



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 475

**PALEOAMBIENTE E ICNOFÓSSEIS DA FORMAÇÃO
PIMENTEIRAS, DEVONIANO DA BACIA DO PARNAÍBA,
REGIÕES DE VALENÇA DO PIAUÍ E PIMENTEIRAS, PIAUÍ**

Dissertação apresentada por:

LUCAS NORONHA CUNHA

Orientador: Prof. Dr. Afonso César Rodrigues Nogueira (UFPA)

**BELÉM
2015**

Dados Internacionais de Catalogação de Publicação (CIP)
Biblioteca do Instituto de Geociências/SIBI/UFPA

Cunha, Lucas Noronha, 1990-

Paleoambiente e icnofósseis da Formação Pimenteiras, devoniano da Bacia do Parnaíba, regiões de Valença do Piauí e Pimenteiras, Piauí / Lucas Noronha Cunha. – 2015.

xv, 78 f. : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Afonso César Rodrigues Nogueira

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2015.

1. Fácies (Geologia). 2. Geologia estratigráfica – Devoniano. 3. Parnaíba, Rio, Bacia (PI e MA). I. Título.

CDD 22. ed. 552.5098122



Universidade Federal do Pará
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

**PALEOAMBIENTE E ICNOFÓSSEIS DA FORMAÇÃO
PIMENTEIRAS, DEVONIANO DA BACIA DO PARNAÍBA,
REGIÕES DE VALENÇA DO PIAUÍ E PIMENTEIRAS, PIAUÍ**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR
LUCAS NORONHA CUNHA

**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de
GEOLOGIA.**

Data de Aprovação: 08 / 12 / 2015

Banca Examinadora:

Prof. AFONSO CÉSAR RODRIGUES NOGUEIRA
(Orientador-UFPA)

Prof. WERNER TRUCKENBRODT
(Membro-UFPA)

Prof.ª RENATA GUIMARÃES NETTO
(Membro- UNISINOS)

À minha família,
Abel Cunha, Neuma Cunha,
Samara Cunha, Jonata Cunha,
Alex Xavier e Mila Silva

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por ter me sustentado e me guiado durante toda minha vida, não deixando eu me afastar dos seus caminhos e me dando forças e sabedoria pra continuar e superar os obstáculos encontrados até aqui.

Ao Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo suporte financeiro e infraestrutura disponível.

A minha família, meus pais e irmão pela educação, amizade e companheirismo durante todos esses anos.

A minha namorada Mila pelo amor, amizade e paciência que teve comigo durante esses anos, sem ela não teria chegado até aqui.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Afonso Nogueira pelas orientações prestadas neste trabalho e na minha vida acadêmica ao longo desses anos e, principalmente, ao Prof. Dr. Joelson Soares por toda a ajuda, discussões e críticas no desenvolvimento desse trabalho, assim como o apoio, companheirismo e amizade construída ao longo desse tempo, desde a época de monitorias, TCC e agora mestrado.

E ao Prof. Dr. Roberto César, pelo auxílio e apoio durante a viagem de campo e nas discussões posteriores ao decorrer da elaboração da dissertação.

A toda a turma de Geologia de 2008, por ter compartilhado tantos momentos juntos, em cada uma das nossas viagens e confraternizações durante o curso. Em especial aos meus colegas de turma e de laboratório Renato (socó) e Raphael pela amizade e companheirismo durante todo esse tempo trabalhando juntos.

Aos amigos de pós-graduação do Grupo de Análises de Bacias Sedimentares da Amazônia (GSED/UFGA) pelos momentos juntos, brincadeiras e contribuições dadas este trabalho.

RESUMO

Um dos mais expressivos registros dos mares devonianos do Oeste do Gondwana é representado pelos folhelhos e arenitos da Formação Pimenteiras, exposta na Bacia do Parnaíba, Região Nordeste do Brasil. Esta formação tem sido interpretada como depósitos de plataforma influenciada por tempestades representativos da fase transgressiva ocorrida entre o Mesodevoniano e o Neodevoniano. A análise de fácies e estratigráfica da Formação Pimenteiras, em excelentes exposições nas regiões de Valença do Piauí e Pimenteiras, Estado do Piauí, corroborou a interpretação prévia desta unidade, bem como proporcionou a identificação de sua diversidade e abundância icnofossilífera para a determinação de parâmetros paleoambientais, tais como taxa de sedimentação, oxigenação e batimetria. Duas associações de fácies foram individualizadas para a Formação Pimenteiras: 1) *offshore/shoreface*, caracterizada por arenitos com estratificação cruzada *hummocky*, intercalado com arenitos com laminação ondulada, acamamento maciço e folhelhos configurando um padrão tipo *pinch-and-swell*; e 2) *offshore* superior, caracterizada por camadas de espessuras métricas e lateralmente contínuas por dezenas de metros de folhelhos, com intercalação de arenitos com estratificação cruzada *hummocky*. A icnologia sistemática da Formação Pimenteiras permitiu a identificação de 15 icnogêneros tais como, *Agrichnium*, *Bergaueria*, *Bifungites*, *Circulichnis*, *Cruziana*, *Diplichnites*, *Helminthopsis*, *Lockeia*, *Lophoctenium*, *Palaeophycus*, *Phycosiphon*, *Planolites*, *Protopaleodictyon*, *Rusophycus* e *Zoophycos*. Os icnogêneros *Agrichnium* e *Circulichnis* são descritos pela primeira vez na Formação Pimenteiras. Níveis de bioturbação distintos ocorrem restritos aos arenitos, com índices de icnofábrica (ii) 3, variando entre 15% e 25%. Estes valores médios de ii sugerem níveis de oxigenação típicos de ambientes aeróbicos, ou a zona de interface água-sedimento com razoáveis níveis de oxigenação. Estes níveis de bioturbação são geralmente limitados por folhelhos com pouca (ii = 2) ou nenhuma bioturbação (ii = 1), o que sugere um ambiente anaeróbico próximo ao substrato. A Formação Pimenteiras inclui as seguintes icnofácies representativas da transição *offshore/shoreface*: *Skolithos*, representativa de ambiente de alta energia dominado por ondas; e *Cruziana*, relacionado a zona litorânea e ambiente marinho raso a profundo. A predominância de espécimes da icnofácie *Cruziana* e com subordinada ocorrência de espécimes da icnofácies *Skolithos* nos depósitos estudados sugerem uma relação entre uma ocupação do substrato permanente pontuada pela exploração episódica de indivíduos colonizadores, após eventos de tempestades. Os estudos de fácies em combinação com a análise icnológica da Formação Pimenteiras forneceram importantes parâmetros para o

entendimento da dinâmica sedimentar e a ocupação do substrato por organismos bentônicos durante o estabelecimento dos mares epicontinentais devonianos no oeste Gondwana.

Palavras-chave: Formação Pimenteiras. Devoniano. Icnofósseis. Fácies deposicionais.

ABSTRACT

Shales and sandstones of the Pimenteiras Formation represent the most expressive records of Devonian seas in the Western Gondwana, exposed in the eastern border of Parnaíba Basin, Northern Brazil. This formation has been interpreted as storm-influenced platform deposits related to the transgressive phase during Mesodevonian to Neodevonian periods. Based-outcrop facies and stratigraphic analysis of the Pimenteiras Formation in the Valença do Piauí and Pimenteiras regions, State of Piauí, corroborated the previous interpretation of this unit, as well as allowed the identification of its ichnofossiliferous diversity and abundance for the determination of paleoenvironmental parameters, such as sedimentation rate, oxygenation and bathymetry. Two facies associations were individualized for Pimenteiras Formation: 1) offshore/shoreface, characterized by hummocky cross-stratified sandstone interbedded with ripple bedded sandstone, massive sandstone and shale, configuring a pinch-and-swell pattern; and 2) upper offshore deposits, consisting by meter-scale thick beds, laterally continuous by dozens of meter of shale, interbedded with hummocky cross-stratified sandstone. Systematic ichnology of Pimenteiras Formation indicated 15 ichnogenera, such as *Agrichnium*, *Bergaueria*, *Bifungites*, *Circulichnis*, *Cruziana*, *Diplichnites*, *Helminthopsis*, *Lockeia*, *Lophoctenium*, *Palaeophycus*, *Phycosiphon*, *Planolites*, *Protopaleodictyon*, *Rusophycus* and *Zoophycos*. The *Agrichnium* and *Circulichnis* ichnogenera are described for the first time in the Pimenteiras Formation. Different bioturbation levels occur restricted to sandstone beds were identified, with ichnofabric index (ii) 3, ranging between 15% and 25%. These average values of ii suggest typical oxygenation levels related to aerobic environments, or the sediment-water interface zone with reasonable oxygenation levels. These bioturbation levels are usually limited by shales with low (ii = 2) or none (ii = 1) bioturbation, suggesting an anaerobic environment near to the substrate. The Pimenteiras Formation includes the following ichnofacies representatives of offshore/shoreface transition: *Skolithos*, related to wave-dominated high energy environment; and *Cruziana* ichnofacies correspondent to the littoral zone and shallow to deep marine environment. The predominance of specimens of *Cruziana* with subordinate specimens of *Skolithos* ichnofacies in the studied deposits suggests a relationship with a permanent occupation of the substrate punctuated by episodic exploration of colonizers individuals, after the storm events. The facies analysis in combination with ichnologic studies carried out in the Pimenteiras Formation provided important parameters for the understanding of sedimentary

dynamic and substrate occupation by bentonic organism during the establishment of Devonian epicontinental seas in the Western Gondwana.

Keywords: Pimenteiras Formation. Devonian. Ichnofossils. Depositional Facies.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1- Mapa de localização e geológico simplificado da área de estudo, região de Valença do Piauí e Pimenteiras (PI), borda leste da Bacia do Parnaíba.4
- Figura 2- Subdivisão dos traços fósseis a partir da sua disposição no substrato de acordo com a classificação de Martinsson e Seilacher7
- Figura 3- Carta para avaliação semiquantitativa da distribuição de bioturbações utilizado para obtenção do índice de icnofábrica de planos de acamamento.9
- Figura 4- Distribuição espacial das principais sucessões sedimentares que constituem o arcabouço litoestratigráfico da Bacia do Parnaíba..... 13
- Figura 5- Carta estratigráfica da Bacia do Parnaíba. Destacado em vermelho o intervalo relativo à Formação Pimenteiras..... 14
- Figura 6- Evolução das transgressões marinhas no continente sulamericano durante o Devoniano. A) Inundação eodevoniana no Brasil (aprox. 400 Ma). 1-Área emersa; 2 - Ambientes sedimentares marinhos; 3 - Ambientes transicionais; 4 - Ambientes sedimentares não-marinhos; 5 - Setas indicativas das principais direções de suprimento sedimentar; 6 - Posição estimada do Pólo Sul; B) Inundação eodevoniana no Brasil (aprox. 395 Ma). Convenções idênticas às da Fig. A; C) Inundação neo-emisiana/eifeliana no Brasil (aprox. 390 Ma). Convenções idênticas às da Fig. A; D) Inundação mesodevoniana no Brasil (aprox. 380 Ma). Convenções idênticas às da Fig. A, exceto para 6 - Extensão máxima oriental dos ambientes não-marinhos e transicionais na Bacia do Solimões (Sub-bacia Juruá).20
- Figura 7- Mapa de localização e geológico simplificado da região de Valença do Piauí e Pimenteiras (PI), borda leste da Bacia do Parnaíba com as localizações dos pontos estudados.....25

Figura 8- Geometria e fácies deposicionais dos depósitos de *offshore/shoreface* da Formação Pimenteiras. A) Lajedo composto de intercalações de arenitos e folhelhos com geometria tabular a ondulada que afloram no leito e nas margens do rio Sambito, no sitio de Oiti. B) Detalhe da fácies arenito com laminação ondulada. C) Camadas de arenito com estratificação cruzada *hummocky* intercalada a lentes de folhelho. D) Camadas onduladas de arenito com estratificação cruzada *hummocky* intercalados com delgadas camadas de folhelhos com inclinação suave para NW. E) Bioturbação horizontal e suavemente curvada na qual a estrutura é constituída por tubos preenchidos por argila e estruturas semelhantes à *spreiten* caracterizados por intercalações de argila e areia/silte, possivelmente associado à *Phycosiphon*. F) Escavação horizontal que deforma a estratificação cruzada *hummocky* possivelmente relacionada à *Palaeophycus* devido a compodição da da rocha matriz. 31

Figura 9- Depósitos de *offshore* superior da Formação Pimenteiras, nas proximidades do município de Pimenteiras. A) Camadas de folhelho (F) com raras intercalações de corpos lenticulares de arenitos com HCS. B) Afloramento próximo a cidade de Pimenteiras com espessos pacotes de folhelhos e camadas tabulares de arenitos maciço no topo. As setas pretas indicam a base das camadas de arenitos onde ocorrem as bioturbações. C) Camada lenticular de arenito com HCS sobreposta que ocorrem inseridas em espessas camadas de folhelho (F). 32

Figura 10- Perfil estratigráfico da sucessão siliciclástica da Formação Pimenteiras na localidade de Oiti, Pimenteiras (PI), relacionado aos índices de icnofábrica (ii) definidos para cada um dos níveis individualizados. 35

Figura 11- Perfil estratigráfico da sucessão siliciclástica da Formação Pimenteiras elaborado com base nas exposições aflorantes na localidade de Oiti, Pimenteiras (PI), com o posicionamento dos níveis de bioturbação, assim como a ocorrência e quantificação dos i cnogêneros em cada um dos níveis. 36

Figura 12- Icnogêneros descritos e identificados no topo de camadas das fácies HCS na Formação Pimenteiras. A) Terminações circulares pareadas, possivelmente de *Arenicolites* vistas em planta. B) *Bifungites piauienses* exibindo terminações em forma de seta. C) Pistas simples caracterizadas por sulcos isolados e alongados de comprimento aproximadamente iguale dispostos em pares paralelos e de espaçamento constante descrito como *Diplichnites* isp. D) Tubos horizontais retilíneos e suavemente curvados que se inter cruzam de *Palaeophycus*. E) Tubos horizontias curtos e retilíneos de *Planolites*, constituído de material diferente da rocha matriz. F) Traços horizontais sinuosos com inter cruzamentos que em perfil apresenta forma de “V”, sem *spreite* e orientados perpendicularmente a estratificação atribuídos a *Agrichnium*.....43

Figura 13- Icnogêneros descritos e identificados no topo de camadas das fácies HCS na Formação Pimenteiras. A) Traços horizontais exibindo formato de ferradura com meandros irregulares sem ramificações ou inter cruzamentos interpretados como *Helminthopsis abeli*. B) Estruturas em forma de tubos meandantes de primeira e segunda ordem gerando formas em zig-zag formando ângulos de 120°, dependendo do corte estas estruturas são vistas na forma de tubos verticais que partem do vértice dos ângulos formados, esses tubos apresentam mesma distancia e diâmetro descritos nos traços horizontais e se projetados em direção aos outros também formam ângulos de 120°, interpretados como *Protopaleodictyon spinata*. C) Escavações de orientação horizontal a oblíqua em relação ao acamamento, apresenta estrutura lobada com *spreiten* e tubo marginal sobresaltado, interpretados como *Lophoctenium* isp. D) Relação de truncamento entre as espécimes de *Protopaleodictyon spinata* e *Lophoctenium* isp. E) Escavações planares e horizontais, dispostas como laços em forma de U, portadores de *spreiten*, interpretadas como *Phycosiphon incertum*. F) Escavações de orientação horizontal a oblíqua em relação ao acamamento, apresentam uma estrutura helicoidal como resultado da sobreposição de diversos tubos em U, irradiados de um ponto central, que possuem *spreiten* entre eles interpretados como *Zoophycos* isp.....49

Figura 14- Icnogêneros descritos e identificados no topo de camadas das fácies HCS na formação Pimenteiras. A) Sulcos ou escavações alongadas, sinuosas e bilobadas com estrias transversais com lobos semicirculares, separados por um sulco central em forma de V classificados como *Cruziana problemática*. B) Escavações bilobadas orientadas de forma horizontal com um sulco central separando os lobos e uma série de ranhuras interpretados como *Rusophycus* isp. C) Escavação circular a elíptica em corte transversal com base arredondada e leve ornamentação concêntrica, interpretados como *Bergaueria prantl*. D) Traço horizontal sem ramificações formando estrutura circular a oval interpretado como *Circulichnis montanus*. E) Traço horizontal, simétrico e alongado, afinando em ambas as extremidades semelhantemente a um grão de arroz, interpretado como *Lockeia siliquaria*.55

Figura 15- Gráfico referente ao comportamento etológico dominante nos depósitos estudados. Os traços que indicam Pascichnia, Fodinichnia e Repichnia são mais comuns na icnofácies Cruziana-Zoophycos e os com predomínio de Domichnia e Cubichnia estão na icnofácies *Cruziana-Zoophycos* e os com predomínio de Domichnia e Cubichnia estão na icnofácies *Skolithos*.58

Figura 16- Modelo deposicional Formação Pimenteiras e a provável localização dos perfis estudados na região de Valença do Piauí e Pimenteiras (PI).63

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.3 LOCALIZAÇÃO E ACESSO.....	3
CAPÍTULO 2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	5
2.1. ANÁLISE DE FÁCIES E ESTRATIGRAFIA	5
2.2 ICNOLOGIA	6
2.2.1 Classificação	6
2.2.2 Icnofácies	7
2.3 ANÁLISE PETROGRÁFICA E MINERALÓGICA	10
CAPÍTULO 3 GEOLOGIA REGIONAL	11
3.1 BACIA DO PARNAÍBA	11
3.2 FORMAÇÃO PIMENTEIRAS	15
CAPÍTULO 4 DEVONIANO	17
4.1 TRANSGRESSÕES MARINHAS NAS BACIAS SEDIMENTARES BRASILEIRAS DURANTE O DEVONIANO	17
4.2 EVENTOS BIOLÓGICOS E DIVERSIDADES FOSSILÍFERAS NO DEVONIANO ...	18
CAPÍTULO 5 ICNOFÁCIES DE TEMPESTITOS DA FORMAÇÃO PIMENTEIRAS (DEVONIANO DA BACIA DO PARNAÍBA), REGIÃO DE PIMENTEIRAS, PIAUÍ.....	21

5.1 INTRODUÇÃO.....	24
5.2 MÉTODOS.....	24
5.3 HISTÓRIO DA ICNOLOGIA NA FORMAÇÃO PIMENTEIRAS.....	26
5.4 ESTRATIGRAFIA E SEDIMENTOLOGIA DA FORMAÇÃO PIMENTEIRAS	27
5.4.1 <i>Offshore/shoreface</i>	28
5.4.2 <i>Offshore</i>	31
5.5 IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS NÍVEIS BIOTURBADOS.....	33
5.6 ICNOLOGIA	37
5.6.1 ICNOLOGIA SISTEMÁTICA	37
5.6.2 Icnofácies	56
5.6.2.1 Icnofácies <i>Cruziana</i>	56
5.6.2.1 Icnofácies <i>Skolithos</i>	58
5.7 DISCUSSÕES E MODELO DEPOSICIONAL.....	59
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES	64
REFERÊNCIAS	65

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

O Período Devoniano é marcado em todo planeta por importantes mudanças paleogeográficas e paleoceanográficas, que incluem a formação de extensas calotas polares no hemisfério sul seguida por aumentos do nível do mar após do derretimento das geleiras (Caputo 1985, Caputo & Crowell 1985, Isaacson *et al.* 1999, 2008). Atualmente estão registrados vários pulsos transgressivos-regressivos relacionados a variações glaciomarinhas durante Devoniano em diversas partes do mundo (Johnson *et al.* 1985, Isaacson *et al.* 2008). Os depósitos transgressivos relacionados a estes eventos globais são geralmente registrados na forma de abundantes folhelhos negros e sem bioturbação que cobrem depósitos carbonáticos ou siliclásticos costeiros (Cluff 1980, Johnson *et al.* 1985, Jordan 1985, O'Brien 1987). A presença de folhelhos negros sem bioturbação é geralmente acompanhada por uma drástica diminuição dos registros fossilíferos, com muitos gêneros e espécimes desaparecendo por completo (Savrda & Bottjer 1986, 1989a,b, Gaines & Droser 2005, Savrda 2007). Estas extinções em massa são geralmente relacionadas aos eventos de anoxia (transgressões), e em alguns casos, perda de ecoespaço (regressões) que ocorrem durante variações glacioeustáticas do nível do mar (Hallam & Wignall 1999, Munnecke *et al.* 2010).

Registros fossilíferos do Devoniano na Bacia do Parnaíba, nordeste do Brasil, são concentrados nos folhelhos e arenitos das formações Pimenteiras e Cabeças, onde ocorre uma fauna caracterizada por crinóides, trilobitas, braquiópodes, bivalvíos, belerofontídeos, tentaculídeos e fragmentos vegetais (Ponciano *et al.* 2010). Enquanto as ocorrências fossilíferas são pontuais, as evidências de atividade biológica desta fauna estão bem registradas em diversas regiões da Bacia na forma de traços fósseis bem preservados, principalmente na Formação Pimenteiras (Agostinho *et al.* 2004, Silva *et al.* 2012). A Formação Pimenteiras representa uma sequência transgressiva composta por folhelhos e arenitos datados do Eifeliano ao Frasniano (Grahm *et al.* 2008), sendo depositados em plataforma marinha rasa dominada por ondas de tempestades (Della Fávera 1990).

A Formação Pimenteiras é a unidade litoestratigráfica que apresenta a assembleia icnofossilífera mais bem estudada da Bacia do Parnaíba com 34 icnotáxons identificados (Silva *et al.* 2012). Contudo, a maioria dos estudos icnofossilíferos da

unidade tem caráter descritivo, e poucos são os trabalhos que abordam aspectos importantes na interpretação paleoambiental como as análises de icnofácies e aplicam métodos quantitativos como análise de icnofábrica, além de suas relações com as fácies deposicionais. A distribuição espacial e o controle estratigráfico destes traços fósseis é outro problema; como a maioria dos trabalhos é de sistemática e taxonomia pouco se enfatiza o posicionamento dos traços fósseis estudados, com exceção dos trabalhos de Silva *et al.* (2012) que faz um mapeamento das principais localidades icnofossííferas e o de Young (2006) que posiciona estratigraficamente os traços fósseis em treze testemunhos da borda leste da Bacia do Parnaíba.

Neste trabalho foram escolhidas duas localidades na região de Pimenteiras que são conhecidas pelo seu diversificado e abundante conteúdo icnofossilífero que são: o rio Sambito na comunidade de Oiti e afloramentos nos arredores da cidade de Pimenteiras (Figura 1). A ocorrência de litotipos intensamente bioturbados é comum na região de Pimenteiras, o que possibilita um estudo icnológico bastante detalhado e a determinação de parâmetros paleoambientais com base nestes vestígios fósseis. Nestas localidades foi realizada a descrição dos traços fósseis com identificação de sua distribuição estratigráfica e sua relação com as fácies deposicionais. Foram coletadas ainda as medidas morfométricas e quantificação espacial dos traços fósseis. Posteriormente os traços fósseis foram classificados taxonomicamente. Estes dados coletados foram utilizados nas interpretações de icnofácies com o objetivo de elaborar um modelo paleoambiental para a Formação Pimenteiras na região estudada.

1.2 OBJETIVOS

Esta dissertação de mestrado tem como objetivo geral a reconstituição paleoambiental da sucessão siliciclástica devoniana da Formação Pimenteiras que ocorre na região entre Valença do Piauí e Pimenteiras tendo como auxílio principal as assembléias de icnofósseis e a análise de fácies deposicionais.

a) Descrever e interpretar as associações de fácies sedimentares da Formação Pimenteiras nas regiões estudadas;

b) Descrever e interpretar os icnofósseis dos arenitos e folhelhos da Formação Pimenteiras para inferir parâmetros ambientais;

- c) Entender as implicações paleoambientais envolvidas nas variações de distribuição e quantificação da bioturbação nos depósitos estudados;
- d) Elaborar um modelo paleoambiental para Formação Pimenteiras com base nas fácies sedimentares e icnofácies.

1.3 LOCALIZAÇÃO E ACESSO

A área delimitada para o enfoque dessa pesquisa localiza-se na região nordeste do Brasil, na porção leste do estado do Piauí próximo a fronteira com o estado do Ceará, na região dos municípios de Valença do Piauí e Pimenteiras (Figura 1).

O acesso à área estudada pode ser realizado por meio da BR-316, partindo da capital Teresina em direção ao município de Valença do Piauí que fica a 216 km a sudeste da capital. O acesso ao município de Pimenteiras é realizado por meio da rodovia estadual PI-120, sendo este localizado a aproximadamente 36 km de distância de Valença do Piauí partindo em direção nordeste. O rio Sambito é a principal drenagem que corta os dois municípios e nele ocorrem os principais afloramentos estudados que ficam localizados nas proximidades da comunidade de Oiti. Os outros afloramentos são na rodovia PI-120 na entrada da cidade de Pimenteiras e em estrada não pavimentada que liga a cidade de Pimenteiras a Bocaina, nas coordenadas 06°17'39.8''S/41°22'44''.

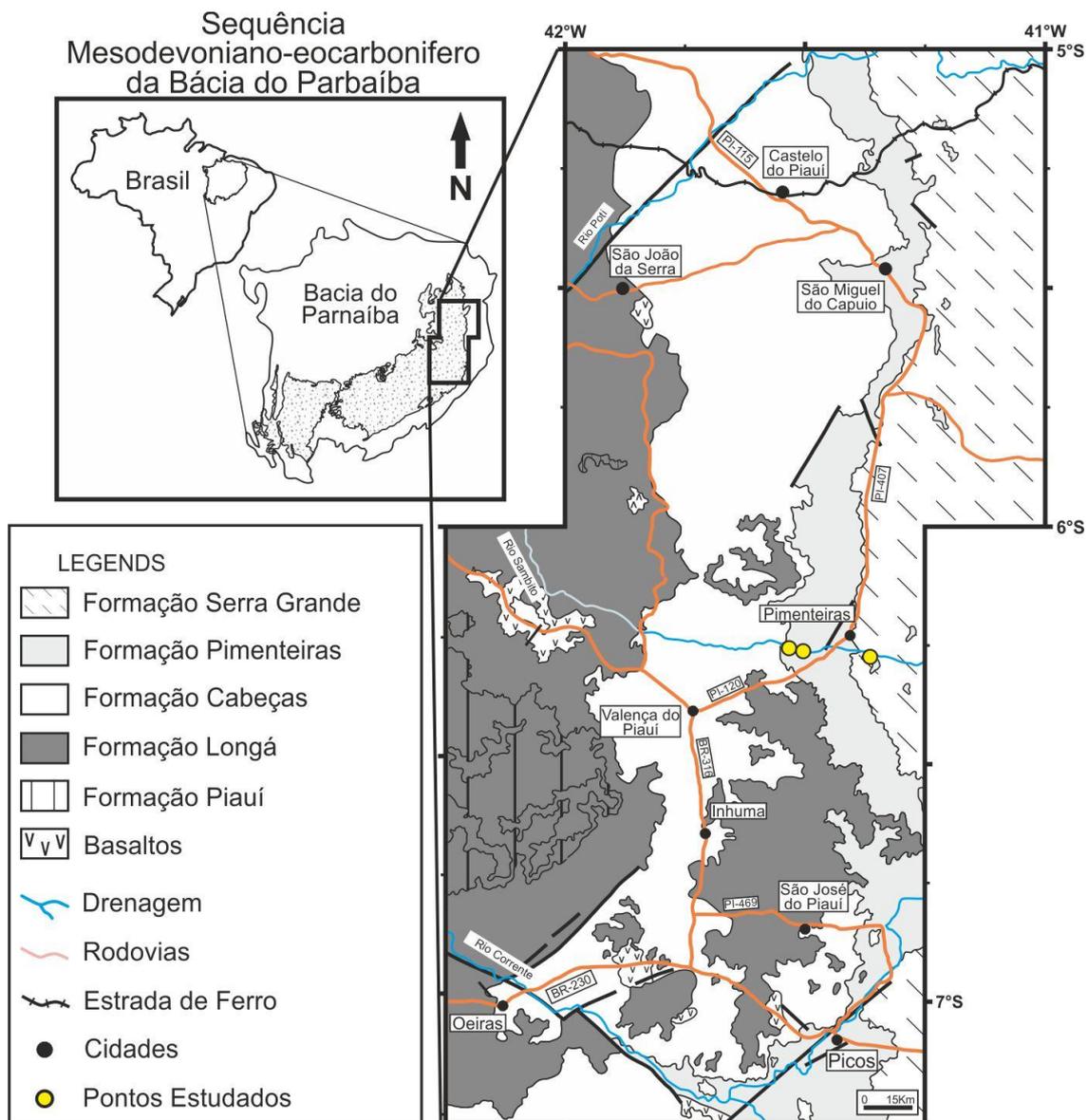


Figura 1- Mapa de localização e geológico simplificado da área de estudo, região de Valença do Piauí e Pimenteiras (PI), borda leste da Bacia do Parnaíba.

Fonte: Modificado de Radam (1973).

CAPÍTULO 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi realizado um trabalho de campo com duração de pouco mais de 10 dias na região de Pimenteiras. Durante o trabalho de campo foram coletadas cerca de 30 amostras contendo traços fósseis; alguns traços foram descritos e fotografados em campo devido à impossibilidade de coleta. Este material foi analisado juntamente com amostras que foram coletadas em outras etapas de campo realizadas pelos professores Afonso Nogueira da UFPA e Roberto César Barbosa da UFAM. As amostras encontram-se armazenadas no Laboratório de Sedimentologia da Universidade Federal do Pará sob a sigla UFPA-IG-LS.

2.1 ANÁLISE DE FÁCIES E ESTRATIGRAFIA

A análise estratigráfica foi realizada em quatro afloramentos da Formação Pimenteiras que mostram estruturas sedimentares e biogênicas bem preservadas. Nestes afloramentos foram individualizadas as principais fácies sedimentares segundo o modelo proposto por Walker (1992). Características texturais e mineralógicas, bem como a geometria das camadas e suas estruturas primárias foram descritas e interpretadas. As fácies descritas foram agrupadas em associações de fácies que refletem os diferentes ambientes e sistemas deposicionais. Conforme a disposição lateral e vertical dos depósitos estudados foi possível elaborar um modelo deposicional para a unidade baseado nas suas características faciológicas e icnológicas.

As descrições das fácies dos diferentes litotipos e de afloramentos, foi auxiliada por perfis e seções panorâmicas, seguindo o procedimento de Wizevich (1991) e Arnott *et al.* (1997). Com as informações obtidas por meio da análise de fácies foi possível à descrição da unidade, associada a isto foi feito um controle estratigráfico do posicionamento dos traços fósseis, com base nas abundância e distribuição dos icnogêneros descritos e identificados durante a fase de campo. Devido ao não reconhecimento de superfícies estratigráficas (erosivas ou de exposição subaérea) chaves e a natureza agradacional das intercalações de arenitos/folhelhos os perfis foram correlacionados a partir das curvas de nível e conforme as suas características faciológicas e icnológicas eles foram posicionados no modelo paleoambiental.

Os pontos analisados e amostrados foram georeferenciados através do uso de GPS (*Global Positioning System*) estabelecendo, com precisão, as coordenadas geográficas. Os dados, coletados deste procedimento, foram plotados em mapas temáticos

adicionados por informações provenientes de mapas geológicos disponíveis para a região. Como resultado final, foi apresentada uma proposta paleoambiental para a sucessão siliciclástica devoniana da Formação Pimenteiras da região entre Valença do Piauí e Pimenteiras.

2.2 ICNOLOGIA

2.2.1 Classificação

O estudo dos traços fósseis se pautam três diferentes classificações que podem se interrelacionar: 1) *classificação icnotaxonômica*, que leva em conta as feições morfológicas dos traços fósseis e obedecem as diretrizes dos procedimentos da sistemática Linneana, porém a sistemática de traços fósseis comporta somente duas categorias icnotaxonômicas: icnogênero e icnoespécie (Carvalho & Fernandes 2004, Netto 2001); 2) *preservacional ou estratinômica*, que considera os traços fósseis como estruturas sedimentares e o seu posicionamento no substrato. Segundo a classificação de Martinsson 1970 os traços fósseis podem ser: epicniais, quando estão no topo da camada; endicniais, entre ou dentro da camada; hipicniais, preservados na base da camada; e exicniais, quando preservados fora da camada hospedeira, enquanto que a classificação de Seilacher 1964 subdivide os traços em relevo cheio, semi relevo (positivo ou negativo) de acordo com a o posicionamento e preservação do traço em relação a camada na qual está inserido; e 3) *etológica*, baseada no comportamento do organismos que produziu o traço fóssil (Seilacher 1964) (Figura 2). Segundo Vallon *et al.* (2015) existem atualmente treze grupos etológicos distintos relacionados aos padrões comportamentais dos bioturbadores: *Agrichnia* (cultivo), *Repichnia* (locomoção), *Cubichnia* (repouso), *Fodinichnia* (alimentação), *Domichnia* (habitação), *Fugichnia* (escape), *Pascichnia* (pastagem), *Equilibrichnia* (equilíbrio), *Praedichnia* (predação), *Calichnia* (reprodução), *Chemichnia* (quimiosimbiose), *Digestichnia* (digestão), *Fixichnia* (fixação) e *Ecdysichnia* (muda).

A nomenclatura dos traços fósseis ainda é um tema em ampla discussão no meio acadêmico apesar de já estar inserida no Código Internacional de Nomenclatura Zoológica desde 1995. Atualmente o reconhecimento de um novo icnotaxón é feito a partir de comparações com traços fósseis descritos em artigos e livros de icnologia, já que o último índice taxonômico foi publicado por Häntzschel (1975). A determinação de

um novo icnotaxón não deve levar em conta o tamanho, produtor do traço, o tipo de preenchimento passivo, idade geológica, fácies deposicional, consistência do substrato e preservação/toponomia como icnotaxobases (Bertling *et al.* 2006). Com objetivo de diminuir as confusões com a nomenclatura binomial utilizada na taxonomia de corpos fósseis, os traços fósseis são designados como icnogênero e icnoespécie e possuem sufixos próprios como *-ichnus*, *-ichnites*, *-opus* e *-phycus*. Recentemente, Bertling *et al.* (2006) sugeriram que “igen.” e “isp.” deveriam ser aprovados como abreviações legítimas para icnogêneros e icnoespécies, respectivamente.

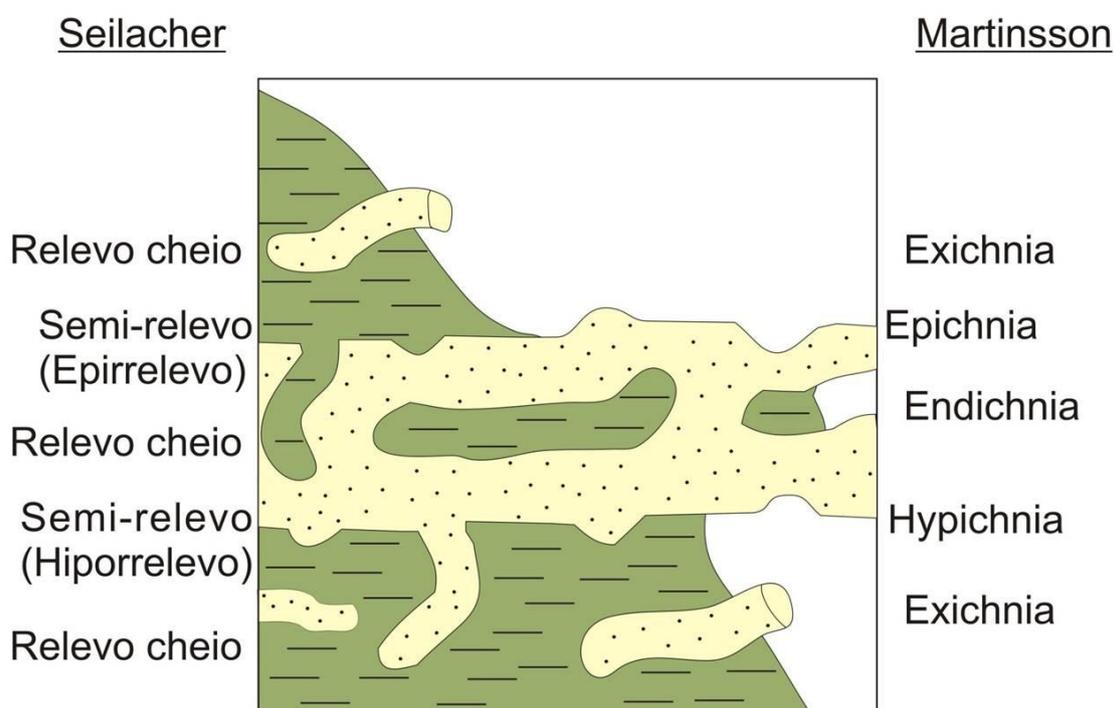


Figura 2. Subdivisão dos traços fósseis a partir da sua disposição no substrato de acordo com a classificação de Martinsson e Seilacher.

Fonte: Modificado de Martinsson 1970 & Seilacher 1964.

2.2.2 Icnofácies

A textura bioturbada foi determinada com base na metodologia de Miller & Smail (1997) que estima o grau de perturbação das camadas assim como a densidade de icnofósseis por unidade de área para determinar o índice de icnofábrica (ii). Baseado nesta premissa o ii pode variar de 1 a 5. Os graus de ii são: ii 1, sedimentos não bioturbados e com as estruturas sedimentares preservadas; ii 2, de 1 a 10% de

bioturbação esparça; ii 3, de 11 a 40% de bioturbação; ii 4, de 41 a 60% de bioturbação; ii 5, de 61 a 100% da camada bioturbada.

O método semiquantitativo proposto por Miller & Smail (1997), e denominado de índice de icnofábrica de planos de acamamento, foi selecionado devido a maioria dos níveis bioturbados apresentarem traços fósseis visíveis somente em planta. Os traços fósseis foram divididos primeiro em níveis que correspondem as suas posições estratigráficas nos afloramentos. Nos níveis com maior quantidade de traços fósseis estes foram quantificados e medidos em malhas de 1m^2 . Devido à descontinuidade de exposição de alguns níveis estes foram subdivididos em áreas menores dentro das malhas. Em níveis que apresentam uma distribuição randômica dos traços fósseis foi realizada uma análise nas áreas com maior concentração de traços fósseis e em áreas de menor concentração. Mesmo nestas áreas os índices de icnofábrica ficavam dentro do mesmo intervalo não tendo grandes diferenças de porcentagem. Nos níveis em que os traços fósseis eram escassos ou ausentes a contagem foi realizada de forma semiquantitativa e foram determinados os índices ii 1 a ii 2. Todavia, esses problemas são transponíveis e bem compensados pelos benefícios do uso de índice de icnofábrica (Miller & Smail 1997). Para reduzir esse impacto Miller & Small (1997) fornecem diagramas com padrões de bioturbação com diversidade de tamanho e forma da distribuição das bioturbações que foram utilizados neste trabalho para um resultado mais preciso (Figura 3).

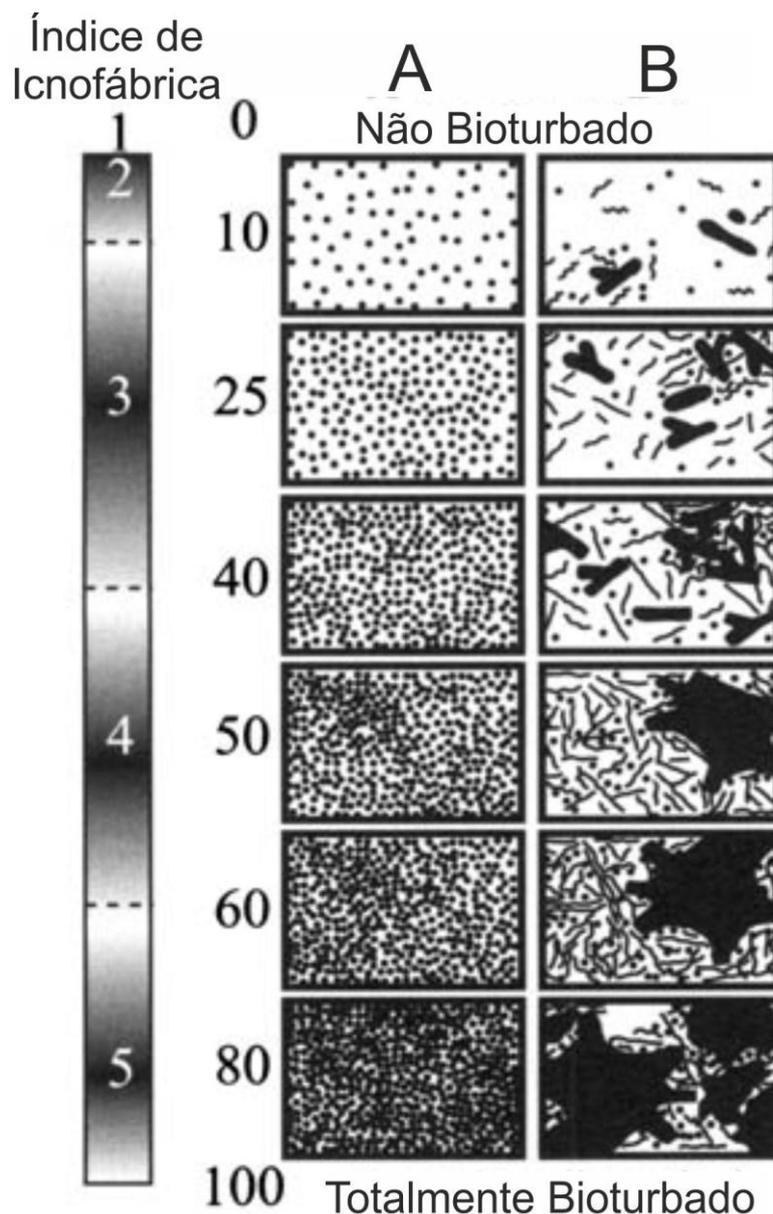


Figura 3. Carta para avaliação semiquantitativa da distribuição de bioturbações utilizado para obtenção do índice de icnofábrica de planos de acamamento.

Fonte: Modificado de Miller & Smail (1997).

As icnofácies correspondem aos registros de traços fósseis presentes no substrato em resposta aos parâmetros ambientais atuantes no meio (Frey & Pemberton 1985, Seilacher 1967, Frey *et al.* 1990). As estruturas de bioturbação ocorrem comumente em associações denominadas icnocenose, esta representa uma associação natural de icnofósseis que refletem as atividades bentônicas dos membros de uma biocenose (Fernandes *et al.* 2002). A icnofácies reúne icnofósseis e icnofábrica produzidas em um mesmo contexto, de acordo com os fatores que controlam a

distribuição de seus produtores (Netto 2001, Carvalho & Fernandes 2004). Segundo Frey & Pemberton (1985) e Frey *et al.* (1990) icnofácies seria o registro da icnocenose preservado, o que permite efetuar inferências sobre as atividades e comportamento dos organismos e do meio em que vivem. Contudo, Bromley (1990, 1996) acredita que utilizar o termo icnofácies como sinônimo de icnocenose seria errôneo e problemático. Várias condições físico-químicas como salinidade, taxa de oxigenação, taxa de sedimentação, energia, consistência do substrato, temperatura e batimetria podem ser sugeridas com base na análise de icnofácies, logo, a icnofácies é uma excelente ferramenta para reconstruções paleoambientais (Frey *et al.* 1990, MacEarchern *et al.* 2007, Gingras *et al.* 2011).

2.3 ANÁLISE PETROGRÁFICA E MINERALÓGICA

Com análises petrográficas foi possível a determinação da composição mineralógica e do arcabouço das rochas. A análise petrográfica auxiliou na descrição dos traços fósseis, como na determinação de possíveis orientações dos grãos originadas pelo *spreiten*, durante a produção do traço, caracterização do preenchimento dos traços e deformações de laminações. Na análise foram confeccionadas seções delgadas que possibilitaram uma visualização e descrição dos constituintes da rocha e de alguns aspectos texturais como a granulometria, arredondamento e esfericidade que foram utilizados na descrição de fácies e interpretação paleoambiental (Tucker 1991, Lindholm 1987). Durante a análise petrográfica foram descritas 7 lâminas delgadas das rochas siliciclásticas que contem traços fósseis que foram avaliadas quantitativamente após contagem de 300 pontos segundo a metodologia de Galehouse (1971). A classificação dos arenitos foi baseada na proposta de Folk (1974) que leva em consideração os conteúdos de quartzo, feldspato e fragmentos de rocha, além da quantidade de matriz.

CAPÍTULO 3 GEOLOGIA REGIONAL

3.1 BACIA DO PARNAÍBA

A Bacia do Parnaíba, localizada na plataforma Sul-americana, apresenta espessuras de até 3.400m e ocupa uma área de aproximadamente 600.000 km² abrangendo os estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Pará e Tocantins (Caputo 1984, Vaz *et al.* 2007) (Figura 4). Esta bacia desenvolveu-se sobre um embasamento continental durante a estabilização da Plataforma Sul-Americana. Acredita-se que a origem ou subsidência inicial da Bacia do Parnaíba provavelmente esteja ligada a deformações e eventos térmicos fini- e pós- orogênicos do Ciclo Brasileiro ou ao Estágio de Transição da plataforma (Vaz *et al.* 2007). O embasamento da Bacia Parnaíba é caracterizado como continental fortemente estruturado e representada por rochas formadas ou retrabalhadas no Ciclo Brasileiro dos cinturões Araguaia-Tocantins, da Faixa Gurupi, dos crátons Amazônico e São Francisco, e da província Borborema (Cunha 1986). A bacia é limitada ao norte pelo Arco Ferrer-Urbano Santos, a leste pela Falha de Tauá, a sudeste pelo lineamento Senador Pompeu, a oeste pelo lineamento Tocantins-Araguaia e a nordeste pelo Arco Tocantins (Góes & Feijó 1994).

Com o decorrer do desenvolvimento tectono-sedimentar da Bacia do Parnaíba foram gerados grabéns como resultado da atuação de um megasistema de fraturas por toda a bacia, resultando no abatimento crustal da porção cratônica, marcando assim as primeiras fases deposicionais da bacia durante o final da Orogenia Brasileira até a Orogenia Caledoniana da Cordilheira Andina (Cunha 1986, Figueiredo & Raja Gabaglia 1986). Segundo Oliveira e Mohriak (2003), estruturas grábenformes interpretadas com base em dados de sísmica, gravimetria e magnetometria, no substrato da bacia teriam controlado o depocentro inicial da Bacia do Parnaíba. Esse evento de sedimentação resultou na deposição de cinco sequências ou ciclos deposicionais que são limitadas através de discordâncias de escala regional (Vaz *et al.* 2007). A sucessão de rochas sedimentares e magmáticas que compõe a Bacia do Parnaíba está disposta em cinco supersequências: “Supersequência Siluriana” (Grupo Serra Grande), “Supersequência Mesodevoniana-Eocarbonífera” (Grupo Canindé), “Supersequência Neocarbonífera-Triássica” (Grupo Balsas), “Supersequência Jurássica” (Formação Pastos Bons), “Supersequência Cretácea” (formações Codó, Corda, Grajaú e Itapecuru) (Figura 5). Ocorrem também rochas ígneas intrusivas (diques e soleiras) e extrusivas de

composição básica, que foram divididas em duas unidades, Formação Mosquito (Neotriássico/Eojurássico) e Formação Sardinha (Eocretáceo) (Vaz *et al.* 2007).

A Supersequência Mesodevoniana-Eocarbonífera da bacia aflora principalmente na porção leste e sudoeste da Bacia do Parnaíba, enquanto que em subsuperfície ela abrange quase toda a bacia (Vaz *et al.* 2007, Santos & Carvalho 2004). A porção devoniana desta supersequência é representada por depósitos plataformais rasos influenciados por tempestades, deltas e depósitos glaciais que registram uma sequência transgressiva-regressiva na bacia (Santos & Carvalho 2004). O Grupo Canindé é composto pelas formações Itaim, Pimenteiras, Cabeças, Longá e Poti. Esta seção encontra-se separada do Grupo Serra Grande por uma discordância erosiva, paralela, relacionada a uma ampla regressão mundial, que ocasionou a migração da linha de costa da África do Norte, entre Argélia e Marrocos, por mais de 1.000km, simultaneamente a regressão das bacias brasileiras (Caputo & Lima 1984). As fácies deste grupo apresentam-se dominadas por processos de correntes de marés e tempestades, sendo as primeiras descrições e interpretações de tempestitos no Brasil feitas por Della Fávera (1990), posteriormente detalhadas em Della Fávera (2001). Estima-se que sua espessura seja superior a 1.000 m, na porção leste da bacia. As formações Itaim, Pimenteiras e Cabeças compõem a sequência devoniana do Grupo Canindé. Exceto pelos contatos diacrônicos entre as formações Pimenteiras-Cabeças e Cabeças-Longá, todas as formações Devonianas podem ser consideradas sincrônicas através da bacia (Grahm *et al.* 2008).

A Formação Itaim encontra-se disposta de forma discordantemente à Formação Jaicós, topo do Grupo Serra Grande, e sotoposta concordantemente à Formação Pimenteiras (Caputo & Lima 1984). É composta por arenitos finos a médios, esbranquiçados e folhelhos cinza escuro, intercalados com arenito na base da Formação, caracterizados por Góes & Feijó (1994) como sendo depositados em ambientes deltáicos e plataformais, dominados por correntes induzidas por processos de marés e tempestades, no Eifeliano (Mesodevoniano).

A Formação Cabeças, de idade Givetiana-Frasniana, é composta predominantemente por arenitos cinza-claros a brancos, médios a grossos, com intercalações delgadas de siltito e folhelho, interpretados como de ambiente nerítico-plataformal, dominado por corrente de maré (Góes & Feijó 1994), além de eventual influência periglacial registrada pela presença de diamictitos na parte superior da

Formação (Caputo 1985, Caputo & Crowell 1985). Estratificação cruzada tabular e feições de lobos sigmoidais ou sigmóides predominam, e tempestitos estão presentes na transição para a Formação Pimenteiras (Barbosa 2014). Ocorrem ainda arenitos finos a médios, associados a arenito grosso, depositados em ambiente fluvial-estuarino, também com influência periglacial, e sua espessura é estimada entre 100 e 400 m, com espessamento para leste da bacia (Caputo 1984).

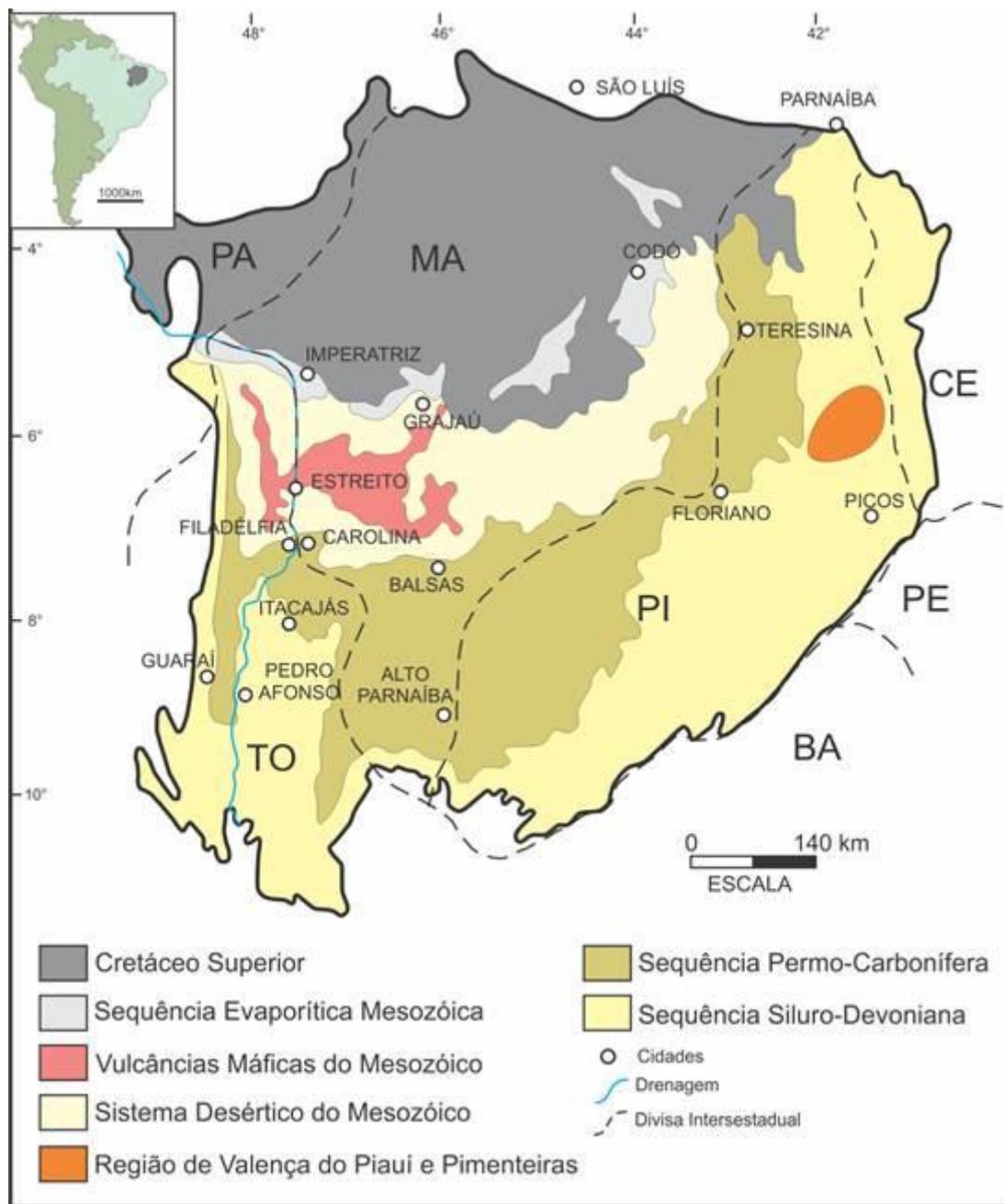


Figura 4. Distribuição espacial das principais sucessões sedimentares que constituem o arcabouço litoestratigráfico da Bacia do Parnaíba.

Fonte: Modificado de Santos & Carvalho (2004).

3.2 FORMAÇÃO PIMENTEIRAS

A Formação Pimenteiras foi proposta por Small 1914 (*apud* Santos & Carvalho, 2004) e designa espessas camadas de folhelhos cinza-escuros a pretos, esverdeados, em parte bioturbados, radioativos, ricos em matéria orgânica, que representam a ingressão marinha mais importante da bacia (Vaz *et al.* 2007). Podem ocorrer intercalados camadas de siltito e arenito grosso e até conglomerático, com estratificação cruzada *hummocky*, sendo as rochas desta unidade interpretadas como depositadas em ambiente nerítico de plataforma dominada por tempestades (Della Fávera 1990). Caputo (1984) estima que a Formação Pimenteiras tenha espessuras superiores a 500 m na porção centro-noroeste da bacia. A Formação Pimenteiras também registra a primeira extensa transgressão marinha do Devoniano que ocorreu na América do Sul (Melo 1988, Almeida & Carneiro 2004). Segundo Melo (1988) a conexão marinha existiu deste o Eoemiliano e durante todo o Devoniano. Esta transgressão marinha levou a conexão entre as bacias do Parnaíba e Paraná. A inundaçãõ marinha devoniana ocasionou a formação de vários ambientes marinhos, deltaicos, fluviais e de planície de maré (Almeida & Carneiro 2004). O final da transgressão é marcado pelo avanço de geleiras no começo do Carbonífero (Caputo 1985, Caputo & Crowell 1985).

Young (2006) descreveu treze poços na porção em rochas devonianas no leste da Bacia do Parnaíba e descreveu doze fácies sedimentares e três icnofácies, que foram organizadas em sete sucessões de fácies e distribuídas em nove sequências deposicionais de 4^a e 5^a ordem que indicam ambientes que vão desde um mar raso influenciado por ondas até influências fluvio-deltaicas. Young & Borghi (2006) registraram seis regressões forçadas menores que criam potencialmente novas perspectivas de exploração de hidrocarbonetos, tanto na formação de rochas fontes como rochas reservatórios na Formação Pimenteiras, diferente do que é comumente considerado como principal reservatório devoniano da bacia, a Formação Cabeças.

O conteúdo fossilífero da Formação Pimenteiras é bem diversificado, apesar de ainda pouco estudada, constituída principalmente por trilobitas, braquiópodes, bivalves, crinoides, conulários, ostracodes, belerofontídeos, tentaculítídeos, hiolitídeos, escolecodontes, condrictes, acantódios quitinozoários e miósporos, além de fragmentos de algas e de vegetais vasculares (Melo 1988, Santos & Carvalho 2004, Grahn *et al.* 2008). Uma rica assembleia de icnofósseis também ocorre nos depósitos da Formação Pimenteiras e será tratada nas próximas páginas.

A idade da Formação Pimenteiras é baseada em diversos estudos palinológicos e mais raramente megafósseis. Em testemunhos de sondagem da borda leste da Bacia Grahn *et al.* (2008), baseados em quitinozoários, e Breuer & Grahn (2011), baseados também em miósporos, dataram a formação no intervalo Neoeifeliano ao Eogivetiano terminal. Na porção central e oeste da bacia Loboziak *et al.* (2000) posicionaram a Formação Pimenteiras, com base em miósporos, no intervalo entre o Neoeifeliano e o EoFameniano. Grahn *et al.* (2006), utilizando quitinozoários e miósporos em depósitos da Formação Pimenteiras que ocorrem nas porções oeste e central da bacia, também encontraram idades entre o Neoeifeliano e o EoFamenia.

CAPÍTULO 4 DEVONIANO

4.1 TRANSGRESSÕES MARINHAS NAS BACIAS SEDIMENTARES BRASILEIRAS DURANTE O DEVONIANO

Durante o Paleozóico Inferior os elevados níveis eustáticos do mar e suas variações ocasionaram as grandes transgressões nas bacias sedimentares existentes, principalmente durante o período Devoniano (Webby 1965, Laporte 1969, Almeida & Carneiro 2004, Haq & Schutter 2008) (Figura 6). No Brasil as transgressões devonianas tiveram início no Eoemsiano logo após um período de regressão marinha causada por soerguimentos epirogênicos na margem ativa do Gondwana (Almeida & Carneiro 2004, Cunha *et al.* 2007, Vaz *et al.* 2007). O início do ciclo transgressivo-regressivo nas bacias paleozóicas do norte do País ocorreu em meados do Eoemsiano e início do Eifeliano e cobriu praticamente as mesmas áreas que os mares silurianos (Melo 1988, Almeida & Carneiro 2004). A transgressão nessa fase atingiu grandes extensões da Bacia do Amazonas, porém a Bacia do Parnaíba só foi totalmente inundada no Eifeliano (Góes & Feijó 1994, Cunha *et al.* 2007). O registro dessa fase de inundação marinha na Bacia do Parnaíba é marcado pela deposição de sedimentos em ambientes marinhos rasos, deltaicos, fluviais e de planície de maré, pertencentes ao Grupo Canindé (Almeida & Carneiro 2004, Vaz *et al.* 2007). As bacias do Paraná e dos Parecis assim como várias bacias da América do Sul começaram a ser inundadas ainda mais cedo no Praguiano, mas já no Eifeliano ao Givetiano estas bacias já estavam completamente inundadas, com o máximo da inundação ocorrendo no Frasniano (Melo 1988, Milani & Thomaz Filho 2000, Almeida & Carneiro 2004). Estas extensas incursões marinhas criaram conexões entre as bacias intracratônicas e costeiras da América do Sul caracterizadas principalmente por um vasto mar epicontinental aberto para o proto-Pacífico (Almeida & Carneiro 2004). O mar devoniano inundou a Bacia do Solimões pela borda ativa do continente até se encontrar com o mar que inundou a Bacia do Amazonas (Melo 1988, Almeida & Carneiro 2004). A extensão de terra que existia entre as bacias do Parnaíba e do Paraná também foi vencida no Eifeliano (Melo 1988).

Segundo Almeida & Carneiro (2004) nas partes internas destes mares epicontinentais permaneceram condições neríticas, com deposição de sedimentos de granulação fina a média, estabelecendo-se nas zonas vizinhas à costa ambientes de plataforma e deltas, estes particularmente desenvolvidos na Bacia do Parnaíba. Os

mares epicontinentais devonianos do Brasil tinham provavelmente águas frias principalmente devido o supercontinente Gondwana estar próximo ao pólo Sul (Scotese *et al.* 1985, Li & Powell 2001, Almeida & Carneiro 2004).

O recuo dos mares epicontinentais ocorreu de forma gradual no início do Carbonífero e pode ter sido causado por movimentos tectônicos relacionados ao ciclo orogênico Eo-Herciniano ou pelo início da glaciação que ocorreu no intervalo entre o Devoniano e o Carbonífero em todo o mundo (Caputo 1985, Caputo & Crowell 1985, Isaacson *et al.* 1999, 2008, Almeida & Carneiro 2004, Haq & Schutter 2008).

4.2 EVENTOS BIOLÓGICOS E DIVERSIDADES FOSSILÍFERAS NO DEVONIANO

As grandes diversidades fossilíferas que ocorrem em rochas Devonianas são atribuídas às transgressões marinhas (por elevação do nível do mar) que ocorreram no Mesodevoniano (Boucot 1985, 2005). Nesta época, a Bacia do Parnaíba teria tido um acesso mais restrito ao Oceano Iapetus que as bacias intracratônicas adjacentes o que favoreceu a deposição dos sedimentos e bioclastos em condições marinhas relativamente mais rasas e o alto grau de endemismo de quitinozoários (Grahm *et al.* 2006). Regiões frias como a área oceânica ocupada pela bacia do Parnaíba durante o Devoniano são caracterizadas por faunas endêmicas, litologias amplamente siliciclásticas, além da ausência de rochas carbonáticas, redbeds, evaporitos, recifes, depósitos lateríticos ou outro indicador de clima quente (Barrett & Isaacson 1988, Boucot 2005). Segundo Boucot (2005) as faunas marinhas do Devoniano da América do Sul são caracterizadas por um aumento gradual do provincianismo a partir do Siluriano Superior, que aumenta durante o intervalo Pragiano-Emsiano, seguido por uma relativamente constante diminuição no final do Devoniano. Esta Província faunística foi denominada de Malvinokaffric e caracterizada pela baixa diversidade taxonômica e forte endemismo.

Carvalho *et al.* (1996) identificaram seis grandes eventos biológicos no Devoniano da Bacia do Parnaíba que refletem as variações climáticas e do nível do mar, e influenciaram a dinâmica dos seres vivos nos mares epicontinentais brasileiros. Estes bioeventos que ocorreram no Eifeliano estão relacionados ao surgimento de organismos bentônicos (Santos & Carvalho 2004), enquanto que os outros bioeventos são

caracterizados pela ocorrência de organismos vegetais e microfósseis que foram fortemente influenciadas pelas rápidas mudanças climáticas e de elevação do nível do mar (Daemon 1976).

Devido a essas condições rochas como calcários, assim como corais e briozoários são quase inexistentes nos registros desse período nessa porção do continente. Em meados do Devoniano as bordas das bacias do Solimões, Amazonas e Parnaíba estavam em parte recobertas por gelos, que desciam ao mar onde produziam gelos flutuantes que ao derreterem deixavam cair fragmentos de rochas nos sedimentos do fundo (Caputo 1985, Caputo & Crowell 1985). O mar devoniano era povoado por animais muito variados: braquiópodes, lamelibrânquios, trilobitas, ostracodes, gastrópodes, crinóides, euripterídeos, peixes, entre outros, além de vegetais (Almeida & Carneiro 2004).

Segundo Santos & Carvalho (2004) durante o Neoeifeliano o aumento do nível dos mares epicontinentais submetidos a tempestades favoreceram acumulações de invertebrados e raros vertebrados. Outra evidência da relação fossilífera com as tempestades foi descrita por Kegel (1966) que registra a ocorrência doo icnogênero *Neoskolithos* em *hardgrounds*. Neste caso *Neoskolithos* sugere episódios de colonização de organismos endobentônicos associadas a interrupções na sedimentação durante ciclos tempestíficos. Durante os episódios de tempestade, as formas das diferentes associações fossilíferas foram misturadas (Santos & Carvalho 2004). Pela interpretação dos paleoambientes e fósseis, as indicações são para uma plataforma marinha de litorânea a rasa (Melo 1988, Carvalho *et al.* 1997, Santos & Carvalho 2004).

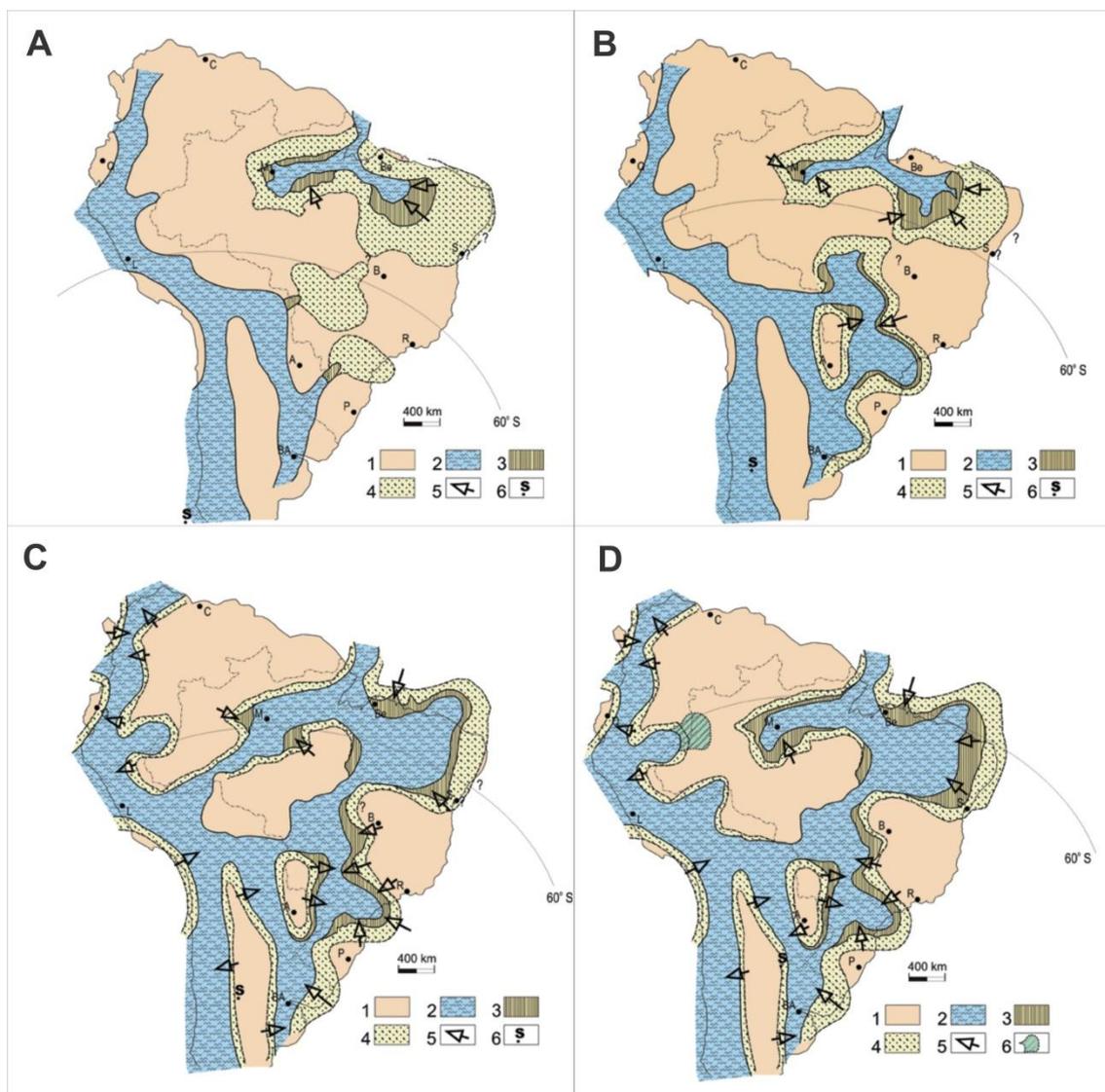


Figura 6. Evolução das transgressões marinhas no continente sulamericano durante o Devoniano (Almeida & Carneiro 2004). A) Inundação eodevoniana no Brasil (aprox. 400 Ma). Figura modificada de Melo (1989): 1 - Área emersa; 2 - Ambientes sedimentares marinhos; 3 - Ambientes transicionais; 4 - Ambientes sedimentares não-marinhos; 5 - Setas indicativas das principais direções de suprimento sedimentar; 6 - Posição estimada do Pólo Sul, com base em reconstruções de Li & Powell (2001); B) Inundação eodevoniana no Brasil (aprox. 395 Ma), baseada em Melo (1989). Convenções idênticas às da Fig. A; C) Inundação neo-emsiana/eifeliana no Brasil (aprox. 390 Ma), baseada em Melo (1989). Convenções idênticas às da Fig. A; D) Inundação mesodevoniana no Brasil (aprox. 380 Ma), baseada em Melo (1989). Convenções idênticas às da Fig. A, exceto para 6 - provável extensão máxima oriental dos ambientes não-marinhos e transicionais na Bacia do Solimões (Sub-bacia Juruá).
Fonte: Almeida & Carneiro 2004.

CAPÍTULO 5 ICNOFÁCIES DE TEMPESTITOS DA FORMAÇÃO PIMENTEIRAS (DEVONIANO DA BACIA DO PARNAÍBA), REGIÃO DE PIMENTEIRAS, PIAUÍ.

Autores: LUCAS NORONHA CUNHA^a, JOELSON LIMA SOARES^b, AFONSO CÉSAR RODRIGUES NOGUEIRA^{a, b}, ROBERTO CESAR DE MENDONÇA BARBOSA^c

^a Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG). Universidade Federal do Pará (UFPA). Rua Augusto Corrêa, 01, Bairro do Guamá. CEP 66075-110, Belém - Pará - Brasil. lucas.noronha@hotmail.com; anogueira@ufpa.br.

^b Faculdade de Geologia (FAGEO). Universidade Federal do Pará (UFPA). Rua Augusto Corrêa, 01, Bairro do Guamá. CEP 66075-110, Belém - Pará - Brasil. anogueira@ufpa.br; jlsoares@ufpa.br.

^c Departamento de Geociências, Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal do Amazonas, Av. Gal. Rodrigo O. J. Ramos, 3.000, 69.077-000, Manaus, Amazonas, Brasil; rcarbosa@ufam.edu.br.

* Corresponding author's mail address: R. Augusto Corrêa, 01, Belém PA 66075-110, Brazil.

Tel.: +55 9198032-5414

E-mail address: lucas.noronha@hotmail.com (L.N. Cunha).

Resumo

O registro de extensos mares epicontinentais devonianos do Oeste do Gondwana é encontrado na região nordeste do Brasil na forma de folhelhos e arenitos da Formação Pimenteiras, Bacia do Parnaíba. A predominância de folhelhos cinza a negros intercalados com delgadas camadas de arenitos com estratificação cruzada hummocky (HCS) sugere ambientes de águas profundas influenciadas por tempestades. Estes depósitos siliciclásticos apresentam variados níveis de bioturbação que refletem mudanças nas condições deposicionais, taxas de oxigenação e formas de ocupação e aproveitamento do substrato. Pelos menos duas zonas batimétricas são bem marcadas. *Offshore/shoreface* caracterizada pela predominância de camadas de arenitos com laminação ondulada, maciço e com HCS intercaladas a delgadas camadas de folhelho.

Offshore superior representado por espessas e contínuas camadas de folhelhos com intercalação de corpos lenticulares de arenitos com HCS. A análise icnológica identificou 15 icnogêneros, sendo eles *Agrichnia*, *Bergaueria*, *Bifungites*, *Circulichnis*, *Cruziana*, *Diplichnites*, *Helminthopsis*, *Lockeia*, *Lophoctenium*, *Palaeophycus*, *Phycosiphon*, *Planolites*, *Protopaleodictyon*, *Rusophycus*, e *Zoophycos*. Os icnogêneros *Agrichnium* e *Circulichnis* são descritos pela primeira vez na Formação Pimenteiras. Níveis de bioturbação distintos ocorrem restritos aos arenitos, com índices de icnofábrica (ii) 3, variando entre 15% e 25%. Estes valores médios de ii sugerem níveis de oxigenação típicos de ambientes aeróbicos, ou a zona de interface água-sedimento com razoáveis níveis de oxigenação. Estes níveis de bioturbação são geralmente limitados por folhelhos com pouca (ii = 2) ou nenhuma bioturbação (ii = 1), o que sugere um ambiente anaeróbico próximo ao substrato. A Formação Pimenteiras inclui as seguintes icnofácies representativas da transição *offshore/shoreface*: *Skolithos*, representativa de ambiente de alta energia dominado por ondas; e *Cruziana*, relacionado a zona litorânea e ambiente marinho raso a profundo. A predominância de espécimes das icnofácies *Cruziana* com poucas ocorrências de espécimes da icnofácies *Skolithos* nos depósitos estudados sugerem uma relação entre uma ocupação do substrato permanente pontuada pela exploração episódica de indivíduos colonizadores, após eventos de tempestades. Os estudos de fácies em combinação com a análise icnológica da Formação Pimenteiras forneceram importantes parâmetros para o entendimento da dinâmica sedimentar e a ocupação do substrato por organismos bentônicos durante o estabelecimento dos mares epicontinentais devonianos no oeste Gondwana.

Palavras Chaves: Icnofábrica, Icnofácies, Tempestitos, Devoniano, Formação Pimenteiras.

Abstract

The record of extensive Devonian epicontinental seas of Western Gondwana in northern Brazil is represented by shale and sandstone of the Pimenteiras Formation, discontinuously exposed in the eastern Parnaíba Basin. Based-facies and stratigraphic analysis carried out in Pimenteiras Formation, indicated the predominance of gray to black shale interbedded with hummocky cross-stratified sandstone suggest storm-influenced deep water environments. The siliciclastic deposits show various levels of

bioturbation reflecting changes in the depositional conditions, oxygenation rates and different occupation and use of the substrate. At least two bathymetric zones are well marked: 1) *offshore/shoreface*, characterized by the predominance of rippled laminated beds, massive and hummocky cross-stratified sandstones interbedded with thin layers of shale; and 2) upper *offshore*, represented by thick shale layers interbedded with hummocky cross-stratified sandstone. The ichnologic analysis identified 15 ichnogenera, such as *Agrichnium*, *Bergaueria*, *Bifungites*, *Circulichnis*, *Cruziana*, *Diplichnites*, *Helminthopsis*, *Lockeia*, *Lophoctenium*, *Palaeophycus*, *Phycosiphon*, *Planolites*, *Protopaleodictyon*, *Rusophycus* and *Zoophycos*. The *Agrichnium* and *Circulichnis* ichnogenera are described for the first time in the Pimenteiras Formation. Different bioturbation levels occur restricted to sandstone beds were identified, with ichnofabric index (ii) 3, ranging between 15% and 25%. These average values of ii suggest typical oxygenation levels related to aerobic environments, or the sediment-water interface zone with reasonable oxygenation levels. These bioturbation levels are usually limited by shales with low (ii = 2) or none (ii = 1) bioturbation, suggesting an anaerobic environment near to the substrate. The Pimenteiras Formation includes the following ichnofacies representatives of offshore/shoreface transition: *Skolithos*, related to wave-dominated high energy environment; and *Cruziana* ichnofacies correspondent to the littoral zone and shallow to deep marine environment. The predominance of specimens of *Cruziana* with subordinate specimens of *Skolithos* ichnofacies in the studied deposits suggests a relationship with a permanent occupation of the substrate punctuated by episodic exploration of colonizers individuals, after the storm events. The facies analysis in combination with ichnologic studies carried out in the Pimenteiras Formation provided important parameters for the understanding of sedimentary dynamic and substrate occupation by benthic organism during the establishment of Devonian epicontinental seas in the Western Gondwana.

Keywords: ichnofabrics, ichnofacies, tempestites, Devonian, Pimenteiras Formation.

5.1 INTRODUÇÃO

Um dos mais expressivos registros dos mares devonianos do Oeste do Gondwana é representado pelos folhelhos e arenitos da Formação Pimenteiras, exposta na Bacia do Parnaíba, região nordeste do Brasil. Trabalhos prévios sobre esta unidade têm interpretado esses depósitos como uma sucessão de fácies de plataforma influenciada por tempestades representando a fase transgressiva na bacia entre o Eifeliano e o Givetiano (Young 2006, Grahn *et al.* 2008). A presença de folhelhos negros sem bioturbação e com abundante matéria orgânica amorfa preservada sugere um evento de máxima inundação no início da deposição (Young 2006, Souza 2007). Bioturbações são comuns principalmente na porção média e superior da unidade, particularmente na formação Pimenteiras, quando os efeitos iniciais da transgressão já não afetam a vida bentônica. A partir desse momento a unidade passa a apresentar uma abundante icnofauna e conteúdo fossilífero.

A Formação Pimenteiras é a unidade que apresenta a maior quantidade de traços fósseis devonianos descritos no Brasil, com mais de 40 icnoespécies descritas até o momento. Entretanto, a maioria dos trabalhos icnológicos se restringe à descrição icnotaxonômica com pouca ênfase no significado paleoambiental destes traços. Recentemente, foram realizados trabalhos de mapeamento das ocorrências de traços fósseis na Formação Pimenteiras (Silva *et al.* 2012), porém ainda sem um controle estratigráfico adequado que posicione corretamente os intervalos bioturbados ao longo das seções estudadas. Este trabalho tem como principais objetivos 1) a descrição e interpretação dos níveis de ocorrência de traços fósseis encontrados em intercalações de folhelhos e arenitos da Formação Pimenteiras, 2) sua relação com variações nas taxas de oxigênio e suprimento de nutrientes e 3) uma breve discussão das possíveis causas paleoambientais que ocasionaram as variações observadas nas assembleias icnofossíferas.

5.2 MÉTODOS

A área estudada está situada entre os municípios de Valença do Piauí e Pimenteiras (Figura 7). Nesta região o trabalho foi concentrado no sítio de Oití, que é

conhecido por ter as melhores exposições de traços fósseis da Formação Pimenteiras, não só pela abundância, mas também pela grande diversidade de traços fósseis.

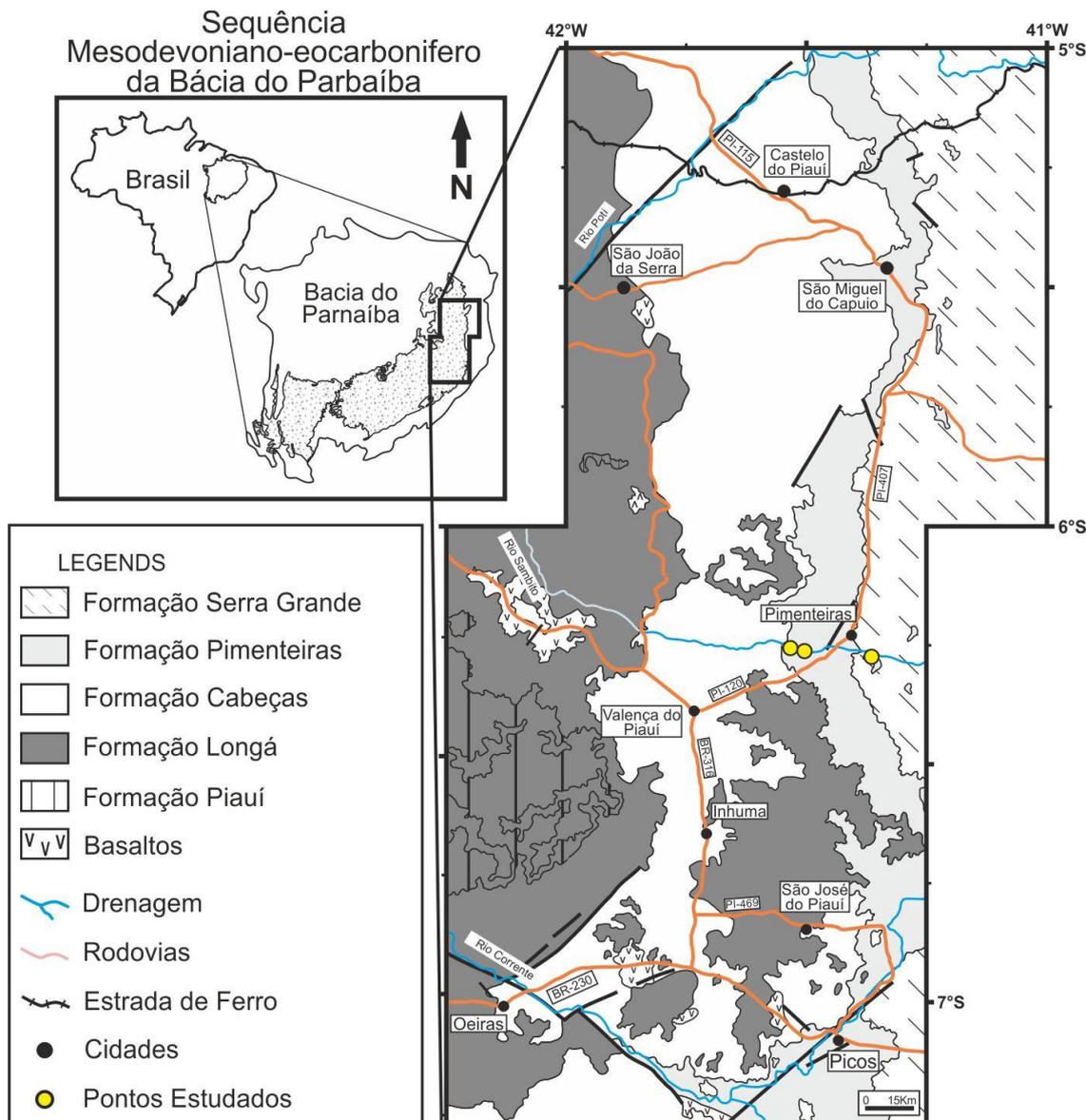


Figura 7. Mapa de localização e geológico simplificado da região de Valença do Piauí e Pimenteiras (PI), borda leste da Bacia do Parnaíba com as localizações dos pontos estudados.

Fonte: Modificado de Radam (1973).

No trabalho de campo foi aplicada a proposta de descrição de fácies de Walker (1992), individualizando as fácies sedimentares e confeccionando perfis estratigráficos. A tarefa importante foi a identificação dos traços fósseis assim como a individualização e posicionamento de seis níveis de bioturbação. Com base na análise de fácies foi possível determinar os possíveis paleoambientes nos quais as fácies foram geradas. Foram confeccionadas oito lâminas delgadas usadas para a classificação petrográfica

das rochas estudadas. Além disso, o estudo petrográfico foi útil para a descrição de traços fósseis no caso da determinação de grãos orientados em um padrão preferencial originado pelo *spreiten*, durante a produção dos traços fósseis.

A análise icnológica consistiu na identificação dos traços fósseis pela sua morfologia comparando-os a outros tipos de traços já estudados e usados como padrão, visando á classificação icnotaxonômica. Para a classificação toponômica foram utilizados os trabalho de Martinsson (1970) e Seilacher (1964) de acordo com a conveniência em cada amostra, já para a classificação etológica foi utilizada a proposta de Seilacher (1964) que classifica os traços conforme a interpretação do comportamento do organismo gerador do traço. Na determinação dos índices de icnofábrica foi utilizado o trabalho de Miller & Smail (1997).

5.3 HISTÓRIO DA ICNOLOGIA NA FORMAÇÃO PIMENTEIRAS

Os primeiros registros de traços fósseis da Formação Pimenteiras foram feitos por Wilhelm Kegel (Fernandes *et al.* 2012) entre 1953 e 1966 principalmente na região sudeste do estado do Piauí, e foram seguidos por uma série de estudos icnológicos desde a década de 70. O material original descrito por Kegel foi revisado por Fernandes *et al.* (2012), tanto no âmbito icnológico como litoestratigráfico, e foram determinados vários icnogêneros ou icnoespécies dos exemplares que eram duvidosos na época dos trabalhos de Kegel. Na Formação Pimenteiras a principal modificação foi a reclassificação de *Spirophyton* para *Zoophycos*.

Contudo, a maioria dos trabalhos na Formação Pimenteiras apenas registra as ocorrências de traços fósseis sem dar maiores detalhes estratigráficos, paleoambientais e taxonômicos (Assis & Fernandes 1980, Agostinho *et al.* 2012). Estudos sistemáticos foram realizados por Agostinho *et al.* (2004) quando foram definidas as icnoespécies *Bifungites munizi* e *Bifungites piauiensis* em arenitos intercalados com folhelhos na região de Valença do Piauí. Recentemente, Silva *et al.* (2012) mapearam diversas regiões no Piauí com ocorrências de traços fósseis na Formação Pimenteiras. Young (2006) a partir de análise estratigráfica de alta resolução posiciona e interpreta varias assembleias de traços fósseis na borda leste da Bacia do Parnaíba.

Atualmente são reconhecidos 32 icnogêneros com 47 icnoespécies distintas, sendo eles: *Arenicolites* isp., *Asteriacites* isp., *A. stelliforme*, *Bergaueria* cf., *B. prantli*, *B. hemisférica*, *Bifungites piauienses*, *B. fezzanensis*, *B. munizi*, *Cruziana* isp., *C. problematica*, *Diplichnites* isp., *Diplocraterion* isp., *Granularia* isp., *Helminthopsis* isp., *Isopodichnus* isp., *Lockeia* isp., *L. siliquaria*, *Lophoctenium* isp., *Merostomichnites piauienses*, *Monomorphichnus* isp., *Neonereites uniserialis*, *Neoskolithos picosensis*, *Nereites* isp., *N. missouriensis*, *Palaeohelminthoidea* isp., *Palaeophycus tubularis*, *Phycosiphon* isp., *P. incertum*, *Planolites beverleyensis*, *Protopalaeodictyon* isp., *P. spinata*, *Protovirgularia rugosa*, *P. dichotoma*, *Rhizocorallium jenense*, *Rusophycus* isp., *R. biloba*, *R. díspar*, *R. polonica*, *Scolicia* isp., *S. prisca*, *Skolithos* isp., *S. linearis*, *Spirophyton* isp., *Subphyllochora*, *Thalassinoides horizontalis*, *Trichophycus* isp., *Zoophycos* isp.

5.4 ESTRATIGRAFIA E SEDIMENTOLOGIA DA FORMAÇÃO PIMENTEIRAS

A análise de fácies e estratigráfica da Formação Pimenteiras concentrou-se em exposições em drenagens e lajedos nas margens do rio Sambito (Figura 8 A), região de Valença do Piauí e afloramentos nas proximidades do município de Pimenteiras (Figura 7). Foram individualizadas quatro fácies sedimentares agrupadas em duas associações de fácies (AF) (Tabela 1), organizadas em ciclos granocrescentes e de espessamento ascendente das camadas de arenito de até 4m de espessuras, representativos de plataforma rasa dominada por ondas de tempestade.

Tabela 1. Fácies e processos deposicionais referentes à gênese das rochas da Formação Pimenteiras, nas regiões de Valença do Piauí e Pimenteiras (PI).

Fácies	Descrição	Processo
Folhelho (F)	Corpos lenticulares e tabulares de folhelho arenoso, de espessura variável, desde centimétrica a métrica.	Deposição a partir de suspensão em condições de baixa energia.
Arenito maciço (Am)	Camadas lenticulares de arenito, de até 30 cm de espessura fino a médio com padrão <i>pinch-and-swell</i> .	Deposição rápida de areias relacionadas à ação de fluxo oscilatório; Deposição rápida de sedimentos ou fluidificação total.
Arenito com laminação ondulada (Ao)	Camadas de arenito fino, com até 20 cm de espessura, e laminação ondulada com comprimentos de onda de 6,5 cm e cristas com orientação NW/SE, lineações de partição com orientação 70° Az.	Deposição a partir da ação de fluxo oscilatório com eventuais momentos de deposição por suspensão.
Arenito com estratificação cruzada <i>Hummocky</i> (Ah)	Camadas lenticulares e/ou amalgamadas de arenito fino com até 2 m de espessura, continua lateralmente, com estratificação cruzada <i>Hummocky</i> com amplitude de 30 cm e escavações de até 2 cm.	Fluxo combinado, predominantemente oscilatório, com alta taxa de agradação e pouca contribuição decorrente unidirecional, relacionado a ondas de tempestades.

5.4.1 *Offshore/shoreface*

A associação de fácies *offshore/shoreface* é composta pelas fácies folhelho (F), arenito com laminação ondulada (Ao) (Figura 8 B), arenito maciço (Am) e arenito com estratificação cruzada *hummocky* (HCS) (Figura 8 C). Os depósitos de folhelho apresentam geometria lenticular e estão intercalados as fácies arenosas (Figura 8 C), formados a partir de decantação de partículas de argila em condições de baixa energia (Potter *et al.* 2005). Os arenitos com laminação ondulada representam delgados corpos lenticulares com padrão *pinch-and-swell* quando limitados por folhelhos (Figura 8 D). O topo das camadas é caracterizado por marcas onduladas simétricas com comprimento de onda de 6,5 cm e cristas com orientação NW/SE, geradas a partir da ação de fluxo oscilatório (De Raaf *et al.* 1977, Cheel & Leckie 1993). A fácies arenito maciço com granulometria fina a média padrão *pinch-and-swell*, bem como as camadas de arenitos com estratificação cruzada *hummocky* (HCS) intensamente bioturbadas, que ocorrem com raras intercalações de folhelho. A geometria das camadas dos arenitos com HCS é geralmente tabular com amplitude de 30 cm e escavações de 2 cm. Os arenitos em geral são caracterizados por grãos de tamanho silte a areia fina, bem selecionados e variando

de angulosos a subangulosos. Os interstícios são preenchidos por argila ou cimento carbonático. A argila aparece escura devido à impregnação de óxido-hidróxido de ferro e ocorre também, em maior concentração, nas bioturbações (Figura 8 E). Deformações milimétricas causadas pela bioturbação são observadas nas camadas de arenitos com estratificação cruzada *hummocky* (Figura 8 F).

Estruturas com HCS são geradas por fluxo combinado predominantemente oscilatório, com alta taxa de agradação e pouca contribuição de corrente unidirecional, relacionado à ação de ondas de tempestade (Dumas & Arnott 2006). As fácies de arenito com laminação ondulada e HCS apresentam um recobrimento de argila que se forma a partir de momentos de deposição por suspensão em fases finais das tempestades (Plint 2010). Os arenitos maciços, com laminação ondulada e o topo dos arenitos com HCS apresentam-se bioturbados. A fácies de folhelho foi depositada em ambientes mais calmos de lâmina d'água mais profunda provavelmente relacionada à zona de *offshore*, essas camadas ocorrem intercaladas a camadas de arenitos com HCS, representando assim intervalos entre eventos de tempestades. As fácies arenosas com a presença de estratificações cruzadas *hummocky* sugerem ambiente es mais proximais afetados por intensa ação de ondas de tempestade característicos de depósitos de *shoreface* inferior ou mesmo *offshore* transicional (Richards & Brown 1987).

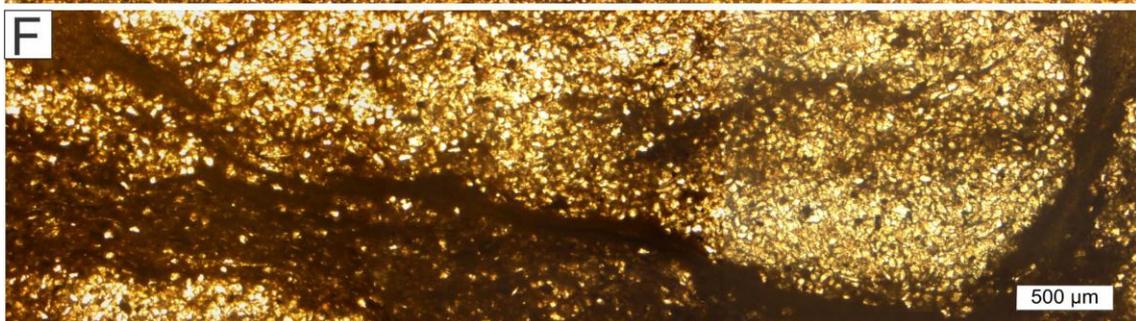
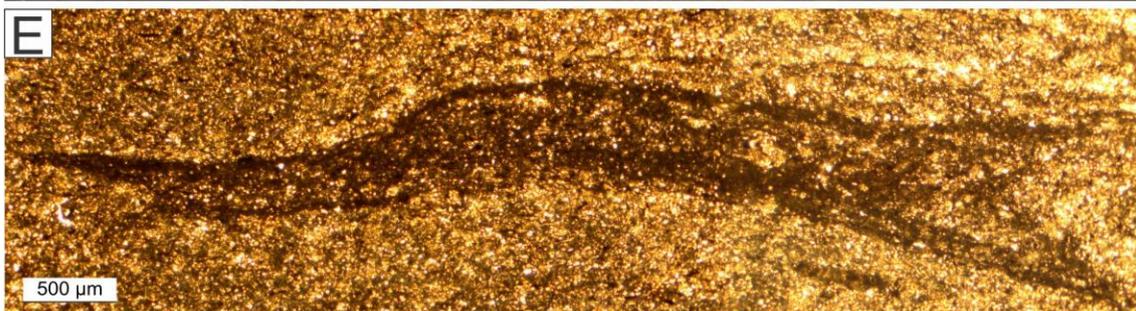


Figura 8. Geometria e fácies deposicionais dos depósitos de *offshore/shoreface* da Formação Pimenteiras. A) Lajedo composto de intercalações de arenitos e folhelhos com geometria tabular a ondulada que afloram no leito e nas margens do rio Sambito, no sítio de Oiti. B) Detalhe da fácies arenito com laminação ondulada. C) Camadas de arenito com estratificação cruzada *hummocky* intercalada a lentes de folhelho. D) Camadas onduladas de arenito com estratificação cruzada *hummocky* intercalados com delgadas camadas de folhelhos com inclinação suave para NW. E) Bioturbação horizontal e suavemente curvada na qual a estrutura é constituída por tubos preenchidos por argila e estruturas semelhantes à *spreiten* caracterizados por intercalações de argila e areia/silte, possivelmente associado à *Phycosiphon*. F) Escavação horizontal que deforma a estratificação cruzada *hummocky* possivelmente relacionada à *Palaeophycus* devido a compodição da da rocha matriz.

5.4.2 Offshore

A associação de depósitos de *offshore* é composta basicamente pelas fácies folhelho (F) e arenito com estratificação cruzada *hummocky* (HCS) (Figura 9 A). A fácies F contém raras intercalações de arenitos com geometria tabular. As camadas de folhelhos variam de 5 a 20 m de espessura, tem continuidade lateral por dezenas de metros (Figura 9 B) e apresentam fissilidade pouco desenvolvida. A coloração varia de cinza escura a avermelhada. Estes folhelhos não apresentam evidências de bioturbações ou macrofósseis. As camadas de arenitos apresentam espessura variável e geometria lenticular (Figura 9 C). Os arenitos são finos e caracterizados por estratificação cruzada *hummocky* ou de aspecto maciço com padrão *pinch-and-swell*. Bioturbações nestes arenitos são raras, pouco diversas e ocorrem principalmente na base da camada.

Como no *offshore* transicional os depósitos de *offshore* estão sujeitos a alternâncias de energia devido a eventos de tempestade de curta duração e longos períodos de deposição de material em suspensão (Buatois & Mángano 2011). Essa alternância de energia no ambiente deposicional devido à ação de ondas de tempestade resulta no deslocamento do nível de base de onda nas porções mais distais, explicando assim a ocorrência de camadas de arenito em ambientes de *offshore* (Della Favera 2008).

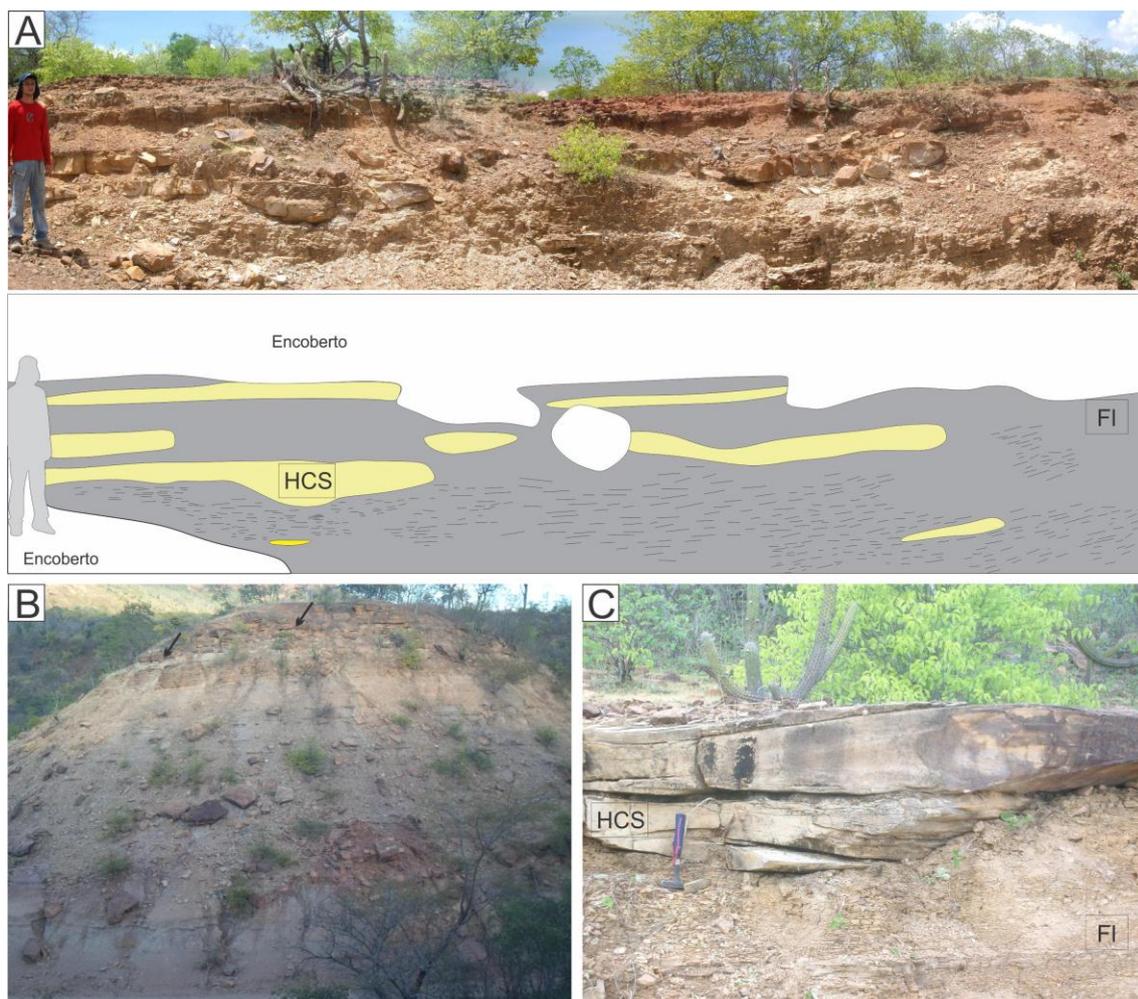


Figura 9. Depósitos de *offshore* superior da Formação Pimenteiras, nas proximidades do município de Pimenteiras. A) Camadas de folhelho (F) com raras intercalações de corpos lenticulares de arenitos com HCS. B) Afloramento próximo a cidade de Pimenteiras com espessos pacotes de folhelhos e camadas tabulares de arenitos maciço no topo. As setas pretas indicam a base das camadas de arenitos onde ocorrem as bioturbações. C) Camada lenticular de arenito com HCS sobreposta que ocorrem inseridas em espessas camadas de folhelho (F).

5.5 IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS NÍVEIS BIOTURBADOS.

O estudo sistemático dos traços fósseis da Formação Pimenteiras foi baseado em seus aspectos descritivos, preservacionais, estratinômicos e etológicas, que permitiram a classificação de 17 icnogêneros distintos, sendo eles *Agrichnium*, *Arenicolites*, *Bergaueria*, *Bifungites*, *Diplichnites*, *Circulichnis*, *Cruziana*, *Helminthopsis*, *Lockeia*, *Lophoctenium*, *Palaeophycus*, *Phycosiphon*, *Planolites*, *Protopaleocidtyon*, *Rusophycus*, *Scolicia* e *Zoophycos*. Os traços fósseis descritos em geral são encontrados em sucessíveis níveis de arenito com laminação ondulada, contínuos lateralmente, que exibem uma geometria que varia de lenticular a tabular. Os arenitos se intercalam com estratos sem bioturbação (Figura 10). Essa disposição dos traços fósseis se dá devido à intensa variação das condições ambientes, tais como energia do ambiente, taxa de deposição, oxigenação e consistência do substrato, fatores que podem ser associados a eventos de tempestades em ambientes de águas profundas como sugerem as fácies deposicionais nas quais os traços fósseis estão inseridos.

Foram identificados seis níveis de bioturbação distintos nos afloramentos estudados (Figura 11). Para cada um dos níveis foi determinado o índice de icnofábrica para estimar o grau de perturbação das camadas assim com a densidade de icnofósseis por unidade de área, de acordo com o método de Miller & Small (1997) que fornece diagramas com padrões de bioturbação como diversidade de tamanho e forma da distribuição das bioturbações em planos horizontais. Conforme os intervalos definidos por Miller & Small (1997) o índice de icnofábrica determinado para todos os níveis estudados foi 3, variando entre 15% e 25% (Figura 10).

O nível 1 foi identificado em um leito rochoso de um córrego afluente do rio Sambito a cerca de 500 m do principal afloramento da Formação Pimenteiras na comunidade de Oiti. Neste nível predominam arenitos finos com HCS e laminação ondulada; subordinadamente ocorrem arenitos maciços. Os traços fósseis são comumente verticais com presença de *Bifungites* e *Arenicolites*, além de *Planolites*. Um equivalente ao nível 1 ocorre também em afloramentos na entrada do município de Pimenteiras, porém com a identificação de apenas *Arenicolites* (Figura 11). Os níveis de 2 a 6 ocorrem nas margens e leito do rio Sambito dentro da comunidade de Oiti. O nível 2 é muito semelhante ao nível 1 tanto em termos faciológicos como de diversidade icnotaxonômica, no qual ocorrem *Arenicolites*, *Bifungites*, *Pla*

nolites e *Lockeia*, porém em menor abundância (Figura 11). Os níveis 3 e 4 exibem uma maior diversidade e abundância de traços fósseis, porém com predomínio de traços horizontais com destaque para *Zoophycos* e *Protopaleodictyon* (Figura 11). Esses traços ocorrem no topo de arenitos com estratificação cruzada *hummocky* e laminação ondulada e associados a marcas onduladas simétricas. Estes arenitos ocorrem como camadas isoladas de geometria lenticular dentro de camadas de folhelhos. Níveis semelhantes são encontrados em afloramentos nas proximidades de Pimenteiras em camadas lenticulares e tabulares isoladas de arenitos dentro de espessos folhelhos. Nesses afloramentos os traços ocorrem na base das camadas de arenitos, são predominantemente horizontais com baixa diversidade e abundância, sendo muitos deles do gênero *Planolites*. Os níveis 5 e 6 mostram uma tendência a diminuição de abundância e diversidade de traços fósseis e o retorno do predomínio de traços verticais como *Arenicolites* e *Bifungites* (Figura 11).

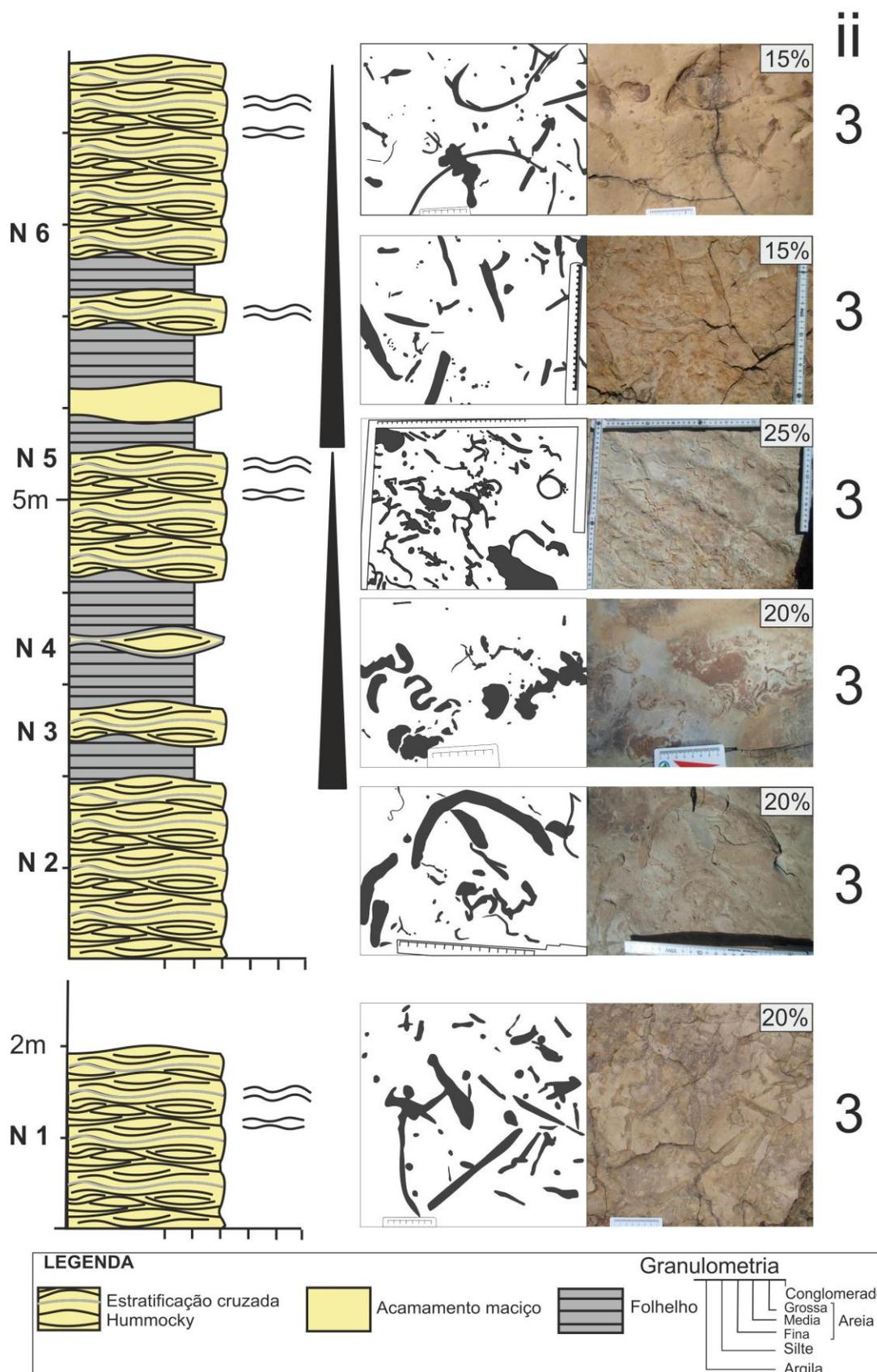


Figura 10. Perfil estratigráfico da sucessão siliciclástica da Formação Pimenteiras na localidade de Oiti, Pimenteiras (PI), relacionado aos índices de icnofábrica (ii) definidos para cada um dos níveis individualizados.

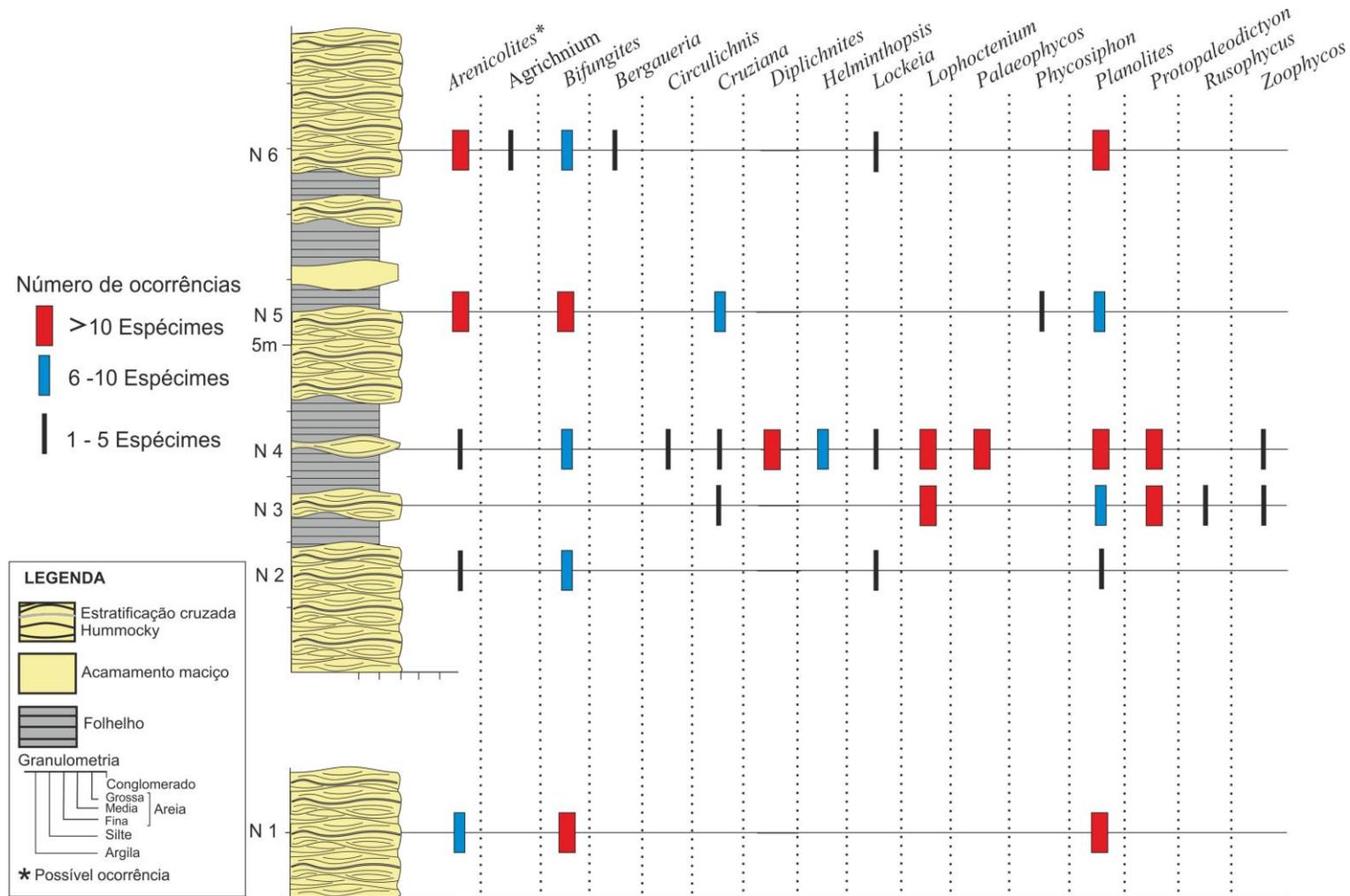


Figura 11. Perfil estratigráfico da sucessão siliciclástica da Formação Pimenteiras elaborado com base nas exposições aflorantes na localidade de Oiti, Pimenteiras (PI), com o posicionamento dos níveis de bioturbação, assim como a ocorrência e quantificação dos i cnogêneros em cada um dos níveis.

5.6 ICNOLOGIA

5.6.1 Icnologia Sistemática

ESTRUTURAS VERTICAIS TUBULARES

Escavações verticais com tendência de pareamento

Figura 12 A

Espécimes: Foram identificadas 45 espécimes deste icnito distribuídos nos níveis 1, 2, 4, 5 e 6.

Descrição: Tubos caracterizados por escavações verticais, simples, sem *spreite*, orientadas perpendicularmente a estratificação, vistas em planta com tendência de pareamento das escavações circulares a subcirculares. Os tubos descritos não foram observados em seção vertical sendo classificados impossibilitando a sua classificação de forma precisa. Suas dimensões são bastante variáveis, de forma que o diâmetro das perfurações varia de 0,8 cm até 1,0 cm. A distância entre os tubos varia de 2,0 a 2,5 cm. Localmente são observadas protuberâncias na porção superior de apenas uma das terminações dos tubos. Estas protuberâncias são convexas e achatadas com diâmetro de 4,0cm. O preenchimento dos tubos é maciço e comumente do mesmo material da rocha.

Observações: Devido à falta de registros em seção vertical não é possível afirmar com precisão, contudo as características observadas sugerem a possível ocorrência de *Arenicolites* que é um tubo endicnial comumente associado a formas de habitação e/ou alimentação, sendo classificados etologicamente como *Domichnia* e *Fodinichnia*. Os organismos geradores responsáveis por esses traços são anelídeos poliquetas suspensívoros, no caso de ambientes marinhos (Fürsich 1974). Bromley (1996) notou que estruturas similares são produzidas por poliquetas, holotúrias e enteropneustas em ambientes modernos. As protuberâncias que ocorrem na porção superior de apenas um dos tubos estão relacionadas a construções feitas pelos organismos e que são muito comuns em perfurações de vermes poliquetas recentes.

Bifungites Desio, 1940

Bifungites piauienses Agostinho, Viana e Fernandes, 2004

Figura 12 B

Espécimes: Foram identificadas 79 espécimes deste traço fóssil, distribuídos nos níveis 1, 2, 4, 5 e 6 .

Descrição: Tubos horizontais com terminações em forma de seta interligadas por um eixo central menos elevado. O comprimento total da estrutura varia entre 12 e 45 mm. O diâmetro do tubo central varia de 2 a 16 mm. A largura máxima das terminações varia de 4 a 25 mm. Na porção central de algumas das terminações em forma de seta é possível observar feições circulares com diâmetro de 5 mm.

Observações: *Bifungites* é um icnito de habitação (*Domichnia*) que pode ser tanto hipicnial como endicnial, gerado por um organismo sedentário vermiforme de hábito suspensívoro, semelhante a anélídeos ou artrópodes (Gutschick & Lamborn 1975). *Bifungites* já foi associado a moldes de aberturas de tubos em forma de U de *Rhizocorallium*, *Corophioides* ou *Diplocraterion* (Gutschick & Lamborn 1975). Atualmente *Bifungites* é descrito como resultado das terminações de dois tubos verticais em forma de câmaras interligadas comparadas a letra π invertido, sem *spreiten* (Gutschick & Lamborn 1975). Em grande parte dos icnitos esses tubos verticais não se encontram preservados, sendo preservado apenas a sua porção basal. Nos espécimes estudados estes tubos aparecem como depressões ou protuberâncias tubulares na porção central das terminações. A formação das protrusões em forma de flecha estaria associada à tentativa do bioturbador de suspender seu corpo acima dos sedimentos encharcados na parte inferior do tubo em forma de U (Cole & McDowell 2003). Outra interpretação seria que a forma de flecha poderia estar associada a uma maneira do bioturbador “segurar” o sedimento ao redor do seu corpo quando confrontado com um predador tentando entrar no tubo (Cole & McDowell 2003). Os traços de *Bifungites* são característicos de ambiente de águas rasas, quentes e influenciados por ondas, com boa oxigenação e abundante alimento em suspensão (Rodriguez & Gutschick 1970). Os espécimes descritos foram classificados como *Bifungites piauienses* por Agostinho *et al.* (2004) devido as suas terminações características em forma de setas. Contudo, três espécimes de *Bifungites* apresentam terminações em forma de seta, são elas: *B. bisagitta*, *B. bisagittula* e *B. bieurysagitta* (Gutschick & Lamborn 1975). Destes espécimes *B. piauienses* são muito semelhantes aos de *B. bisagitta*, sendo diferenciados apenas por suas dimensões (Agostinho *et al.* 2004). Segundo Bertling *et al.* (2006) o tamanho não pode ser considerado uma característica taxonômica relevante na elevação de novos icnogêneros e icnoespécies, pois poderiam refletir relações ontogênicas.

Porém, outra característica que pode ser relevante em *B. piauienses* poderia ser as projeções para trás com ângulos de 10° a 35° que ocorrem nas terminações. O trabalho de Gutschick & Lamborn (1975) não apresentam estas informações que possibilitem uma comparação entre as icnoespécies. Alguns exemplares geraram dúvidas em relação a outras icnoespécies, como foi o caso da possível presença de *Bifungites cruciformis*, comum na Formação Longá, porém nenhum desses exemplares apresentava bom estado de preservação para que pudesse ter um diagnóstico preciso.

Bifungites é um traço fóssil muito comum em rochas de idade devoniana em varias partes do mundo. No Brasil são encontrados principalmente em depósitos marinhos rasos da Formação Ponta Grossa, Devoniano Inferior a Superior da Bacia do Paraná (Fernandes & Melo 1985), Formação Manacapuru, Siluro-Devoniano da Bacia do Amazonas (Soares & Nogueira 2006), Formação Inajá, Devoniano Superior da Bacia Jatobá (Muniz 1979) e Formação Longá, Devoniano a Carbonífero da Bacia do Parnaíba (Muniz 1982).

ESTRUTURAS HORIZONTAIS SIMPLES

Diplichnites Dawson, 1873

Diplichnites isp.

Figura 12 C

Espécimes: Foram identificadas 30 espécimes deste traço fóssil, concentrados no nível 4.

Descrição: Corresponde a pistas simples caracterizadas por sulcos isolados e alongados de comprimento aproximadamente igual; os sulcos estão dispostos em pares paralelos com distância de 5 mm entre eles, o é espaçamento constante e estão dispostos de forma perpendicular ao eixo central da pista. Apresentam até 10 cm de comprimento.

Observações: *Diplichnites* é uma pista epicnial associado a formas de locomoção, sendo classificados etologicamente como *repichnia*. Os organismos geradores responsáveis por essas pistas são artrópodes, possivelmente trilobitas. A classificação deste icnogênero é bastante complexa devido a grande variedade desse tipo de traço. Ele é morfológicamente similar a *Dimorphichnus*, mas difere por possuir impressões de tamanho aproximadamente igual (comprimento) em cada lado do traço. Contudo devido ao baixo grau de preservação estas pistas foram classificadas como *Diplichnites* isp.

***Palaeophycus* Hall, 1847.**

***Palaeophycus tubularis* Hall, 1847.**

Figura 12 D

Espécimes: Foram identificadas 14 espécimes deste traço fóssil, concentrados no nível 4.

Descrição: Escavações em hiporrelevo positivas, registradas entre as camadas de arenitos e descritos como traços retos ou curvados, sem ornamentações, cilíndricos e dispostos de forma paralela à estratificação. Seu preenchimento é maciço e do mesmo material da rocha-matriz. Seus comprimentos são variados e seu diâmetro varia entre 0,1 cm e 0,5 cm.

Observações: *Palaeophycus* é classificado como icnito de habitação (*Domichnia*) e/ou alimentação (*Fodinichnia*) e sua origem é atribuída a organismos vermiformes predadores ou suspensívoros (Pemberton & Frey 1982). Este icnogênero é característico por não apresentar ramificações nem estruturação interna, contudo a comum sobreposição de espécimes leva a confusões gerando essa falsa impressão. Pemberton & Frey (1982) propõe um esquema icnotaxonomico para o *Palaeophycus*, onde mostra que tal icnogênero difere do *Planolites* devido o seu preenchimento passivo, de forma que o sedimento que preenche o icnito é semelhante à rocha matriz, fato contrário ao que ocorre nos *Planolites*. Contudo, Jensen (1997) notou que o material digestivo pode ser semelhante ao sedimento hospedeiro e sedimento passivamente introduzido pode contrastar com a rocha hospedeira. Consequentemente, em vez da natureza do preenchimento (contraste vs similar a rocha hospedeira), a análise deveria verificar se a estrutura registra um retrabalhamento ativo pelo produtor ou uma simples infiltração de matéria de forma passiva. Os espécimes descritos não apresentam peloides (peletes fecais) ou meniscos que são características de preenchimentos ativos (Ekdale *et al.* 1984). A presença de preenchimento maciço e semelhante à rocha matriz e de paredes bem definidas classificam estes espécimes como *Palaeophycus* (Keighley & Pickerill 1995). Cinco espécimes são definidos conforme a estrutura externa das escavações (Pemberton & Frey 1982). *Palaeophycus striatus* apresentam numerosas estrias finas contínuas, paralelas e longitudinais ao tubo. *P. heberti* apresentam paredes com grossas linhas, lisas e sem ornamentação, com a espessura da parede variando com o tamanho da bioturbação. As linhas das paredes consistem de sedimentos aglutinados, mais grossos e bem selecionados que o da rocha hospedeira. *P. sulcatus* tubos ornamentados

com estrias bruscas, anastomosadas enfileiradas e distintamente esculpidos com entrelaçamentos de pequenos sulcos. *P. alternatus* apresenta tubos com ornamentações alternadas de estrias e anelações de diâmetro periodicamente variável. As icnoespécies descritas não apresentam ornamentações na porção externa nem paredes grossas. A icnoespécie foi classificada como *Palaeophycus tubulares*, devido à presença de finos revestimentos das paredes dos tubos e pela ausência de estrias ao longo dos traços.

***Planolites* Nicholson, 1873**

***Planolites beverleyensis* (Billings, 1862)**

Figura 12 E

Espécimes: Foram identificadas 75 espécimes deste traço fóssil, distribuídos nos níveis 1, 2, 3, 4, 5 e 6 .

Descrição: Tubos em epirrelevo positivo ou hiporrelevo, seus traços são retilíneos ou meandantes de orientação horizontal ou levemente oblíqua em relação à estratificação, em grande parte dos registros os seus traços entrecruzar-se, e raramente apresenta ramificações. Apresentam seção transversal circular a elíptica, com preenchimento diferente da matriz, também arenosa, contudo mais grosseira que a rocha encaixante. Suas dimensões variam desde poucos centímetros até 20,0 cm, e seu diâmetro chega a alcançar até 2,5 cm em alguns casos, mas em média o diâmetro é de 8 mm.

Observações: *Planolites* é classificado como um icnito de alimentação (*Fodinichnia*). A sua origem está relacionada a atividade animais vermiformes sedimentívoros (Pemberton & Frey 1982). Este icnogênero é caracterizado por não apresentar revestimento em volta dos tubos e por seu preenchimento ocorrer de forma ativa, no qual o material encontrado no interior dos tubos é diferente da composição da rocha matriz, diferindo assim do *Palaeophycus*, descrito anteriormente (Pemberton & Frey 1982, Keighley & Pickerill 1995). Três espécimes são definidos conforme o diâmetro dos tubos e a presença ou ausência de ornamentações (Pemberton & Frey 1982). *Planolites montanus* são caracterizados por tubos horizontais relativamente pequenos, curvados a contorcidos, irregularmente cilíndricos e o preenchimento tende a ser composto de sedimento mais claro e melhor selecionado que a rocha hospedeira. *P. annularis* são tubos que exibem proeminentes anelações de tamanho e espaçamento regular ou irregular, porém com o diâmetro mais ou menos constante. Os espécimes

descritos apresentam tubos relativamente largos, retos a suavemente curvados e com limites externos sem ornamentações que sugerem *Planolites beverleryensis*.

ESTRUTURAS MEANDRANTES, SINUOSAS E RAMIFICADAS

Agrichnium de Pfeiffer, 1968

Agrichnium isp.

Figura 12 F

Espécimes: Foram identificadas 5 espécimes deste traço fóssil, concentrados no nível 6.

Descrição: Traços caracterizados por sulcos horizontais em epirrelevo, sem direção preferencial, em perfil apresenta forma de “V”, simples, sem *spreite*, orientados perpendicularmente a estratificação. Correspondem a traços sinuosos com intercruzamentos. Seus sulcos apresentam comprimentos bastante variáveis e largura média de 0,7 cm.

Observações: *Agrichnium* é um traço epichnial associado a formas e locomoção e alimentação, sendo classificados etologicamente como *Pascichnia*. O principal organismo produtor são os moluscos bivalves, que em sua maioria possuem o comportamento vágil, locomovendo-se sobre o substrato deixando muitas vezes estas trilhas na forma de traços fósseis de *Agrichnium*, as escavações horizontais com formas em “V” seriam formadas pelo deslocamento sobre o substrato a procura de alimentos (Pryor 1967; Netto & Gonzaga 1985, Boeira & Netto 1987). Pryor (1967) e Netto & Gonzaga (1985) observaram as atividades desses organismos em ambientes recentes, confirmando assim o mecanismo gerador desses sulcos em forma de V. *Agrichnium* ocorre principalmente em ambientes mixohalinos, lagunares e de planície de maré do Permiano da Formação Rio Bonito (Boeira & Netto 1987), canais de planícies de maré arenosas em estuários do Devoniano da Formação Windy Gully Sandstone, Grupo Taylor, Antártica (Bradshaw 1981) e depósitos fluviais recentes (Pryor 1967). Em águas profundas *Agrichnium* foi registrado em depósitos turbidíticos permianos da Formação Lercara, Oeste da Sicília, Itália (Kozur *et al.* 1996). A ocorrência de *Agrichnium* na Formação Pimenteiras estende sua ocorrência e distribuição estratigráfica para o Devoniano do Brasil.

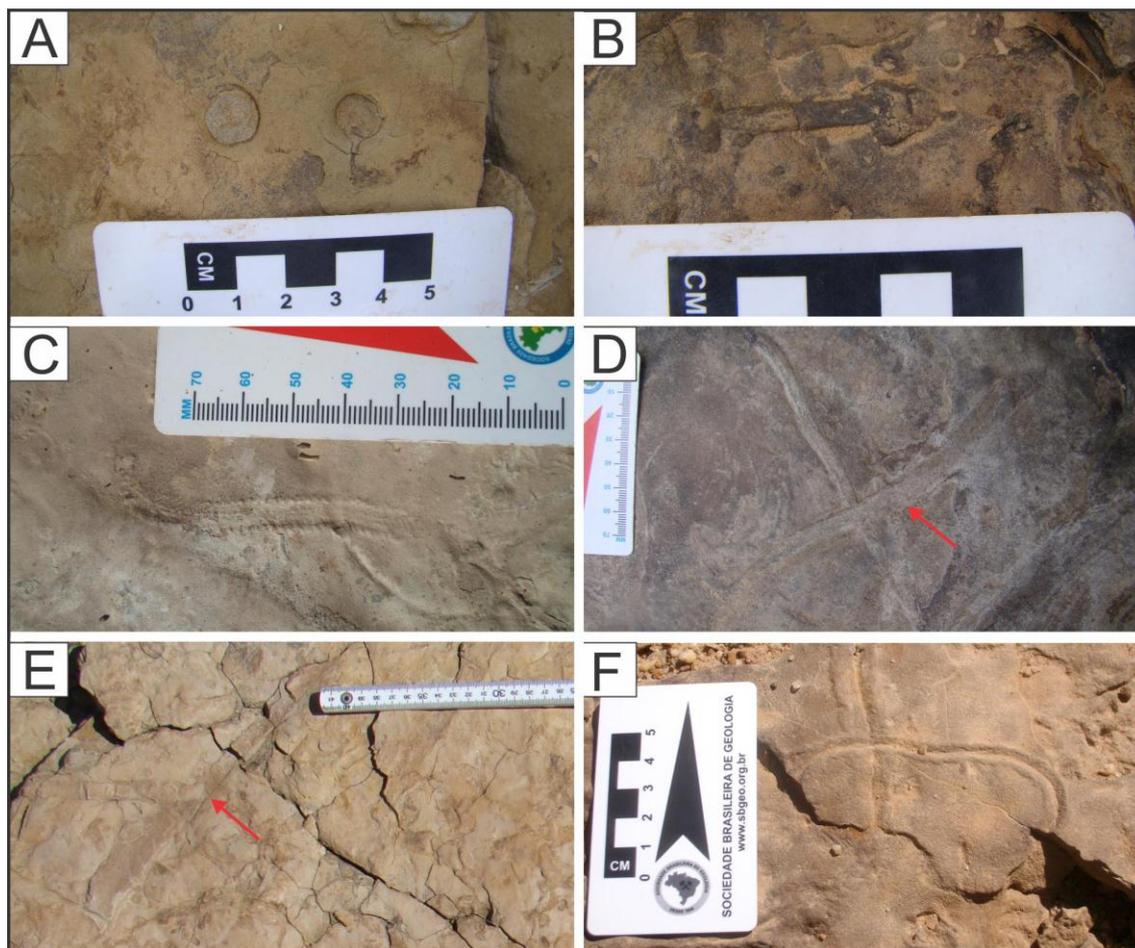


Figura 12. Icnogêneros descritos e identificados no topo de camadas das fácies HCS na Formação Pimenteiras. A) Terminações circulares pareadas, possivelmente de *Arenicolites* vistas em planta. B) *Bifungites piauienses* exibindo terminações em forma de seta. C) Pistas simples caracterizadas por sulcos isolados e alongados de comprimento aproximadamente iguale dispostos em pares paralelos e de espaçamento constante descrito como *Diplichnites* isp. D) Tubos horizontais retilíneos e suavemente curvados que se inter cruzam de *Palaeophycus*. E) Tubos horizontais curtos e retilíneos de *Planolites*, constituído de material diferente da rocha matriz. F) Traços horizontais sinuosos com inter cruzamentos que em perfil apresenta forma de “V”, sem *spreite* e orientados perpendicularmente a estratificação atribuídos a *Agrichnium*.

Helminthopsis Heer, 1877

Helminthopsis abeli Ksiazkiewicz, 1977

Figura 13 A

Espécimes: Foram identificadas sete espécimes deste traço fóssil, concentrados no nível 4.

Descrição: Traços horizontais em epirrelevo negativo, sem ramificações, irregularmente meandrantés ou sinuosos de forma que a angulosidade formada nos meandros são

variáveis dentro de um mesmo espécime, sem intercruzamentos entre si. O preenchimento é maciço e do mesmo material da rocha matriz. A porção externa dos traços é lisa e sem ornamentações. Suas medidas são variáveis, onde o diâmetro das pistas não passa de 0,2 cm e o comprimento de aproximadamente 10,0 cm. Os meandros apresentam altura (H) de 1cm e largura de 0,4 cm.

Observações: *Helminthopsis* é interpretado como um icnito de pastagem (*Pascichnia*) ou alimentação (*Fodinichnia*) gerado por anelídeos poliquetas e possivelmente priapulídeos (Chamberlain 1971, Kasiakiewicz 1977, Dam 1990, Han & Pickerill, 1995). Esse icnogênero é descrito por Wetzel & Bromley (1996) como sendo traços simples horizontais em formas meandantes sem qualquer tipo de ramificação. Estes autores identificaram três icnoespécies com base na geometria dos traços considerando principalmente a relação entre o comprimento e a altura dos meandros: *H. tenuis*, *H. abeli* e *H. hieroglyphica*. Contudo, a utilização deste tipo de padrão torna difícil a diferenciação das icnoespécies. Han & Pickerill (1995) revisaram a taxonomia de *Helminthopsis* e propuseram uma simplificação para a classificação icnotaxonômica que seria representada por três icnoespécies. Estes autores concluíram que *H. tenuis* é sinônimo de *H. abeli*, enquanto que *H. hieroglyphica* apesar de ser pobremente definida ainda é uma icnoespécie válida, assim como *H. granulata* que é caracterizada por ornamentações externas granuladas. Os espécimes descritos não apresentam ornamentações externas, portanto, não podem ser classificados como *H. granulata*. *H. hieroglyphica* apresenta segmentos retos intercalados com segmentos sinuosos, porém sem segmentos em forma de ferradura. Nos espécimes descritos são comuns que um mesmo traço apresente variações, desde meandros com o clássico formato de ferradura, até mesmo curvaturas pouco sinuosas. Estas características são semelhantes a *H. abeli* que apresenta meandros irregulares e não exibem segmentos retos (Han & Pickerill 1995). Estes traços são comuns em depósitos que registram ambientes marinhos rasos a profundos e continentais que abrangem o intervalo desde o Cambriano até o Recente (Chamberlain 1971, Hydes 1982, Uchman *et al.* 2005, Sarkar *et al.* 2009). Contudo, *Helminthopsis* é mais comum em ambientes de águas marinhas profundas. Vossler & Pemberton (1989) tem registrado *Helminthopsis* em depósitos de águas profundas dominadas por tempestades. Apesar de ser um espécime típico de ambientes profundos *Helminthopsis* foi registrado também em ambientes marinhos rasos do Ordoviciano da Espanha (Aceñolaza & Gutiérrez-Marco 1998), fluviais (Keighley & Pickerill 1997) e

lacustres do Carbonífero do Canadá (Pickerill 1992) e da Argentina (Buatois & Mángano 1993).

***Protopaleodictyon* Ksiazkiewicz, 1970**

***Protopaleodictyon spinata* (Geinitz 1867)**

Figura 13 B e F

Espécimes: Foram identificadas 51 espécimes deste traço fóssil, distribuídos nos níveis 3 e 4.

Descrição: Estruturas em forma de tubos, em epirrelevo positivo, meandantes de primeira e segunda ordem gerando formas em zig-zag. O diâmetro dos tubos alcança no máximo 0,5 cm, a extensão total das malhas é variada, porém não é encontrada preservada com tamanho superior a 10 cm. Os tubos apresentam formas elípticas, com ramificações formando ângulos de 120°. Os vértices desses ângulos formados, em alguns casos apresentam uma leve protuberância, que são relacionadas com os tubos verticais que conectam os traços, também chamados de *shafts*.

Observações: *Protopaleodictyon* corresponde a um icnito de cultivo (*Agrichnia*) e ainda não foi atribuído a nenhum organismo gerador. Segundo Uchman (1998) somente quatro icnoespécies de *Protopaleodictyon* podem ser distinguidas com base na forma dos meandros de segunda ordem e no número de apêndices, são elas: *P. incompositum*, *P. minutum*, *P. bicaudatum* e *P. spinata*. *P. incompositum*. *P. incompositum* é caracterizado por meandros de segunda ordem sinuosos e um apêndice por ondulação. *P. minutum* apresenta meandros sinuosos e finos com apêndices curtos ou pequenos tubérculos nos ápices. *P. bicaudatum* tem dois apêndices por ondulação e ocorre somente em depósitos *flysch* do Eoceno (Uchman 1998). *P. spinata* exibe meandros de segunda ordem em forma de zig-zag e um apêndice por ondulação. A principal feição usada para distinguir entre as icnoespécie *P. spinata* e *P. incompositum* é a forma de “zig-zag” (Uchman 1998). Os espécimes descritos apresentam características morfológicas de *P. spinata* que ocorre em depósitos de águas profundas, principalmente turbiditos (Pickerill *et al.* 1982, Uchman 1998). As principais ocorrências de *Protopaleodictyon* são encontradas em depósitos do tipo *flysch* (Ksiazkiewicz 1977, Uchman 1998). A única ocorrência de *Protopaleodictyon* em ambiente marinho rasos foi notificada por Gierlowski-Kordesch & Ernst (1987) em depósitos cretáceos do Leste da África.

ESTRUTURAS COM SPREITEN

Lophoctenium Richer, 1850*Lophoctenium* isp.

Figura 13 C e D

Espécimes: Foram identificados 72 espécimes deste traço fóssil, distribuídos nos níveis 3 e 4.

Descrição: Icníto em epirrelevo positivo disposto de forma horizontal a oblíqua em relação ao acamamento. Apresenta uma estrutura em forma de lobos com *spreiten* e caracterizado pela preservação de um tubo marginal protuberante. A estrutura total apresentam dimensões variadas, cobrindo áreas de até 14 cm, constantemente são registrados tubos marginais de até 3 mm

Observações: *Lophoctenium* é interpretado como um traço de alimentação (*fodinichnia*) ou pastagem (*pascichnia*) produzido por vermes anelídeos sedimentófagos (Chamberlain 1971, Ksiazkiewicz 1977). Ekdale & Bromley (2001) descrevem *Lophoctenium* associado a outros traços fósseis como *Lockeia* e *Protovirgularia* e interpretam esta estrutura como produzida por bivalves durante a alimentação, além disso foi descrita a associação com icnogênero *Protopaleodictyon* descrita através do truncamento de *Lophoctenium* por tubos de *Protopaleodictyon*. Chamberlain (1971) relaciona a maneira de formação destes traços pela construção do *spreite* semelhante à *Zoophycos*. O organismo produzia os *spreiten* da estrutura durante a busca por alimento no sedimento a partir de movimentos que empurravam periodicamente o sedimento para frente e para traz, seguido por movimentos peristálticos que empurravam sedimento para a margem da área de alimentação ou de volta para um novo retrabalhamento (Chamberlain 1971). Segundo Seilacher (2007) o procedimento básico de formação de *Lophoctenium* seria uma descontínua exploração do substrato realizada pela cabeça do organismo virada para o lado, com a fabricação do traço orientada pelo contato com elementos anteriores a cada etapa da escavação e retorno para o traço-base fazendo um *backup* em curva em vez de seguir em frente antes de iniciar uma nova série de escavações (Seilacher 2007). *Lophoctenium* tem sido registrado em sedimentos finos recentes de águas profundas entre 1000 e 3000 m (Hydes 1982) e principalmente em depósitos turbidíticos do Paleozoico (Seilacher 2007), além de depósitos *flysch* do

Cretáceo Superior (Ksiazkiewicz 1977) e do Paleoceno-Oligoceno dos Cárpatos Poloneses (Ksiazkiewicz 1977, Uchman 2009).

***Phycosiphon* von Fischer-Oster, 1858.**

***Phycosiphon incertum* (Fischer-Oster, 1858)**

Figura 13 D

Espécimes: Foram identificados três espécimes deste traço fóssil, concentrados no nível 5.

Descrição: Icnito em epirrelevo negativo, pequenas escavações planares e horizontais, dispostas como laços em forma de U, portadores de spreiten, é encontrado disposto de modo paralelo em relação à camada. Seu comprimento é bastante variável, atingindo dimensões superiores a 10,0 cm, já a espessura da escavação é relativamente pequena, variando entre 2 e 3 mm.

Observações: *Phycosiphon* é classificado como um icnito de pastagem (*Paschnia*) gerados a partir da atividade de organismos vermiformes detritívoros. A única icnoespécie reconhecida até então é *Phycosiphon incertum* que foi caracterizada por Wetzel & Bromley (1994). Essa icnoespécie é caracterizada por apresentar estrutura em forma de escavações lobadas ornamentada por spreite. *Phycosiphon* é geralmente um traço fóssil que ocorre em varias batimetrias de águas rasas a abissais (Wetzel & Bromley 1994, Netto & Rossetti 2003), porém é mais comumente registrado em depósitos de águas profundas (Pickerill *et al.* 1988, McCann & Pickerill 1988). Conforme Wetzel & Bromley (1994), assim como Ekdale & Mason (1988), *Phycosiphon* é produzido por um organismo detritívoro oportunista, comumente encontrado em sedimentos pobremente oxigenados.

***Zoophycos* Massalongo, 1855**

***Zoophycos* isp.**

Figura 13 E e F

Espécimes: Foram identificadas 7 espécimes deste traço fóssil, distribuídos nos níveis 3 e 4.

Descrição: Icnito em epirrelevo positivo de orientação horizontal a oblíqua em relação ao acamamento, apresentam uma estrutura helicoidal como resultado da sobreposição de diversos tubos em U, irradiados de um ponto central, que possuem *spreiten* entre eles. Os traços apresentam dimensões variadas, cobrindo áreas semicirculares de até 10 cm de diâmetro.

Observações: *Zoophycos* corresponde a um icnito de alimentação (*Fodinichnia*) gerado pela atividade de anelídeos poliquetos, sipunculídeos, foronídeos e equiúros (Bischoff 1968, Wetzel & Werner 1981). Trata-se de um icnogênero com diversas variações morfológicas, contudo nos espécimes estudadas não são identificadas feições como lamelas secundárias, de forma que são vistas apenas a sobreposição de formas em U sem nenhum padrão específico, sendo assim classificados como *Zoophycos* isp. A forma dos tubos em U e J são morfologias comuns em *Zoophycos* e podem sugerir em quais as condições ambientais às escavações foram produzidas. Segundo Wetzel & Werner (1981) a arquitetura em forma de U facilitaria a ventilação de tubos mais profundos por apresentar duas aberturas na superfície, enquanto que a forma em J seria mais eficiente quando os tubos fossem mais próximos da superfície e as águas de fundo oceânico fossem oxigenadas. *Zoophycos* é geralmente um traço fóssil que ocorre em *tiering* mais profundos e sua porção mais distal não é destruída por subsequente bioturbação (Wetzel & Werner 1981). A presença de tubos marginais em forma de U nos *Zoophycos* estudados sugere águas com deficiência em oxigênio próximo do fundo marinho. *Zoophycos* ocorre desde ambientes litorâneos até abissais, porém são característicos de ambientes profundos abaixo da base de atuação das ondas (Seilacher 1964). Estes traços também ocorrem em depósitos turbidíticos do Ordoviciano ao Eoceno (Pickerill *et al.* 1984, D'Alessandro *et al.* 1986) e marinhos profundos influenciados por tempestades (Pemberton & Frey 1984).

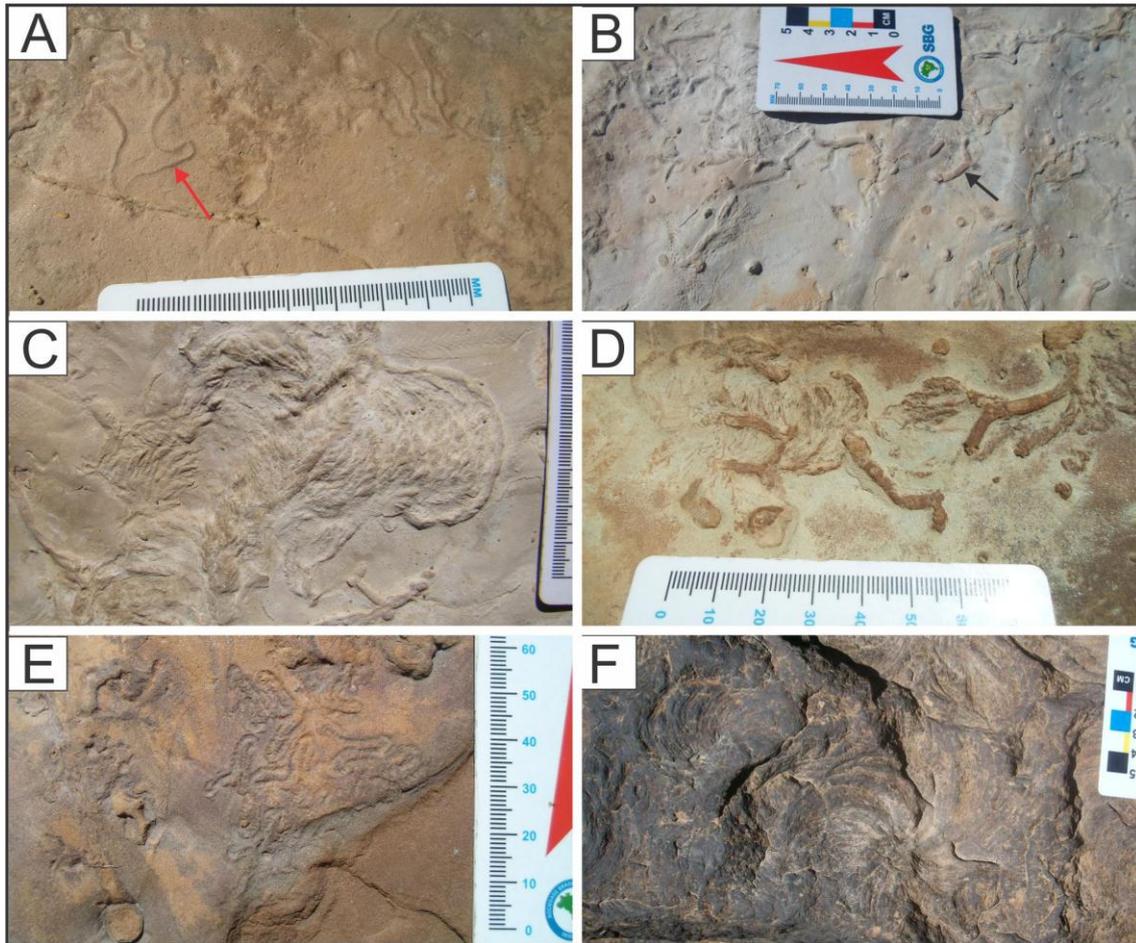


Figura 13. Icnogêneros descritos e identificados no topo de camadas das fácies HCS na Formação Pimenteiras. A) Traços horizontais exibindo formato de ferradura com meandros irregulares sem ramificações ou inter cruzamentos interpretados como *Helminthopsis abeli*. B) Estruturas em forma de tubos meandantes de primeira e segunda ordem gerando formas em zig-zag formando ângulos de 120° , dependendo do corte estas estruturas são vistas na forma de tubos verticais que partem do vértice dos ângulos formados, esses tubos apresentam mesma distancia e diâmetro descritos nos traços horizontais e se projetados em direção aos outros também formam ângulos de 120° , interpretados como *Protopaleodictyon spinata*. C) Escavações de orientação horizontal a oblíqua em relação ao acamamento, apresenta estrutura lobada com *spreiten* e tubo marginal sobresaltado, interpretados como *Lophoctenium* isp. D) Relação de truncamento entre as espécimes de *Protopaleodictyon spinata* e *Lophoctenium* isp. E) Escavações planares e horizontais, dispostas como laços em forma de U, portadores de *spreiten*, interpretadas como *Phycosiphon incertum*. F) Escavações de orientação horizontal a oblíqua em relação ao acamamento, apresentam uma estrutura helicoidal como resultado da sobreposição de diversos tubos em U, irradiados de um ponto central, que possuem *spreiten* entre eles interpretados como *Zoophycos* isp.

ESTRUTURAS BILOBADAS

Cruziana d'Orbigny, 1842*Cruziana* isp.

Figura 14 A

Espécimes: Foram identificadas 13 espécimes deste traço fóssil, distribuídos nos níveis 3, 4 e 5.

Descrição: Icnito caracterizado por sulcos ou escavações alongadas, sinuosas e bilobadas com estrias transversais preservados em hiporrelevo positivo. Lobos semicirculares, separados por um sulco central em forma de V. Seus comprimentos são muito variáveis, atingindo dimensões próximas de 20,0 cm e sua espessura varia de alguns milímetros até 2,7 cm. Suas estrias são transversais são vistas em pares partindo do sulco central em direção aos lobos.

Observação: *Cruziana* é usualmente classificado como um icnito de locomoção (*Repichnia*), contudo trabalhos de Seilacher (1985), Mángano *et al.* (2002) e Brandt (2008) reinterpretaram e relacionaram as sua gênese com mecanismos de alimentação dos organismos gerados, haja visto que o movimento dos apêndices servem não só para a sua locomoção mas também para levar sedimentos contendo alimento até a boca. Bergström (1976) assinalou que vários espécimes de *Cruziana* são profundos ou requerem muita energia para representar um comportamento puramente de locomoção. Dessa forma, a feição morfológica mais significativa de *Cruziana*, um sulco bilobado com estrias transversais ou em forma de V. Os organismos responsáveis por esses traços são normalmente os trilobitas, embora muitas vezes possa ser atribuída a ação de artrópodes trilobitomorfos, branquiópodes notostráceos, aglaspídeos e até mesmo vertebrados (Donovan 2010, Schatz *et al.* 2011). Porém, os principais produtores de *Cruziana* e *Rusophycus* no Paleozoico Inferior e Médio foram provavelmente os trilobitas ou trilobitomorfos. Existem diversas icnoespécies de *Cruziana* todas baseadas no padrão das ranhuras e sulcos centrais dos traços. Schlirf *et al.* (2001) notou que a icnoespécie *Cruziana problemática* é característica por apresentar ranhuras oblíquas partido do sulco central em forma de V, mas que desaparecem em direção as porções bilobadas. Contudo é importante citar que tais feições podem ser alteradas dependendo do estado de preservação dos mesmos, devido a essas alterações os espécimes descritos foram classificados como *Cruziana* isp.

***Rusophycus* Hall, 1852**

***Rusophycus* isp.**

Figura 14 B

Espécimes: Foram identificados três espécimes deste traço fóssil, concentrados no nível 3.

Descrição: Traço fóssil caracterizado por apresentar escavações bilobadas orientado de forma horizontal com um sulco central, semelhante à forma de um grão de café, separando cada um dos lobos e uma série de ranhuras transversais e levemente oblíquas em relação ao sulco central, preservados em hiporrelevo positivo. Seu comprimento é de aproximadamente 5 cm e largura de 3 cm, seu sulco central e ranhuras se assemelham as descritas para o icnogênero *Cruziana*.

Observações: *Rusophycus* corresponde a um icnito de repouso (*Cubichnia*), porém este icnotáxon pode ser bastante complexo e estar relacionado a uma ampla variedade de comportamentos que incluem alimentação, habitação, proteção, caça e nidificação (Osgood 1970, Jensen 1997, Mángano & Buatois 2003, 2004, Brandt 2008). Os principais produtores de *Cruziana* e *Rusophycus* em depósitos marinhos do Paleozoico Inferior e Médio foram os trilobitas ou trilobitomorfos (Osgood 1970, Crimes 1975). Contudo, vários outros artrópodes podem ter produzido estruturas semelhantes à *Cruziana* e *Rusophycus* (Donovan 2010, Schatz *et al.* 2011). Os espécimes encontrados não apresentam detalhes morfológicos bem preservados, impossibilitando uma descrição mais detalhada, sendo assim foi classificada como *Rusophycus* isp.

ESTRUTURAS CIRCULARES E ELÍPTICAS

***Bergaueria* Prantl, 1945**

***Bergaueria perata* Prantl, 1945**

Figura 14 D

Espécimes: Foram identificadas duas espécimes deste traço fóssil, concentrados no nível 6.

Descrição: Escavações em hiporrelevo positivo circular a elíptica em corte transversal e base arredondada, e com uma leve ornamentação concêntrica. Seu diâmetro varia entre 25 e 30 mm, levemente afunilado em direção ao topo, e profundidade de 20 mm. Seu

preenchimento é essencialmente maciço e constituído do mesmo material da rocha encaixante.

Observações: *Bergaueria* é descrito como um icnito de habitação (*Domichnia*) ou de repouso (*Cubichnia*), gerado pela ação de organismos suspensívoros do tipo actiniários e celenteratos ceriantharia, ambos cnidários (Alpert 1973, Fillion & Pickerill 1990, Pemberton *et al.* 1988, Bromley 1996). *Bergaueria* é muito semelhante à *Conostichus*, sendo este último mais largo (tamanho médio de 65 mm de comprimento e 45 mm de diâmetro) e mais cônico que cilíndrico ou hemisférico que *Bergaueria*, além de apresentar mais ornamentações (Chamberlain 1971). Outra importante característica de *Conostichus* é a superimposição de estruturas cônicas (*cone-in-cone*) observada internamente e que indica migração do organismo produtor em direção a superfície na tentativa de escapar do soterramento (Pfefferkorn 1971). Tal característica não é observada em *Bergaueria*, no qual a rápida sedimentação resultava na morte do organismo produtor por soterramento (Alpert 1973). As icnoespécies de *Bergaueria* são diferenciadas pelos padrões de impressões concêntricas e radiais que ocorrem na seção basal da estrutura ou seu molde subsequente, podem ainda ser distinguidos pelo modo de preservação do traço (Alpert 1973). Os exemplares descritos estão pobremente preservados, mas apresentam uma incipiente depressão no topo, assim como sutil ornamentação concentrica, semelhante aos espécimes classificados como *Bergaueria perata* por Plantl (1945). *Bergaueria* tem sido registrado principalmente ambientes marinhos de águas rasas e incluídos nas icnofácies *Skolithos* e *Cruziana* (Crimes 1970, Alpert 1973).

***Circulichnis* Vialov, 1971**

***Circulichnis montanus* Vialov, 1971**

Figura 14 E

Espécimes: Foram identificadas dois espécimes deste traço fóssil, concentrados no nível 4.

Descrição: Pistas ou escavações horizontais sem ramificações formando estrutura circular a oval de diâmetro de aproximadamente 4,0 cm, a espessura do traço é de aproximadamente 2 mm com pouca ou nenhuma variação ao longo do traço. Os traços

são preservados em epirrelevo negativo e positivo. O preenchimento é semelhante ao da rocha hospedeira, porém mais escuro que os sedimentos ao redor.

Observações: *Circulichnis* trata-se de um icnito de habitação (*Domichnia*) gerado a partir da atividade de organismos vermiformes, presentes em ambientes de águas profundas (McCann & Pickerill 1988). Este icnogênero é considerado monoespecífico, denominado de *Circulichnis montanus*. Pickerill & Keppie (1981) encontram *C. montanus* exibindo tubo semelhante a *Helminthopsis* partindo de sua elipse completa. A morfologia achatada e as dimensões similares levaram Pickerill & Keppie (1981) a sugerir que *C. montanus* e *Helminthopsis* foram produzidos pelo mesmo organismo, um verme anelídeo. Nos espécimes descritos não foram encontradas nenhuma associação com *Helminthopsis*, mas sim com *Zoophycos* e *Protopaleodictyon* que apresentam dimensões diferentes dos tubos. No Brasil a única ocorrência desse traço fóssil está nos arenitos devonianos da Formação Furnas (Fernandes 1999), sendo assim essa é a primeira ocorrência na Formação Pimenteiras e a segunda do Devoniano do Brasil. Embora *Circulichnis* seja uma forma euribatimétrica (capaz de ser encontrada em diversas profundidades), ele é mais frequentemente registrado em depósitos *flysch* de águas profundas (Pickerill & Keppie 1981, Pickerill *et al.* 1988, McCann & Pickerill 1988).

***Lockeia* James, 1879**

***Lockeia siliquaria* James, 1879**

Figura 14 F

Espécimes: Foram identificadas seis espécimes deste traço fóssil, distribuídos nos níveis 2, 4 e 6.

Descrição: Pequenos corpos horizontais, simétricos e alogados, afinando em ambas as extremidades semelhantemente a grãos de arroz, projetando-se acima da superfície. Preservado geralmente em hiporrelevo convexo (*hypichnia*). Superfície e, geral lisa, mas em alguns casos pode apresentar uma crista longitudinal. Suas dimensões são relativamente pequenas, de forma que seu eixo maior chega a atingir no máximo 2,4 cm e o seu eixo menor 0,9 cm.

Observações: *Lockeia* é classificado como um traço fóssil de repouso (*Cubichnia*) e de locomoção (*Repichnia*) (Seilacher 1953, Osgood 1970, Seilacher & Seilacher 1994, Schlirf *et al.* 2001), contudo Mángano *et al.* (2002) sugere que esses icnitos representem

uma estrutura de habitação (*Domichnia*) como resultado do mecanismo de fixação de moluscos bivalves ao substrato. Em ambientes de baixa taxa de sedimentação dificilmente esses traços se preservam (Eagar *et al.* 1985, Bromley, 1990), fator que pode explicar a baixa ocorrência nos depósitos estudados, assim como a baixa taxa de sedimentação não permite a formação de *Lockeia* muito protuberantes, como ocorrem em outros ambientes. Os espécimes são classificados como *L. siliquaria* que é conhecida por traços geral simétricos, alongados e afinando em ambas as extremidades, além da presença de uma crista mediana central, feições semelhantes às descritas nos espécimes encontradas. *L. siliquaria* é a icnoespécie de *Lockeia* mais comum registrada na literatura e é interpretada como traço de repouso de bivalves infaunais (Archer & Maples 1984, Seilacher & Seilacher 1994, Schlirf *et al.* 2001, Goldring *et al.* 2005, Gaillard & Racheboeuf 2006). Escavações de bivalves são comumente registradas em ambientes marinhos costeiros e fluviais (Archer & Maples 1984, Mangano *et al.* 1998, Radley *et al.* 1998, de Gibert & Ekdale 1999, Schlirf *et al.* 2001, Hasiotis 2004, Uchman *et al.* 2004, Uchman & Gazdzicki 2006).

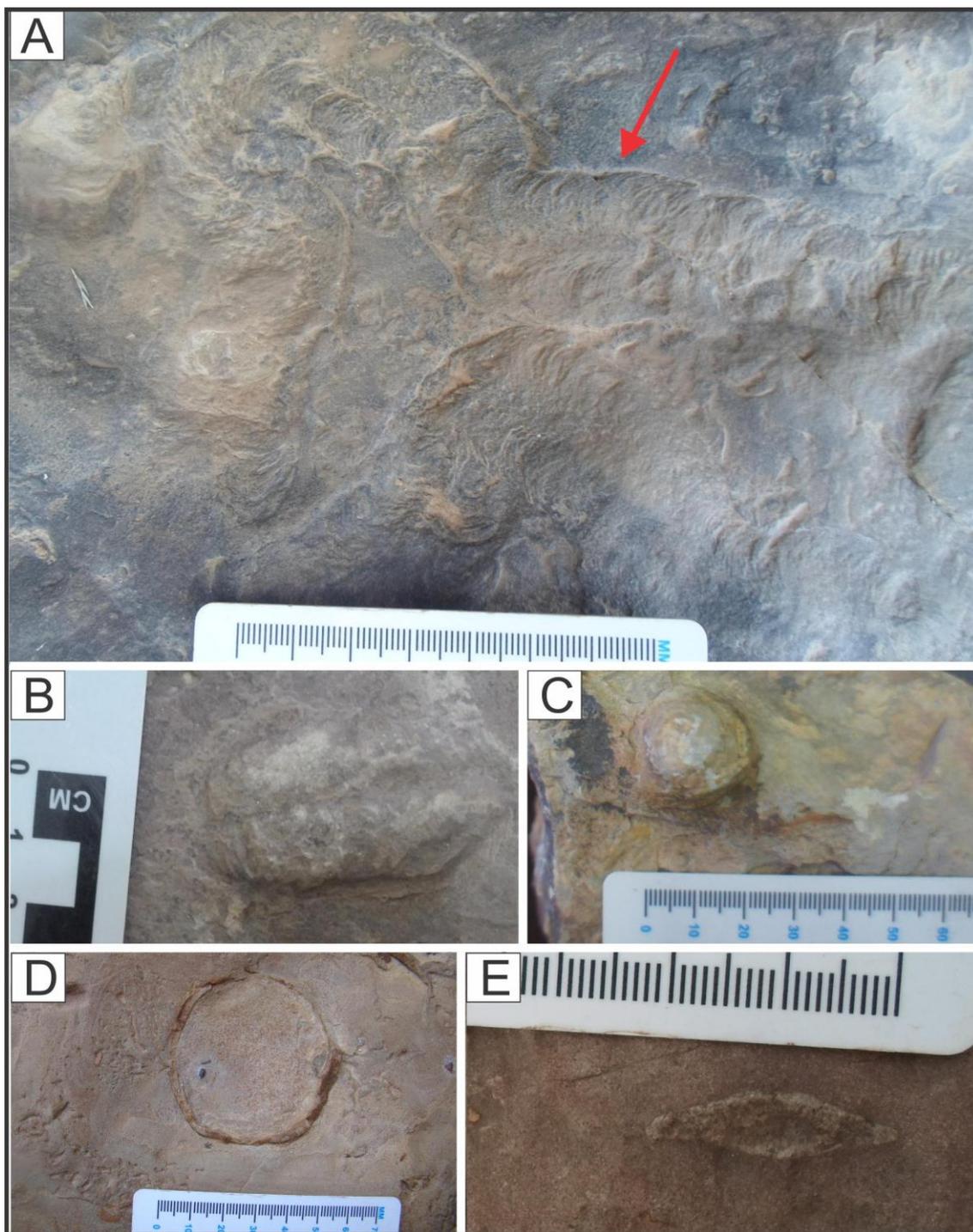


Figura 14. Icnogêneros descritos e identificados no topo de camadas das fácies HCS na formação Pimenteiras. A) Sulcos ou escavações alongadas, sinuosas e bilobadas com estrias transversais com lobos semicirculares, separados por um sulco central em forma de V classificados como *Cruziana problemática*. B) Escavações bilobadas orientadas de forma horizontal com um sulco central separando os lobos e uma série de ranhuras interpretados como *Rusophycus* isp. C) Escavação circular a elíptica em corte transversal com base arredondada e leve ornamentação concêntrica, interpretados como *Bergaueria prantl*. D) Traço horizontal sem ramificações formando estrutura circular a oval interpretado como *Circulichnis montanus*. E) Traço horizontal, simétrico e alongado, afinando em ambas as extremidades semelhantemente a um grão de arroz, interpretado como *Lockeia siliquaria*.

5.6.2 Icnofácies

A classificação de icnofácies é feita a partir do conjunto de atividades desenvolvidas pelos organismos em resposta aos parâmetros ecológicos atuantes no meio responsável pela distribuição da fauna bentônica dentro ou sobre o substrato (Netto 2001). As estruturas de bioturbação ocorrem comumente em associações denominadas icnocenose. Esta representa uma associação natural de icnofósseis que refletem as atividades bentônicas dos membros de uma biocenose (Fernandes *et al.* 2002). A icnofácies reúne icnofósseis e icnofábricas produzidas em um mesmo contexto, de acordo com os fatores que controlam a distribuição de seus produtores (Netto 2001, Carvalho & Fernandes 2004). Várias condições físico-químicas como salinidade, taxa de oxigenação, taxa de sedimentação, energia, consistência do substrato, temperatura e batimetria podem ser sugeridas com base na análise de icnofácies, logo, a icnofácies é uma excelente ferramenta para reconstruções paleoambientais (Frey *et al.* 1990, MacEarchern *et al.* 2007, Gingras *et al.* 2011).

Com base nos icnofósseis identificados foi possível identificar presença de icnogêneros característicos de duas icnofácies, sendo elas, icnofácies *Skolithos* e *Cruziana* que de acordo com Frey e Pemberton (1984) correspondem, respectivamente, a ambientes marinhos rasos de alta energia dominados por ondas e ambientes marinhos rasos a profundos, posicionados na transição entre *shoreface/offshore* corroborando com o ambiente definido na análise de fácies.

5.6.2.1 Icnofácies *Cruziana*

Os níveis bioturbados 3 e 4 apresentam uma interposição de elementos da icnofácies *Cruziana*, contudo devido a variação do comportamento e características dos icnogêneros associados a essa icnofácies ela foi subdividida em duas suítes, sendo elas denominadas de *Cruziana* proximal e *Cruziana* distal, com predomínio de icnogêneros da suíte distal. Ambas as suítes apresentam um domínio de traços fósseis horizontais, contudo com icnodiversidade e abundâncias diferentes.

A icnofácies *Cruziana* é caracterizada por apresentar varias categorias ecológicas e uma ampla icnodiversidade, localmente podem ocorrer traços verticais e

inclinados (Frey & Seilacher 1980, Frey & Pemberton 1984, 1985, Gingras *et al.* 2011). Nessa icnofácies são comuns sistemas de galerias, rastros e pistas em substratos inconsolidados (*softground*) que exibem uma alta densidade de ocupação e aproveitamento do fundo marinho, com diminuição progressiva na quantidade de oxigênio presente na água intersticial (Seilacher 1967, Ekdale *et al.* 1984). A icnofácies *Cruziana* é classicamente relacionada a ambientes localizados abaixo da base de ondas de tempo bom, contudo no intervalo de ação das ondas de tempestade, posicionados no *Shoreface* inferior. Mangano & Buatois (2004) incluem esta icnofácies na zona costeira dominada por maré como sendo um dos possíveis ambientes.

Na sucessão estudada a suíte proximal é caracterizada por maior diversidade de traços e por serem relacionados a ambientes de maior energia, os icnogêneros identificados são *Agrichnium*, *Arenicolites*, *Bergaueria*, *Bifungites*, *Circulichnis*, *Cruziana*, *Diphichnites*, *Lockeia*, *Palaeophycus*, *Planolites* e *Rusophycus*. Em sua grande maioria os traços dessa suíte consistem em construções de habitação (*Domichnia*), repouso (*Cubichnia*) e locomoção (*Repchnia*).

Por outro lado a suíte distal é caracterizada por menor diversidade de icnogêneros em comparação a suíte proximal, sendo aqui identificados os icnogêneros *Helminthopsis*, *Lophoctenium*, *Phycosiphon*, *Protopaleodictyon* e *Zoophycos*. Em sua grande maioria os traços dessa suíte correspondem a construções de pastagem (*Pascichnia*) e alimentação (*Fodinichnia*) (Figura 15).

Os icnogêneros mais abundantes na icnofácies *Cruziana* são *Zoophycos*, *Protopaleodictyon*, *Planolites*, *Palaeophycus*, *Diphichnites*, *Helminthopsis* e *Cruziana*. *Arenicolites* e *Bifungites* ocorrem em menor abundância e os outros icnogêneros são muito raros. Esta associação sugere uma interação entre comportamentos de alimentação/pastagem e períodos de maior deslocamento de organismos bentônicos. A distribuição destes traços indica um ambiente de águas relativamente calmas, talvez abaixo da zona de ação efetiva de ondas normais como também sugere as intercalações entre folhelhos e arenitos lenticulares na qual os traços ocorrem. A presença de marcas onduladas simétricas que estão associadas à icnofácies *Cruziana* são provavelmente produtos finais de eventos de tempestades (Duke *et al.* 1991, Morsilli & Pomar 2012).

5.6.2.1 Icnofácies *Skolithos*

A icnofácies *Skolithos* é típica de ambientes de alta energia em ambientes marinhos rasos dominados por ondas (MacEachern *et al.* 2010). A icnofácies é caracterizada pelo domínio de traços verticais ou inclinados, com raros traços horizontais, além de baixa icnodiversidade e alta abundância. Na sucessão estudada ela ocorre nos níveis 1, 2, 5 e 6 sempre associados a espessas camadas de arenitos com HCS. Os principais traços fósseis são *Arenicolites* e *Bifungites*, subordinadamente ocorrem *Bergaueria*, *Lockeia*, *Agrichnium* e *Planolites*. Esta assembleia de traços fósseis indica o domínio de construções de habitação (*Domichnia*) e repouso (*Cubichnia*) (Figura 15). A presença de traços verticais associados a depósitos de tempestades sugere que os organismos que produziram estas bioturbações habitaram momentaneamente o substrato.

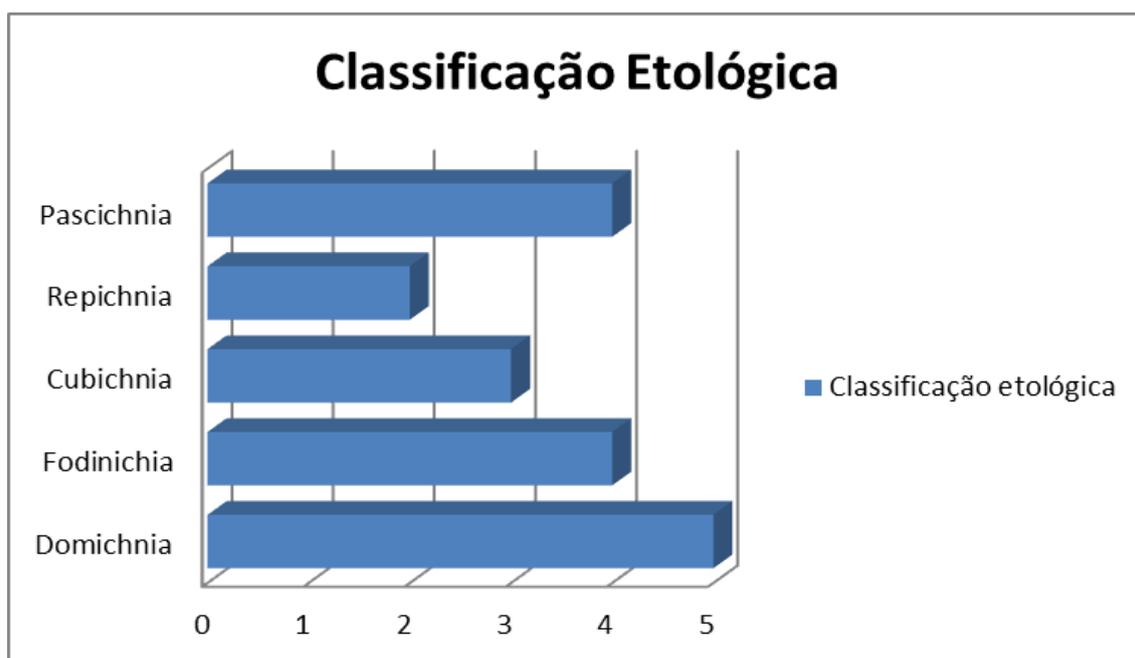


Figura 15. Gráfico referente ao comportamento etológico dominante nos depósitos estudados. Os traços que indicam Pascichnia, Fodinichnia e Repichnia são mais comuns na icnofácies *Cruziana-Zoophycos* e os com predomínio de Domichnia e Cubichnia estão na icnofácies *Cruziana-Zoophycos* e os com predomínio de Domichnia e Cubichnia estão na icnofácies *Skolithos*.

5.7 DISCUSSÕES E MODELO DEPOSICIONAL

De acordo com os dados de icnofácies e fácies deposicionais foi possível ter idéia dos padrões ambientais atuantes no ambiente deposicional (Figura 17). Buatois & Mángano (2011) relacionam ambientes de baixa energia a traços horizontais, e elevada icnodiversidade, padrões descritos nos níveis bioturbação 3 e 4 que caracterizam a icnofácies *Cruziana*. A predominância de folhelhos com delgadas intercalações de arenitos com HCS indica ambientes de águas calmas e relativamente profundas esporadicamente influenciadas por tempestades. Por outro lado ambientes de alta energia são normalmente caracterizados por ocorrências de tubos verticais e baixa icnodiversidade e relativa abundância, padrões semelhantes aos descritos nos níveis de bioturbação 1, 2, 5 e 6 que apresentam icnofácies *Skolithos*. Estes traços fósseis ocorrem associados à tempestitos o que explicaria a alta energia envolvida na deposição dos sedimentos e predomínio de traços verticais pouco diversificados.

Conforme Knaust & Bromley (2012) uma série de parâmetros ambientais podem ser analogamente definidos baseado no estudo de traços fósseis. Com base nisso a variação de moderada a alta diversidade observada em traços fósseis é indicativa de salinidade normal em ambiente marinho com baixa mobilidade do substrato, classificado como *softground*, ambiente oxigenado, ou periodicamente suboxigenado e baixa turbidez. Buatois & Mángano (2014) propõem algumas características que foram usadas para determinar o ambiente, sendo elas: alta diversidade, icnotaxas característicos de ambientes marinhos, presença de estruturas simples e complexas, predominância de icnofósseis horizontais, assembleia multiespecífica e alta densidade.

A ocorrência de *Zoophycos*, *Protopaleodictyon* e *Phycosiphon* normalmente sugere condições de oxigenação baixa no substrato ou próximo dele (Pemberton & Frey 1984, Pickerill *et al.* 1988). Olivero (2007) descreve ambientes com baixo nível de oxigenação como sendo favorável para a ocorrência de *Zoophycos*, além do fato desse traço apresentar uma estrutura penetrativa alcançando regiões abaixo da superfície ainda mais anóxica. Essas condições são inclusive favoráveis à preservação de matéria orgânica, que podem possivelmente servir de alimento para os organismos colonizadores (Wetzel & Werner 1981). Nos espécimes descritos nos níveis 3 e 4, os *Zoophycos* são descritos de forma mais planar e sem a ocorrência de múltiplos lobos o

que é relacionado a ambientes mais estáveis, com substrato enriquecido de nutrientes (Olivero & Gaillard 1996). Outras feições, como os tubos marginais em forma de U nos *Zoophycos* estudados sugerem águas com deficiência em oxigênio próximo do fundo marinho (Wetzel & Werner 1981).

Phycosiphon sugere atividade de organismos oportunistas, comumente encontrado em sedimentos pobremente oxigenados (Wetzel & Bromley 1994, Ekdale & Mason 1988). Por outro lado, mesmo os níveis onde são registrados traços de *Zoophycos* e *Phycosiphon* apresentam elevada icnodiversidade e densidade dos traços, fatores que indicam um ambiente aeróbico (Ekdale & Mason 1988, Savrda & Bottjer 1986, 1989a, 1989b). Isso pode ser explicado pela migração de algumas formas de águas rasas em direção a ocupação de águas mais profundas durante o Paleozoico Inferior (Seilacher 1986).

A relação entre os níveis de oxigenação e o comportamento etológico dos organismos é abordado nos modelos de Buatois & Mangano (1992) e Levin *et al.* (2003) nos quais em ambientes pobremente oxigenados ocorre a predominância de traços classificados como *Fodinichnia* e *Pascichnia*, enquanto que em ambientes ricos em oxigênio ocorre a predominância do grupo de organismos classificados como *Domichnia* (Figura 15).

Wetzel & Werner (1981) discutem a taxa de sedimentação e afirmam que ambientes de baixa ou nula sedimentação são mais propícios para o desenvolvimento dos organismos geradores do *Zoophycos*. Outros traços como *Protopaleodictyon*, *Diplichnites*, *Cruziana*, *Rusophycus*, *Agrichinium* e *Helminthopsis* também sugerem baixas taxas de sedimentação. Tais condições confirmam os dados descritos na Formação Pimenteiras, na qual os níveis bioturbados encontram-se sempre em superfícies posicionadas entre arenitos com estratificação cruzada *hummocky* e folhelhos, sendo os arenitos gerados em períodos entre os eventos de tempestades. A presença de abundantes traços de *Bifungites* e possivelmente *Arenicolites* indica taxas de sedimentação mais elevadas que estão diretamente associadas aos eventos de tempestades.

A distribuição dos níveis bioturbados intercalados com estratos sem bioturbação é semelhante ao padrão heterogêneo e esporádico descrito por Gingras *et al.* (2011). Este padrão está diretamente relacionado às variações das taxas de deposição resultantes dos eventos de tempestades, de forma que durante tais eventos devido à alta taxa de

sedimentação não foi possível a colonização do substrato e a preservação de traços fósseis, tornando assim esses estratos isentos de registros icnofossilíferos. Já os níveis intensamente bioturbados correspondem aos períodos de pausa durante as tempestades, nos quais a energia do ambiente é reduzida bruscamente assim como as taxas de sedimentação, possibilitando assim a proliferação de determinados traços fósseis (Gingras *et al.* 2011).

Hydes (1982) analisa traços fósseis recentes e descreve a profundidade na qual são descritos. Com base nos seus dados, em comparação com a icnocenose descrita na Formação Pimenteiras, os icnogêneros *Helminthopsis*, *Lophoctenium*, *Planolites* e *Zoophycos* dão idéia da profundidade na qual seus depósitos foram formados. As profundidades referentes aos diferentes icnogêneros são bastante variadas, indo de aproximadamente 1000 até 4000 m, contudo nem todos são considerados bons índices de profundidade, por apresentarem uma ampla distribuição batimétrica, como é o caso do *Planolites* e *Helminthopsis*, contudo outros, como o *Zoophycos*, já são mais restritos a ambientes de maior profundidade, comumente entre 2500 a 3000 m. Wetzel & Werner (1981) também propôs profundidades superiores a 2000 m para ocorrências de *Zoophycos*. O clássico trabalho de Seilacher (1967) também aborda a relação entre a assembleia icnofossilífera e a profundidade do ambiente na qual tais traços foram gerados. Os tubos verticais como *Bifungites* e possivelmente *Arenicolites* são relacionados a ambientes de águas mais rasas (Cole & McDowell 2003, McIlroy & Garton 2004), os traços horizontais como *Palaeophycus* e *Planolites* são referentes a zonas intermediárias, enquanto que traços de pastagem (*Agrichnium*, *Helminthopsis*, *Protopaleodictyon*, *Lophoctenium* e *Phycosiphon*) são mais comuns em ambientes profundos. Essas variações de profundidade são controladas pela energia do ambiente e principalmente pela disponibilidade de alimento. Portanto, organismos suspensívoros tendem a se instalar em ambientes de alta energia, devido às partículas em suspensão, enquanto que em ambientes profundos, de baixa energia, as partículas tendem a decantar juntamente com a matéria orgânica, favorecendo organismos que pastam.

Alguns trabalhos (Young 2006) tem relacionado a ocorrência de tempestitos a ambientes influenciados por maré, contudo além dos fatores citados anteriormente as características litológicas das rochas da Formação Pimenteiras nas localidades estudadas não apresentam nenhum indício disso, pois estruturas como ritmitos, acamamentos *wavy*, *flaser* e *linsen*, além de indicativos de exposição subaérea como gretas de

contração e marcas de raízes são ausentes. O que foi observado são espessas camadas de arenitos intercalados a folhelhos, comumente descritos em ambientes marinhos profundos ou lagunas.

As camadas mais espessas de arenitos com HCS, laminação ondulada e padrão *pinch-and-swell* representam o produto de deposição sob condições de tempestades de intensidade variável que podem ocorrer em *shoreface* ou próximo da transição para *offshore* (Richards & Brown 1987). Arenitos bioturbados representam períodos de retrabalhamento por ondas normais (Richards & Brown 1987). Embora o grau de bioturbação possa ser algumas vezes menor do que em depósitos de *offshore*, algumas camadas de arenitos com estratificações cruzadas *hummocky* podem apresentar topos intensamente bioturbados (Mángano *et al.* 2005), semelhante ao que ocorre nos tempestitos estudados. Segundo Buatois & Mángano (2011) o topo dessas camadas de tempestitos representariam superfícies palimpsestas que registrariam icnoassembleia relacionada a tempestades sobreposta por uma subsequente icnoassembleia de ambientes de ondas normais. Estes autores afirmam ainda que em ambientes na qual as tempestades apresentam frequência ou intensidade variando de moderada a baixa os intervalos de folhelhos podem ser completamente bioturbados. A quase total ausência de bioturbação nos folhelhos intercalados com os arenitos tempestíticos poderiam representar tempestades mais frequentes e intensas ou ainda que as bioturbações do folhelho não fossem preservadas (Buatois & Mángano 2011). Depósitos de *offshore* transicional influenciados por tempestades seriam habitados por uma biota residente representada por uma ampla variedade de icnotaxons com características da icnofácies *Cruziana* e *Zoophycos*, e por colonizadores com alguns poucos icnotaxons com características da icnofácies *Skolithos* (Buatois & Mángano 2011). A presença predominante de espécimes das icnofácies *Cruziana* (*Cruziana*, *Diplichnites*, *Bergaueria*, *Lockeia*, *Palaeophycus*, *Planolites*, *Rusophycus*, *Agrichnium* e *Circulichnus*) e *Zoophycos* (*Zoophycos*, *Lophoctenium*, *Phycosiphon*, *Helminthopsis*, *Protopaleodictyon*) com poucas ocorrências de espécimes da icnofácies *Skolithos* (*Arenicolites* e *Bifungites*) nos depósitos estudados sugerem uma relação entre uma ocupação do substrato permanente pontuada pela exploração episódica de colonizadores.

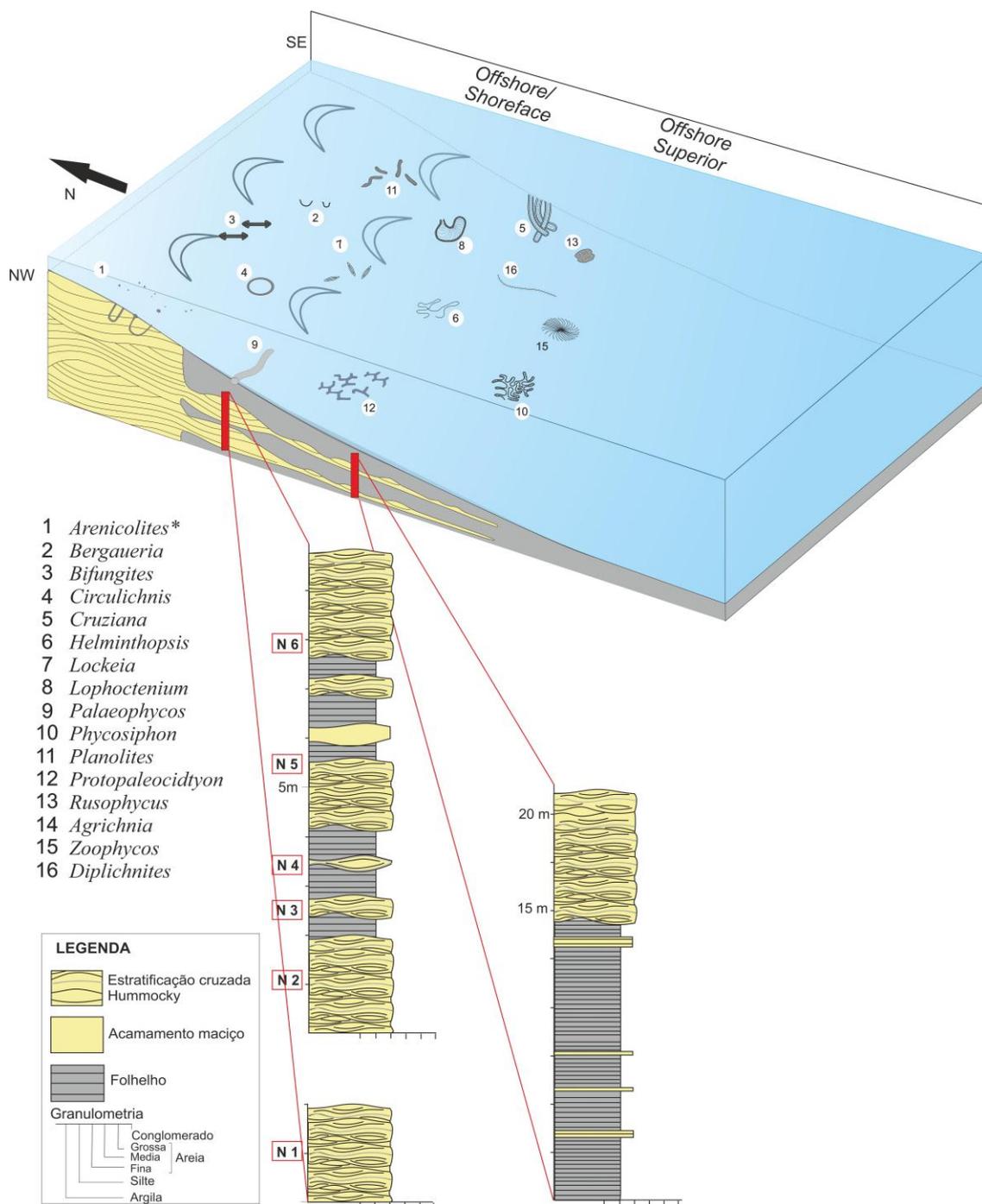


Figura 166. Modelo deposicional Formação Pimenteiras e a provável localização dos perfis estudados na região de Valença do Piauí e Pimenteiras (PI).

CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES

Depósitos Devonianos da Formação Pimenteiras foram estudados e caracterizados, a fim de fazer uma reconstituição paleoambiental. Na análise fácies e estratigráfica, realizada em exposições nas regiões de Valença do Piauí e Pimenteiras, foram definidas 4 fácies sedimentares agrupadas em duas associações de fácies (AF), sendo elas *offshore/shoreface* (AF1) e *offshore* (AF2), que correspondem a um sistema marinho raso a profundo intensamente influenciado pela ação de ondas de tempestade no Devoniano da Bacia do Parnaíba.

O estudo sistemático dos traços fósseis da Formação Pimenteiras foi baseado em seus aspectos descritivos, preservacionais, estratinômicos e etológicos, que permitiram a classificação de 15 icnogêneros distintos, sendo eles *Agrichnium*, *Bergaueria*, *Bifungites*, *Diplichnites*, *Circulichnis*, *Cruziana*, *Helminthopsis*, *Lockeia*, *Lophoctenium*, *Palaeophycus*, *Phycosiphon*, *Planolites*, *Protopaleocidtyon*, *Rusophycus* e *Zoophycos*. Dentre eles os icnogêneros *Agrichnium* e *Circulichnis* representam a primeira ocorrência na Formação Pimenteiras.

Foram identificados e caracterizados seis níveis de bioturbação distintos descritos em níveis de arenitos nos afloramentos estudados. Todos os níveis apresentam $ii = 3$ com índice de icnofábrica variando entre 15 e 25%, valores médios que sugerem níveis de oxigenação típicos de ambientes aeróbicos, ou um ambiente transicional em que a interface água-sedimento detinha razoáveis níveis de oxigenação.

De acordo com a associação de icnofósseis identificados foram definidas as icnofácies *Skolithos* e *Cruziana*. Estas icnofácies são características de ambientes marinhos que correspondem, respectivamente, a ambientes marinhos rasos de alta energia dominados por ondas, ambientes litorâneos e marinho raso a profundo, posicionados na transição entre *offshore/shoreface*. Contudo ocorre uma predominância de icnogêneros referentes às icnofácies *Cruziana* e uma subordinada ocorrência de icnogêneros da icnofácies *Skolithos* nos depósitos estudados sugerindo uma relação entre uma ocupação permanente do substrato pontuada pela exploração episódica de colonizadores.

REFERENCIAS

- Aceñolaza, G.F. & Gutiérrez-Marco, J.C. 1998. *Helminthopsis abeli* Ksiazkiewicz, un icnofósil del Ordovícico Superior de la Zona Centroibérica española. *Geogaceta*, 24: 7-10.
- Agostinho, S., M.S.S. Viana, A.C.S. Fernandes. 2004. Duas novas icnoespécies de *Bifungites* Desio, 1940 na Formação Pimenteira, Devoniano da Bacia do Parnaíba, Brasil. *Arquivos do Museu Nacional*, 62: 519–530.
- Agostinho, S., Batista, Z.B., Barros, C.L., Gomes, C.R., Santos, C.A. 2012. Icnofósseis devonianos da Formação Pimenteira, Estado do Piauí, e suas aplicações paleoambientais e paleogeográficas. *Estudos Geológicos*, 22(1):117-130.
- Almeida F.F.M. & Carneiro C.D.R. 2004. Inundações marinhas fanerozóicas no Brasil e recursos minerais associados. In: Mantesso-Neto V., Bartorelli A., Carneiro C.D.R., Brito-Neves B.B. (Eds.). *Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flavio Marques de Almeida*. Editora Beca, São Paulo, p. 43-58.
- Alpert, S.P. 1973. *Bergaueria* Prantl (Cambrian and Ordovician), a probable actinian trace fóssil. *Journal of Paleontology*, 47: 919-924.
- Archer, A.W. & C.G. Maples. 1984. Trace-fossil distribution across a marine-to-nonmarine gradient in the Pennsylvanian of southwestern Indiana. *Journal of Paleontology*, 58(2): 448–466.
- Annot, M.J., Good, T.R., Lewis, J.J.M. 1997. Photogeological and image-analysis techniques for collection of large-scale outcrop data. *Journal Sedimentary Research*, 67: 984-987.
- Assis, J.F.P. & Fernandes, A.C.S., 1980. A ocorrência de *Bifungites* Desio, 1940 na Formação Pimenteiras, Devoniano da Bacia do Maranhão. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, Rio de Janeiro, 52(2):335-338.
- Barbosa R.C.M. 2014. *Paleoambiente e proveniência da Formação Cabeças da Bacia do Parnaíba: evidências da glaciação Famenniana e implicações na potencialidade do reservatório*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Pará, 124p.
- Barrett S. & Isaacson P. 1988. Devonian Paleogeography of South America. In: McMillan N.J., Embry A.F., Glass D.J. (Eds.). *Devonian of the World*. Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir, 3, (14): 655- 667.
- Bergström J. 1976. Lower Palaeozoic trace fossils from eastern Newfoundland. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 13: 1613-1633.
- Bertling M., Braddy S.J., Bromley R.G., Demathieu G.R., Genise J., Mikulas R., Nielsen J.K., Nielsen K.S.S., Rindsberg A.K., Schirf M., Uchman A. 2006. *Names for trace fossils: a uniform approach*. *Lethaia*, 39: 265-286.

- Bischoff B. 1968. *Zoophycos*, a polychaeta annelid. *Journal of Paleontology*, 42: 1433-1439.
- Boeira, J.M. & Netto, R.G. 1987. Novas considerações sobre os icnofósseis da Formação Rio Bonito, Cachoeira do Sul, RS. *Acta Geológica Leopoldensia*, 25: 105-140.
- Boucot A.J. 1985. Late Silurian-early Devonian biogeography, provincialism, evolution and extinction. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*, 309: 323-339.
- Boucot A.J. 2005. Ecostratigraphy's basis, using Silurian and Devonian examples, with consideration of the biogeographic complication. In: Koutsoukos E.A.M. (ed.), *Applied Stratigraphy*. Springer, Dordrecht, v. 23, p. 55-71.
- Bradshaw, M.A. 1981. Paleoenvironmental interpretations and systematics of Devonian trace fossils from the Taylor Group (lower Beacon Supergroup), Antarctica. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 24: 615-652.
- Brandt D.S. 2008. Multiple *Rusophycus* (Arthropod ichnofossil) assemblages and their significance. *Ichnos*, 15: 28-43.
- Breuer P. & Grahn Y. 2011. Middle Devonian spore stratigraphy in the eastern outcrop belt of the Parnaíba Basin, northeastern Brazil. *Revista Española de Micropaleontología*, 43: 19-38.
- Bromley, R.G. 1990. Trace fossils. Biology and taphonomy. *Unwin Hyman*, London, 280 p.
- Bromley R.G. 1996. Trace fossils: Biology, Taphonomy and Applications. *Chapman and Hall*, London, 361p.
- Bromley R.G. & Ekdale A.A. 1986. Composite ichnofabrics and tiering of burrows. *Geological Magazine*, 123: 59-65.
- Buatois, L.A. & Mángano, M.G. 1993. *Trace fossils from a Carboniferous turbiditic lake*: implications for the recognition of additional nonmarine ichnofacies. *Ichnos*, 2: 237-258.
- Buatois, L.A. & Mángano, M.G. 2011. *Ichnology: organism-substrate interactions in space and time*. Cambridge University Press, 358p.
- Caputo, M.V. 1984. *Stratigraphy, Tectonics, Paleoclimatology and Paleogeography of Northern Basins of Brazil*. University of California, Santa Barbara, USA. Tese de Doutorado.
- Caputo, M.V. 1985. Late Devonian glaciation in South America. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 51, 291-317.

- Caputo, M.V. & Crowell, J.C., 1985. Migration of glacial centers across Gondwana during Paleozoic Era. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 96, 1020–1036.
- Caputo, M.V. & Lima, E.C. 1984. Estratigrafia, idade e correlação do Grupo Serra Grande. *In: SBG, Sociedade Brasileira de Geologia, 33, Anais*, Rio de Janeiro, Brasil, v. 2, p. 740-753.
- Carvalho I.S. & Fernandes A.C.S. 2004. Icnofósseis. *In: Carvalho I.S. (ed.), Paleontologia*. Editora Interciência, Rio de Janeiro. 2. ed. v. 1, p. 143-169.
- Carvalho M.G.P., Edgecombe G., Lieberman B.S. 1997. Devonian calmonid trilobites from the Parnaíba Basin, Piauí State, Brazil. *American Museum Novitates*, 3192: 11p.
- Carvalho M.S.S., Santos M.E.C.M., Fonseca V.M.M. 1996. Eventos biológicos no devoniano da bacia do Parnaíba. *In: SBP, Simpósio Sul-Americano do Siluro-Devoniano*, Ponta Grossa, *Anais*, p. 375-390.
- Chamberlain, C.K., 1971. Morphology and ethology of trace fossils from the Quachita Mountains, southeast Oklahoma. *Journal of Paleontology* 45: 2–246.
- Cheel R.J. & Leckie D.A. 1993. Hummocky cross-stratification. *Sedimentology Review*, 1: 103-122.
- Cluff R.M. 1980. Paleoenvironment of the New Albany Shale Group (Devonian-Mississippian) of Illinois. *Journal of Sedimentary Petrology*, 50: 767-780.
- Cole S.L.III. & McDowell R.R. 2003. Implications of Bifungites from the Upper Devonian of West Virginia, USA. *In: 38th Annual Meeting, Halifax, Nova Escócia. Undergraduate Research in the Geological Sciences II (Posters)*.
- Crimes T.P. 1970. The significance of trace fossils in sedimentology, stratigraphy, and palaeoecology with examples from Lower Paleozoic strata. *In: Crimes T.P. & Harper J.C. (eds.). Trace Fossils, Geological Journal Special Issue 3*, p. 101-126.
- Crimes T.P. 1975. The production and preservation of trilobite resting and furrowing traces. *Lethaia*, 8: 35-48.
- Cunha F.M.B. 1986. *Evolução paleozóica da Bacia do Parnaíba e seu arcabouço tectônico*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Cunha P.R.C., Melo J.H.G., Silva O.B. 2007. Bacia do Amazonas. *Boletim de Geociências da PETROBRÁS*, 15: 227-251.
- Daemon R.F. 1976. Correlação bioestratigráfica entre os sedimentos do Siluriano, Devoniano, Carbonífero inferior das bacias do Amazonas, Parnaíba e Paraná. *In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 29, Ouro Preto, 29, Anais*, p. 189-194.

- D'Alessandro A., Ekdale A.A., Sonnino M. 1986. Sedimentologic significance of turbidite ichnofacies in the Saraceno Formation (Eocene), Southern Italy. *Journal of Sedimentary Petrology*, 56: 294-306.
- Dam, G. 1990. Taxonomy of trace fossils from the shallow marine Lower Jurassic Neill Klintor Formation, East Greenland. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, 38: 119-144.
- Della Fávera J.C. 1990. *Tempestitos na Bacia do Parnaíba*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 150p.
- Della Fávera J.C. 2001. *Fundamentos de estratigrafia moderna*. Rio de Janeiro, UFRJ. 246p.
- De Raaf J.F.M, Boersma J.R. Van Gelder, A. 1977. Wave generated structures and sequences from a shallow marine succession. Lower Carboniferous County Cork, Ireland. *Sedimentology*, 24: 451-483.
- Donovan S.K. 2010. *Cruziana* and *Rusophycus*: Trace fossils produced by trilobites in some cases? *Lethaia*, 43: 283-284.
- Duke, W.L., Arnott, R.W.C., and Cheel, R.J., 1991, Shelf sandstones and hummocky crossstratification: New insight on a stormy debate: *Geology*, 19: 625–628.
- Dumas S. & Arnott R.W.C. 2006. Origin of hummocky and swaley cross-stratification the controlling influence of unidirectional current strength and aggradation rate. *Geology*, 34(12): 1073-1076.
- Eagar, R.M.C., Baines, J.G., Collinson, J.D., Hardy, P.G., Okolo, S.A., Pollard, J.E. 1985. Trace fossil assemblages and their occurrence in Silesian (Mid-Carboniferous) deltaic sediments of the Central Pennine Basin – England. In: Curran H.A. (ed.) *Biogenic structures: their use in interpreting depositional environments*, SEPM. p. 99-150. (Special Publication 35).
- Ekdale, A.A. & Bromley, R.G. 2001. A day and a night in the life of a cleft-foot clam: *Protovirgularia-Lockeia-Lophoctenium*. *Lethaia*, 34:119–124.
- Ekdale, A.A. & Mason T.R. 1988. Characteristic trace fossil associations in oxygen-poor sedimentary environments. *Geology*, 16: 720-723.
- Ekdale, A.A., Bromley, R.G., Pemberton, S.G. 1984. *Ichnology: the use of trace Fossils in sedimentology and stratigraphy*. SEPM, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Tulsa, Oklahoma, 317p.
- Fernandes A.C.S. 1999. Conteúdo icnológico das formações do Ordoviciano-Devoniano da Bacia do Paraná, Brasil. *Boletim do Museu Nacional*, 46: 1-11.
- Fernandes A.C.S. & Melo J.H.G. 1985. Ocorrência do icnogênero Bifungites na Formação Ponta Grossa, Devoniano do estado do Paraná. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 57(2): 203-207.

- Fernandes A.C.S., Borghi L., Carvalho I.S., Abreu C.J. 2002. *Guia dos Icnofósseis de Invertebrados do Brasil*. Editora Interciência, Rio de Janeiro, 260p.
- Fernandes, A.C.S., Fonseca, V.M.M., Ponciano, L.C.M.O. 2012. Icnofósseis da Bacia do Parnaíba: As contribuições de Wilhelm Kegel. *Revista Brasileira de Paleontologia*, 15: 153-163.
- Figueiredo, A.M. & Raja Gabaglia, G.P. 1986. Sistema classificatório aplicado às bacias sedimentares brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*, 16(4): 350-369.
- Fillion D. & Pickerill R.K. 1990. Ichnology of the upper Cambrian? to Lower Ordovician Bell Island and Wabana groups of eastern Newfoundland. *Palaeontographica Canadiana*, 7: 119p.
- Folk, R.L. 1974. *Petrology of sedimentary rocks*. Austin, Hemphill Publishing. 182p.
- Frey R.W. & Pemberton S.C. 1985. Biogenic Structures in Outcrops and Cores. I. Approaches to Ichnology. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 33: 72-115.
- Frey R.W., Pemberton S.C., Saunders T.D.A. 1990. *Ichnofacies and bathymetry: a passive relationship*. *Journal of Paleontology*, 64: 155-158.
- Frey, R. W. & Seilacher, A. 1980. Uniformity in marine invertebrate ichnology. *Lethaia*, 23: 183-207.
- Fürsich F.T. 1974. Corallian (Upper Jurassic) trace fossils from England and Normandy. *Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie B*, 13: 1-52.
- Gaillard, C. & P.R. Racheboeuf. 2006. Trace fossils from nearshore to offshore environments, Lower Devonian of Bolivia, *Journal of Paleontology*, 80(6): 1205–1226.
- Gaines, R.R. & Droser, M.L. 2005. New approaches to understanding the mechanics of Burgess Shale-type deposits: from the micron scale to the global picture. *The Sedimentary Record*, 3: 4-8 p.
- Galehouse, J.S. 1971. Point counting. In Carver, R. E. (Ed.), *Procedures in sedimentary petrology*: New York (Wiley-Interscience), p. 385-407.
- Gibert, J.M, & A.A. Ekdale. 1999. Trace fossil assemblages reflecting stressed environments in the Middle Jurassic Carmel Seaway of Central Utah, *Journal of Paleontology*, 73(4): 711–720.
- Gierlowski-Kordesch, E. & Ernst, F. 1987. A flysch trace fossil assemblage from the Upper Cretaceous shelf of Tanzania. In: Mathies, G. & Schandelmair, H. (eds.), *Current Research in African Earth Sciences*. Extended Abstracts. 14th Colloquium on African Geology, Berlin (West), 18-22 August, 1987. A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 2 17—221.

- Gingras M.K., MacEachern J.A., Dashtgard S.E. 2011. Process ichnology and the elucidation of physic-chemical stress. *Sedimentary Geology*, 237: 115-134.
- Góes A.M.O. & Feijó F.J. 1994. Bacia do Parnaíba. *Boletim de Geociências da PETROBRÁS*, 8: 57-67.
- Goldring, R., Pollard, J.E., J.D. Radley. 2005. Trace fossils and pseudofossils from the Wealden strata (non-marine Lower Cretaceous) of southern England, *Cretaceous Research*, 26: 665–685.
- Grahn Y., Melo J.H.G., Loboziak S. 2006. Integrated Middle and Late Devonian miospore and chitinozoan biozonation of the Parnaíba Basin, Brazil: an update. *Revista Brasileira de Paleontologia*, 9: 283-294.
- Grahn Y., Young C., Borghi L. 2008. Middle Devonian Chitinozoan biostratigraphy and sedimentology in the eastern outcrop belt of the Parnaíba Basin, northeastern Brazil. *Revista Brasileira de Paleontologia*, 11: 137-146.
- Gutschick, R.C. & R. Lamborn. 1975. *Bifungites* trace fossils form Devonian-Mississippian rocks of Pennsylvania and Montana, U.S.A. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 18:193–212.
- Hallam, A. & Wignall, P.B. 1999. Mass extinctions and sea-level changes. *Earth Science Reviews*, 48: 217-250
- Han, Y. & Pickerill, R.K. 1995. Taxonomic review of the ichnogenus *Helminthopsis* Heer 1877 with a statistical analysis of selected ichnospecies. *Ichnos*, 4(2): 83-118.
- Häntzschel, W. 1975. Trace fossils and problematica. In C. Teichert (ed.), *Treatise on Invertebrate paleontology. The Geological Society of America, University of Kansas Press*, Boulder, Colorado, Lawrence, p. 177-243
- Haq B.U. & Schutter S.R. 2008. A chronology of Paleozoic sea-level changes. *Science*, 322: 64-68.
- Hasiotis, S.T. 2004. Reconnaissance of Upper Jurassic Morrison Formation ichnofossils, Rocky Mountain Region, USA: paleoenvironmental, stratigraphic, and paleoclimatic significance of terrestrial and freshwater ichnocoenoses, *Sedimentary Geology*, 167(3–4): 177–268.
- Hydes, D.J. 1982. Animal burrows in deep-sea sediments. *Institute of Oceanographic Sciences*, Report N° 151, 36 p.
- Isaacson, P.E., Hladil, J., Shen, J.W., Kalvoda, J., Grader, G., 1999. *Late Devonian (Famennian) glaciation in South America and marine offlap on other continents*. In: Feist, R., Talent, J.A., Daurer, A. (Eds.), *North Gondwana: Mid-Paleozoic Terranes, Stratigraphy and Biota*. Wien, Abh. Geol. Bund., vol. 54, pp. 239–257.
- Isaacson, P.E., Díaz-Martínez E., Grader G.W., Kalvoda J., Babek O., Devuyt F.X. 2008. Late Devonian-earliest Mississippian glaciation in Gondwanaland and its

biogeographic consequences. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 268: 126-142.

Jensen, S. 1997. Trace fossils from the lower Mickwitzia sandstone, south-central Sweden. *Fossil and Strata*, 42: 1-110.

Johnson, J.G., Klapper, G., Sandberg, C.A., 1985. Devonian eustatic fluctuations in Euramerica. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 96, 567–587.

Jordan D.W. 1985. Trace fossils and depositional environments of Upper Devonian black shales, east-central Kentucky, U.S.A. In: Curran H.A. (ed.) *Biogenic Structures: Their use in interpreting depositional environment*. SEPM Special Publication, vol. 35, p. 279-298.

Kegel W. 1966. Rastros do Devoniano da Bacia do Parnaíba. *Departamento Nacional de Produção Mineral, Divisão de Geologia e Mineralogia*, Rio de Janeiro, 32p.

Keighley D.G. & Pickerill R.K. 1995. The ichnotaxa *Palaeophycus* and *Planolites*: Historical perspectives and recommendations. *Ichnos*, 3: 301-309.

Keighley, D.G. & Pickerill, R.K. 1997. Systematic ichnology of the Mabou and Cumberland groups (Carboniferous) of western Cape Breton Island, eastern Canada, 1: burrows, pits, trails, and coprolites. *Atlantic Geology*, 33: 181-215.

Knaust, D., Bromley, R.G. 2012, Trace Fossils as Indicators of Sedimentary Environments. *Developments in Sedimentology*, vol. 64. *Elsevier*, Amsterdam, pp. 79-101.

Kozur, H.W., Krainer, K., Mostler, H. 1996. Ichnology and sedimentology of the Early Permian deep-water deposits from the Lercara-Roccapalumba Area (Western Sicily, Italy). *Facies*, 34: 123-150.

Ksiazkiewicz, M. 1977. Trace fossils in the flysch of the Polish Carpathians. *Paleontologica Polonica* 36, 1–200.

Laporte L.F. 1969. *Recognition of a transgressive carbonate sequence within an epeiric sea: Helderberg Group (Lower Devonian) of New York state*. In: Friedman G.M. (Ed.), *Depositional environments in carbonate rocks*. SEPM Special Publication 14, p. 98-119.

Levin, L.A., Rathburn, A.E., Gutierrez, D., Munoz, P. And Shankle, A. (2003). Bioturbation by symbiont-bearing annelids in near-anoxic sediments; implications for biofacies models and paleo-oxygen assessments. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 199, 129–140.

Li Z.X. & Powell C.McA. 2001. An outline of the palaeogeographic evolution of the Australasian region since the beginning of the Neoproterozoic. *Earth-Science Reviews*, 53: 237-277.

Lindholm, R. C. 1987. *A Practical approach to sedimentology*: Boston, MA, *Allen and Unwin*, 276 p.

Loboziak S., Caputo M.V., Melo J.H.G. 2000. Middle Devonian–Tournaisian miospore biostratigraphy in the southwestern outcrop belt of the Parnaíba Basin, north-central Brazil. *Révue de Micropaléontologie*, 43: 301-318.

MacEachern J.A., Pemberton S.G., Gingras M.K., Bann K.L. 2007. The ichnofacies concept: a fifty-year retrospective. In: Miller III W. (ed.), Trace Fossils: Concepts, Problems, Prospects, *Elsevier B.V*, Amsterdam, p. 50-75.

MacEachern J.A., Pemberton S.G., Gingras M.K., Bann K.L. 2010. Ichnology and Facies Models. In: James N.P. & Dalrymple R.W. (Eds.). Facies Models 4, GEOText 6, Geological Association of Canada, Ottawa, pp. 19-58.

Mángano M.G. & Buatois L.A. 2003. *Rusophycus leifeirikssoni* en la Formación Campanario: Implicancias paleobiológicas y paleoambientales, In: Buatois L.A. & Mángano M.G. (Eds), Icnología: Hacia una convergencia entre geología y biología. Volume 9. *Publicación Especial de la Asociación Paleontológica*, Argentina, p. 65-84.

Mángano M.G. & Buatois L.A. 2004. Reconstructing early Phanerozoic intertidal ecosystems: Ichnology of the Cambrian Campanario Formation in northwest Argentina. *Fossils and Strata*, 51: 1-22.

Mangano, M.G., Buatois, L.A., West, R.R., C.G. Maples. 1998. Behavioral and feeding strategies recorded by tidal-flat bivalve trace fossils from the Upper Carboniferous of eastern Kansas, *Palaios*, 13(4): 335–351.

Mángano, M.G., Buatois, L.A., West, R.R., Maples, C.G. 2002. Ichnology of a Pennsylvanian equatorial tidal flats—the Stull Shale Member at Waverly, eastern Kansas. *Bulletin of the Kansas Geological Survey*, 245, 1-133.

Mángano M.G., Buatois L.A., Muniz-Guinea F. 2005. Ichnology of the Alfarcito Member (Santa Rosita Formation) of northwestern Argentina: animal–substrate interactions in a lower Paleozoic wave-dominated shallow sea. *Ameghiniana*, 42: 641–668.

Martinsson A. 1970. Toponomy of trace fossils. In: Crimes T.P. & Harper J.C. (Eds.). Trace Fossils. *Geological Journal Special Issue 3*, p. 323-330.

McCann, T. & Pickerill, R.K. 1988. Flysch trace fossils from the Cretaceous Kodiak Formation of Alaska. *Journal of Paleontology*, 62: 330-348.

McIlroy D. & Garton M. 2004. A worm’s eye view of the Early Palaeozoic sea floor. *Geology Today*, 20(6): 224-230.

Melo, J.H.G. 1988. The Malvinokaffric Realm in the Devonian of Brazil. In: McMillan N.J., Embry A.F., Glass D.J. (eds.), Devonian of the World. Canadian Society of *Petroleum Geologists Memoir*, 14(1):669-703.

- Milani E.J. & Thomaz Filho A. 2000. Sedimentary Basins of South America. In: Cordani U.G., Milani E.J., Thomaz Filho A., Campos D.A. (Eds.). *Tectonic Evolution of South America*, 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro, p. 389-449
- Miller M.F. & Smail S.E. 1997. A Semiquantitative Field Method for Evaluating Bioturbation on Bedding Planes. *Palaios*, 12: 397-396.
- Morsilli, M., Pomar, L., 2012. Internal waves vs. surface storm waves: a review on the origin of hummocky cross-stratification. *Terra Nova*, 24: 273-272.
- Muniz, G.C.B. 1979. Novos ichnofósseis devonianos da Formação Inajá, no Estado de Pernambuco. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 51(1): 121-132.
- Muniz, G.C.B. 1982. Ichnofósseis Devonianos da Formação Longá, no Estado do Piauí. 32th *Brazilian Geological Congress*, Salvador, Abstracts 4:1305–1316.
- Munnecke, A., Calner, M., Harper, D.A.T., Servais, T. 2010. Ordovician and Silurian sea-water chemistry, sea level, and climate: A synopsis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 296: 389-413.
- Netto, R.G. 2001. *Icnologia e estratigrafia de sequências*. In: Severiano Ribeiro H.P.J. (Ed.), *Estratigrafia de Sequências – Fundamentos e Aplicações*. Editora UNISINOS, São Leopoldo, p. 219-259.
- Netto, R.G. & Gonzaga, T.D. 1985. Paleicnologia do Grupo Guatá (Super-grupo Tubarão) nos sedimentos da Mina do Iruí. *Acta Geológica Leopoldensia*, 21: 77-102.
- Netto, R.G. & Rossetti, D.F. 2003. Ichnology and salinity fluctuations: a case study from the Early Miocene (Lower Barreiras Formation) of São Luís, Maranhão, Brazil. *Revista Brasileira de Paleontologia*, 6: 5-18.
- O'Brien N.R. 1987. The effects of bioturbation on the fabric of shale. *Journal of Sedimentary Petrology*, 57: 449-455.
- Oliveira D.C. & Mohriak W.U. 2003. Jaibaras trough: an important element in the early tectonic evolution of the Parnaíba interior sag basin, Northern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 20: 351-383.
- Olivero, D., Gaillard, C., 1996. Palaeoecology of Jurassic Zoophycos from south-eastern France. *Ichnos* 4, 249–260.
- Olivero, D., 2007. Zoophycos and the role of type specimens in ichnotaxonomy. In: Miller, W. III (Ed.), *Trace Fossils: Concepts, Problems, Prospects*. Elsevier B.V., 219–231.
- Osgood, R.G. 1970. Trace fossils of the Cincinnati area. *Palaeontographica Americana* 6(41): 277–444.
- Pemberton, S.G. & Frey, R.W. 1982. Trace Fossil nomenclature and the *Planolites-Palaeophycus* dilemma. *Journal of Paleontology*, 56: 843-881.

- Pemberton S.G. & Frey R.W. 1984. Ichnology of storm-influenced shallow marine sequence: Cardium Formation (Upper Cretaceous) at Seebe, Alberta. *Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir 9*, p. 281-304.
- Pemberton S.G., Frey R.W., Bromley R.G. 1988. The ichnotaxonomy of *Conostichnus* and other plug-shaped ichnofossils. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 25: 866-892.
- Pfefferkorn H.W. 1971. Note on *Conostichus broadheadi* Lesquereux (Trace fossil: Pennsylvanian). *Journal of Paleontology*, 45: 888-892.
- Pickerill, R.K. 1992. Carboniferous nonmarine invertebrate ichnocoenoses from southern New Brunswick, eastern Canada. *Ichnos*, 2: 21-35.
- Pickerill, R.K. & Keppie, J.D. 1981. Observations on the ichnology of the Meguma Group (?Cambro-Ordovician) of Nova Scotia. *Maritime Sediments and Atlantic Geology*, 17: 130-138.
- Pickerill R.K., Fyffe L.R., Forbes W.H. 1988. Late Ordovician-Early Silurian trace fossils from the Matapedia Group, Tobique River, western New Brunswick, Canada. II Additional discoveries with descriptions and comments. *Maritime Sediments and Atlantic Geology*, 24: 139-148.
- Pickerill, R.K., Hurst, J.M., Surlyk, F. 1982. Notes on Lower Palaeozoic flysch trace fossils from Hall Land and Pearly Land, North Greenland. *Gronl. Geol. Unders., Rap.*, 108: 25-29.
- Pickerill, R.K., Romano N., Meléndez B. 1984. *Arenig trace fossils from Salamanca area, western Spain*. *Geological Journal*, 19, pp 249-269.
- Plint A.G. 2010. Wave-and Storm-Dominated Shoreline and Shallow-Marine Systems. In: N.P. James & R.W. Dalrymple (eds.). *Facies Model 4*. Geological Association of Canada, 167-200.
- Ponciano L.C.M.O., Fonseca V.M.M., Fernandes A.C.S., Machado D.M.C., Souza A.R. 2010. Afloramento Fossilífero de Oiti, Bacia do Parnaíba, PI - Registro de um mar devoniano no Nordeste do Brasil. In: Winge M., Schobbenhaus C., Souza C.R.G., Fernandes A.C.S., Berbert-Born M., Sallun Filho W., Queiroz E.T. (Eds.). *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*, vol. 3.
- Potter P.E., Maynard J.B., Depetris P.J. 2005. *Mud and mudstone*. Berlin: Springer 2005.
- Prantl, F. 1945. Two new problematic trails from the Ordovician of Bohemia. (In Czech, English summary). *Akademie Tcheque Sci. Bull. Intern., Cl Sci. Math. Nat. Med.*, 46: 49-59.
- Pryor, W.A. 1967. Biogenic directional features on several recent point bars. *Sedimentary Geology*, 1: 235-245.

- Radam, 1973. Folhas SB.23 Teresina e parte da SB. 24 Jaguaribe: geomorfologia, solos vegetação e uso potencial da terra. CPRM. Rio de Janeiro, 325pp.
- Radley, J.D., Barker, M.J., M.C. Munt. 1998. Bivalve trace fossils (*Lockeia*) from the Barnes High Sandstone (Wealden Group, Lower Cretaceous) of the Wessex sub-basin, southern England, *Cretaceous Research*, 19: 505–509.
- Richards P.C. & Brown S. 1987. Shoreface storm deposits in the Rannoch Formation (Middle Jurassic), North West Hutton oilfield. *Scottish Journal of Geology*, 22: 367-375.
- Rodriguez, J. & Gutschick, R.C. 1970. Late Devonian-Early Mississippian ichnofossils from western Montana and northern Utah. In: Crimes, T.P. & Harper, J.C. (eds.). Trace Fossils. *Geol. J., Special Issue*, N° 3: 407-438.
- Santos, M. E. C. M. & Carvalho, M. S. S., 2004. *Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB*. Paleontologia das bacias do Parnaíba, Grajaú e São Luís. In: CPRM, Serviço Geológico do Brasil/DIEDIG/DEPAT, Rio de Janeiro, 211 p..
- Sarkar, S., Ghosh, S.K., Chakraborty, C. 2009. Ichnology of a Late Palaeozoic ice-marginal shallow marine succession: Talchir Formation, Satpura Gondwana basin, central India. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 283: 28-45.
- Savrda C.E. 2007. Trace fossils and marine benthic oxygenation. In: Miller III W. (ed.), Trace Fossils: Concepts, Problems, Prospects. *Elsevier B.V.*, Amsterdam, p. 149-157.
- Savrda C.E. & Bottjer D.J. 1986. Trace-fossil model for reconstruction of paleo-oxygenation in bottom waters. *Geology*, 14: 306-309.
- Savrda C.E. & Bottjer D.J. 1989a. Trace-fossil model for reconstructing oxygenation histories of ancient marine bottom waters: application to Upper Cretaceous Niobrara Formation, Colorado. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 74: 49-74
- Savrda C.E. & Bottjer D.J. 1989b. Anatomy and implications of bioturbated beds in “Black Shale” sequences: Examples from the Jurassic Posidonienschiefer (Southern Germany). *Palaios*, 4: 330-342.
- Schatz E.R., Mángano M.G., Buatois L.A., Limarino C.O. 2011. Life in the Late Paleozoic Ice Age: Trace fossil from glacially influenced deposits in a Late Carboniferous fjord of western Argentina. *Journal of Paleontology*, 85: 502-518.
- Schlirf, M., Uchman, A., Kümmel, M., 2001. Upper Triassic (Keuper) nonmarine trace fossils from the Hassberge area (Franconia, south-eastern Germany). *Paläontologische Zeitschrift* 75, 71–96.
- Scotese C.R., Van der Voo R., Barrett S.F. 1985. *Silurian and Devonian base maps*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*, 309: 57-77.

- Seilacher, A. 1953. *Studien zur palichnologie I. uber die methoden der palichnologie, Neues Jahrbuch Geologie Palaontologie Abhandlungen*, 96 : 421–452.
- Seilacher A. 1964a. Sedimentological classification and nomenclature of trace fossils. *Sedimentology*, 3: 253-256.
- Seilacher A. 1967. Bathymetry of trace fossils. *Marine Geology*, 5: 413-428.
- Seilacher A. 1985. Trilobite palaeobiology and substrate relationships. Transactions of the Royal Society of Edinburgh *Earth Sciences*, 76: 231-238.
- Seilacher A. 1986. Evolution of behavior expressed in marine trace fossils. In: Nitecki, M. H. & Kitchell J., A. (eds) *Evolution of animal behavior*. Oxford University Press. New York, Oxford, 62-87.
- Seilacher A. 2007. Trace Fossil Analysis. *Springer*, Berlin, 226p.
- Seilacher, A. & Seilacher, E., 1994. Bivalvian trace fossils: a lesson from actuopaleontology. *Courier Forschungsinstitut Senckenberg* 169, 5–15.
- Silva R.C., Dominato V.H., Fernandes A.C.S. 2012. Novos registros e aspectos paleoambientais dos icnofósseis da Formação Pimenteira, Devoniano da Bacia do Parnaíba, Piauí, Brasil. *Journal of Geoscience*, 8: 33-41.
- Soares, J.L. & Nogueira, A.C.R. 2006. Fácies Depositionais e Traços Fósseis do Devoniano Inferior da Bacia do Amazonas, Região de Presidente Figueiredo, AM. In: XLIII Congresso Brasileiro de Geologia, Aracaju. *Sedimentologia e Estratigrafia*, p. 283.
- Souza, I.V.A.F. 2007. *Faciologia orgânica de seções devonianas da Bacia do Parnaíba (Formação Pimenteira): implicações para geração de petróleo*. Programa de Pós Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertation, 160 p.
- Taylor A.M. & Goldring R. 1993. Description and analysis of bioturbation and ichnofabric, organisms and sediments; relationships and applications. *Journal of the Geological Society of London*, 150: 141–148.
- Tucker, M. E., 1991. Sedimentary Petrology: an introduction to the origin of sedimentary rocks. 2° ed., *Blackwell Scientific Publications*, 260 p.
- Uchman A. 1998. Taxonomy and ethology of flysch trace fossils: revision of the Marian Ksiazkiewicz collection and studies of complementary material. *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 68: 105-218.
- Uchman A. 2009. The *Ophiomorpha rudis* ichnosubfacies of the Nereites ichnofacies: Characteristics and constraints. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 276: 107-119.

- Uchman, A., Bubík, M., Mikuláš, R., 2005. The ichnological record across the Cretaceous/Tertiary boundary in turbiditic sediments at Uzgruò (Moravia Czech Republic). *Geologica Carpathica* 56, 57–65.
- Uchman, A., Drygant, D., Paszkowski, M., Porębski, S.J., Turnau, E. 2004. Early Devonian trace fossils from marine to non-marine redbeds in Podolia, Ukraine: palaeoenvironmental context and implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 214: 67-83.
- Uchman, A. & Gaździcki, A. 2006 New trace fossils from the La Meseta Formation (Eocene) of Seymour Island, Antarctica. *Polish Polar Research*, 27 153–170.
- Vallon, L. H., Rindsberg, A. K. & Bromley, R. G., 2015. An updated classification of animal behaviour preserved in substrates. *Geodinamica Acta* [on line first in August 2015 at DOI: 10.1080/09853111.2015.1065306]
- Vaz P.T., Rezende N.G.A.M., Wanderley Filho J.R., Travassos W.A.S. 2007. Bacia do Parnaíba. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 15: 253-263.
- Vossler, S.M., & Pemberton, S.G., 1989. Ichnology and paleoecology of offshore siliciclastic deposits in the Cardium Formation (Turonian, Alberta, Canada). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 74, 217–239.
- Walker, R.G. 1992. Facies, facies models and modern stratigraphic concepts. In: Walker R.G. & James, N.P. (eds.) *Facies Models: Response to Sea Level Change*. Geol. Ass. Canada, p.1-14.
- Webby B.D. 1965. The Middle Devonian marine transgression in North Devon and West Somerset. *Geological Magazine*, 102: 478-488.
- Wetzel, A. & Bromley, R.G. 1994. *Phycosiphon incertum* revisited: *Anconichnus horizontalis* is its junior subjective synonym. *Journal of Paleontology*, 68: 1396-1402.
- Wetzel A. & Bromley R.G. 1996. Re-evaluation of the ichnogenus *Helminthopsis* – A new look at the type material. *Palaeontology*, 39(1): 1-19.
- Wetzel A. & Werner F. 1981. Morphology and ecological significance of *Zoophycos* in deep-sea sediments off NW Africa. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 32: 185-212.
- Wizevic, M.C. 1991. Photomosaic of outcrops: useful photomographic techniques. In: Miall A.D. e Tyler N. (eds). *The three-dimensional facies architecture of terrigenous clastic sediments and its implications for hydrocarbon discovery and recovery*. SEPM, p.22-24.
- Young, C.G.K. 2006. *Estratigrafia de alta-resolução da Formação Pimenteira (Devoniano, Bacia do Parnaíba)*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 170 p.

Young, C.G.K. & Borghi, L. 2006. Pimenteira Formation (Devonian, Parnaíba basin): a new prospect for hydrocarbon reservoirs. *In*: SBG, Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 2, *Resumos Expandidos*, 6p.