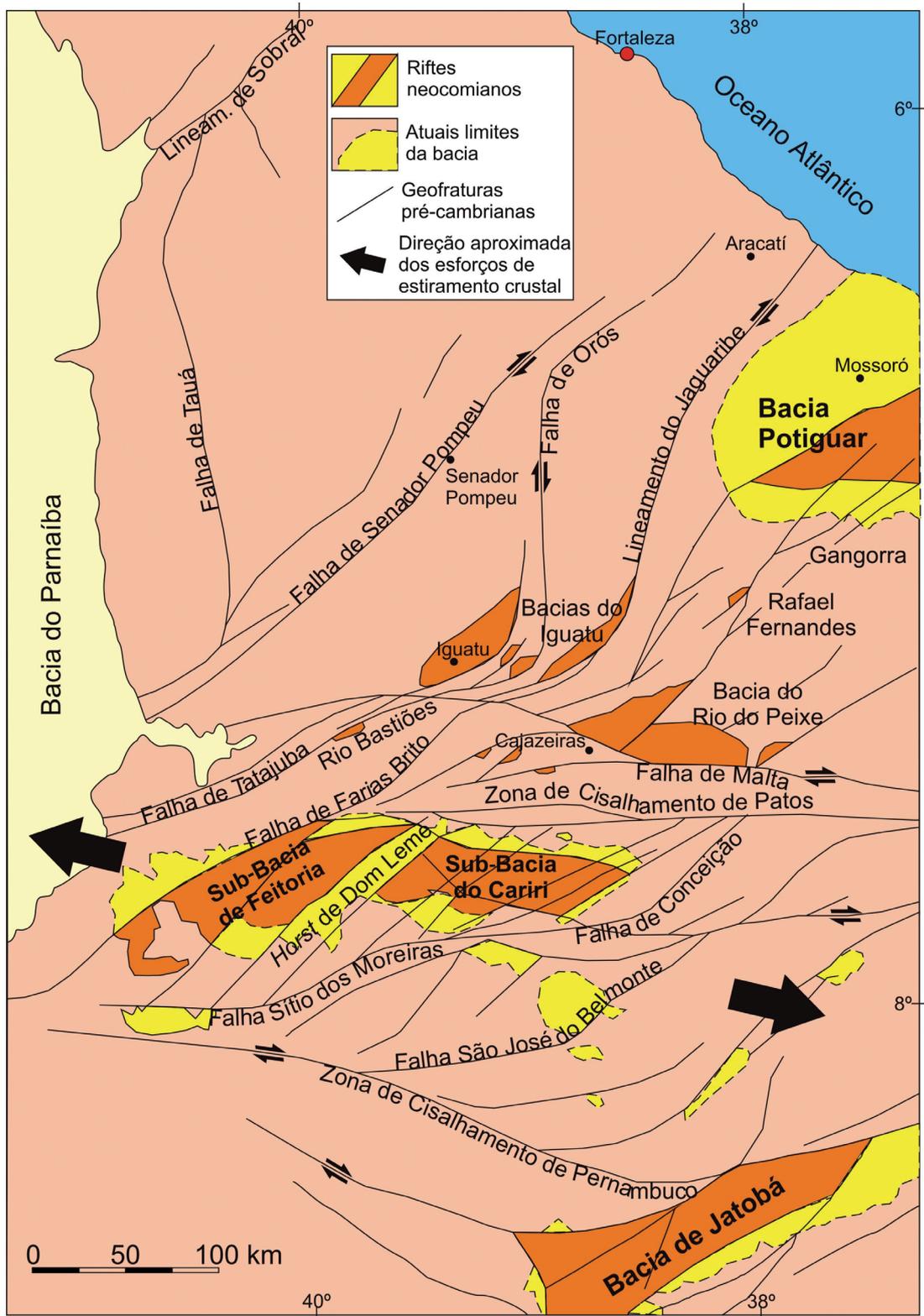
da Paraíba), a noroeste pela Falha de Farias Brito, ao sul pela Falha de Sítio dos Moreiras, e a leste pela Falha de Conceição (Figura 14). Internamente, a bacia está separada por grabens e *horsts* orientados na direção NE-SW.

Ponte (1996), a partir de linhas de sísmica de reflexão e de dados obtidos dos trabalhos realizados por Guerra (1986), Miranda et al. (1986), Crepani (1987) e Brito-Neves (1990),



Fsc: argilitos arroxeados intercalados com siltitos laminados; Sp: arenitos com estratificações cruzadas tabulares (planar); Sh: arenitos com estratificação plano-paralela; St: arenitos com estratificações cruzadas acanaladas; Sd: arenitos deformados; Gp: conglomerados com estratificação plano-paralela; Gm: conglomerados maciços; A: argila; S: silte; Af: areia fina; Am: areia média; Ag: areia grossa; C: cascalho.

**Figura 13.** Afloramento do topo da Formação Abaiara em corte da Ferrovia Transnordestina (UTM 0498910, 9179574). (A) Mosaico do afloramento acima; (B) seção estratigráfica de detalhe do topo da formação.



Fonte: modificada de Ponte e Ponte Filho (1996b).

**Figura 14.** Padrão estrutural da Bacia do Araripe, Bahia. As falhas de direção NE-SW (principais e mais antigas) seguem o traçado do embasamento ígneo-metamórfico, enquanto as falhas de orientação WNW-ESSE (mais jovens) são responsáveis tanto pelos limites da bacia como por sua compartimentação em duas sub-bacias separadas pelo Alto de Dom Leme. Mais detalhes no texto.

propôs um cenário estrutural para o embasamento da bacia, conforme a Figura 3. Pode-se notar que a sequência Pós-rifte da bacia repousa discordantemente e de forma horizontalizada sobre as rochas sedimentares das fases início de rifte e clímax de rifte (exceto no Vale do Cariri), e ainda sobre áreas do embasamento adjacente, o que evidencia a pequena atividade tectônica que esta sofreu.

A análise estrutural aplicada às rochas do estágio clímax de rifte da Bacia do Araripe (e que afetou também as rochas paleozoicas e dos estágios início de rifte) permitiu o entendimento da distribuição e da evolução das rochas sedimentares passíveis de originar armadilhas de hidrocarbonetos.

No Vale do Cariri, na região compreendida entre as cidades de Juazeiro do Norte e de Brejo Santo, área abrangida por este estudo, o arcabouço estrutural do embasamento possibilita o reconhecimento dos *horsts* de Joá, Barbalha, Abaiara e Brejo Santo-Mauriti, alternados com os grabens de Crato-Juazeiro, Missão Velha, Serrote das Cacimbas e Palestina (Figuras 3 e 4). Os grabens são assimétricos, separados por *horsts* alternados e se dispõem preferencialmente na direção NE-SW. As camadas sedimentares apresentam mergulho geral de baixo ângulo (10–20°) para NW do Horst de Joá até o Graben de Missão Velha. No *Horst* de Abaiara, o sentido dos mergulhos é mais variável, mas já se nota mudança de mergulho para S/SE, que se acentua do *Horst* de Brejo Santo-Mauriti para sul, incluindo-se os grabens de Serrote das Cacimbas e Palestina, nos quais as camadas se mostram inclinadas para S/SE, com blocos de mergulho contrário (para NW) na porção sul do *Horst* de Brejo Santo-Mauriti, a sul/sudeste da cidade de Brejo Santo.

Os grabens acham-se limitados por falhas normais (extensionais) estruturadas preferencialmente segundo N30-55E. Essas falhas normalmente posicionam-se no contato entre as unidades litoestratigráficas e se associam a traços estruturais do embasamento pré-cambriano (Assine, 1990; Ponte e Ponte Filho, 1996a, 1996b; Morales et al., 2011; Fambrini et al., 2011a).

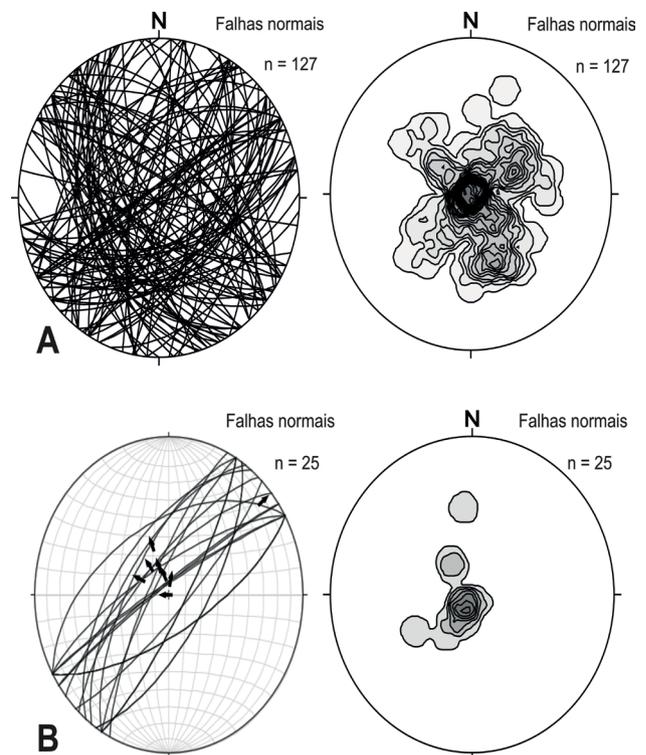
As falhas analisadas em campo acham-se compatíveis com as falhas traçadas e interpretadas a partir de imagens de sensores remotos, bem como aos mapas regionais (Figura 14). As falhas reconhecidas para este estudo foram separadas em falhas normais (principais), falhas transcorrentes (importantes) e falhas inversas. Os dados coletados em campo possibilitaram reunir as falhas normais distinguidas em dois conjuntos principais:

1. conjunto de falhas orientadas de acordo com a direção NE-SW (mais antigo);
2. conjunto de falhas orientadas segundo NW-SE a WNW-ESE (mais jovem).

As falhas normais de direção NE-SW englobam aquelas relacionadas ao sistema rifte principal (Figura 15), com mergulhos tanto para NW como para SE, e direção entre

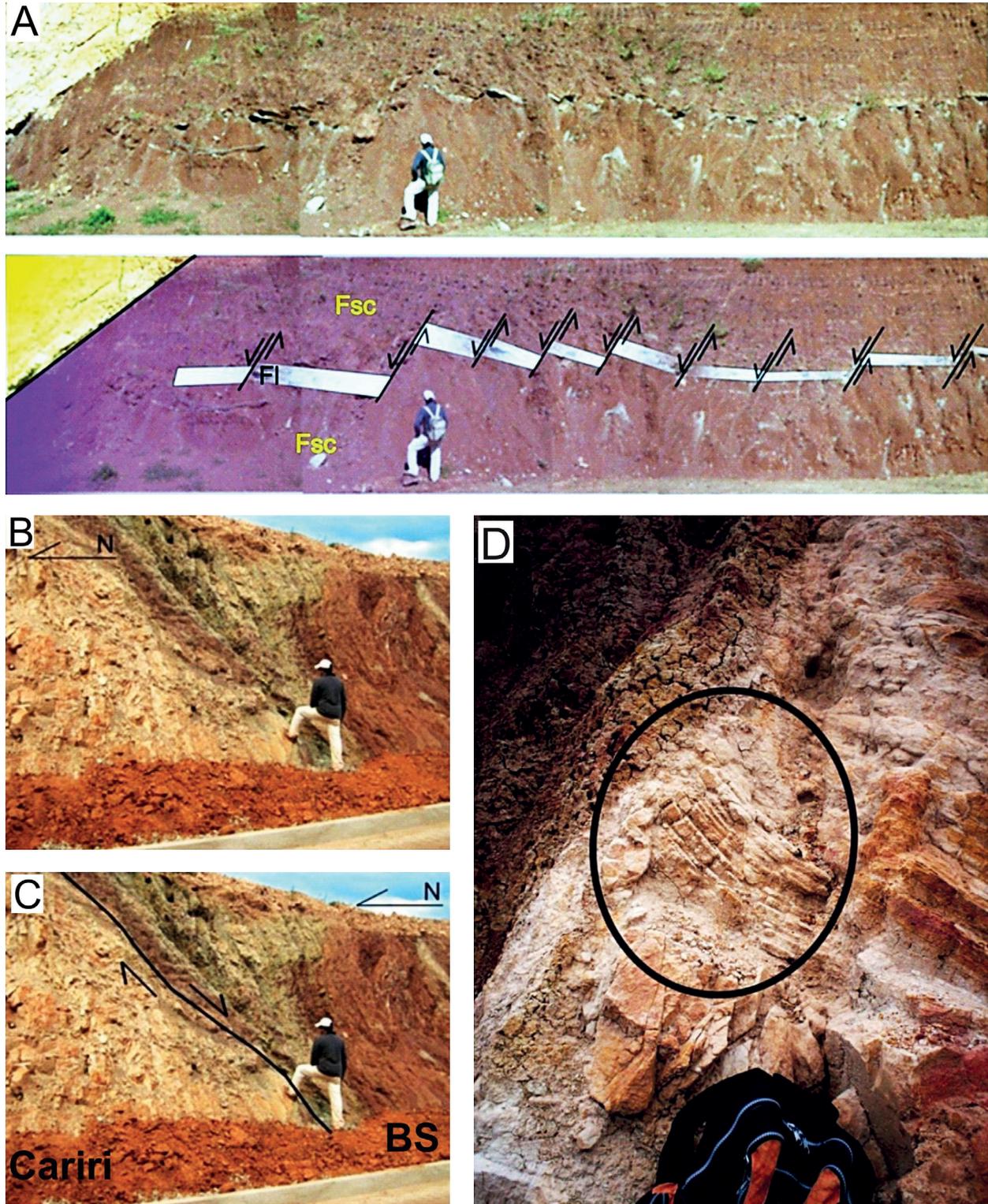
N20E e N60E. A intensidade do mergulho varia de médio a forte para NW ou SE (obliquidade média de 77°) e a obliquidade (*rake*) das estrias variam entre 23 e 76° (Figura 15). Na escala de afloramento, os planos de falhas são retos e se associam à homogeneidade reológica. Não foram observadas rochas geradas pelas falhas, tais como cataclasitos, no entanto crescimentos de minerais secundários, como calcita, acham-se presentes em alguns planos de falha.

As falhas normais presentes no Vale do Cariri mostram um arranjo em dominó com mergulhos para o bloco rotacionado. Na Figura 16A, as estruturas presentes sintetizam o que ocorre em larga escala nessa porção da bacia. O critério cinemático utilizado foi a separação estratigráfica evidenciada pelas camadas arenosas em meio aos folhelhos da Formação Brejo Santo. Por outro lado, falhas associadas aos limites entre grabens e *horsts* apresentam rejeito aparente de grande deslocamento, capazes de colocar em contato lateral unidades de níveis estratigráficos distintos (Figuras 16B e 16C). Acamadamentos sedimentares próximos aos planos de falhas



n: número de medidas.

**Figura 15.** (A) Projeção estereográfica de falhas normais das fases Paleozoica a clímax de rifte da Bacia do Araripe. Observar a concentração de falhas orientadas nas direções NE (principal) e NW, e falhas subordinadas de direção NNE a NNW e WNW a ENE; (B) projeção estereográfica de falhas normais de orientação NE-SW com estrias, e respectivo diagrama de contorno do sentido de mergulho de falhas normais com estrias.



Fsc: argilitos arroxeados intercalados com siltitos laminados; BS: Formação Brejo Santo.

**Figura 16.** Falhas normais de orientação NE-SW. (A) Sucessão de falhas que afetam arenitos e folhelhos da Formação Brejo Santo em contato com arenitos da Formação Missão Velha (em amarelo), evidenciando padrão em dominó; (B e C) falha normal (contato por falha entre as formações Cariri e Brejo Santo); (D) dobras por arrasto (*drag-folds*) por falha normal NE-SW que afetam arenitos da Formação Abaiara. Corte da Ferrovia Transnordestina nas proximidades da cidade de Abaiara.

normais mostram, na maioria das vezes, valores de mergulho elevados formando dobras de arrasto (Figura 16D), critério cinemático que indica uma componente gravitacional e define o tipo de falha aflorante. Além dessas falhas, aparece ainda estreita faixa de falhas normais de atitude N35E com mergulho para NW, com rotação e deflexão do acamamento — *drag* de falha normal na capa —, que afetam a Formação Abaiara (Figura 17A) — conjunto de falhas normais escalonadas com blocos rotacionados (Figura 17B) e conjuntos de falhas conjugadas, com pequenos rejeitos (centimétricos a métricos), delineando estruturas dispostas em *horsts* e *grabens* (Figuras 17C, 17D e 17E). É comum essas falhas limitarem blocos basculados e rotacionados, como o *Horst* de Brejo Santo-Mauriti. Outras estruturas incluem sinforme de teto (*hanging wall sinform*) que afeta rochas da Formação Brejo Santo (Figura 18). Além disso, falhas normais propiciaram a colocação lateral de unidades distintas na Bacia do Araripe (Figura 19).

Falhas normais de direção NE-SW definem arranjo com falhas transcorrentes de direção E-W penecontemporâneas de cinemática sinistral, provavelmente controladas pelas zonas de cisalhamento do embasamento (mesma orientação).

O conjunto mais jovem de falhas, com direção principal variando de NW-SE a WNW-ESE, compreende falhas cujas estrias indicam movimentação normal (ou oblíqua com forte componente normal) com caimento alternando-se para os quadrantes NE ou SW, com orientação entre N50W e N75W. Observou-se em bandas de deformação associadas que as falhas NW cortam as falhas NE, indicando que se trata de conjunto mais jovem. Esse conjunto NW de falhas extensionais do estágio rifte aparece combinado com deformação transtrativa dextral ao longo das falhas de direção E-W (Figura 15). Essas falhas mais jovens têm grande relevância na distribuição das unidades litoestratigráficas do Vale do Cariri, pois determinam o limite de ocorrência à norte da sequência mesozoica, tanto em contato com arenitos paleozoicos da Formação Cariri, como com rochas do embasamento pré-cambriano.

Falhas pertencentes ao conjunto mais jovem delimitam, do mesmo modo, o limite sul de ocorrência da sequência rifte, por baixo das rochas do estágio pós-rifte da Bacia do Araripe na chapada homônima, onde é evidente intenso alinhamento WNW-ESE em mapas gravimétricos (Rand e Manso, 1984; Ponte e Ponte Filho, 1996a; Morales et al., 2006, 2011). Dados sísmicos corroboram que o limite sul da bacia é caracterizado pela presença de falhas. Morales et al. (2006) assinalaram que o alinhamento, de direção preferencial WNW, pode ser reconhecido na drenagem presente no topo da chapada, em feições morfotectônicas nas suas escarpas, com prolongamento para leste, até área a sul da cidade de Brejo Santo, onde falhas WNW e NW limitam a ocorrência de rochas das formações Brejo Santo e Cariri.

Falhas inversas, de pequeno porte, foram localmente reconhecidas, sistematicamente cortando as falhas normais

ou assinalando sua inversão e reativação (Figura 18). Possuem direção segundo orientação NNE-SSW.

Falhas transcorrentes foram também reconhecidas, definidas por pequenos planos estriados com movimentação lateral dextral (predominante) e sinistral, orientadas em torno de NNE-SSW e ENE-WSW, todas de alto ângulo de mergulho (Figuras 20 e 21). Nesse conjunto, destacam-se estruturas em flor (*flower structures*) associadas com transcorrência sinistral NNE (Figuras 20A e 20B), que afetam rochas da Formação Cariri atribuídas ao Paleozoico (movimento deduzido a partir de estrias de atrito; Figura 20C).

As estrias indicam regime transcorrente com *rake* muito baixo variando entre 5 e 20°, sendo os melhores indicadores cinemáticos para a classificação das falhas transcorrentes. Bandas de deformação em arenitos associam-se a alguns planos de falhas exibindo arquitetura de pares entrelaçados e/ou conjugados indicando claramente o movimento dextral para elas (Figura 22). O diagrama da Figura 21 sintetiza essas medidas de falhas transcorrentes.

Outro conjunto de falhas transcorrentes identificado, embora mais restrito, apresenta direção WNW-ESE a NW-SE, também com fortes mergulhos de cinemática predominantemente dextral.

Uma feição importante de regimes transcorrentes é que estruturas extensionais e contracionais podem se desenvolver em associação com as falhas de rejeito direcional (Figura 18). Isso ocorre:

1. em zonas de terminação de falhas;
2. quando a falha tem um traçado sinuoso; ou
3. quando o movimento de uma falha interfere com o de uma falha vizinha.

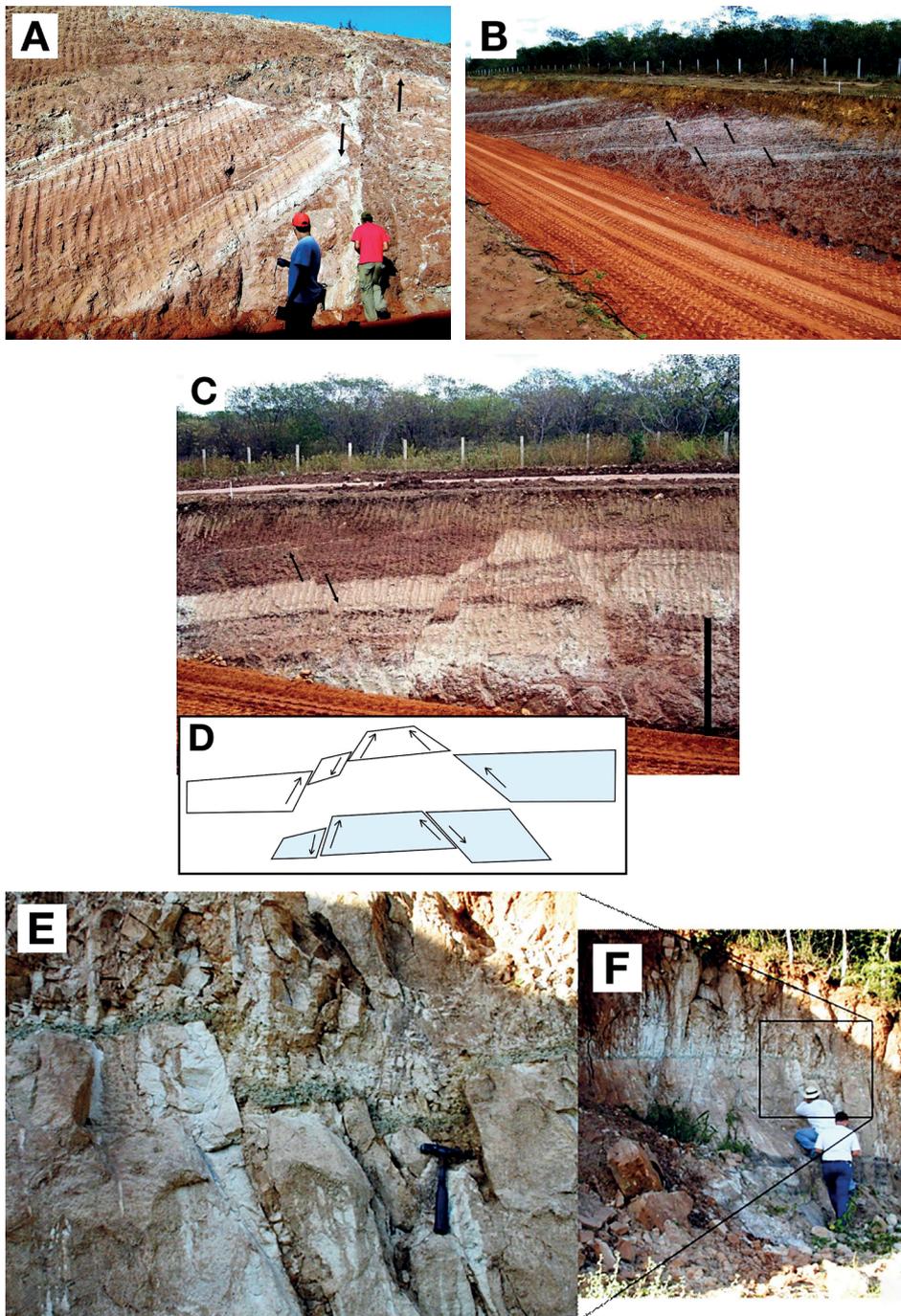
Nessas três situações, elevações e depressões topográficas, bem como falhas normais ou inversas subsidiárias, podem se desenvolver. A Figura 18 exemplifica o caso (iii), em que ocorre o desenvolvimento de falhas normais ou inversas subsidiárias por atuação de falha transcorrente.

Feições diagenéticas, como carbonatização de pelitos da Formação Brejo Santo, aproveitaram fraturas para se formar, tais como as lâminas de calcita nos argilitos da referida formação, que se ajustaram segundo as direções NW (principal) e N-S.

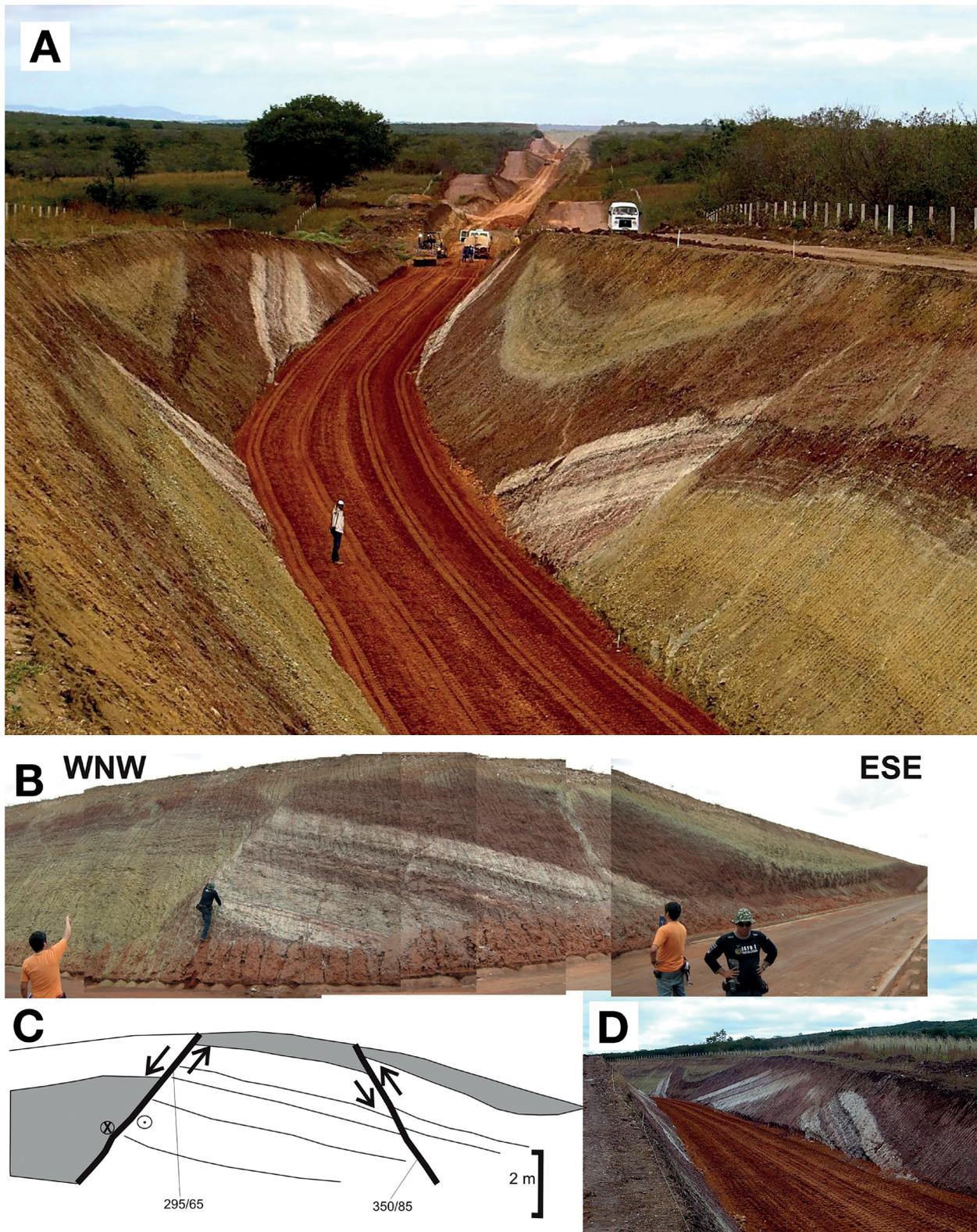
## EVOLUÇÃO TECTONOESTRATIGRÁFICA DAS FASES INÍCIO DE RIFTE E CLÍMAX DE RIFTE DA BACIA DO ARARIPE

De modo semelhante aos estudos adotados para as bacias pericratônicas da margem continental brasileira, Ponte e Ponte Filho (1996a, 1996b) identificaram três estágios sucessivos de evolução tectônica:

1. estágio Pré-rifte, de bacia interior simples, formada por efeito de estiramento ou adelgaçamento crustal;



**Figura 17.** Exemplos de falhas normais e estruturas NE-SW que afetam rochas das fases Início de Rifting a Clímax de Rifting na Bacia do Araripe. (A), (B) e (C) Cortes da Ferrovia Transnordestina (em construção): (A) falha de atitude N35E com mergulho para NW com rotação e deflexão do acamadamento — *drag* de falha normal na capa, Formação Abaiara (à esquerda da falha) com Formação Brejo Santo (à direita) (UTM 0496143, 9196770); (B) conjunto de falhas escalonadas com rotação dos blocos e formação de volteio (estrutura *roll-over*) que afetaram folhelhos e arenitos finos da Formação Brejo Santo. Talude com aproximadamente 20 m de altura (UTM 0496843, 9195388); (C) conjunto de falhas conjugadas, de pequeno rejeito, formando estruturas tipo grabens e *horsts* alternados (notar inclinação geral dos estratos para SE), que afeta arenitos e folhelhos da Formação Brejo Santo. Barra de 2 m de escala; setas indicam movimentação das falhas (UTM 0496116, 9196808); (D) esquema gráfico de C mostrando a movimentação normal dos blocos; (E) e (F) arenitos finos com camada delgada de siltitos verde-claros com falhas de direção NE de rejeito centimétrico que afetam a Formação Abaiara (Localização: UTM 0495160, 9187192).

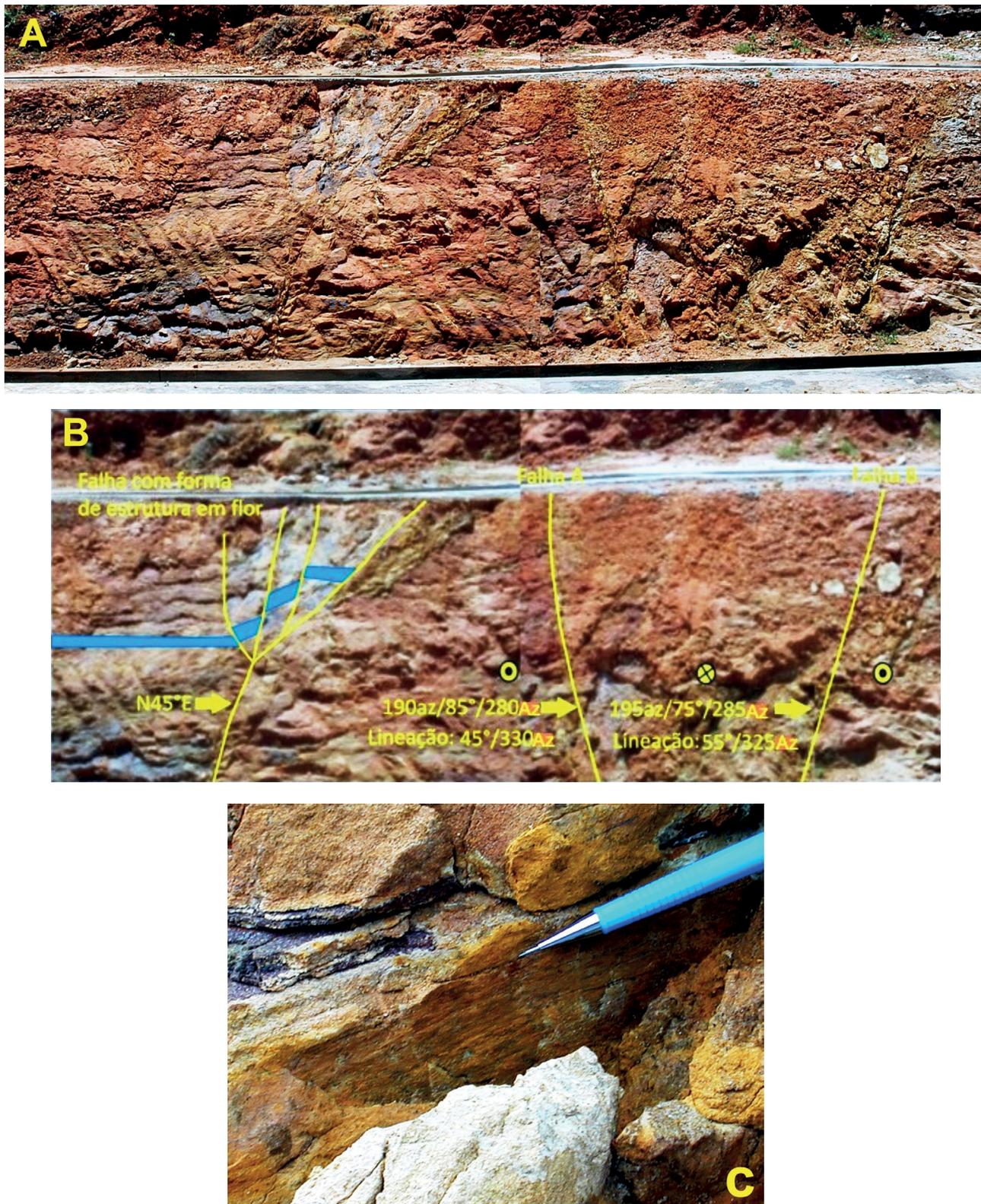


**Figura 18.** (A) *Hangingwall sinform* (sinforme do teto), Formação Brejo Santo. Vista para WNW; (B) mosaico de estrutura *Hangingwall sinform* (sinforme do teto), Formação Brejo Santo. Vista para ESE; (C) esquema das falhas exibidas no mosaico de B, mostrando falha normal com componente lateral e falha inversa de pequeno rejeito; (D) idem B, vista para SE, Corte da Ferrovia Transnordestina (em construção) (UTM 0495381, 9198326).



Fsc: argilitos arroxeados intercalados com siltitos laminados; FI: folhelhos laminados.

**Figura 19.** Exemplos de colocação lateral de unidades distintas na Bacia do Araripe. (A) Contato tectônico por falhas oblíquas normais que colocam lateralmente rochas pelíticas da Formação Brejo Santo com arenitos da Formação Missão Velha; (B) contato lateral por falha normal entre arenitos da Formação Missão Velha e rochas pelíticas da Formação Brejo Santo; (C) contato lateral por falha normal entre folhelhos da Formação Brejo Santo e arenitos médios bem selecionados da Formação Missão Velha (localização de A, B e C: UTM 0499581, 9173948); (D) contato por falha normal entre arenitos finos e argilitos e folhelhos da Formação Abaiara (UTM 0497264, 9189949); (E) intercalações de arenitos médios a finos e folhelhos e siltitos da Formação Abaiara basculados por falhamentos normais (UTM 0498910, 9179574).



**Figura 20.** Esquema exibindo falhas transcorrentes destrais associadas a falhas normais NE cuja deformação originou estrutura em flor negativa (extensão), afetando arenitos da Formação Cariri. (A) Painel fotográfico; (B) interpretação das falhas observadas e medidas; (C) estrias direcionais no plano de falha de atitude N45E/90° da estrutura em flor (UTM 0492281, 9200244).

2. estágio Rife, de bacia do tipo rife intracontinental;
3. estágio Pós-rife, de bacia do tipo interior simples.

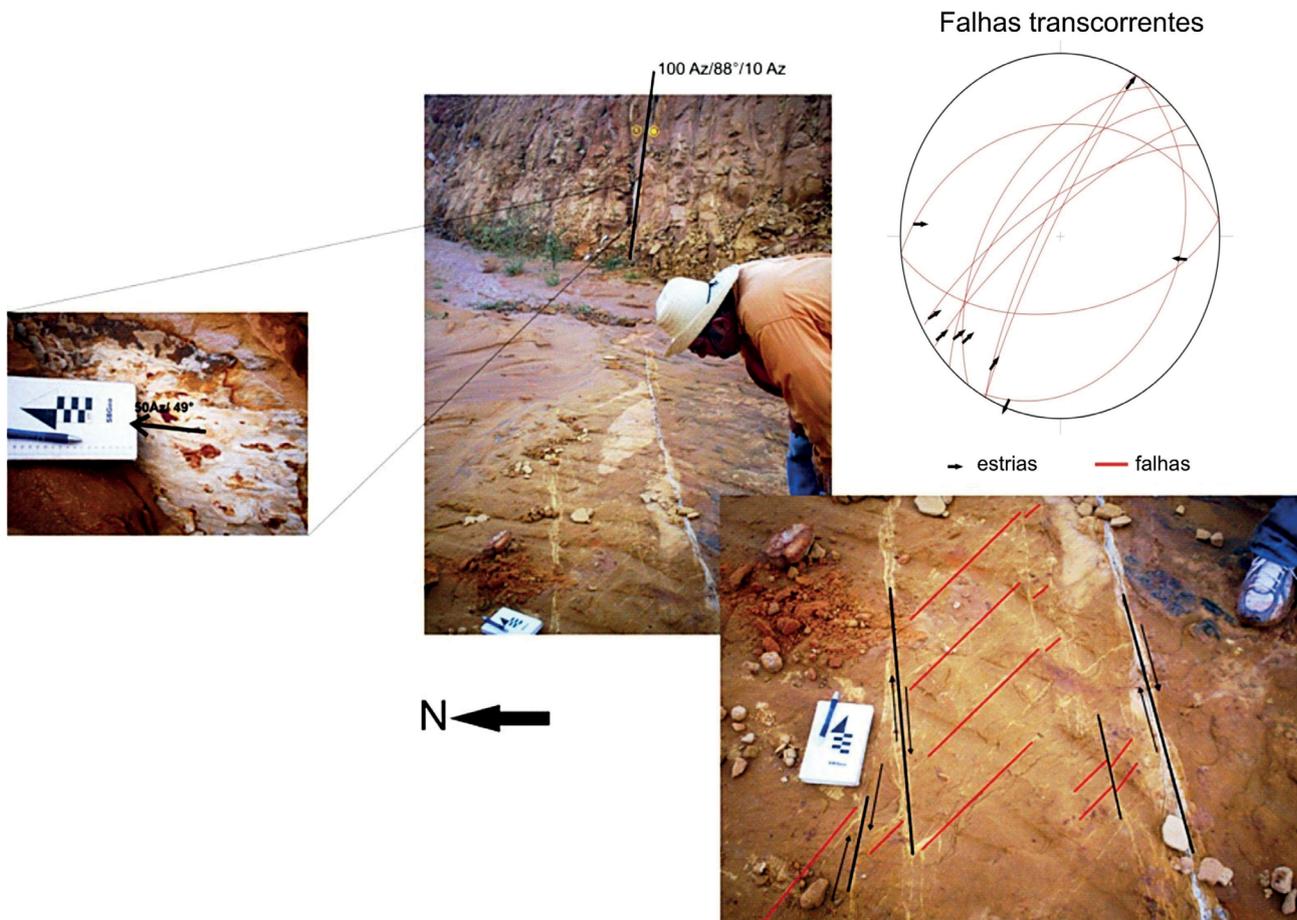
Mais recentemente, Fambrini et al. (2010a, 2010b, 2011b; 2017) empregaram o modelo de Prosser (1993) para atribuir os estágios de evolução tectônica para a Bacia do Araripe, comportando quatro tectonossequências deposicionais limitadas por discordâncias de caráter regional que atestam a superposição de bacias originadas em contextos tectônicos distintos (Assine, 1990, 1992, 2007; Ponte e Ponte Filho, 1996a, 1996b; Neumann e Cabrera, 1999; Fambrini et al., 2007, 2008; Hessel e Freitas, 2009), a saber (Figura 2):

1. Fase Paleozoica (provavelmente Ordoviciano-Siluriano), constituído da Formação Cariri, representada por arenitos médios a grossos granodécrescentes;
2. Fase Início de Rife, de idade jurássica superior, composto da Formação Brejo Santo e da porção inferior da Formação Missão Velha, dispõe-se em horsts e grabens

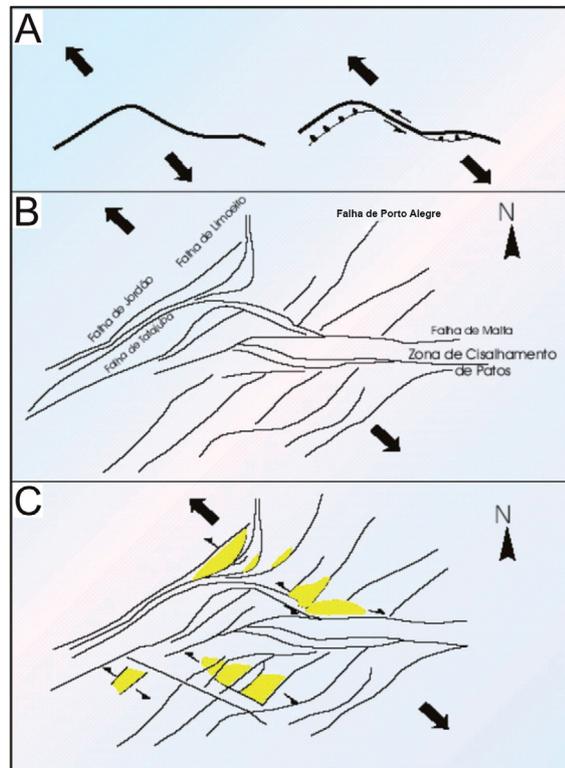
em duas sub-bacias principais separadas pelo alto de Dom Leme: Cariri a leste e Feitoria a oeste;

3. Fase Clímax de Rife, constituído da porção superior da Formação Missão Velha e da Formação Abaiara, com idade neocomiana, formada, respectivamente, por arenitos grossos a médios amalgamados portadores de lenhos fósseis com pelitos subordinados, e por sucessão de arenitos descontínuos lateralmente intercalados em folhelhos variegados calcíferos;

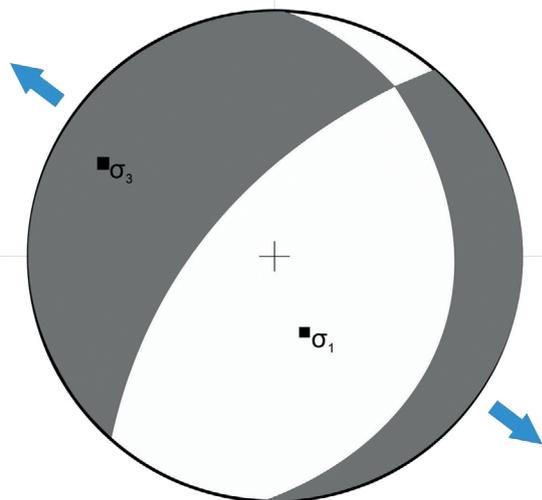
1. Fase Pós-Rife, separado em duas fases, pós-rife I e II (Assine, 2007; Araujo et al., 2008). O Estágio Pós-Rife I ou Inferior, de idade aptiano-albiana, registra o início e a principal fase pós-rife da bacia, sendo constituído das formações Barbalha, Crato, Ipubi e Romualdo, que denota intervalo de tempo pequeno de um ciclo transgressivo-regressivo com ingressão marinha em que ocorre camada repleta



**Figura 21.** Esquema exibindo falha transcorrente de componente dextral associada a bandas de deformação (pares trançados e conjugados) afetando arenitos da Formação Missão Velha. Esterograma exibindo falhas e estrias de caráter transcorrente de componente dextral associada a bandas de deformação (pares trançados e conjugados) que afetaram principalmente arenitos da Formação Missão Velha (UTM 0497371, 9187312).



D Planos nodais *versus* tensores



Fonte: planos obtidos do método de Almendiger (1989).

**Figura 22.** (A) Modelo mostrando a extensão NW-SE ao longo de zonas de cisalhamento sigmoidais preexistentes proposto por Matos (1992) para a origem e a evolução das bacias do Vale do Cariri; (B) cenário tectônico início de rifte; (C) distribuição dos riftes e cenário tectônico; (D) planos nodais associados aos eixos de tensão principais máximos ( $\sigma_1$ ) e ( $\sigma_3$ ) das falhas normais do sistema principal NE-SW. Notar extensão segundo a direção NW-SE, compatível com o modelo de Matos (1992).

de concreções carbonáticas fossilíferas e jazidas de gipsita (evaporitos) (Assine et al., 2014);

2. Estágio Pós-Rifte II ou Superior, de idade albiano-cenomaniana, caracterizada por sedimentos aluviais das formações Araripina e Exu, indicativos de reativação tectônica nesse intervalo de tempo.

A análise tectonossedimentar desenvolvida para as rochas do estágio rifte da Bacia do Araripe possibilitou a identificação de dois conjuntos principais de falhas:

1. conjunto de falhas normais orientadas de acordo com a direção NE-SW (mais antigo), com  $\sigma_1$  subvertical,  $\sigma_2$  NE-SW/sub-horizontal e  $\sigma_3$  próximo de NW-SE/horizontal; e
2. conjunto de falhas normais orientadas segundo NW-SE a WNW-ESE (mais jovem), com arranjo de  $\sigma_1$  vertical,  $\sigma_2$  WNW-ESE/horizontal e  $\sigma_3$  NNE-SSW/sub-horizontal.

O principal conjunto de falhas estudado apresenta orientação NE-SW, com mergulho com sentidos para SE ou NW (Figura 16). As falhas com mergulho SE configuram as falhas sintéticas e as com mergulho com sentido NW, as antitéticas. As falhas de direção NE-SW com mergulho com sentido SE compõem o conjunto que controlou o basculamento da bacia, segundo os modelos de evolução geodinâmica propostos para a Bacia do Araripe (e.g., Ponte e Ponte Filho, 1996a, 1996b).

Outra importante orientação na estruturação da região estudada é o NW-SE (mais jovem que o NE-SW), caracterizado por falhas normais de orientação NW-SE a WNW-ESE. Esse conjunto tem como principal função acomodar movimentos diferenciais nas diversas localidades da bacia, principalmente em razão da heterogeneidade reológica que caracteriza o embasamento da área, composta de granitos, gnaisses e micaxistos, rochas com respostas à deformação dútil distintas. Essas falhas atuaram tanto como falhas de alívio, marcadas por rejeitos predominantemente verticais, como falhas de transferência, caracterizadas por rejeitos horizontais. As falhas normais desse conjunto são praticamente ortogonais ao primeiro, demarcando as áreas de ocorrência das rochas sedimentares da Sequência Clímax de Rifte, pela simples razão de esses sedimentos não ocorrerem além das falhas limítrofes a norte e a sul da Bacia do Araripe. Esse conjunto apresenta relação com movimentação das estruturas maiores do embasamento.

Assim, ainda de acordo com o modelo de Matos (1992), esses falhamentos normais estão relacionados com as fases iniciais do rifteamento dos continentes sul-americano e africano, e estão associados a um esforço extensional máximo de direção aproximada N45E (Figura 22).

Adicionalmente, falhas transcorrentes e inversas também foram assinaladas. As falhas transcorrentes apresentam movimentação lateral dextral (predominante) e sinistral,

orientadas em torno de NNE-SSW e ENE-WSW, todas de alto ângulo de mergulho (Figura 21). Assim, a disposição aproximada dos esforços é  $\sigma_1$  com orientação NE-SW;  $\sigma_2$  na vertical; e  $\sigma_3$  com orientação NW-SE. As falhas transcorrentes apresentam direções NE-SW com eixos de tensões máximos compressivos E-W e extensivos N-S, esforços nos quais não encontram correspondência com os trabalhos publicados na região. Essas falhas são compatíveis com o campo de esforços das falhas normais da família NE-SW. Se NNE-SSW for sinistral e ENE-WSW destal, a compatibilização é com as falhas normais NW-SE. Foram detectadas duas famílias de falhas transcorrentes: aproximadamente NNE-SSW dextrais associadas às falhas normais NE-SW (Figura 20) e aproximadamente E-W sinistrais associadas às falhas normais NW-SE (Figura 21). Esse conjunto perfaz duas fases de esforços. Falhas inversas são localizadas e restritas à inversão de algumas falhas de orientação NE-SW (mais antigas), reativando-as como falhas inversas de pequeno rejeito. Compreendem duas situações: compressões localizadas em flancos de sinfomes de teto e basculamentos com eixos paralelos à direção de falhas normais e sentido do muro para o teto, invertendo o sentido de movimento.

Aqui serão tão somente discutidas as fases início de rifte e clímax de rifte da Bacia do Araripe.

### Fase Início de Rifte (Pré-Rifte)

A Fase Início de Rifte é caracterizada pela formação da chamada Depressão Afro-Brasileira, uma extensa e rasa bacia interior, resultante do estiramento crustal. Tal depressão estendia-se desde a região de Almada, no sul da Bahia, até a região do Cariri, no sul do Ceará, onde era barrada pelo forte relevo desenvolvido ao longo da Zona de Cisalhamento de Patos. Repousando sobre os estratos sedimentares da Formação Cariri, atribuídos ao Estágio Paleozoica, estão as unidades representantes desse estágio: formações Brejo Santo e Missão Velha, de idade situada no Andar Dom João (Neojurássico).

A Formação Brejo Santo representa o início do processo de subsidência formador da Depressão Afro-Brasileira, sendo responsável pelo registro de aproximadamente 450 m de sedimentos finos lacustres. No entendimento de Fambrini et al. (2007, 2008, 2010a, 2010b, 2011a, 2011b, 2017), essa unidade estabeleceria o desenvolvimento do primeiro sistema lacustre completo da Bacia do Araripe, resultando na deposição de até 1.300 m de sedimentos pelíticos lacustres (em razão da compactação de minerais de argila constituintes dos pelitos). Outros autores já haviam admitido sedimentação lacustre para essa unidade (Braun, 1966; Medeiros, 1990; Assine, 1992; Ponte e Ponte-Filho, 1996a).

A exposição denominada de Grota Funda, assim como a região em torno, foi objeto de análise de fácies e de sistemas deposicionais, a área-tipo da Formação Velha. Desse modo,

a Formação Missão Velha abrange a porção superior da Sequência Início de Rifte e a porção inferior da Sequência Clímax de Rifte, informalmente definidas como Formação Missão Velha Inferior (Sequência I) e Formação Missão Velha Superior (Sequência II) (Figura 23).

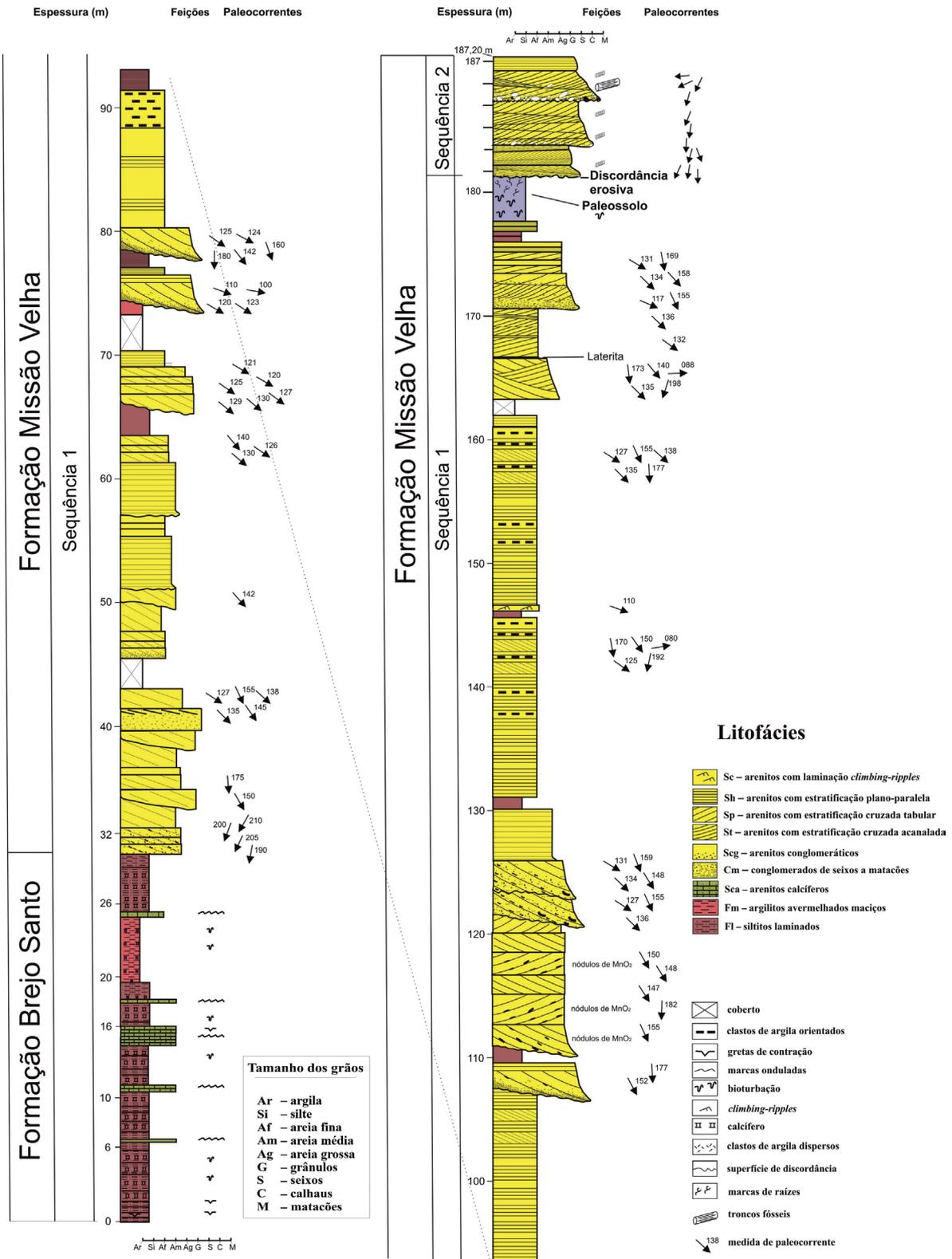
A Sequência I é composta de depósitos pelíticos lacustres na base (Formação Brejo Santo), que são sobrepostos por arenitos finos a médios depositados por canais fluviais efêmeros e, subordinadamente, dunas e lençóis de areia eólicos (porção inferior da Formação Missão Velha), definindo um padrão progradacional com taxa relativamente elevada de criação de espaço de acomodação de sedimentos no início da sequência. O padrão de dispersão de paleocorrentes dos estratos fluviais mostra-se consistente para S, SE e SW. A Sequência I (porção inferior da Formação Missão Velha mais a totalidade da Formação Brejo Santo) caracteriza-se por:

1. depósitos de sistema lacustre com contribuição fluvial;
2. depósitos de sistema fluvial entrelaçado com retrabalhamento eólico;
3. depósitos de sistema fluvial entrelaçado com processo de *sheet-flood*.

Esse padrão de empilhamento sugere diminuição da taxa de criação de espaço de acomodação em direção ao topo dessa sequência.

Os depósitos da Sequência II (porção superior da Formação Missão Velha mais a totalidade da Formação Abaiara) acham-se limitados na base por uma superfície erosiva, sobre um nível de paleossolo de espessura variável e de grande extensão lateral, sendo compostos de arenitos grossos a conglomeráticos portadores de abundantes troncos fósseis depositados por cinturões de canais entrelaçados, cujos estratos cruzados (tabulares e acanalados) mostram sentido de paleocorrentes mais variável, para W, SW, S e SE. A existência de troncos fósseis na Formação Missão Velha superior confirma a existência do hiato deposicional e é coerente com o paleossolo, que deve ter sido colonizado pela floresta, em um estado de equilíbrio da superfície e taxa de criação de espaço de acomodação próxima ou igual a 0.

A Formação Missão Velha constitui-se, de acordo com a proposta de Ponte e Asmus (1978) e Ponte e Ponte Filho (1996a, 1996b), em unidade arenosa principal da denominada Depressão Afro-Brasileira, conjunto de bacias que caracterizaram o Jurássico Superior no início da fragmentação do Supercontinente Gondwana. Esse evento acha-se registrado em várias bacias do Nordeste do Brasil (Ponte, 1994), como as Bacias do Recôncavo-Tucano-Jatobá e de Sergipe e Alagoas. No entendimento dos mencionados autores, a Formação Missão Velha representaria a fase início de rifte na evolução tectonossedimentar das bacias da Depressão Afro-Brasileira. Por outro lado, alguns autores põem a discordância na base da Formação Missão Velha (Neumann, 1999; Neumann e Cabrera, 1999). Depois, Scherer et al.



**Figura 23.** Seção colunar de detalhe do afloramento das localidades de Olho D'água do Comprido e da Grotta Funda, seção-tipo da Formação Missão Velha. Na figura, exibem-se as litofácies, as medidas de paleocorrentes por nível estratigráfico, as feições sedimentares encontradas e a discordância erosiva que separa as sequências S1 e S2 (modificada de Fambrini et al., 2011b).

(2007) identificaram discordâncias internas na Formação Sergi, na Bacia do Recôncavo, correlato cronoestratigráfico da Formação Missão Velha durante o desenvolvimento da Depressão Afro-Brasileira. Os mencionados autores assinalaram a presença de duas discordâncias na Formação Sergi, sendo uma ao final da primeira sequência fluvioeólica, que inclui ainda a Formação Aliança, e a outra ao final da sequência fluvioeólica da Formação Sergi propriamente dita, abaixo da sequência eminentemente fluvial de topo. Essas conclusões são importantes, pois se ambas as unidades compunham a denominada de Depressão Afro-Brasileira, as mesmas discordâncias da Bacia do Recôncavo reconhecidas por Scherer et al. (2007) poderiam ocorrer na Bacia do Araripe. Recentemente, Fambrini et al. (2010a, 2010b, 2010c, 2011a, 2011b, 2017) reconheceram preliminarmente a existência de discordância interna na Formação Missão Velha, onde depósitos de planícies fluvioeólicas com abundantes troncos fósseis silicificados de coníferas (reconhecidos por vários autores, como Beurlen, 1962, 1963; Assine, 1992; Ponte e Ponte Filho, 1996b, entre outros) seriam colmatados por depósitos fluviais grossos de topo com mudança no regime fluvial, de rios entrelaçados efêmeros na primeira sequência para rios entrelaçados de alta energia na segunda sequência. Essa interpretação é reforçada pela presença de abundantes fragmentos de arenitos no topo da Formação Missão Velha na exposição do Morro do Cruzeiro (reconhecida por vários autores, como Ponte e Appi, 1990; Ponte e Ponte Filho, 1996b; Fambrini et al., 2011b, 2011c, 2017), acima da referida discordância.

Ponte Filho (1992) e Ponte e Ponte Filho (1996a, 1996b) estimaram em 24 Ma a suposta duração da Fase Início de Rifte, com base na análise geo-histórica do poço estratigráfico 2-AP-1-CE, tendo a Bacia do Araripe ocupado a porção setentrional da depressão. Os citados autores avaliaram, ainda, que esse estágio foi responsável pela subsidência total de 800 m de sedimentos. Só de registro sedimentar preservado a espessura atinge 650 m, e como os pelitos têm alta taxa de compactação, espera-se que a subsidência tenha sido acentuadamente maior, pelo menos o dobro, como se sugere aqui. Ainda de acordo com Ponte Filho (1992) e Ponte e Ponte Filho (1996a, 1996b), cerca de 2/3 da subsidência total desse estágio seria causada por fatores tectônicos e 1/3 pela subsidência isostática em razão do peso dos sedimentos. A sedimentação transcorreu de modo equilibrado com a subsidência (agração), tendo em vista a deposição em sistemas subaéreos (fluviais e eólicos) e lacustres rasos. O fim do estágio marca o completo assoreamento da então formada bacia, propiciando o desenvolvimento de amplas e exuberantes florestas de coníferas sobre as planícies fluvioeólicas. Isso é corroborado pela abundância de troncos fósseis e madeira silicificados em depósitos de canais fluviais entrelaçados arenoconglomeráticos, vários deles *in situ*.

O padrão de paleocorrentes da porção inferior da Formação Missão Velha na Bacia do Araripe apresenta consistente

dispersão para SSW e SSE, coerente com o padrão obtido em trabalhos consultados na literatura, tais como os de Assine (1994, 2007), Küchle et al. (2011) e de Scherer et al. (2014). Essa interpretação coaduna-se com as paleocorrentes medidas na Bacia do Araripe. O padrão de dispersão sedimentar da Formação Missão Velha, deduzido de 11 estações analisadas e compiladas (191 medidas), era para sul e assinalado por paleocorrentes unimodais para o azimute 190° (Fambrini et al., 2011b, 2017).

Considerando-se a área de ocorrência confirmada dessa fase, conclui-se que o limite norte foi condicionado pelas estruturas leste-oeste do embasamento pré-cambriano/eopaleozoico que compõem a ZCP. Não sendo submetido ao estiramento litosférico, o bloco a norte permaneceu topograficamente mais elevado, funcionando como área-fonte para as bacias que se formavam a sul (Assine, 1994; Arai, 2006). De fato, até o momento, não se registrou comprovadamente a ocorrência de rochas atribuídas a essa fase a norte da ZCP, isto é, nas bacias de Iguatu, Rio do Peixe e Potiguar, entre outras (Figuras 1 e 14).

### Fase Clímax de Rifte (Rifte)

Essa fase corresponde à fase clímax de rifte de Ponte e Ponte Filho (1996a, 1996b). Na Fase Clímax de Rifte, a fragmentação crustal progrediu de sul para norte em razão de zonas de fraquezas relacionadas aos lineamentos Pré-Cambrianos de Pernambuco e de Patos. Essas megaestruturas, com orientação E-W, atuaram como zonas de transferência nos limites da Zona Transversal (Província Borborema), onde se acomodaram os esforços diferenciais entre os blocos ao sul e ao norte (Matos, 1992). As tensões acumuladas em razão da resistência imposta pela zona transversal se estenderam ao sul, para o continente, submetendo a Província da Borborema a esforços de estiramento crustal, de direção WNW-ESE, suficientes para dar início a um processo de rifteamento (Figura 22). Nesse estágio, depositaram-se a parte superior da Formação Missão Velha e toda a Formação Abaiara. A discordância, assim, estaria no topo da Formação Missão Velha, demarcada por nível conglomerático rico em clastos de arenitos grossos a médios das unidades rifte inferiores (Fambrini et al., 2017). Essa discordância é reforçada pela possibilidade de o topo da Formação Missão Velha adentrar o Neocomiano, como sugere Arai (2006). A superfície de topo desse estágio é marcada por superfície erosiva conhecida como discordância pré-aptiana (Ponte e Ponte Filho, 1996b). O padrão de paleocorrentes difere da fase início de rifte, no qual, aqui, as medidas mostram paleofluxo para norte, em direção às bacias de Iguatu e Rio do Peixe.

Com relação à Formação Abaiara, a partir de afloramentos da obra da Ferrovia Transnordestina, foi possível observar a vasta variação de fácies presente na unidade e construir, por meio dela, seções geológicas contínuas chegando

a mais de 100 m de extensão (Figuras 12 e 13). Essas seções e as fotomontagens construídas podem nos mostrar a passagem de um sistema fluvial entrelaçado para um sistema lacustrino deltaico caracterizado pela passagem gradativa dos arenitos de granulometria fina a média para folhelhos arroxeados laminados e maciços, onde, em seguida, foi possível observar a passagem do ambiente lacustre representado pelos folhelhos arroxeados para um ambiente fluvial meandrante caracterizado pelos conglomerados na base desse pacote de arenito (Figuras 12 e 13) (Fambrini et al., 2012a).

Na Bacia do Araripe, formaram-se, simultaneamente pelo mesmo processo, os riftes neocomianos, que tiveram evolução mais rápida e atingiram um estágio pouco mais avançado (Figura 14).

## CONCLUSÕES

A Fase Início de Rife (neojurássico-neocominano da Bacia do Araripe) compreende as formações Brejo Santo e Missão Velha e se constitui no preenchimento sedimentar principal da denominada Depressão Afro-Brasileira, conjunto de bacias que caracterizaram o Neojurássico no início da fragmentação do Supercontinente Gondwana. Esse evento acha-se registrado em várias bacias do Nordeste do Brasil, tais como as Bacias do Recôncavo-Tucano-Jatobá e de Sergipe e Alagoas. A Formação Missão Velha representa a fase início de rife na evolução tectonossedimentar das bacias da Depressão Afro-Brasileira. Entretanto, estudos recentes revelaram a presença de importante discordância interna à Formação Missão Velha, que evidencia modificações no preenchimento tectonossedimentar da unidade. Desse modo, a Fase Início de Rife pode ser subdividida em duas sequências deposicionais, informalmente definidas como Sequência I e Sequência II (Figura 23). A Sequência I é composta de depósitos pelíticos lacustres na base (Formação Brejo Santo), que são sobrepostos por arenitos finos a médios depositados por canais fluviais efêmeros e, subordinadamente, dunas e lençóis de areia eólicos (porção inferior da Formação Missão Velha), definindo um padrão progradacional com taxa relativamente elevada de espaço de acomodação de sedimentos. Os estratos fluviais apresentam paleofluxo consistente para S e SE. A Sequência I (porção inferior da Formação Missão Velha mais a totalidade da Formação Brejo Santo) possui padrão progradacional com taxas relativamente elevadas de espaço de acomodação de sedimentos, caracterizando-se por:

1. depósitos de sistema lacustre com contribuição fluvial;
2. depósitos de sistema fluvial entrelaçado efêmero com retrabalhamento eólico;
3. depósitos de sistema fluvial entrelaçado de alta energia (processos de *sheet-flood*), com paleofluxo consistente para S e SE (Fambrini et al., 2011b, 2011c, 2017).

Os depósitos da Sequência II (porção superior da Formação Missão Velha mais a totalidade da Formação Abaiara) acham-se limitados na base por uma superfície erosiva, sobre um nível de paleossolo de espessura variável e de grande extensão lateral, sendo compostos de arenitos grossos a conglomeráticos portadores de abundantes lenhos fósseis depositados por cinturões de canais entrelaçados, cujos estratos cruzados mostram um sentido de paleocorrente para W, SW, S e SE. A ligeira mudança no sentido de paleocorrente dos sistemas fluviais das sequências I e II indica uma reestruturação no sistema de drenagem, associada a movimentações tectônicas na bacia, sobretudo em seu limite norte (Zona de Cisalhamento de Patos). Além disso, ocorreu uma alteração nas características de descarga do sistema fluvial, associada a uma mudança de condições climáticas mais áridas para mais úmidas. Isso se reflete na abundância de lenhos fósseis silicificados de coníferas presentes na Sequência II. Desse modo, a Formação Missão Velha superior (Sequência II) representaria o início do estágio rife na Bacia do Araripe, de acordo com os preceitos de Prosser (1993) e Martins-Neto e Catuneanu (2010), em função das seguintes características:

1. presença de discordância erosiva que coloca conglomerados de sistemas fluviais entrelaçados ricos em lenhos fósseis silicificados;
2. mudança no regime de drenagem da bacia;
3. refletida na ligeira mudança no sentido de paleocorrentes dos sistemas fluviais das sequências I e II;
4. acentuação na taxa de espaço de acomodação de preenchimento sedimentar da porção superior da Formação Missão Velha, denotada pela presença de conglomerados e arenitos grossos com lenhos fósseis que passam para os conglomerados e os arenitos grossos e folhelhos intercalados da Formação Abaiara.

Essas características acham-se relacionadas ao incremento da atividade tectônica na bacia no início do Cretáceo, significando, em termos tectônicos, as fases iniciais e a própria implantação do Estágio Rife da Bacia do Araripe (*Rift Initiation* de Prosser, 1993).

A análise tectonossedimentar desenvolvida para as rochas da Fase Clímax de Rife da Bacia do Araripe possibilitou a identificação de dois conjuntos principais de falhas:

1. conjunto de falhas normais orientadas de acordo com a direção NE-SW (mais antigo), com  $\sigma_1$  subvertical,  $\sigma_2$  NE-SW/sub-horizontal e  $\sigma_3$  próximo de NW-SE/horizontal;
2. conjunto de falhas normais orientadas segundo NW-SE a WNW-ESE (mais jovem), com arranjo de  $\sigma_1$  vertical,  $\sigma_2$  WNW-ESE/horizontal e  $\sigma_3$  NNE-SSW/horizontal.

Adicionalmente, falhas transcorrentes e inversas também foram assinaladas. A tectônica rife que afetou a Bacia do

Araripe possui esforços distensivos que reativaram falhas antigas pertencentes ao embasamento Pré-Cambriano e que, por sua vez, proporcionaram falhas normais de direção principal NE-SW, e também geraram falhas de direção E-W e NW-SE.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (Processo Universal nº 476232/2006-6 concedido em nome do coordenador Gelson Luís Fambrini), o apoio e a bolsa concedida (bolsa de produtividade em pesquisa de Virgínio Henrique de Miranda Lopes Neumann). Este trabalho recebeu ainda auxílio financeiro do PRH-26/ANP/UFPE, na pessoa dos Coordenadores Profs. Drs. João Adauto de Souza Neto e Mário Lima Filho, a quem agradecemos o suporte financeiro e a concessão de bolsas de graduação aos estudantes Diógenes Ribeiro de Lemos, Jadson Trajano de Araújo, José Acioli Bezerra de Menezes Filho e Sidney Tesser Junior. Ao colega Prof. Dr. Alexandre Magno Feitosa Sales (*in memoriam* URCA-CE), o auxílio nos trabalhos de campo. Ao LAGESE/DGEO/UFPE, o apoio logístico e material. Ao Prof. Dr. José Maurício Rangel da Silva (aposentado, DGEO-UFPE), a criteriosa revisão da parte de análise estrutural do trabalho. Aos editores da *Geologia USP*, assim como a Daniel Machado, a correta orientação, presteza, paciência e auxílio em várias fases da publicação deste trabalho. Aos revisores anônimos da *Revista Geologia USP. Série Científica*, a profunda revisão e as sugestões formuladas, fundamentais para o aprimoramento deste manuscrito.

## REFERÊNCIAS

- Almendiger, R. W. (1989). *Notes on Fault Slip Analysis, Quantitative Interpretation of Joints and Faults*. Free software.
- Angelier, J. (1989). From orientation to magnitudes in paleostress determinations using fault slip data. *Journal of Structural Geology*, 11(1-2), 37-50. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(89\)90034-5](https://doi.org/10.1016/0191-8141(89)90034-5)
- Angelier, J. (1994). Fault slip analysis and paleostress reconstruction. In: P. L. Hancock (Ed.). *Continental deformation* (53-100). Oxford: Pergamon Press.
- Angelier, J., Mechler P. (1977). Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en séismologie: la méthode des dièdres droits. *Bulletin de la Societe Géologique de France*, S7-19(6), 1309-1318. <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.S7-XIX.6.1309>
- Arai, M. (2006). Revisão estratigráfica do Cretáceo Inferior das Bacias Interiores do Nordeste do Brasil. *Geociências*, 25(1), 7-15.
- Araujo, B. C., Morales, N., Assine, M. L., Pellegrini, B. S. (2008). Formação Abaiara da Bacia do Araripe: importante registro da fase rifte no interior do Nordeste do Brasil. *XLIV Congresso Brasileiro de Geologia*, Anais, p. 120. Curitiba: SBG.
- Asmus, H. E., Ponte, F. C. (1973). The Brazilian Marginal Basins. In: A. E. M. Nairn, F. G. Stehli. *The Ocean Basins and Margins V.1: The South Atlantic* (87-133). Nova York: Plenum Press.
- Assine, M. L. (1990). *Sedimentação e Tectônica da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil*. Dissertação (Mestrado). Rio Claro: IGCE/UNESP, 124 p.
- Assine, M. L. (1992). Análise estratigráfica da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 22(3), 289-300. <https://www.doi.org/10.25249/0375-7536.1992289300>
- Assine, M. L. (1994). Paleocorrentes e paleogeografia na Bacia do Araripe, nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 24(4), 223-232.
- Assine, M. L. (2007). Bacia do Araripe. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2), 371-389.
- Assine, M. L., Perinotto, J. A. J., Custódio, M. A., Neumann, V. H. M. L., Varejão, F. G., Mescolotti, P. C. (2014). Sequências deposicionais do Andar Alagoas da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 22(1), 3-28.
- Barros, C. L. (2010). *Ostracodes da Formação Brejo Santo (Neojúrrassico?), Sub-Bacia leste do Araripe, Nordeste do Brasil: Implicações bioestratigráficas*. Dissertação (Mestrado). Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 100 p.
- Barros, C. L., Fambrini, G. L., Galm, P. C., Agostinho, S. (2011). Ostracodes da Formação Brejo Santo (Neojúrrassico?), Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil: implicações paleoambientais e sistemática paleontológica. *Estudos Geológicos*, 21(1), 105-122.
- Beurlen, K. (1962). A geologia da Chapada do Araripe. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 34(2), 365-370.
- Beurlen, K. (1963). Geologia e estratigrafia da Chapada do Araripe. *XVII Congresso Brasileiro de Geologia*, Anais, Suplemento, 47 p. Recife: SBG/SUDENE.

- Braun, O. P. G. (1966). *Estratigrafia dos Sedimentos da Parte Inferior da Região Nordeste do Brasil (Bacias do Tucano-Jatobá, Mirandiba e Araripe)*. Boletim 236, 75 p. Rio de Janeiro: DNPM/DGM.
- Brito-Neves, B. B. (1990). A Bacia do Araripe no contexto geotectônico regional. *I Simpósio sobre a Bacia do Araripe e Bacias Interiores do Nordeste*, Atas, p. 21-33. Crato: DNPM.
- Brito-Neves, B. B., Santos, E. J., Van Schmus, W. R. (2000). Tectonic history of the Borborema Province. In: U. G. Cordani, et al. *Tectonic evolution of the South America. 31<sup>st</sup> International Geological Congress*, p. 151-182. Rio de Janeiro.
- Camacho, C. R., Sousa, F. R. F. R. O. (2017). O arcabouço estrutural da Bacia Sedimentar do Araripe, Província Borborema, baseado em dados aeromagnetométricos. *Geologia USP. Série Científica*, 17(3), 149-161. <https://www.doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v17-393>
- Castro, D. L., Castelo Branco, R. M. G. (1999). Caracterização da arquitetura interna das bacias do Vale do Cariri (NE do Brasil) com base em modelagem gravimétrica 3-D. *Revista Brasileira de Geofísica*, 17(2-3), 130-144. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X1999000200003>
- Cesero, P., Ponte, F. C. (1997). Análise comparativa da paleogeologia dos litorais atlânticos brasileiro e africano. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 11(1/2), 1-18.
- Coimbra, J. C., Arai, M., Carreño, A. L. (2002). Biostratigraphy of Lower Cretaceous microfossils from Araripe basin, Northeastern Brazil: a stratigraphical approach. *Geobios*, 35(6), 687-698. [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-6995\(02\)00082-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-6995(02)00082-7)
- Crepani, E. (1987). *Análise de fracturas através de imagens fotográficas de baixa resolução da Chapada do Araripe-NE do Brasil*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências, USP. <https://www.doi.org/10.11606/T.44.2016.tde-12022016-144601>
- Fambrini, G. L., Araújo, J. T., Lemos, D. R., Neumann, V. H. M. L., Tesser Jr., S., Souza, B. Y. C., Silva-Filho, W. F. (2009a). A Formação Missão Velha na Área-Tipo, Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil: Fácies e Sistemas Depositionais. *XXIII Simpósio de Geologia do Nordeste*, Boletim 21, p. 34. Fortaleza: SBG/Núcleo NE. CD-ROM.
- Fambrini, G. L., Buarque, B. V., Menezes-Filho, J. A. B., Valença, L. M. M., Araújo, J. T., Neumann, V. H. (2012a). Análise estratigráfica da Formação Abaiara (Neocomiano), Bacia do Araripe, NE do Brasil: implicações para a implantação da fase rifte das bacias fanerozóicas brasileiras. *XLVI Congresso Brasileiro de Geologia*, Anais, CD-ROM. Santos: SBG.
- Fambrini, G. L., Lemos, D. R., Menezes-Filho, J. A. B., Silva-Filho, W. F., Neumann, V. H. M. L., Lima-Filho, M., Buarque, B. V. (2011a). Análise da tectônica rifte na Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil: implicações para a geração e acumulação de hidrocarbonetos. *VII Congresso Brasileiro em P&D em Petróleo e Gás Natural*. Florianópolis: ABGP. CD-ROM.
- Fambrini, G. L., Lemos, D. R., Tesser Jr., S., Araújo, J. T., Silva-Filho, W. F., Souza, B. Y. C., Neumann V. H. M. L. (2011b). Estratigrafia, arquitetura deposicional e faciologia da Formação Missão Velha (Neojurássico-Eocretáceo) na área-tipo, Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil: exemplo de sedimentação de estágio de início de Rift a Clímax de Rift. *Geologia USP. Série Científica*, 11(2), 55-87. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X2011000200004>
- Fambrini, G. L., Menezes-Filho, J. A. B., Jesuíno, P. C. L., Araújo, J. T., Durval, L. G. L., Neumann, V. H. M. L. (2015). Sucessão faciológica da Formação Barbalha (Aptiano), Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Estudos Geológicos*, 25, 139-166. <https://doi.org/10.18190/1980-8208/estudosgeologicos.v25n1p137-164>
- Fambrini, G. L., Neumann, V. H. M. L., Barros, C. L., Agostinho, S. M., Galm, P. C., Araújo, J. T., Menezes Filho, J. A. B. (2012b). Análise de fácies da Formação Brejo Santo, Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil: implicações paleogeográficas. *Estudos Geológicos*, 22(1), 131-155.
- Fambrini, G. L., Neumann, V. H. M. L., Barros, C. L., Silva, S. M. O. A., Galm, P. C., Menezes Filho, J. A. B. (2013). Análise estratigráfica da Formação Brejo Santo, Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil: implicações paleogeográficas. *Geologia USP. Série Científica*, 13(4), 3-28. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X201300040001>
- Fambrini, G. L., Neumann, V. H. M. L., Lemos, D. R., Araújo, J. T., Buarque, B. V., Menezes Filho, J. A. B., Silva Filho, W. F., Lima, C. B. (2011c). Significado tectônico da Formação Missão Velha, Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *XIII Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos / VII International Symposium on Tectonics*, Anais, p. 414-417. Campinas: SBG.
- Fambrini, G. L., Neumann, V. H. M. L., Lemos, D. R., Araújo, J. T., Lima-Filho, M. F., Silva-Filho, W. F. (2010a). Stratigraphy and sedimentology of the Rift Initiation to Rift Climax stages of the Araripe Basin, Northeastern Brazil: new considerations. *18<sup>th</sup> International Sedimentological Congress*, Abstracts, v. 1, p. 333. Mendoza: IAS/Petrobras. CD-ROM.

- Fambrini, G. L., Neumann, V. H. M. L., Lemos, D. R., Araújo, J. T., Lima-Filho, M. F., Tesser Jr., S. (2010b). Facies and architectural elements of Missão Velha Formation (Upper Jurassic-Eocretaceous), Araripe Basin, Northeastern Brazil. *18<sup>th</sup> International Sedimentological Congress, Abstracts*, v. 1, p. 332. Mendoza: IAS/Petrobras.
- Fambrini, G. L., Neumann V. H. M. L., Menezes Filho, J. A. B., Silva-Filho, W. F., Oliveira, E. V. (2017). Facies architecture of fluvial Missão Velha Formation (Neojurassic-Eocretaceous), Araripe Basin, Northeast Brazil: paleogeographic and tectonic implications. *Acta Geologica Polonica*, 67(4):515-545. <https://doi.org/10.1515/agp-2017-0029>
- Fambrini, G. L., Neumann, V. H. M. L., Silva Filho, W. F., Tesser Jr., S., Valença, L. M. M., Lima-Filho, M. F., Araújo, J. T., Souza, B. Y. C., Lemos, D. R. (2008). Eventos de subsidência e instalação de sistemas lacustres na Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *XLIV Congresso Brasileiro de Geologia*, Anais, p. 118. Curitiba: SBG.
- Fambrini, G. L., Neumann, V. H. M. L., Silva-Filho, W. F., Valença, L. M. M., Lima-Filho, M. F., Barbosa J. A., Tesser Jr., S., Souza, B. Y. C. (2007). Sistemas lacustres da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil: resposta à subsidência e tectônica de bacias rifte. *XXII Simpósio de Geologia do Nordeste*, Atas, 007, p. 101. Natal: SBG.
- Fambrini, G. L., Silvestre, D. C., Menezes-Filho, J. A. B., Costa, I. C., Neumann, V. H. M. L. (2019). Architectural and facies characterization of the Aptian fluvial Barbalha Formation, Araripe Basin, NE Brazil. In: P. W. M. Corbett, A. Owen, A. J. Hartley, S. Pla-Pueyo, D. Barreto, C. Hackney, S. J. Kape (eds.). *River to Reservoir: Geoscience to Engineering. Geological Society, London, Special Publications*, 488. (in press). <http://dx.doi.org/10.1144/SP488-2017-275>
- Fambrini, G. L., Tesser Jr., S., Neumann, V. H. M. L., Souza, B. Y. C., Silva Filho, W. F. (2009b). Fácies e Sistemas Depositionais na área-tipo da Formação Missão Velha, Bacia do Araripe, CE. *Estudos Geológicos*, 19(1), 161-190.
- Fambrini, G. L., Tesser Jr., S., Neumann, V. H. M. L., Souza, B. Y. C., Silva Filho, W. F., Araújo, J. T., Lemos, D. R. (2010c). Sedimentary facies analysis and depositional systems of Missão Velha Formation in the type-area, Araripe Basin, northeastern Brazil: reservoir implications. *Rio Oil & Gas Expo and Conference*, Anais, 10 p. Rio de Janeiro. CD-ROM.
- Garcia, A. J. V. (1991). Evolução sedimentar da seqüência pré-rifte das bacias costeiras e interiores do Nordeste brasileiro. *Pesquisas*, 18(1), 3-12. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.21357>
- Gaspary, J., Anjos, N. F. R. (1964). *Estudo Hidrogeológico de Juazeiro do Norte - Ceará*. Recife: SUDENE, 25 p. (Série Hidrogeologia 3).
- Guerra, S. M. S. (1986). Análise Morfoestrutural da Bacia do Araripe. *III Congresso Brasileiro do Petróleo*. Boletim, IBP/PETROBRÁS, TT-119, 12 p. Rio de Janeiro.
- Hancock, P. L. (1994). *Continental Deformation*. Oxford: Pergamon Press, 421 p.
- Hessel, M. H., Freitas, F. I. (2009). A Polibacia do Araripe. *XXIII Simpósio de Geologia do Nordeste*, Boletim 21. Fortaleza: SBG/Núcleo NE. CD-ROM.
- Küchle, J., Scherer, C. M. S., Born, C. C., Alvarenga, R. S., Adegas, F. A. (2011). Contribution to Regional Stratigraphic Correlations of the Afro-Brazilian Depression – The Dom João Stage (Brotas Group and Equivalent Units – Late Jurassic) In: Northeastern Brazilian Sedimentary Basins. *Journal of the South American Earth Sciences*, 31(4), 358-371. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.02.007>
- Martins-Neto, M., Catuneanu, O. (2010). Rift sequences stratigraphy. *Marine and Petroleum Geology*, 27(1), 247-253. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.08.001>
- Matos, R. M. D. (1992). The Northeast Brazilian rift system. *Tectonics*, 11(4), 766-791. <https://doi.org/10.1029/91TC03092>
- Matos, R. M. D. (1999). History of the northeast Brazilian rift system: kinematic implications for the break-up between Brazil and West Africa. In: N. R. Cameron, R. H. Bate, V. S. Clure (eds.). *The Oil and Gas Habitats of the South Atlantic. Geological Society Special Publication*, 153, 55-73.
- Medeiros, R. A. (1990). Ambientes deposicionais da Bacia do Araripe. *I Simpósio sobre a Bacia do Araripe e Bacias Interiores do Nordeste*, Atas. Crato: Departamento Nacional da Produção Mineral, Universidade Regional do Cariri, Sociedade Brasileira de Paleontologia.
- Medeiros, R. A., Ponte, F. C., Ponte-Filho, F. C. (1997). Análise estratigráfica da Bacia do Araripe: Parte 2 - Análise de Fácies. *II Simpósio sobre a Bacia do Araripe e Bacias Interiores do Nordeste*, Atas, p. 93-100. Crato: Departamento Nacional da Produção Mineral, Universidade Regional do Cariri, Sociedade Brasileira de Paleontologia, 2001.
- Melo, B. G. V., Carvalho, I. S. (2017). A Fauna da Formação Brejo Santo, Neojurássico da Bacia do Araripe, Brasil: Interpretações Paleoambientais. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, 40(3), 62-74. [https://doi.org/10.11137/2017\\_3\\_62\\_74](https://doi.org/10.11137/2017_3_62_74)

- Miall, A. D. (1985). Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits. *Earth Science Reviews*, 22(4), 261-308. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(85\)90001-7](https://doi.org/10.1016/0012-8252(85)90001-7)
- Miall, A. D. (1996). *The geology of fluvial deposits: sedimentary facies, basin analysis and petroleum geology*. Nova York: Springer, 582 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-03237-4>
- Miall, A. D. (2006). Reconstructing the architecture and sequence stratigraphy of the preserved fluvial record as a tool for reservoir development: A reality check. *AAPG Bulletin*, 90(7), 989-1002. <https://doi.org/10.1306/02220605065>
- Miranda, L. O. S., Ferrari, M. P., Viana, R. B. (1986). Prospecção sísmica de reconhecimento na Bacia do Araripe. *III Congresso Brasileiro de Petróleo*, Boletim, TT-158, 11 p. Rio de Janeiro.
- Miranda, T. S. (2015). *Caracterização geológica e geomecânica dos depósitos carbonáticos e evaporíticos da Bacia do Araripe, NE Brasil*. Tese (Doutorado). Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 259 p. <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/17055>
- Morales, N., Assine, M. L., Araújo, B. (2011). Tectônica rifte na Bacia do Araripe, NE do Brasil. *XIII Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos / VII International Symposium on Tectonics*, Anais, p. 478-481. Campinas.
- Morales, N., Hasui Y., Assine, M. L., Chagas, D. B. (2006). Eventos de tectônica rúptil na evolução da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *VII Simpósio sobre o Cretáceo do Brasil*, Boletim UNESP/IGCE, p. 87. Serra Negra.
- Morley, C. K. (2002). Evolution of large normal faults: Evidence from seismic reflection data. *American Association of Petroleum Geology Bulletin*, 86(6), 961-978. <https://doi.org/10.1306/61EEDBFC-173E-11D7-8645000102C1865D>
- Neumann, V. H. M. L. (1999). *Estratigrafia, sedimentologia, geoquímica y diagénesis de los sistemas lacustres Aptienses-Albienses de la Cuenca de Araripe (Nordeste de Brasil)*. Tese (Doctorado). Barcelona: Universidad de Barcelona, 244 p.
- Neumann, V. H. M. L., Cabrera, L. (1999). Una nueva propuesta estratigráfica para la tectonosecuencia post-rifte de la Cuenca de Araripe, Nordeste de Brasil. *V Simpósio Sobre o Cretáceo do Brasil*, Boletim de Resumos, p. 279-285. Serra Negra: UNESP/IGCE.
- Neumann, V. H. M. L., Mabesoone, J. M., Viana, M. S. S. (2000). Late Jurassic to Mid-Cretaceous Lacustrine Sequences in the Araripe-Potiguar Depression of Northeastern Brazil. In: E. H. Gierlowski-Kordesch, K. R. Kelts. *Lake Basins through Space and Time* (46, 197-208). Tulsa: The American Association of Petroleum Geologists, AAPG Studies in Geology.
- Petit, J. P. (1987). Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks. *Journal of Structural Geology*, 9(5-6), 597-608. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(87\)90145-3](https://doi.org/10.1016/0191-8141(87)90145-3)
- Petri, S. (1987). Cretaceous paleogeographic maps of Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 59, 117-168. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(87\)90077-0](https://doi.org/10.1016/0031-0182(87)90077-0)
- Ponte, F. C. (1992). Sistemas deposicionais na Bacia do Araripe, nordeste do Brasil. *II Simpósio sobre as Bacias Cretácicas Brasileiras*, 81-84. Rio Claro.
- Ponte, F. C. (1994). Extensão paleogeográfica da Bacia do Araripe no Mesocretáceo. *III Simpósio Sobre o Cretáceo do Brasil*, Boletim de Resumos Expandidos, p. 131-135. Rio Claro: UNESP.
- Ponte, F. C. (1996). Arcabouço estrutural da Bacia do Araripe. *IV Simpósio Sobre o Cretáceo do Brasil*, Boletim, p. 169-177. Águas de São Pedro: UNESP/IGCE.
- Ponte, F. C., Appi, C. J. (1990). Proposta de revisão da coluna litoestratigráfica da Bacia do Araripe. *XXXVI Congresso Brasileiro de Geologia*, Anais, 1, 211-226. Natal: SBG.
- Ponte, F. C., Asmus, H. E. (1978). Geological framework of the Brazilian continental margin. *Geologische Rundschau*, 67(1), 201-235. <https://doi.org/10.1007/BF01803262>
- Ponte, F. C., Ponte-Filho, F. C. (1996a). *Estrutura geológica e evolução tectônica da Bacia do Araripe*. Recife: Departamento Nacional da Produção Mineral, 4º e 10º Distritos Regionais, Delegacias do Ministério das Minas e Energia em Pernambuco e Ceará, 68 p.
- Ponte, F. C., Ponte-Filho, F. C. (1996b). Evolução tectônica e classificação da Bacia do Araripe. *IV Simpósio Sobre o Cretáceo do Brasil: Águas de São Pedro*, Boletim, p. 123-133. Rio Claro: UNESP.
- Ponte-Filho, F. C. (1992). Análise de geohistória do poço 2-AP-1-CE, Bacia do Araripe. *II Simpósio sobre Bacias Cretácicas Brasileiras*, Resumos Expandidos, p. 85-89. Rio Claro: UNESP/IGCE.
- Ponte-Filho, F. C., Ponte, F. C. (1992). Caracterização estratigráfica da Formação Abaiara, Cretáceo inferior da Bacia do Araripe. *II Simpósio sobre bacias cretáceas brasileiras*, Resumos Expandidos, p. 61-64. Rio Claro: UNESP.

- Prosser, S. (1993). Rift-related linked depositional systems and their seismic expression. *Geological Society, Special Publications*, 71(1), 35-66. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1993.071.01.03>
- Rand, H. M., Manso, V.A. V. (1984). Levantamento gravimétrico e magnetométrico da Bacia do Araripe. *XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia, Anais*, 4, 2011-2016. Rio de Janeiro: SBG.
- Santos, E. J., Nutman, A. P., Brito Neves, B. B. (2004). Idades SHRIMP U-Pb do Complexo Sertânia: implicações sobre a evolução tectônica da Zona Transversal, Província Borborema. *Geologia USP. Série Científica*, 4(1), 1-12. <https://doi.org/10.5327/S1519-874x2004000100001>
- Scherer, C. M. S., Jardim de Sá, E. F., Córdoba, V. C., Sousa, D. C., Aquino, M. M., Cardoso, F. M. C. (2014). Tectono-stratigraphic evolution of the Upper Jurassic-Neocomian rift succession, Araripe Basin, Northeast Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 49, 106-122. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2013.10.007>
- Scherer, C. M. S., Lavina, E. L. C., Dias Filho, D. C., Oliveira, F. M., Bongioiolo, D. E., Aguiar, E. S. (2007). Stratigraphy and facies architecture of the fluvial–aeolian–lacustrine Sergi Formation (Upper Jurassic), Recôncavo Basin, Brazil. *Sedimentary Geology*, 194(3-4), 169-193. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2006.06.002>