

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
*Campus de Rio Claro*

**ESTRUTURAS DISCOIDES NA FORMAÇÃO CERRO NEGRO  
(GRUPO LA PROVIDENCIA), ARGENTINA E SUAS  
IMPLICAÇÕES PARA A PALEONTOLOGIA DE  
MACROORGANISMOS PRÉ-CAMBRIANOS**

LUCAS INGLEZ

Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Lucas Veríssimo Warren

Coorientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Fernanda Quaglio

Rio Claro - SP

2018

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
*Campus de Rio Claro*

LUCAS INGLEZ

ESTRUTURAS DISCOIDES NA FORMAÇÃO CERRO NEGRO  
(GRUPO LA PROVIDENCIA), ARGENTINA E SUAS  
IMPLICAÇÕES PARA A PALEONTOLOGIA DE  
MACROORGANISMOS PRÉ-CAMBRIANOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
do Campus de Rio Claro, da Universidade  
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho,  
como parte dos requisitos para obtenção  
do título de Mestre.

Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente  
Orientador: Prof. Dr. Lucas Veríssimo Warren  
Coorientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Fernanda Quaglio

Rio Claro - SP  
2018

560 Inglez, Lucas  
I51e Estruturas discoides na Formação Cerro Negro (Grupo La Providencia), Argentina e suas implicações para a paleontologia de macrorganismos pré-cambrianos / Lucas Inglez dos Reis. - Rio Claro, 2018  
97 f. : il., figs., gráfs., quadros, fots. + Tabela

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Orientador: Lucas Veríssimo Warren  
Coorientadora: Fernanda Quaglio

1. Paleontologia. 2. Discos ediacaranos. 3. MISS. 4. Pseudofósseis. 5. Escape de fluido. I. Título.

ESTRUTURAS DISCOIDES NA FORMAÇÃO CERRO NEGRO  
(GRUPO LA PROVIDENCIA), ARGENTINA E SUAS IMPLICAÇÕES  
PARA A PALEONTOLOGIA DE MACROORGANISMOS PRÉ-  
CAMBRIANOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
do Campus de Rio Claro, da Universidade  
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho,  
como parte dos requisitos para obtenção  
do título de Mestre.

**Data da defesa:** 12/04/2018

**Resultado:** Aprovado

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Lucas Veríssimo Warren (Orientador)

---

Prof. Dr. Thomas Rich Fairchild

---

Profa. Dra. Renata Guimarães Netto

---



## Agradecimentos

Agradeço ao Professor Lucas Warren pela orientação, paciência e solicitude demonstrada ao longo do desenvolvimento desse trabalho, bem como à CAPES e à FAPESP (Processo nº 15/24608-3) pelo financiamento sem o qual a pesquisa não seria possível.

Por discussões e conselhos nos primeiros meses da pesquisa, agradeço aos Professores Thomas R. Fairchild (IGc-USP) e Alexander Liu (*Department of Earth Sciences, University of Cambridge, UK*), cujos pontapés iniciais permitiram visualizar os caminhos a serem traçados.

À Julia Arrouy, Daniel Poiré e toda equipe das minas La Cabañita e Loma Negra (em Olavarria e Barker, Argentina, respectivamente) e da Universidade Nacional de La Plata pelo apoio na etapa de campo e discussões por ela desencadeadas. Nesse sentido, especial agradecimento à Profa. Fernanda Quaglio, cujas discussões no início da pesquisa me permitiram estar mais certo de minhas próprias convicções.

Agradeço ainda à equipe (em especial Julia e Daniel) do CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas), em La Plata, Argentina pelo uso das instalações e autorização para transporte de amostras.

Ao técnico Júnior do Laboratório de Laminação (DPM) pela assistência e atenção, ao Professor Mario Assine pela autorização de uso dos equipamentos do Laboratório de Estudos Quaternários e sua equipe Patricia, Eder, Felipe, Milena e Michele, por todo auxílio fornecido.

Ao Professor Leonardo Cury (UFPR) e toda equipe dos laboratórios do LAMIR pela recepção em Curitiba e assistência na realização das minhas análises. Também à Profa. Rosemarie pela atenção e discussões nas últimas etapas da pesquisa.

À minha mãe Claudia por acreditar em mim e apoiar minhas escolhas e minha irmã pela parceria e discussões que, ao longo dos anos, auxiliaram em meu amadurecimento acadêmico.

Por fim, agradeço aos meus amigos Fernanda Menin, Natasha (Orka), Juliana e Denis pelas horas de discussões acadêmicas que me ajudaram a organizar minhas ideias. Agradeço também à própria amizade, não apenas dos quatro supracitados, mas também da Patricia, Regiane, Marol, Fênix e Mari, os quais tornaram leve e prazeroso o período de desenvolvimento desse trabalho. Nesse sentido, especiais agradecimentos à Fer, Orka, Antônio, Marcela e Dave, cuja convivência e carinho me ensinaram e ensinam tanto da vida e do universo quanto as rochas e fósseis aos quais me dedico com prazer.

## Resumo

A Formação Cerro Negro, Grupo La Providencia (Região das cidades de Olavarría e Barker, Argentina), compreende uma sucessão siliciclástica marinha com idade ediacarana. A unidade é composta por uma intercalação de pelitos e arenitos ricos em estruturas microbialmente induzidas (MISS), depositada sob influência de tempestades em ambiente de inter- a inframaré. Nesse contexto, camadas de evento de arenitos finos a muito finos, ricos em estruturas de deformação por sobrecarga apresentam em seu topo centenas de estruturas discoides preservadas como relevo completo (epirelevo positivo + endorelevo + epirelevo negativo). Os discos densamente distribuídos no acamamento ocorrem como protuberâncias centimétricas (5 – 140 mm) de epirelevo liso em oposição a sua superfície inferior radialmente enrugada e marcada por uma depressão central. Tais feições, juntamente com a distribuição de frequências de tamanho e presença de deformação mútua de indivíduos em contato lateral levaram a interpretação dos discos como tafomorfos do plexus *Aspidella*. Entretanto, os contextos sedimentares e tafonômicos das estruturas discoides ornamentadas (EDO) argentinas, bem como sua morfologia interna complexa, impedem sua associação direta com o registro de macrobiotas em outras unidades ediacaranas. Assim, de modo a elucidar a gênese e preservação das ED em termos de sua natureza biótica ou abiótica, foi proposta a aplicação de uma série de técnicas analíticas, tais como: 1) contagem e medições sistemáticas das estruturas em campo, observando a distribuição de classes de tamanho em distintas populações de discos, 2) secção e escaneamento de slabs de rocha, de modo a acessar suas feições internas, 3) análise secções delgadas ao microscópio óptico e eletrônico de varredura (MEV), 4) análise por microtomografia computadorizada (Micro-CT), compondo modelos tridimensionais das estruturas. Assim, o uso combinado de diferentes técnicas permitiu discutir as EDO diante de duas hipóteses alternativas, HA-I e II, as quais compreendem: I- Uma origem biológica, de acordo com a qual, perturbações em subsuperfície seriam produzidas por uma comunidade infaunal produzindo tubos verticais simples (icnofósseis tipo-*Skolithos*), que podem ou não culminar em discos horizontalmente radiados (icnofósseis tipo-*Asterosoma*). II – Uma natureza abiótica, implicando nos discos como produtos da ascensão de sedimento fluidificado interagindo com o substrato microbialmente estabilizado. Tal hipótese explica a correlação entre os discos e as feições de liquidação observadas, o que lhe confere maior poder de síntese. Além do mais, a HA-II independe do rompimento de paradigmas biológicos e paleontológicos, sendo compatível com a interpretação presente na literatura para ocorrências semelhantes. Dessa forma, conclui-se que as EDO sejam estruturas problemáticas, com gênese provavelmente associada a processos de fluidificação e injeção de sedimentos em interação com substratos bioestabilizados, caracterizando assim um pseudofóssil.

**Palavras chave:** Discos ediacaranos, MISS, Pseudofósseis, Estruturas de escape de fluido

## Abstract

The Cerro Negro Formation, La Providencia Group (Olavarría and Barker municipalities Argentina) comprises a marine siliciclastic succession of ediacaran ages. The unit is composed of intercalated mudstones and sandstones rich in microbially induced structures (MISS) and deposited under the influence of storms in inter- to subtidal settings. In this context, event beds of fine to very fine sandstones are rich in overload deformation features (liquidization processes). They also commonly exhibit on its upper surface hundreds of discoidal structures preserved in full relief. The densely distributed discs occur as centimetric protuberances (5 to 140 mm) with a smooth upper surface and a radially symmetric wrinkled underside, which is marked by a central depression. These characters, along with their size frequency distribution and the occurrence of mutually deformed individuals, led to the interpretation of the discs as probable taphomorphs of the plexus *Aspidella*. However, the sedimentary and taphonomic context of the Argentinian Ornamented Discs (OD), as well as their complex internal morphology, prevent direct association with macrofossils from other Ediacaran units. Thus, in order to elucidate the genesis and preservation of the discs in terms of their biotic or abiotic nature, I proposed the application of a series of analytical techniques, including: 1) Systematic counting and measuring the discs in the field, understanding the size distribution of different disc populations; 2) sectioning and scanning rock slabs in order to observe internal features; 3) analyses of thin sections under optical and electron scanning microscopes (MEV); 4) scanning with Micro-computerized Tomography (Micro-CT) to observe the tridimensional distribution of internal features. The combined use of these techniques allowed the discussion of the OD under the light of two main alternative hypothesis, AH-I and AH-II, that comprise: AH-I) A biogenic genesis, in which subsurface perturbations were originated by an infaunal community producing simple vertical tubes (*Skolithos*-like traces), that may or may not culminate in horizontal radiated discs (*Asterosoma*-like traces). AH-II) An abiotic origin, in which the discs are the product of the ascension of fluidized sediments interacting with a microbially bounded substrate. This hypothesis explains the observed correlation between discs and the liquidization features, thereby providing it greater synthesizing power. The AH-II is also independent of the breaking of biological and paleontological paradigms and it is compatible with the interpretation of similar occurrences in the literature. As such, I consider the OD as a problematic structure probably associated to migrating fluidized sediments, trapped under a biostabilized substrate. In this interpretation, therefore, they are considered pseudofossils.

**Key words:** Ediacaran discs, MISS, Pseudofossils, Fluid escape structures.

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> – Resumo esquemático da preservação de estruturas sedimentares biogênicas e suas expressões nos planos de acamamento (epirelevo ou hiporelevo - semirelevos) e no interior de camadas sedimentares). _____	16
<b>Figura 2</b> - Principais modelos tafonômicos para a preservação de holdfasts discoides de organismos ediacaranos. ____	23
<b>Figura 3</b> – Icnofósseis com morfologia discoide ou radial. _____	28
<b>Figura 4</b> – Exemplos de estruturas sedimentares discoide de origem abiótica. _____	32
<b>Figura 5</b> - Localização e unidades litoestratigráficas do Sistema Tandilia. (1989). _____	34
<b>Figura 6</b> - Localização da área de estudo. _____	36
<b>Figura 7</b> - Localização dos locais de estudo. _____	37
<b>Figura 8</b> - Mapa geológico simplificado da região de estudo próxima ao município de Olavarría, província de Buenos Aires. _____	38
<b>Figura 9</b> – Seção colunar dos depósitos da Formação Cerro Negro expostos na Pedreira La Cabañita, Olavarría. ____	43
<b>Figura 10</b> - Estruturas e feições sedimentares ilustrativas de diferentes fácies sedimentares.. _____	44
<b>Figura 11</b> - Estruturas de origem microbial (MISS) observadas em campo. _____	46
<b>Figura 12</b> - Fotomicrografias obtidas a partir de sessões delgadas de amostras contendo estruturas microbiais. ____	48
<b>Figura 13</b> – Icnofósseis da Formação Cerro Negro. _____	49
<b>Figura 14</b> - Detalhes da fácies Alc. _____	50
<b>Figura 15</b> – Estruturas Discoides Ornamentadas (EDO). _____	53
<b>Figura 16</b> – EDO em blocos ex situ da Pedreira Loma Negra (Loc 2). _____	54
<b>Figura 17</b> – Estruturas discoides em blocos ex situ na Localidade 1. _____	56
<b>Figura 18</b> – EDO e estruturas discoides controle utilizadas para análise quantitativa do material estudado. _____	58
<b>Figura 19</b> – Gráficos das frequências de ocorrência de diferentes classes de tamanho das populações de EDO, ILS e “Bolhas em pó de café” .. _____	59
<b>Figura 20</b> - Fotomicrografias obtidas a partir de amostra de Alc. _____	61
<b>Figura 21</b> - Detalhes de corte de amostra do topo da fácies Alc, observados em planta e em corte. _____	63
<b>Figura 22</b> - Detalhes da estruturação interna de exemplar de EDO. _____	65
<b>Figura 23</b> - Detalhes da estruturação interna de exemplar de EDO. _____	67
<b>Figura 24</b> - Imagens obtidas por meio de Microtomografia Computadorizada (Micro-CT) de exemplar de EDO com padrão de enrugamento lobado. _____	68
<b>Figura 25</b> – Detalhes da estruturação interna de exemplar de EDO de grandes dimensões e detalhe ao microscópio óptico de estrutura central. _____	70
<b>Figura 26</b> - Detalhes da estruturação interna de exemplares de EDO em contato lateral e mutuamente deformados. _____	71
<b>Figura 27</b> - Estruturas Discoides Simples (EDS) em seções polidas. _____	72
<b>Figura 28</b> - Modelo genético para o desenvolvimento das estruturas discoides de Olavarría (EDO). _____	81

## Lista de Tabelas

**Tabela 1** - Sistematização das principais informações levantadas referentes às Estruturas Discoïdes Ornamentadas (EDO) e Simples (EDS). \_\_\_\_\_ 73

**Tabela 2** - Lista de caracteres observados nas Estruturas Discoïdes Ornamentadas e sua relação de afinidade (verde) ou não afinidade (vermelho) com os modelos apresentados pelas hipóteses 0, I e II. \_\_\_\_\_ 87

# SUMÁRIO

<b>1. Introdução</b> .....	<b>8</b>
<b>2. Questões sobre a construção do conhecimento envolvendo estudos do Pré-Cambriano</b> .....	<b>10</b>
2.1. Geologia e tempo profundo: como investigar o registro sedimentar e paleobiológico do Pré-Cambriano? .....	10
2.2. Dubiofósseis e a paleontologia do Proterozoico: uma questão de ordem epistemológica? .....	11
<b>3. Paleogeobiologia do Ediacarano e o contexto de preservação de fósseis com morfologia discoide</b> .....	<b>14</b>
3.1. Comunidades microbiais bentônicas e sua influência no desenvolvimento de estruturas sedimentares em sistemas siliciclásticos .....	14
3.2. Registro fóssil de macrobiotas ediacaranas de corpo mole .....	18
3.2.1. Macrorganismos ediacaranos com morfologia discoide.....	19
3.2.2. Modelos tafonômicos e a origem de <i>Lagerstätten</i> ediacaranos.....	20
<b>4. Estruturas sedimentares discoides no registro geológico</b> .....	<b>24</b>
4.1. Traços fósseis no registro sedimentar e o desenvolvimento de feições discoides .....	25
4.2. Processos de liquidação e o desenvolvimento de estruturas de escape de fluido .....	29
<b>5. Geologia regional</b> .....	<b>33</b>
5.1. Evolução tectônica e sedimentar do Sistema Tandilia .....	33
5.2 Grupo La Providencia .....	34
<b>6. Área de estudo</b> .....	<b>36</b>
<b>7. Metodologia</b> .....	<b>39</b>
<b>8. Resultados</b> .....	<b>41</b>
8.1. Contexto sedimentológico e paleobiológico .....	41
8.2. Estruturas discoides da Formação Cerro Negro .....	51
8.3. Petrografia e estruturação interna das Estruturas Discoides.....	60
<b>9. Discussão</b> .....	<b>74</b>
9.2. Contexto deposicional.....	74
9.2. Origem biótica vs. abiótica: gênese e preservação das estruturas discoides.....	76
9.2.1. Escape de fluido em um pavimento liquidificado - hipótese alternativa I.....	77
9.2.2. Icnitos de alimentação/excreção – Hipóteses alternativa II .....	82
9.2.3. Estruturas sedimentares problemáticas e a busca pela abordagem mais simples e parcimoniosa .....	84
<b>10. Conclusões</b> .....	<b>89</b>
<b>Referências bibliográficas</b> .....	<b>90</b>
<b>Anexo – A</b> .....	<b>98</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Diferentes sucessões sedimentares depositadas ao final da Era Neoproterozoica em várias localidades do mundo contêm o registro excepcional das mais antigas assembleias de microfósseis, conhecidas como *Biotas Ediacaranas* (MACGABHANN 2007). Estes conjuntos de seres vivos caracterizavam-se, de modo geral, por organismos bentônicos de corpo mole, morfologicamente simples e com filogenia incerta, comumente preservados em associação com esteiras microbiais soterrados por eventos episódicos (NARBONNE & HOFMANN, 1987; SEILACHER, 1989; BUSS & SEILACHER, 1994; MACGABHANN, 2007; GEHLING & DROSER, 2009).

Comunidades microbiais bentônicas, comumente desenvolvidas em ambiente marinho raso com algum nível de estresse ecológico, foram importantes componentes dos ecossistemas da Terra durante os éons Arqueano e Proterozoico (HAGADORN & BOTJER, 1997; BOTTJER & CLAPHAM, 2006; NOFFKE 2001, 2009; BOSE et al. 2012).

Nesse contexto, as interações entre as microbiotas bentônicas e o meio físico influenciaram profundamente a dinâmica sedimentar dos sistemas deposicionais da Terra ao longo do Pré-Cambriano. Em fácies siliciclásticas, tais interações foram responsáveis pelo desenvolvimento e preservação de uma série de estruturas sedimentares características de substratos colonizados por esteiras microbiais (*Microbially Induced Sedimentary Structures – MISS sensu* NOFFKE 2001) e que evidenciam alterações na coesão de sedimentos nas frações areia fina a silte (HAGADORN & BOTTJER, 1997; NOFFKE, 2001, 2009; BOTTJER & CLAPHAM, 2006).

Na Formação Cerro Negro, Grupo La Providencia, região de Olavarría, Argentina, enigmáticas estruturas sedimentares discoides ocorrem em fácies de arenitos finos a muito finos ricas em estruturas microbiais. Tais estruturas foram atribuídas a um grupo de macrorganismos, classificados como pertencentes ao *plexus Aspidella* (*sensu* Gehling et al. 2000) e ocorrem em uma sucessão depositada em condições marinhas de águas rasas, possivelmente em ambiente de inter a inframaré (ARROUY, 2015; ARROUY et al., 2016a, b).

Com status de classificação informal e sem pretensão filogenética, o *plexus Aspidella* caracteriza-se pela presença de estruturas de fixação no substrato, comumente preservadas como moldes e impressões discoides em epi- ou hiporelevo. Entretanto, a ocorrência argentina, apesar de semelhante a depósitos contendo registro destes organismos em outras localidades, apresenta particularidades quanto a estilos de preservação e ornamentação. Desse modo, não é possível sua associação direta com fósseis ediacarnos dentro dos modelos tafonômicos e paleontológicos pré-estabelecidos (GEHLING et al., 2000; TARHAN et al., 2015; ARROUY et al., 2016).

Assim, justifica-se o desenvolvimento desse projeto considerando o potencial do material para contribuir para a compreensão não apenas da gênese e preservação das estruturas identificadas na

Formação Cerro Negro, mas o modo como estas se relacionam com ocorrências semelhantes em outras localidades. Desse modo, espera-se contribuir também para o entendimento do cenário paleoambiental e paleoecológico do Neoproterozoico terminal, especialmente no que se refere aos estilos preservacionais e biogenicidade de estruturas discoides supostamente associadas a macrobiotas ediacaranas.

Como objetivos específicos, esse projeto visou a descrição e caracterização detalhada das estruturas discoides presentes na Formação Cerro Negro, de modo a elucidar sua natureza em termos de sua gênese e preservação, dentro do contexto sedimentar e paleoambiental da unidade de estudo. Ademais, procurou-se compreender o modo como tais estruturas se relacionam com feições de MISS, às quais ocorrem associadas, estabelecendo critérios para a interpretação dos discos como estruturas de origem biótica, abiótica ou ainda influenciadas por atividade biológica.

Por fim, buscou-se contribuir para o desenvolvimento de uma metodologia para o estudo de estruturas problemáticas em estratos pré-cambrianos, em especial quando inseridas no contexto paleobiológico e paleoambiental do Período Ediacarano.



## 2. QUESTÕES SOBRE A CONSTRUÇÃO DO CONHECIMENTO ENVOLVENDO ESTUDOS DO PRÉ-CAMBRIANO

### 2.1. GEOLOGIA E TEMPO PROFUNDO: COMO INVESTIGAR O REGISTRO SEDIMENTAR E PALEOBIOLÓGICO DO PRÉ-CAMBRIANO?

No que se refere aos processos geológicos atuantes durante o Pré-Cambriano, é comum a discussão quanto a sua natureza atualista ou não atualista (DONALDSON et al., 2002). O conceito de atualismo aceito pode ser definido como uma linha de pensamento que considera que os fenômenos e leis naturais observados atualmente controlaram os processos do passado, porém com frequências e intensidades variáveis (DONALDSON et al., 2002; ALLABY, 2008). Essa definição leva em consideração o atualismo sob uma perspectiva moderna e não uniformitarista e é sugerida como a maneira mais simples e cientificamente adequada de se compreender o registro geológico (DONALDSON et al., 2002).

Nesse aspecto, ao se trabalhar com sistemas deposicionais com idades proterozoicas, ou mesmo arqueanas, é preciso considerar primeiramente problemas de ordem temporal. O que significa que estatisticamente eventos extremamente raros, ou processos que se desenvolvem na escala de tempo de evolução planetária (bilhões de anos), ainda não aconteceram ao longo do Fanerozoico, e assim não apresentariam análogos modernos diretos. Como exemplo, tem-se a maior proximidade entre a Terra e a Lua, responsável pela geração de efeitos de maré com maiores intensidades no passado e as grandes variações no gradiente geotérmico do manto terrestre (HALL & HUGHES, 1993; DONALDSON et al., 2002; LONGHITANO et al., 2012).

Outro problema relaciona-se a questões de ordem geológica e tectônica, vinculadas a própria evolução do planeta. Entre elas encontra-se o predomínio de sistemas marinhos epéiricos em bacias intracratônicas, cujos ambientes de sedimentação não apresentam necessariamente correspondentes modernos adequados. Além disso, é possível mencionar que as maiores taxas de acreção crustal e maiores taxas de erosão (associadas a baixa retenção de solos devido à ausência ou raridade de vegetação continental), influenciaram profundamente a disponibilidade de material sedimentar e os padrões de sedimentação nos períodos anteriores ao Devoniano (BOSE et al., 2012; ERIKSSON et al., 2005; MARCONATO, 2014).

Com relação aos aspectos biológicos, o Pré-Cambriano é um Éon de extrema importância, pois foi nesse imenso intervalo de tempo que a vida se originou e desenvolveu as inovações chave para a evolução e estabelecimento da biosfera como ela é atualmente (e ao longo do Fanerozoico, de modo geral) (KNOLL & BAMBACH, 2000; WARD & BROWNLEE, 2003; FAIRCHILD et al., 2012). Contudo, diferentemente do Fanerozoico, durante o Arqueano e a quase totalidade do Proterozoico a

vida no planeta foi composta exclusivamente por organismos unicelulares (incluindo aqui os grandes Domínios da vida: Archaea, Bacteria e parte de Eukaria), cujas interações ecológicas moldaram profundamente os ciclos biogeoquímicos, influenciando aspectos composicionais oceânicos e atmosféricos, bem como processos climáticos (MARGULIS & DOLAN, 2002; WARD & BROWNLEE, 2003; VICKERS-RICH & FEDONKIN, 2007a,b).

Além disso, durante o Pré-Cambriano, a ampla distribuição de comunidades microbiais bentônicas aquáticas em ambientes marinhos ou continentais dentro da zona fótica influenciou profundamente aspectos tais como a coesão de sedimentos, controlando o desenvolvimento e preservação de estruturas sedimentares incomuns, ou mesmo ausentes no registro geológico do Fanerozoico (HAGADORN & BOTTJER, 1997; BOTTJER & CLAPHAM, 2006; NOFFKE, 2001, 2009; BOSE et al., 2012).

Portanto, considerando tais aspectos, uma abordagem atualista, não uniformitarista é sugerida ao se trabalhar com o registro geológico presente em rochas mais antigas que 541 Ma. Esse deve ser investigado com base no que se conhece dos processos e fenômenos naturais modernos, contudo considerando o modo não uniformitário com o qual estes podem ter se expressado no passado geológico (DONALDSON et al. 2002). O que significa que a distribuição não uniforme dos fenômenos ao longo de tempo em escala geológica deve ser um fator decisivo na escolha de hipóteses que expliquem determinadas feições geológicas.

## 2.2. DUBIOFÓSSEIS E A PALEONTOLOGIA DO PROTEROZOICO: UMA QUESTÃO DE ORDEM EPISTEMOLÓGICA?

Em termos de registro paleobiológico, o Pré-Cambriano representa potencialmente 85% da história evolutiva da vida. Contudo, estudos paleontológicos desse longo período de tempo, têm se apresentado em alguns casos de forma problemática. Dentre os fatores que contribuem para as dificuldades envolvendo o estudo de fósseis proterozoicos (ou mesmo Arqueanos) é possível citar: 1) a antiguidade das rochas, muitas vezes expostas a processos de deformação e metamorfismo; e/ou 2) a natureza predominantemente microbial e morfológicamente simples da vida até meados do Ediacarano (registro da *Biota de Doushantuo* estimada em ~580 Ma) (BOTTJER & CLAPHAM 2006; SCHOPF et al. 2010).

Tais aspectos intrínsecos à paleobiologia desse período de tempo, quando associados a problemas de preservação podem resultar em vieses de interpretação, dada a semelhança de formas microbiais com partículas de natureza inorgânica (SCHOPF et al. 2010). Este problema, contudo, não é recorrente no Fanerozoico devido ao grau de complexidade morfológica de macrofósseis de plantas e animais, que impede ou dificulta que estes sejam confundidos com produtos de processos inorgânicos (SCHOPF et al. 2010).

Entretanto, ao observarmos o registro de formas fósseis macroscópicas dos estágios terminais do Neoproterozoico, nota-se que este é caracterizado por grande disparidade de formas com pouca ou nenhuma semelhança com os grandes grupos de macrorganismos vivos, ou presentes no registro fóssil do Fanerozoico (NARBONNE, 2005; MCCALL, 2006; BOTTJER & CLAPHAM, 2006). Essas características possibilitam a proliferação de ocorrências muitas vezes duvidosas, como apontado por CLOUD (1973). Segundo este autor o grande número de supostos fósseis do Proterozoico na literatura poderia ser interpretado como pseudomorfo de pirita (ou outros minerais), marcas de objeto ou ainda estruturas de ressecamento (CLOUD 1973). Contudo, o avanço das pesquisas demonstrou a clara ocorrência de assembleias fósseis com idades proterozoicas (Ediacarano) contendo macrorganismos cuja sofisticação morfológica poderia ser equiparada, em parte, àquela observada em organismos pluricelulares fanerozoicos (NARBONNE 2005; MCCALL 2006; BOTTJER & CLAPHAM 2006; HOYAL CUTHULL & MORRIS, 2014). Porém, alguns elementos dessas ocorrências com menores graus de complexidade fisiológica e pequena semelhança com grupos de organismos vivos, ainda hoje desafiam o entendimento quanto às suas relações filogenéticas e modo de preservação (GEHLING et al. 2000; MACGABHANN 2007; TARHAN et al. 2010).

Um número crescente de dubiofósseis e estruturas problemáticas são descritos em estratos ediacaranos, porém também em unidades mais antigas (paleoproterozoicas, por exemplo), e pontualmente, em estratos fanerozoicos (DE 2003; EL ALBANI et al. 2014; ANDERSON et al. 2016; KIRKLAND et al. 2016; MOCZYDŁOWSKA & MENG 2016). Para o Ediacarano, devido ao seu potencial para estudos relativos à origem e diversificação da vida pluricelular, o problema pode se tornar ainda mais evidente. Porém, com o refinamento de técnicas e critérios, tem sido comum a reinterpretção de táxons fósseis como feições de origem abiótica, revelando ocasionalmente novos processos e fenômenos porventura preservados no registro geológico (HAGADORN & MILLER 2011; VAN LOON & MAULIK 2011; MENON et al., 2015, 2016).

Em ciência, é comum entre pesquisadores a adoção de princípios como o da parcimônia e da simplicidade na escolha por hipóteses que melhor expliquem os fenômenos observados (GOODMAN 1975, POINCARÉ 1988).

Goodman (1975) em seu ensaio *Ciência e Simplicidade* caracteriza a ciência como um processo de sistematização das informações (obtidas por meio de métodos de experimentação e raciocínio indutivo, por exemplo). Assim, seria possível entender a ciência como uma expressão da simplificação das intrincadas relações entre os diferentes elementos e fenômenos que compõem a natureza (GOODMAN 1975).

Muitos autores por sua vez justificam o uso dos princípios da simplicidade e parcimônia evocando com frequência o princípio da *Navalha de Ockham*, a qual enuncia: “se em tudo o mais

forem idênticas as várias hipóteses levantadas para explicar um determinado fenômeno, a mais simples apresenta maiores probabilidades de ser verdadeira” (FITZPATRICK [199-]; KELLY 2007, SHULZ 2012).

Contudo, em filosofia da ciência, muito é debatido em relação a quais critérios adotar para a criação de tal hierarquia de simplicidade imposta a diferentes hipóteses. Ou ainda, por quais motivos teorias ou ideias mais simples apresentariam vantagens na solução de problemas mais complexos (POPPER, 1972, GOODMAN, 1975, SCHULZ, 2012, SCORZATO 2013).

No contexto desses questionamentos, tem-se as ideias desenvolvidas por Popper (1972) em relação à *Falseabilidade de hipóteses* (propostas em 1959). Para o autor, uma hipótese de caráter científico é assim considerada se, e somente se, esta puder ser testada ou falseada por meio de experimentação. Mais além, Popper (1972) propõe a utilização do grau de falseabilidade de uma hipótese como medida de sua simplicidade, uma vez que, segundo o autor, hipóteses mais simples podem ser mais facilmente testadas, sendo assim preferíveis.

Discussões posteriores acerca dos trabalhos de Goodman (1975), Popper (1972) e Poincaré (1988) demonstram que o uso indiscriminado de princípios tais como a *Navalha de Ockham* não é recomendado, apesar das muitas contribuições à ciência da aplicação dos princípios de parcimônia e simplicidade (SCORZATO 2013; SCHULZ 2012).

Ao invés disso, recomenda-se a avaliação das hipóteses não por seus graus de simplicidade ou complexidade, mas por seu valor metodológico intrínseco. Assim, de forma intuitiva, a escolha de hipóteses deve levar em consideração sua consistência com os dados disponíveis, bem como com as teorias e modelos vigentes (SCHULZ 2012). Em termos de sua falseabilidade, deve-se evitar àquelas que necessitem de um grande número de hipóteses adicionais que garantam sua sustentação (hipóteses *ad hoc*) (SHULZ 2012).

Sem dúvida, não é do escopo deste trabalho uma discussão detalhada quanto a questões de ordem filosófica e epistemológica. Porém, a aplicação de alguns desses conceitos pode elucidar questões importantes para o conhecimento relacionado aos aspectos geobiológicos e paleontológicos da passagem do Proterozoico para o Fanerozoico. Em especial ao se trabalhar com formas fósseis de morfologia simples, ou cuja preservação e afinidade com outras formas biológicas (viventes e fósseis) não é compreendida de maneira clara em determinado estágio de evolução do conhecimento científico.

### 3. PALEOGEOBIOLOGIA DO EDIACARANO E O CONTEXTO DE PRESERVAÇÃO DE FÓSSEIS COM MORFOLOGIA DISCOIDE

#### 3.1. COMUNIDADES MICROBIAIS BENTÔNICAS E SUA INFLUÊNCIA NO DESENVOLVIMENTO DE ESTRUTURAS SEDIMENTARES EM SISTEMAS SILICICLÁSTICOS

Em sistemas deposicionais subaquosos siliciclásticos, carbonáticos ou evaporíticos modernos, marinhos e continentais, tais como sistemas estuários, lagunas, planícies de maré e lagos, é comum o desenvolvimento de comunidades microbiais bentônicas fotossintetizantes (NOFFKE et al. 2001, 2003, CUADRADO et al. 2014).

Ao longo da maior parte do Fanerozoico, contudo, a atuação de metazoários complexos, sejam eles bioturbadores ou consumidores primários, funcionou como fator inibidor para o desenvolvimento de comunidades microbiais bentônicas em ambientes de sedimentação convencionais (HAGADORN & BOTTJER, 1997, TU et al. 2016). Durante o Pré-Cambriano por sua vez, a ausência destes organismos permitiu a proliferação de extensas comunidades microbiais que recobriam o substrato de quase todos os ambientes aquáticos, marinhos dentro da zona fótica (BOSE et al., 2012).

A comunidade microbiana é caracterizada pela presença de substâncias poliméricas extracelulares (*Extracellular Polymeric Substances - EPS*), cuja consistência gelatinosa não apenas garante a fixação dos microrganismos no substrato, como possibilita sua estabilização e fixação do próprio sedimento, dificultando sua erosão por ondas ou correntes (PORADA & BOUOUGRI, 2007; CUADRADO et al., 2013).

Em sistemas siliciclásticos o modo como as comunidades microbiais influenciam a dinâmica sedimentar pode ser resumido de acordo com processos que 1) diminuem os efeitos da erosão, denominado 'Bioestabilização', 2) controlam a deposição de sedimentos, associados à 'Atenuação de corrente' (*Baffling*) e à 'Captura de grãos' (*Trapping*) ou ainda 3) se relacionam ao próprio crescimento da comunidade e ao 'Aprisionamento de grãos' (*Binding*) (NOFFKE et al. 2003, 2009).

A Bioestabilização caracteriza-se pela fixação do sedimento devido ao entrelaçamento dos filamentos microbiais e grãos sedimentares, além do envelopamento desses por EPS microbiana com propriedades adesivas. Dentre as feições desenvolvidas encontram-se bolsões de sedimento preservados dos processos erosivos dominantes em determinados contextos ("*Erosional pockets*", *sensu* Noffke 1999) (NOFFKE et al. 2003, 2009).

A 'Atenuação' de correntes unidirecionais ou oscilatórias (*Baffling*) associada à captura de grãos sedimentares (*Trapping*) marca o enriquecimento ativo dos depósitos em sedimento devido a ação da comunidade microbiana. Neste processo, estruturas filamentosas reduzem a velocidade de correntes

(moderadas a fracas) de fundo, induzindo a decantação de sedimentos finos em suspensão (p. ex. filossilicatos), que acabam presos pela trama microbiana rica em EPS (NOFFKE et al. 2003).

Em condições de pouco ou nenhum retrabalhamento e de menor energia no sistema, o crescimento e desenvolvimento das esteiras microbianas tornam-se os processos dominantes. Assim, predomina o aprisionamento de grãos sedimentares (*Binding*), anteriormente capturados pelos filamentos e EPS presentes e sua incorporação à trama da esteira ou biofilme microbiano (NOFFKE et al. 2009).

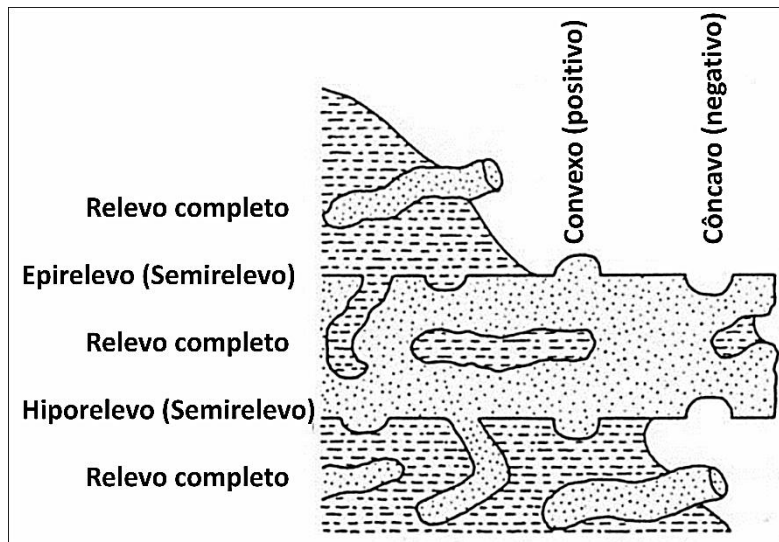
Como resultado da atuação desses processos, ou ainda da somatória deles, reconhece-se no registro geológico o desenvolvimento de estruturas sedimentares primárias denominadas como Estruturas Sedimentares Induzidas por atividade Microbiana (MISS – *Microbially Induced Sedimentary Structures*, sensu NOFFKE et al. 2001) (NOFFKE et al. 2001, 2009).

O reconhecimento de tais processos no registro por sua vez é feito com base em uma série de parâmetros que ateste sua biogenicidade (NOFFKE et al. 2009, GERDES et al. 2000).

De modo geral, tais estruturas são caracterizadas como superfícies com acentuado padrão de enrugamento conhecido como ‘Marcas Enrugadas’ (*wrinkle marks*). Tal padrão pode ser classificado de acordo com dois principais tipos morfológicos; ‘Estruturas do tipo *Kinneyia*’ (*Kinneyia-structures*) com o desenvolvimento de cristas sinuosas, com paralelismo dos eixos observados em certas porções da estrutura; e ‘Estruturas Favo de Mel’ (*Honeycomb-structures*), marcadas pela presença de distribuição poligonal de pequenas depressões ligeiramente alongadas (PORADA & BOUOGRI 2007, PORADA et al. 2008).

Outra forma expressa dentro da categoria de “Marcas Enrugadas” denomina-se ‘Pele de Elefante’ (*Elephant Skin*), caracterizada por padrão de enrugamento milimétrico, crenulado a reticulado, irregular e caracterizado pela presença de pequenas elevações ou protuberâncias semelhantes a pústulas (PORADA & BOUOGRI, 2007).

Essas feições se desenvolvem pela impressão, preservada em epi-relevo, ou hiporelevo dos padrões de estruturação (aspectos morfológicos originais) e deformação de esteiras microbianas, por correntes de fundo (unidirecionais ou bidirecionais) ou por processos pós deposicionais. A figura 1 resume de forma esquemática as diferentes formas de preservação de feições biogênicas em epi, hipo e endorelevo (relevo completo).



**Figura 1**– Resumo esquemático da preservação de estruturas sedimentares biogênicas e suas expressões nos planos de acamamento (epirelevo ou hiporelevo - semirelevos) e no interior de camadas sedimentares como feições tridimensionais (endorelevo - relevo completo). Traduzido de Ekdale et al. (1984) a partir de Seilacher (1964).

Outras estruturas podem ainda ser relacionadas a interação físico-microbiótica no ambiente sedimentar, tais como:

- Estruturas do tipo ‘*Arumberia*’: Estrutura caracterizada por padrão enrugado complexo nos planos de acamamento, com cristas subparalelas bem marcadas. Estas apresentam tendência a se ramificarem, produzindo cristas menos desenvolvidas de segunda ordem que podem ainda se ramificar em feições de terceira ordem. Tal padrão complexo de ramificação e que se repete em diferentes exemplares permitiu a interpretação destas estruturas como prováveis organismos multicelulares, tendo recebido nomenclatura taxonômica de gênero (*Arumberia*) e espécies (*A. vindhyanensis*, *A. banksi*, *A. usvaensis*, *A. multykensis*, *A. ollii*, *A. beckeri*). Contudo interpretações mais recentes apontam para uma origem microbial para estas feições, devendo representar exemplos não atualistas de comunidades microbiais complexas restritas ao Proterozoico (GLAESSNER & WALTER 1975, KOLESNIKOV et al. 2012).

- ‘Gretas poligonais’ em fácies arenosas (GPA) (*Polygonal Sand Cracks*): desenvolvidas em superfícies bioestabilizadas gretadas por ressecamento devido a exposição subaérea. Tal feição está intimamente relacionada ao aumento de coesão dos sedimentos arenosos, fornecido pelo EPS microbial bem como pela própria comunidade rica em estruturas filamentosas (NOFFKE et al. 2003, 2009; TU et al. 2016).

- ‘Domos de Gás’ (DG) (*Gas Domes*): estruturas circulares a subcirculares em planta, desenvolvidas sob superfícies bioestabilizadas, devido ao acúmulo de gases aprisionados sob espessa camada orgânica. Tal acúmulo é comumente relacionado a processos de degradação de matéria orgânica e produção de gases como metano (CH<sub>4</sub>), gás carbônico (CO<sub>2</sub>) e gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S),

impossibilitados de escapar para a atmosfera devido à resistência física apresentada por esteiras bem desenvolvidas (NOFFKE et al. 2003, 2009; TU et al. 2016).

- ‘Estruturas *Intrites*’ (EI) (*Intrites like structures – ILS sensu* MENON et al. 2016): Identificadas como diminutas estruturas discoides em planta, expressas nos planos de acamamento como feições em hiporelevo positivo com contrapartes em epirelevo negativo. Anteriormente descritas como macrofósseis pertencentes aos gêneros *Medusinites* e *Beltanelliformis* tais feições foram recentemente reinterpretadas como resultantes da interação entre processos de ejeção de sedimento (associada a processos de perda de água e gases em sedimentos finos e ricos em matéria orgânica) e esteiras microbiais bem desenvolvidas e substratos bioestabilizados (MENON et al. 2016a, b). A feição foi descrita na região de Shropshire, Inglaterra, no Supergrupo Longmyndian de idade ediacarana, representando resultados de processos intraestratais de escape e injeção de sedimento (MENON et al. 2016a).

Em associação aos padrões morfológicos supracitados, aspectos petrográficos foram apontados como critérios importantes para identificação de feições sedimentares desenvolvidas sob influência de atividade ou presença de comunidades microbiais (NOFFKE et al. 2009). Dentre esses aspectos, é possível citar:

- ‘Porosidade Esponja’ (PE) (*Sponge Pore fabric*): Textura caracterizada pela distribuição regular de pequenas cavidades, paralelas ao plano de acamamento e por vezes conectadas. Desenvolve-se comumente em determinados níveis em intercalação com laminais de origem orgânica (biolaminitos). Tal textura está intimamente associada a difusão de gases resultantes da degradação de matéria orgânica. A presença de esteiras microbiais e biofilmes soterrados por sua vez diminui a velocidade de difusão dos gases, dificultando a migração vertical dos mesmos e consequente escape. Como resultado gases se acumulam em poros cujo arranjo textural apresenta semelhanças com disposição de elementos esqueléticos em Poríferas (esponjas) (NOFFKE et al. 1996, GERDES et al. 2000). Tal textura apresenta gênese associada aos mesmos processos que resultam no desenvolvimento de ‘Domos de Gás’ e ‘Estruturas *Intrites*’.

- Orientação de grãos sedimentares paralelamente ao plano de acamamento: Em esteiras microbiais bem desenvolvidas, é comum observar a presença de grãos sedimentares totalmente manteados ou envelopados por biofilme, células filamentosas e EPS. Tal envelopamento resulta em grãos emersos em uma matriz orgânica que, ao ser degradada, gera espaço para rearranjo dos grãos. Esses por sua vez tendem a se reorientarem com os eixos maiores paralelos ao acamamento durante a compactação (NOFFKE et al. 2003).

- Filmes e lâminas ricas em argilominerais e/ou minerais opacos: Em depósitos identificados como biolaminitos, a presença de lâminas de minerais pesados tais como óxidos/hidróxidos de ferro, ou mesmo sulfetos de ferro tem se mostrado comum. Tal associação é interpretada como resultado



de processos eodiagênicos em microambientes redutores, devido a degradação de matéria orgânica em esteiras soterradas e mortas. Nesse modelo, filmes ricos em sulfetos marcariam antigas superfícies colonizadas, posteriormente oxidadas para óxidos ou hidróxidos (TU et al. 2016, LIU 2016). Lâminas ricas em argilominerais (dentre eles esmectita e illita, como observado por CALLOW & BRASIER 2009, TU et al. 2016, respectivamente) de forma semelhante, parecem estar associadas a diminuição no pH devido às reações metabólicas de bactérias heterotróficas redutoras de sulfato presentes na estrutura da comunidade microbiana (CALLOW & BRASIER 2009, MENON et al. 2016, TU et al. 2016, LIU 2016, YANG et al. 2016). Nesse cenário, filmes de argilominerais autigênicos, associados à outras feições tipicamente microbianas, podem ser indícios de antigas comunidades microbianas mineralizadas durante a eodiagênese (CALLOW & BRASIER 2009).

Quando observadas uma ou mais dessas feições morfológicas, texturais, mineralógicas e diagenéticas constituem importantes evidências da presença ou influência de comunidades microbianas em sistemas siliciclásticos.

### 3.2. REGISTRO FÓSSIL DE MACROBIOTAS EDIACARANAS DE CORPO MOLE

O registro fóssil de organismos ediacaranos é excepcional, tanto pela disparidade morfológica dos fósseis quanto pela predominância de organismos de corpo mole, comumente preservados em posição de vida. Essas características revelam condições tafonômicas especiais, aparentemente restritas ao pré-cambriano ou extremamente raras durante o Éon Fanerozoico (NARBONNE 2005; MCCALL 2006; BOTTJER & CLAPHAM 2006).

Por sua natureza única, as assembleias fósseis deste período geológico são consideradas por alguns autores como verdadeiros *Konservat Lagerstätten* (*sensu* SEILECHER, 1970), uma vez que ocorrem preservados os moldes e impressões dos tecidos moles de organismos bentônicos, comumente associados a fácies sedimentares siliciclásticas (NOFFKE et al., 2003; NARBONNE, 2005; BOTTJER & CLAPHAM, 2006).

Dentre os principais fatores que condicionaram este tipo de preservação, é possível citar a estrita associação desses organismos fósseis com eventos episódicos de soterramento rápido (tais como tempestades) ou depósitos de cinzas vulcânicas (GEHLING, 1999; BOTTJER & CLAPHAM, 2006). Além disso, em muitos casos, a presença de extensa cobertura por esteiras microbianas parece ter influenciado processos eodiagênicos, facilitando a preservação destes organismos (CALLOW & BRASIER, 2009; GEHLING & DROSER, 2009; LIU, 2016).

Nestes casos, é possível que processos envolvendo a degradação da matéria orgânica presente nas esteiras e a precipitação de sulfetos sob condições redutoras, tenha sido fundamental para a

preservação dos moldes e impressões dos elementos dessas macrobiotas (GEHLING, 1999; NARBONNE, 2005; LIU, 2016).

Na tentativa de classificação das ocorrências fósseis em termos de suas características taxonômicas, bioestratigráficas, tafonômicas, e paleogeográficas, essas foram divididas em assembleias cujos nomes refletem as localidades onde foram originalmente descritas. Assim sendo, destacam-se as assembleias denominadas de *Avalon*, *White Sea* e *Nama* (NARBONNE, 2005; BOTTJER & CLAPHAM, 2006).

O termo *Biota de Ediacara* (ou ainda *Biota Ediacarana*, *Fauna de Ediacara* ou *Fauna Ediacarana*) foi cunhado para se referir ao grupo de organismos macroscópicos encontrados em rochas do Proterozoico terminal na região de Ediacara, na Austrália, apesar de também ocorrerem em outras localidades.

Como discutido por McGabhann (2014), ao longo do tempo o termo foi usado de forma inconsistente, perdendo qualquer significado que justificasse seu emprego. Segundo este autor, qualquer afinidade, ou unidade (biológica, tafonômica, estratigráfica ou geográfica) indicada pela terminologia empregada, seria falsa da maneira como foi utilizada originalmente na literatura.

Dessa maneira, MacGabhann (2014) sugere que o termo “*Biota Ediacarana*” seja utilizado com significado puramente cronoestratigráfico, evitando assim arbitrariedades no que se refere à afinidade filogenética entre os organismos, preservados das mais variadas formas em diversas regiões do mundo. Assim, todos os fósseis contidos em rochas com idades ediacaranas estariam inclusos nessa classificação.

### 3.2.1. MACROORGANISMOS EDIACARANOS COM MORFOLOGIA DISCOIDE

Dentre os fósseis mais comuns encontrados em assembleias fósseis ediacaranas, encontram-se estruturas de morfologia discoide que no passado foram identificadas como impressões de organismos medusoides, pertencentes a cnidários da Classe Scyphozoa (SPRIGG, 1947; WADE, 1969, 1972; SUN, 1986).

Entretanto, em certas localidades, fósseis discoides ocorrem associados a estruturas frondosas, bilaterais e comumente ramificadas em padrão fractal, ocasionalmente conectadas aos discos (FORD, 1958; HOYAL CUTHULL & MORRIS, 2014). Tal associação entre discos e frondes é morfologicamente semelhante ao observado em cnidários penatúláceos modernos, apesar de estes dois grupos não serem diretamente relacionados. Essa comparação permitiu a diversos autores interpretar parte dos fósseis discoides como estruturas de fixação destes organismos ao substrato (*holdfasts*) (FORD, 1958; MCCALL, 2006; ANTCLIFFE & BRASIER, 2007; HOYAL CUTHILL & MORRIS, 2014).

A falta de análogos modernos, de modelos preservacionais e a alta variedade de formas (grande disparidade morfológica em relação à diversidade) dificultaram por muito tempo o agrupamento destes organismos em táxons bem estabelecidos. Dentre as propostas mais recentes, encontra-se a utilização do termo *Aspidella* como um *plexus* que reúne diferentes morfotipos tafonômicos com provável afinidade filogenética (GEHLING et al., 2000).

A ideia apresentada por Gehling et al. (2000) trouxe uma outra perspectiva à discussão do real significado de discos ao longo do Ediacarano. Segundo os autores, a diversidade de formas discoides no registro, comumente classificadas como uma série de táxons, de acordo com o local em que ocorrem e suas características morfológicas, representam na realidade diferentes modos de preservação (variações tafonômicas) de um mesmo grupo de organismos.

Estudos mais recentes, contudo, sugerem cautela na interpretação de inúmeras formas discoides como pertencentes ao mesmo grupo de organismos dentro de um único *plexus*. Chama-se atenção, por exemplo para a diversidade de formas que poderiam não representar estruturas fixadoras de organismos portadores de penas e frondes (MACGABHANN, 2007).

Além disso, deve-se considerar a morfologia relativamente simples destas estruturas que podem ser confundidas com estruturas inorgânicas, tais como concreções, estruturas de escape de fluido, vulcões de areia, entre outras formas resultantes de processos abióticos (SUN, 1986; VAN LOON, 2008; MENON et al., 2015, 2016).

### 3.2.2. MODELOS TAFONÔMICOS E A ORIGEM DE *LAGERSTÄTTEN* EDIACARANOS

No que se refere à preservação de organismos de morfologia discoide em contexto siliciclástico, foram adotados nesse trabalho três modelos principais, de acordo com a revisão e simplificação proposta por Macgabhann (2007): Estilo “*Conception*”, Estilo “*Death Mask*” (“Máscara da Morte”) e Estilo “*Gravity Cast*” (Preenchimento gravitacional).

*Estilo Conception* – Identificado exclusivamente no Grupo *Conception* na região de Newfoundland, Canadá, e na sucessão *Charnwood* na Inglaterra, esse estilo de preservação está relacionada ao soterramento de comunidades bentônicas inteiras sob camadas de cinzas vulcânicas (Fig. 2-1a). Nesse contexto, o rápido soterramento associado a cimentação precoce das partículas de origem vulcânica tornaram possível o desenvolvimento de moldes da superfície superior de organismos com estruturas de fixação (*holdfasts*) discoide, membros de comunidades da semi-infauna rasa (Fig. 2-1b). Assim, durante a compactação, as estruturas orgânicas moldadas em superfícies mineralizadas foram preenchidas por material sedimentar proveniente da camada sotoposta. Dessa forma, tem-se como resultado assembleias fósseis preservadas como moldes em epirelevo positivo (SEILACHER 1992; NARBONNE 2005; MACGABHANN 2007) (Fig.2-1c).

*Estilo “Death Mask”* – Comumente presente nas Assembleias White Sea, Federação Russa, tal estilo tafonômico é caracterizado pela preservação dos moldes externos de organismos como epirelevo positivo ou hiporelevo negativo, na base de camadas depositadas em eventos episódicos (Fig. 2-2a). Como sugerido por Gehling (1999), a preservação de macrorganismos nesses modos pode ser explicada pela presença de esteiras microbiais nos substratos nos quais viviam essas comunidades. De acordo com o autor, após rápido soterramento, a degradação da matéria orgânica presente nas esteiras criaria condições redutoras, influenciando a precipitação de sulfetos em estágios eodiagénéticos (Fig. 2-2b). Assim, a rápida litificação da base da camada sobreposta às comunidades bentônicas condicionaria a formação de moldes de sua superfície superior e seu preenchimento pelo sedimento sotoposto (GEHLING 1999) (Fig. 2-2c).

Este estilo de preservação é comumente associado a organismos com planos corpóreos mais complexos, tais como os gêneros *Dickinsonia* e *Yorgia*, com corpos segmentados e com indícios de cefalização. Contudo, a preservação de organismos discoides preservados dessa forma em algumas ocorrências indica que tal estilo não deve ser ignorado como mecanismo de preservação de formas mais simples (HOFMANN 1981; GEHLING 1999; MACGABHANN 2007).

*Estilo “Gravity Cast” (Preenchimento por gravidade)* – Em sua proposição para o estilo de preservação “*Death Mask*”, Gehling (1999) considerou a influência de comunidades microbiais, mas também a resistência ao colapso e compactação dos integumentos constituintes dos macrorganismos. Assim, organismos menos resistentes, apresentariam a tendência a terem suas estruturas colapsadas em estágios anteriores a litificação eodiagénética. Assim, ocorreria a moldagem de suas superfícies superiores por sedimento proveniente de sedimentação ou compactação (efeitos de gravidade), desenvolvendo fósseis em hiporelevo positivo (ou contrapartes).

Esse é o caso da grande maioria dos organismos discoides presentes nas assembleias White Sea e parte das assembleias Avalon, nas quais esses ocorrem preservados como moldes externos, compostos ou internos em epirelevo negativo ou hiporelevo positivo na base de camadas de eventos episódicos. Em todos os casos, a presença de comunidades microbiais bentônicas parece ter desempenhado papel importante para a preservação dessas formas. Contudo, a complexidade tafonômica observada e demonstrada por Tarhan et al (2010, 2015), justifica a separação deste modo de preservação daquele assinalado como “*Death Mask*” por Gehling (1999), como sugerido por Macgabhann (2007) e denominado “*Gravity Cast*” (preenchimento por gravidade).

As principais variedades tafonômicas observadas podem ser explicadas de acordo com três diferentes cenários:

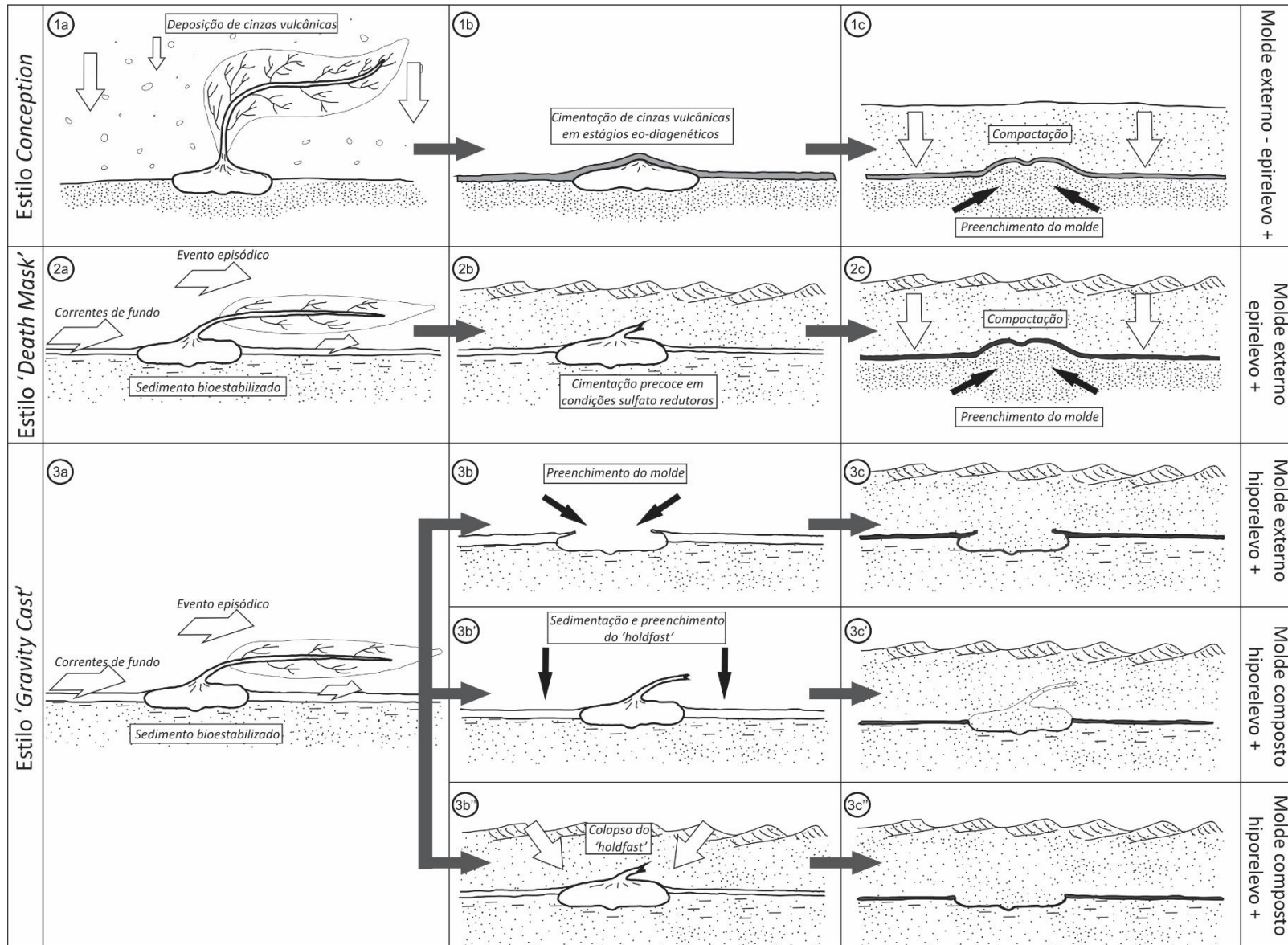
- a) O organismo com sua base de fixação parcialmente enterrada no sedimento bioestabilizado e recoberto por comunidades microbiais é arrancado do substrato devido a ação de correntes em evento de alta energia (Fig.2-3a). Porém, a coesão fornecida pelas esteiras de

microorganismos permite a retenção de um molde externo a superfície inferior do organismo (Fig.2-3b). Tal molde seria então preenchido por sedimento seja do próprio evento energético que atuou no ambiente, seja pela sedimentação do dia-a-dia. O fóssil resultante é caracterizado como um molde externo em hiporelevo positivo (ou eventual contraparte) (TARHAN et al. 2015) (Fig.2-3c). Contudo, tal modo de preservação apresenta grande afinidade com estilos preservacionais descritos para traços de repouso de cnidários fanerozoicos da ordem Actiniaria (discutidos na próxima sessão) (SEILACHER 2007) (Fig.2-3a).

- b) A base fixadora do organismo parcialmente enterrada quando em vida teria parte da haste que a conecta à estrutura frondosa rompida durante evento episódico (Fig.2-3a' e 3b'). Tal rompimento seria sucedido pelo soterramento e preenchimento de espaços vazios internos do indivíduo por sedimento proveniente da sedimentação episódica ou normal (Fig.2-3c'). Tal modelo, explicaria o desenvolvimento de raros relevos (parcialmente) completos (“*full reliefs*”), com partes de hastes de frondes preservadas tridimensionalmente no sedimento sobreposto aos fósseis (TARHAN et al. 2015).
- c) Um organismo nos moldes do exemplo anterior é morto e totalmente soterrado durante um evento episódico (Fig.2-3a'' e 3b''). Após a morte do indivíduo e perda de fluidos, seus integumentos seriam facilmente colapsados pelo peso do sedimento recentemente depositado, desenvolvendo um molde composto do corpo do organismo, preservado em hiporelevo positivo (ou eventual contraparte) (TARHAN et al. 2010, 2015) (Fig.2-3c'').

A ocorrência de cada um dos cenários a, b ou c, seria determinada por uma série de fatores. Entre eles, é possível citar a espessura ou grau de desenvolvimento da comunidade microbial em relação às dimensões do organismo. Esse fator poderia ser responsável pela resistência oferecida pelo substrato (bioestabilizado) à extração/remoção do organismo durante um evento de alta energia (a). Tal fator pode ainda estar relacionado a resistência ao colapso da estrutura parcialmente enterrada (b e c) ou aspectos relacionados à fisiologia e propriedades histológicas dos tecidos (ou tegumentos) que compunham originalmente o organismo (TARHAN et al. 2015).

Os modelos tafonômicos apresentados são resumidos na Figura 2.



**Figura 2** - Principais modelos tafonômicos para a preservação de *holdfasts* discoides de organismos ediacaranos. Baseado em Gehling (1999), Narbonne (2005), Macgabhann (2007) e Tarhan et al. (2015).

#### 4. ESTRUTURAS SEDIMENTARES DISCOIDES NO REGISTRO GEOLÓGICO

Estruturas sedimentares com morfologia discoides desenvolvem-se comumente em diferentes ambientes sedimentares, passados e modernos. No registro geológico, tais feições podem ser encontradas do Éon Proterozoico, até os mais recentes períodos da Era Cenozoica. De fato, o olhar atento em sistemas deposicionais modernos revelaria o desenvolvimento de tais estruturas nesse exato momento (CALLOW et al. 2011, EL ALBANI et al. 2014, TAJ et al. 2014, DAVIES et al. 2016).

Quanto à sua formação ou desenvolvimento, é possível apontar processos responsáveis tão variados quanto os ambientes ou contextos sedimentares nos quais são encontradas essas feições. Dentre suas possíveis gêneses, podemos incluir marcas de gotas de chuva, estruturas de escape de gás ou fluido, feições de liquefação ou sobrecarga, icnofósseis, estruturas microbialmente induzidas, macrofósseis, além de concreções e outras estruturas desenvolvidas em diferentes estágios da diagênese (WESTON 1891, ALPERT 1973, MOUSSA, 1974, METZ 1981, GEHLING et al. 2000, KAHLE, 2009, PICKERILL & HARRIS 1979, PICKERILL 1984, SUN 1986, GRAZHDANKIN & GERDES 2007, NOFFKE et al. 2009, CALLOW et al. 2011, HAGADORN & MILLER 2011, VAN LOON & MAULIK 2011, TAJ *et al.* 2014, TARHAN et al. 2015, ANDERSON et al. 2016, DAVIES et al. 2016, MENON et al., 2015, 2016, TU et al. 2016).

No que concerne ao registro Pré-Cambriano, a profunda influência exercida por ecossistemas microbiais bentônicos na dinâmica e processos sedimentares, desempenhou papel fundamental no desenvolvimento e preservação de uma gama de estruturas sedimentares (HAGADORN & BOTTJER 1997, NOFFKE et al. 2001, 2009, BOTTJER & CLAPHAM 2006). Não surpreendentemente, um grande número de feições morfológicamente complexas é encontrado no registro proterozoico, devido a distribuição não uniformitária de comunidades microbiais bentônicas em uma série de sistemas deposicionais (JENSEN et al. 2005).

Tendo em vista o enfoque deste trabalho, não serão abordadas feições desenvolvidas em condições de exposição subaérea, tais como marcas de gota de chuva, facilmente descartadas após a análise sedimentológica dos estratos em que se encontram as formas ora estudadas. Restam, portanto, quatro grandes grupos de estruturas/feições: 1) Feições produzidas pela interação fluido-sedimento (envolvendo processos de liquefação e fluidificação); 2) traços fósseis; 3) macrofósseis (apresentados como parte do contexto paleobiológico do Ediacarano na seção 3.2.); e 4) feições pós-deposicionais (associados a eodiagênese).

#### 4.1. TRAÇOS FÓSSEIS NO REGISTRO SEDIMENTAR E O DESENVOLVIMENTO DE FEIÇÕES DISCOIDES

A interação entre organismos e o substrato por eles ocupados tem como resultado o desenvolvimento de uma categoria própria de estruturas sedimentares primárias de caráter biogênico, conhecidas como icnofósseis. Tais estruturas podem ser expressas como traços, pistas, perfurações entre outras de complexidade variada, refletindo aspectos comportamentais (etológicos) dos organismos responsáveis por seu desenvolvimento (deslocamento, alimentação, fuga, habitação, etc.) (MACEACHERN et al. 2011).

A paleoicnologia é a ciência responsável pelo estudo de tais estruturas preservadas no registro fóssil, sendo essa uma ferramenta de grande importância para análises faciológicas, bioestratigráficas e paleoambientais (SEILACHER 2007; MACEACHERN et al. 2011). Isso ocorre devido a sensibilidade acentuada dos organismos bentônicos a condições ambientais, cujas variações muitas vezes não se refletem no desenvolvimento de estruturas sedimentares de origem exclusivamente física. Condições essas, tais como níveis de oxigenação, disponibilidade de nutrientes, turbidez da água, salinidade, aporte sedimentar, entre outras que controlam a associação de organismos bioturbadores presentes no ambiente (MACEACHERN et al. 2011).

Outro aspecto importante, relaciona-se ao fator bioestratigráfico, uma vez que os tipos de marcas e as associações de icnofósseis variam ao longo de estratos com diferentes idades, refletindo às modificações evolutivas sofridas por diferentes grupos de organismos ao longo do tempo geológico (BUATOIS et al. 2005; MACEACHERN et al. 2011).

Como resultado direto e intuitivo dessa relação, a distribuição de traços fósseis apresenta-se restrita ao Fanerozoico e à parte terminal do Período Ediacarano (mais recentes que 560Ma), intervalo de tempo no qual surgiram e se desenvolveram metazoários complexos, relativamente grandes e capazes de locomoção e interação com o substrato (segundo uma interpretação conservativa do problema como abordado por Jensen et al. 2005) (JENSEN et al. 2005; MANGÁNO & BUATOIS 2016).

Contudo, independentemente do grau de confiança de ocorrências de traços fósseis com mais de 560 Ma, é possível afirmar que o registro paleoicnológico se inicia de forma contundente no final do Neoproterozoico (JENSEN et al. 2005). Este é então caracterizado por traços simples nos planos de acamamento produzidos por organismos adaptados aos microecossistemas controlados por comunidades microbiais bentônicas, alimentando-se e locomovendo-se sobre, ou sob, esteiras de cianobactérias (SEILACHER 1999). Perfurações verticais com idade ediacarana são raras, ocorrendo como tubos milimétricos (2 a 11 mm), pouco profundos comumente identificados como pertencentes ao icnogênero *Skolithos* (ALPERT 1975, JENSEN et al. 2005, 2006, SELECHER et al. 2005). Contudo, tais ocorrências são consideradas em muitos casos duvidosas, interpretadas como feições



de escape de fluidos, caracterizando pseudofósseis (JENSEN et al. 2005, 2006, SELECHER et al. 2005).

Durante o Cambriano tem-se o aparecimento de novos grupos de metazoários ou diversificação de grupos evoluídos durante o Proterozoico, entre eles o clado Bilateria de organismos triploblásticos e cefalizados, representantes da quase totalidade de filos animais conhecidos (MARSHALL 2006, ERWIN et al. 2011). Com eles, diversificam-se padrões de interação ecológica tais como herbivoria e predação ativa e passiva, que funcionaram como importantes mecanismos de pressão evolutiva que culminaram com o desenvolvimento de incontáveis estratégias adaptativas que podem ser exemplificadas por: 1) diversificação de processos de esqueletogênese, associada à proteção, 2) exploração do substrato como estratégia de fuga ou busca por nutrientes (aparecimento de organismos escavadores), 3) diversificação de aparatos de captura de alimento, entre outras (MANGÁNO & BUATOIS 2016).

Em termos de estratégias adaptativas, a exploração do substrato permitiu a ocupação de nichos ecológicos anteriormente inexplorados, resultando em profundas mudanças em termos da distribuição de comunidades microbiais bentônicas (até então dominantes em fundos marinhos) (BOTTJER et al. 2000; MANGÁNO & BUATOIS 2016). Com a destruição de esteiras microbiais por consumidores primários, ou pela remobilização de sedimentos, trocas químicas entre a coluna d'água e o substrato tornaram-se possíveis, permitindo a circulação de oxigênio e nutrientes (MANGÁNO & BUATOIS 2016). O conjunto dessas transformações ambientais, com profundas implicações para a estruturação dos ecossistemas fanerozoicos, foi denominada por Seilacher & Pflüger (1994 *apud* Seilacher 1999) como *Revolução Agronômica Cambriana*, ou ainda *Revolução Cambriana do Substrato*, segundo Bottjer et al. (2000).

Ao longo do Fanerozoico, a diversidade de organismos bentônicos em ambientes marinhos com diferentes estratégias de sobrevivência é refletida em uma ampla assembleia de traços fósseis preservados no registro sedimentar. Dentre as inúmeras formas resultantes listam-se aqui exemplos de traços fósseis produzidos por invertebrados cuja morfologia expressa-se no plano de acamamento, como estruturas discoides, circulares ou com padrão radial de simetria. Ao serem consideradas expressões dessa morfologia específica, destaca-se os processos etológicos relacionados ao repouso, moradia e busca ou obtenção de alimento. Entre elas, cita-se o icnogênero *Bergaueria*, com distribuição stratigráfica desde o Cambriano inferior, apresenta ampla ocorrência no Paleozoico. Os icnofósseis são caracterizado por perfurações verticais pouco profundas, cilíndricas ou hemisféricas e circulares em planta, preservadas em hiporelevo positivo. Sua porção central, levemente aplainada é marcada por suave depressão ou invaginação, sendo comuns estrias radiais e concêntricas (Fig. 3-A) (ALPERT 1973; SEILACHER 2007). *Bergaueria* é interpretado como a réplica de perfurações produzidas por antozoários das ordens Actiniaria e mais raramente Pennatulacea, ao se fixarem

ativamente no substrato, por meio de movimentos produzidos por contração e relaxamento muscular (SEILACHER 2007). Após evento de alta energia, o qual soterra e mata os organismos, a decomposição dos mesmos é seguida pelo preenchimento do espaço vazio deixado pelo molde de seus corpos por material arenoso da camada sobreposta (ALPERT 1973).

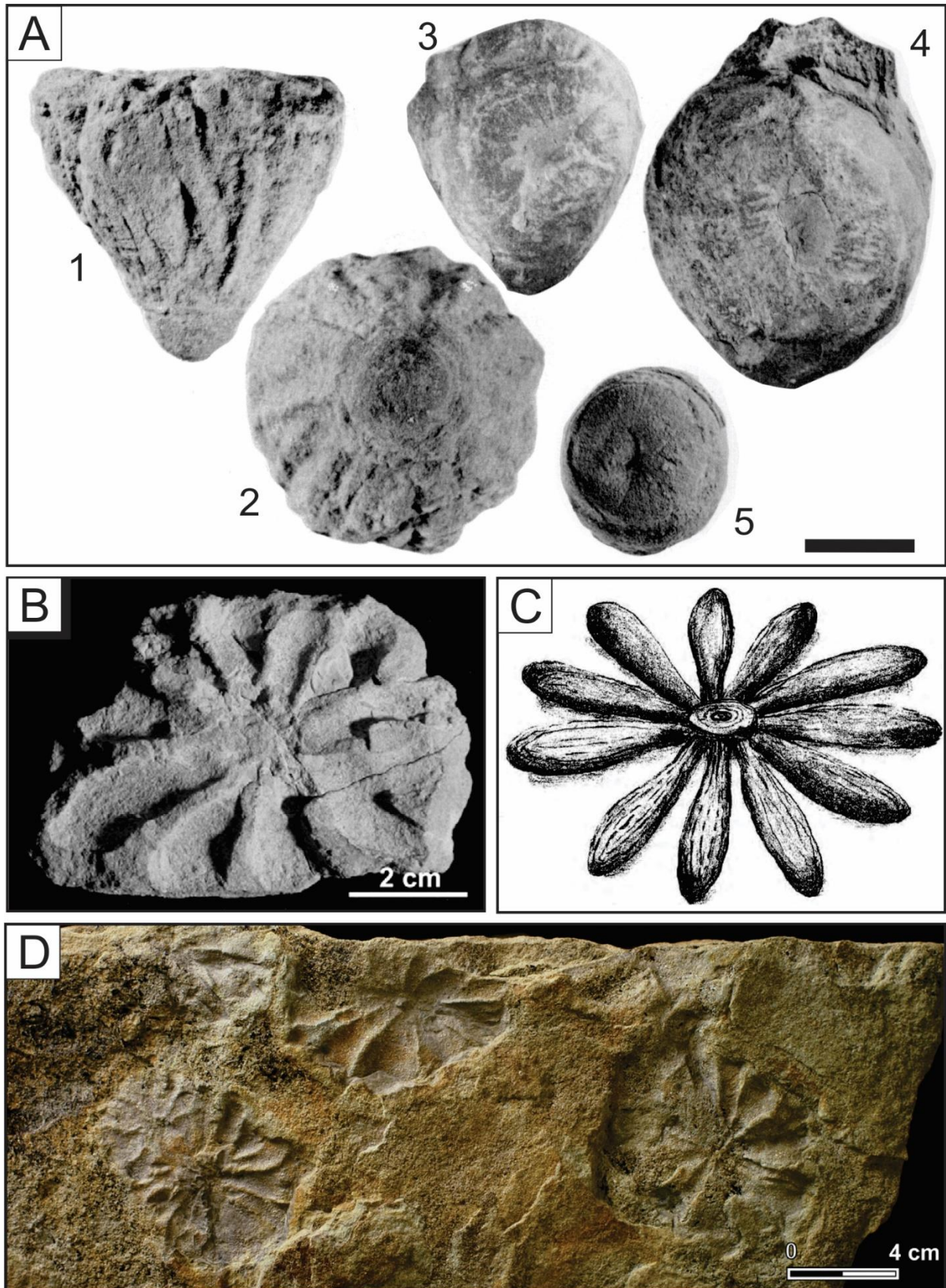
Entre outros icnogêneros associados a perfurações produzidas por actiniários, encontram-se *Astropolichnus*, *Conostichus* (Fig. 3-A), *Solicyclus* e *Kulindrichinus* sendo os três primeiros caracterizados por estrias radiais mais expressivas e melhor desenvolvidas do que aquelas observadas em *Bergaueria*. *Kulindrichinus*, juntamente com *Solicyclus* apresenta ocorrência no Jurássico, caracterizando exceções à comum distribuição paleozoica de traços fósseis de antozoários (SEILACHER 2007).

Em relação perfurações associadas à obtenção de alimento, cita-se aqui a ocorrência de tubos produzidos por organismos detritívoros, que se alimentam de nutrientes presentes no sedimento. Dentro dessa categoria encontram-se organismos construtores de túneis verticais no substrato, que culminam nos planos de acamamento em redes de galerias em padrões radiais e geometrias variadas, classificadas em icnologia como Asterosomideos (SCHLIRF 2000; SEILACHER 2007).

A interpretação para esse grupo de icnofósseis é a de que o organismo produtor dessa feição após se alimentar do sedimento deslocaria os resíduos para trás e para fora em bulbos ou bolsões de material arenoso em padrão radial. Dentre inúmeras icnoespécies e icnogêneros descritos e interpretados como expressões desse comportamento, *Asterosoma radiceforme* (Jurássico superior, possível sinonímia de *Asterichnus* isp.) (Fig. 3 – B e C) é aquele que apresenta padrão mais simples, com morfologia semelhante a estrelas, cujos ramos se distribuem radialmente em torno da abertura do tubo (SCHLIRF 2000; SEILACHER 2007).

Outro importante grupo a ser mencionado refere-se a Gyrophyllitideos, cuja morfologia assemelha-se àquela dos Asterosomideos em termos de seu aspecto estelar e radial. No entanto o preenchimento ativo dos lobos radiais com resíduos de processos alimentares é feito com material argiloso, ocorrendo com frequência como feições em endorelevo, na interface entre fácies argilosas e arenosas (Fig. 3 – D) (SEILACHER 2007; STRZEBÓNSKI & UCHMAN 2015)

Comuns em fácies marinhas profundas, Gyrophyllitideos agrupam numerosos icnogêneros, muitos dos quais com problemas de identificação e representantes de prováveis sinonímias. Essa categoria de icnofósseis, contudo, tem ampla distribuição com ocorrências paleozoicas, sendo mais comum ao longo do Mesozoico e parte do Cenozoico (HANTZCHEL 1975; SEILACHER 2007; STRZEBÓNSKI & UCHMAN 2015).



**Figura 3** – Icnofósseis com morfologia discoide ou radial. A – 1 e 2 - Exemplos de *Conostichus* isp. (1 – vista lateral; 2 – vista inferior), 3, 4 e 5 – Exemplos de *Bergaueria radiata* (ALPERT 1973). B – *Asterosoma* isp. (PHILIPS et al. 2011). C – Ilustração de *Asterosoma* (SCHILIRF 2000). D – Exemplos de *Gyrophyllites* isp. (STRZEBÓNSKI & UCHMAN 2015). Escalas: A: 1cm; B: 2 cm; C: fora de escala

#### 4.2. PROCESSOS DE LIQUIDIFICAÇÃO E O DESENVOLVIMENTO DE ESTRUTURAS DE ESCAPE DE FLUIDO

Depósitos sedimentares compostos por grãos com dimensões entre silte grosso e areia média apresentam considerável resistência a esforços realizados sobre eles na forma de carga devido ao atrito existente entre os grãos que o compõem (resistência ao cisalhamento). Tal característica confere a sedimentos clásticos não coesos, propriedades reológicas semelhantes às aquelas apresentadas por sólidos convencionais (ALLEN 1982a). Contudo, modificações em parâmetros como a pressão dos fluidos presentes entre os grãos do sedimento, podem fazer com que este se comporte como um fluido de alta viscosidade, fenômeno denominado liquidação (LOWE 1975; ALLEN 1977, 1982a).

Tal fenômeno é produzido por efeito dos processos de liquefação e fluidificação, sendo ambos relacionados às interações físicas entre os grãos sedimentares e os fluidos presentes em seus interstícios, notavelmente água ou gás (LOWE 1975). A liquefação caracteriza-se pela ruptura temporária das relações texturais entre os grãos de modo que estes perdem sua resistência a esforços cisalhantes e passam a ser sustentados pelo fluido presente entre eles. Tal processo associa-se primariamente ao colapso de sedimentos com empacotamento aberto, ou ainda um aumento na pressão dos fluidos intersticiais nos quais o sedimento encontra-se saturado, devido a atuação de esforços (comumente na forma de repetidos pulsos) sobre ele (LOWE 1975; ALLEN 1982a, b).

Dentre os mecanismos apontados como desencadeadores de processos de liquefação, é possível citar o impacto de ondas de tempestade (ALFARO et al. 2002), tsunamis (MATSUMOTO 2008), esforços produzidos por oscilações de marés (GREB & ARCHER 2007), sobrecarga sedimentar (MORETTI et al. 2001), glaciectônica (HARRIS et al 2000), ondas de choque produzidas por abalos sísmicos de origem tectônica (ALLEN 1986) ou relacionados a impactos de meteoritos (ALVAREZ et al. 1998), entre outros.

A fluidificação por sua vez, é caracterizada pela perda de sustentação dos grãos devido ao efeito da migração de fluidos de forma ascendente através de sedimentos inconsolidados, que acaba por equilibrar a força descendente da gravidade atuante sobre o material (LOWE 1975, ALLEN 1984).

Esse processo é comumente associado a entrada ativa de fluidos no sedimento, associada por vezes a dinâmica de águas subterrâneas (GUHMAN & PEDERSON 1992) ou ainda relacionada à fluidos de origem vulcânica e hidrotermal (JAMTVEIT et al. 2004) ou possivelmente à exudação de hidrocarbonetos (MATOS et al. 2017).

Contudo, os dois processos comumente podem ocorrer juntos, sendo usual que, após evento de liquefação, o rearranjo dos grãos para condições de empacotamento mais fechado tenha como resultado a expulsão de água dos poros do sedimento. Esse efeito pode produzir horizontes fluidificados no topo de camadas anteriormente liquefeitas, com a produção de estruturas típicas dos dois fenômenos (LOWE 1975; OWEN & MORETTI 2011).

As estruturas resultantes são caracterizadas como estruturas de deformação sinsedimentar, sendo a maioria delas consequência direta da liquefação de massas sedimentares tais como: laminação convoluta, estruturas em prato e pilar (*dish-and-pillar*), estruturas de carga (*load casts*), estruturas “*ball-and-pillow*”, dobras, falhas sinsedimentares, entre inúmeros outros exemplos que não serão detalhados nesse trabalho (ALLEN 1982b).

Dentre as estruturas produzidas por processos de fluidificação, encontram-se diques e sills clásticos, condutos (*pipes*), vulcões de areia e outras feições categorizadas como estruturas de escape de fluido (LOWE 1975).

Como feições de ejeção de sedimento fluidificado, vulcões de areia expressam-se na interface água-sedimento, como estruturas de geometria circular ou discoide em planta, com tendência a geometria cônica ou dômica, variando entre dimensões subcentimétricas a métricas (LOWE 1975; VAN LOON & MAULIK 2011; RODRIGUEZ-PASCOA et al. 2012; REID et al. 2012; PÕLDSAAR & AINSAAR 2014).

Em sistemas deposicionais modernos, estruturas de escape de fluido tais como vulcões de areia têm sido descritas como resultado direto da fluidificação de sedimentos como consequência de abalos sísmicos. Nesses casos, desenvolvem-se comumente dezenas a centenas de estruturas, com formato cônico, atingindo por vezes até 5 m de diâmetro (RODRIGUEZ-PASCOA et al. 2012; REID et al. 2012). Tais feições, cujo desenvolvimento ocorre simultaneamente aos eventos sísmicos, tende a desaparecer com frequência em poucos dias em ambientes costeiros, devido ao retrabalhamento por ondas ou correntes de maré, a menos que sejam rapidamente soterrados, apresentando assim baixo potencial de preservação (REID et al. 2012; REID, comunicação pessoal).

Tais observações direcionam grande parte das interpretações feitas em relação a presença dessas feições no registro geológico. De fato, vulcões de areia e outras estruturas de escape de fluido (como “*pipes*” e diques clásticos) ocorrem comumente associados a outras feições de deformação sinsedimentar e são interpretados como de origem sísmica (PRINGLE et al 2007; VON LOON & MAULIK 2011; PÕLDSAAR & AINSAAR 2014).

Em estratos pré-cambrianos, como apresentado na Seção 3.1 a presença de extensa cobertura dos substratos marinhos por comunidades microbiais bentônicas deve influenciar em determinados níveis tanto a gênese de fluidos, quanto aos padrões de migração e aprisionamento deles abaixo de esteiras microbiais (TAJ et al. 2014). Nesse contexto, a migração de gases provenientes da decomposição de matéria orgânica e processos fotossintéticos se dá comumente por meio de lenta percolação (*seeping*), cuja expressão em superfície ocorre comumente como domos de gás, ou pequenas pústulas com dimensões subcentimétricas ou mesmo milimétricas (DAVIES et al. 2016). No registro, tais feições são descritas como parte do grande grupo de outras estruturas sedimentares induzidas por atividade microbial (CALLOW et al. 2011; TU et al. 2015; YANG et al. 2016; DAVIES et al. 2016).

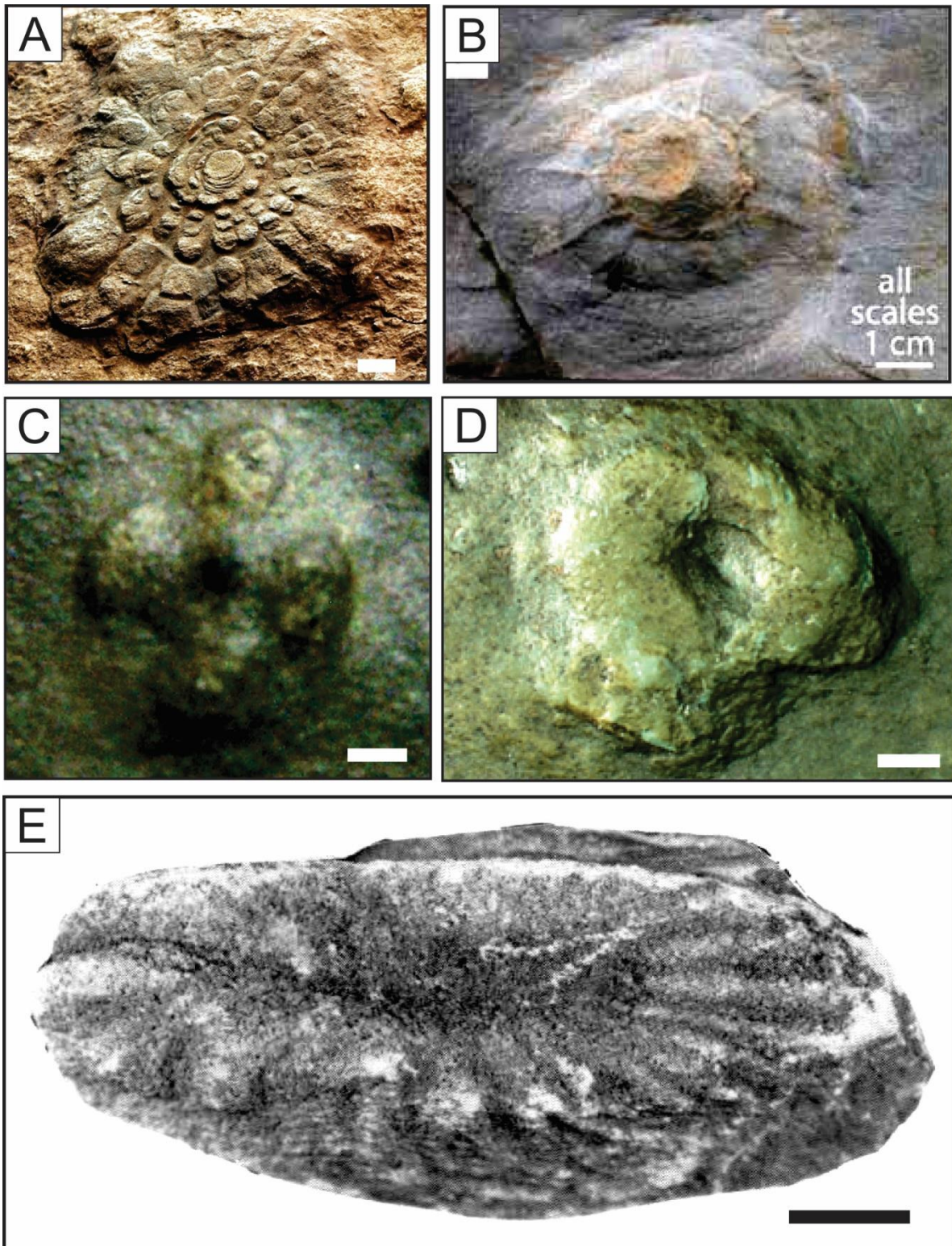
Dentro da problemática envolvendo o registro de macrofósseis ediacaranos (ou estendendo ainda para registros de outras idades), diversos autores têm reinterpretado materiais anteriormente descritos como impressões de medusas ou bases de fixação de organismos ediacaranos distintos como estruturas de escape de fluido (WALTER 1972; PICKERILL 1984; SEILACHER et al. 2005; VAN LOON 2008; HAGADORN & MILLER 2011).

Dentre os critérios estabelecidos para a caracterização dessas estruturas como de origem biogênica, encontra-se a presença de intrincados padrões morfológicos, radiais ou concêntricos, entendidos como expressões de ornamentação ou deformação de tecidos orgânicos. Dentre eles é possível citar o gênero *Mawsonites* (Fig. 4 - A). Devido a sua ornamentação radial, foi considerado como a impressão de um organismo membro da classe Scyphozoa. Contudo, Seilacher et al. (2005) propõem que este represente um vulcão de areia desenvolvido de modo a interagir com esteiras microbiais, semelhante ao icnogênero *Astropolithon* (Fig. 4 – E) reinterpretado de modo parecido por Pickerill (1984). Em ambos os casos, as feições radiais presentes seriam explicadas como fraturas preenchidas por sedimento fluidificado, como discutido por Seilacher (2007).

Hagadorn & Miller (2011) apresentam a ocorrência de dezenas de estruturas discoides em estratos cambrianos, interpretadas anteriormente como cifozoários nectônicos (Fig. 4 – B). Contudo os autores reinterpretam a ocorrência como de origem abiótica, referindo-se a elas como pertencente a mesma categoria de estruturas “*Astropolithon*”.

Por fim, em trabalhos recentes, Menon et al. (2015 e 2016) demonstraram que o papel de esteiras microbiais como selantes e barreiras naturais, dificultam a migração de fluidos resultantes da degradação de matéria orgânica como apresentado na Seção 3.1. resultando em estruturas de injeção e ejeção de sedimentos outrora interpretadas como gêneros de macroorganismos ediacaranos (*Medusinites* e *Beltanelliformis*) (Fig. 4 – C e D).





**Figura 4** – Exemplos de estruturas sedimentares discoide de origem abiótica. A – Vulcão de areia, anteriormente identificado como o gênero *Mawsonites*, *Biota de Ediacara* (VAN LOON 2008). B – Estrutura de escape de fluido, anteriormente interpretada como cifozoário nectônico cambriano (HAGADORN & MILLER 2011). C – Estrutura de escape de fluido, anteriormente *Medusinites*, em sua variedade tetra-lobada (MENON et al. 2015). D – Estrutura Intrites (escape de fluido – anteriormente ocorrências de *Medusinites* e *Beltanelliformis*) (MENON et al. 2016). E – Estrutura *Astropolithon*, possivelmente um vulcão de areia (Pickerill 1984) Escalas: A, B e E: 1cm; C e D: 1mm

## 5. GEOLOGIA REGIONAL

### 5.1. EVOLUÇÃO TECTÔNICA E SEDIMENTAR DO SISTEMA TANDILIA

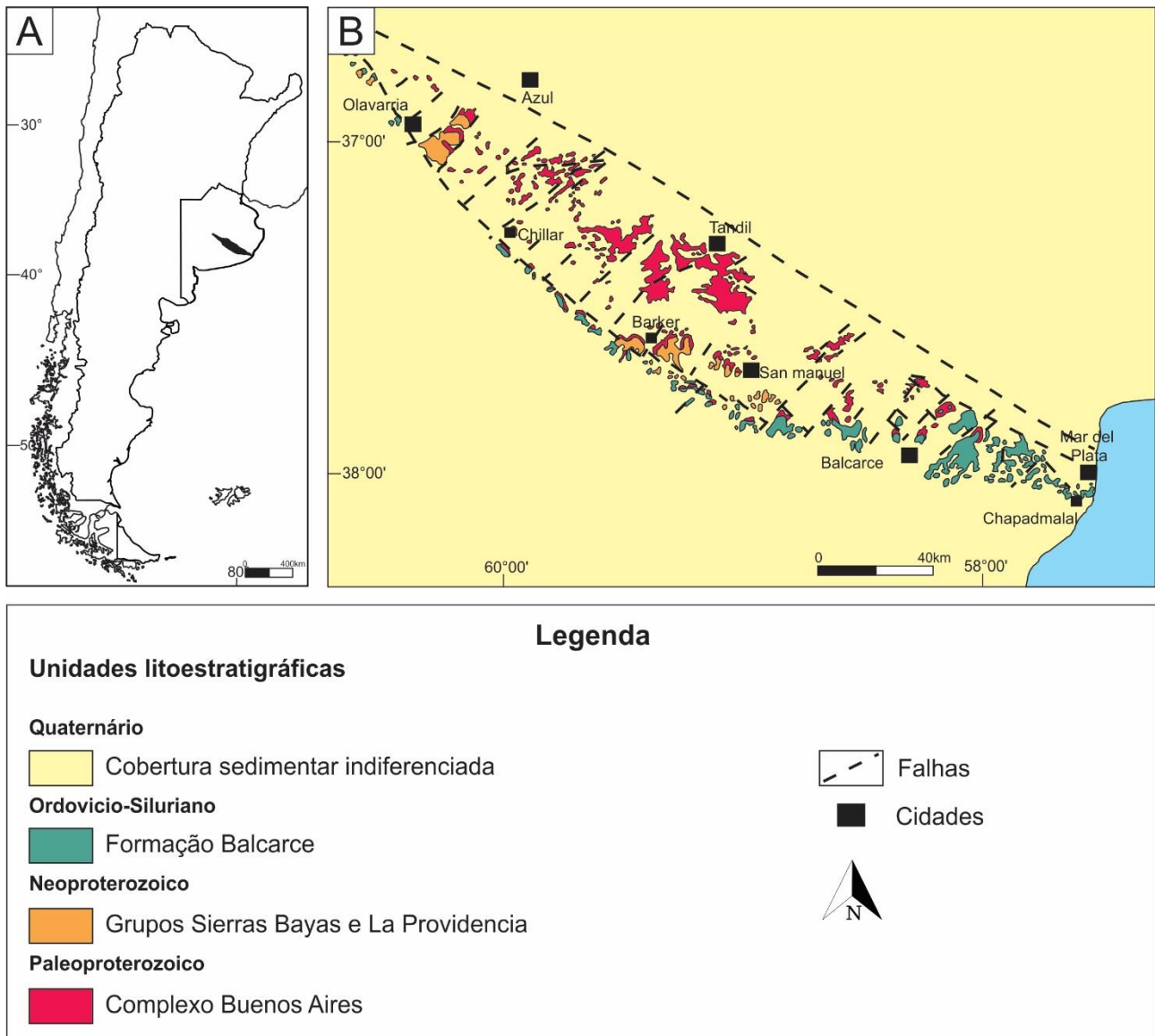
Localizado no que seriam as porções centrais do paleocontinente Gondwana, o cráton Río de La Plata foi formado durante estágios orogênicos do Paleoproterozoico. Sua área de exposição mais meridional localiza-se na região leste/sudeste da Argentina (sul da Província de Buenos Aires) e é caracterizada por uma faixa estreita de afloramentos com 350 km de comprimento por 60 km de largura, denominada Sistema Tandilia (Fig.4) (DALLA SALDA et al., 1988; POIRÉ et al., 2002; CINGOLANI 2011).

O Sistema Tandilia é composto principalmente por gnaisses granítico-tonalíticos, migmatitos, anfibolitos, rochas ultramáficas e plútons graníticos associados a colagens de blocos tectônicos durante o Ciclo Transamazônico. Ocorrem ainda subordinadamente unidades metassedimentares e metavulcânicas deformadas durante o mesmo ciclo tectônico. Tal associação litológica compõem parte do que é denominado Complexo Buenos Aires (PANKHURST, 2003; CINGOLANI, 2011).

A fase compressiva de idade paleoproterozoica é seguida por período de estabilização e cratonização dos blocos que compõem o Cráton Rio de La Plata. Este é então afetado por três fases principais de ingressões marinhas que propiciaram a deposição de três sucessões sedimentares de diferentes idades (CINGOLANI 2011).

A primeira é marcada por pacotes siliciclásticos e carbonáticos datados do Neoproterozoico e que compõem o Grupo Sierras Bayas (ARROUY et al. 2015), limitado abaixo por depósitos métricos de um paleosolo pertencente à Formação Villa Mónica e acima por uma bem marcada superfície erosiva denominada de “Superfície Barker” (Poiré et al., 2007). A segunda grande incursão marinha, com idade Ediacarana terminal (ou mesmo Eo-Cambriana) é caracterizada pelos depósitos pelíticos e psamíticos do Grupo La Providencia. Por fim, tem-se os depósitos ordoviciano-silurianos da Formação Balcarce, não abordados nesse trabalho (POIRÉ et al. 2002).





**Figura 5** - Localização e unidades litoestratigráficas do Sistema Tandilia. A- destaque em preto do Sistema Tandilia na Província de Buenos Aires, Argentina. B - mapa geológico simplificado com principais unidades proterozoicas e eo-paleozoicas do Sistema Tandilia. Modificado de Iñiguez et al. (1989).

## 5.2 GRUPO LA PROVIDENCIA

Separado por importante discordância do Grupo Sierras Bayas com idade Neoproterozoica, o recentemente definido Grupo La Providencia apresenta idades do Ediacarano tardio ou possivelmente da base do Cambriano. O pacote de rochas é caracterizado por depósitos pelíticos a psamíticos e é subdividido nas Formações Avellaneda, Alicia e Cerro Negro (ARROUY, 2015).

Localizada na base da sucessão, a Formação Avellaneda é caracterizada pela presença de fácies pelíticas margosas que se enriquecem em componentes siliciclásticos em direção ao topo. Este pacote apresenta espessuras que variam de 4 a 25 m, acomodando-se sobre uma superfície irregular e erosiva que a separa da Formação Loma Negra, denominada Superfície Barker (POIRÉ et al., 2007). A unidade é marcada pela presença de margas e pelitos maciços ou com laminação plano paralela e

coloração arroxeadada. Interpreta-se sua deposição em condições de baixa energia e águas rasas, possivelmente associadas a ambiente de supramaré (ARROUY et al., 2015).

Acima, seguem-se os depósitos da Formação Alicia, cuja espessura alcança até 150m em algumas localidades. São caracterizados pela presença de argilitos e folhelhos cinzas e negros, ricos em matéria orgânica, com presença de pirita, com ocasionais fácies heterolíticas com laminação cruzada ou plano paralela. A unidade é interpretada como depositada durante evento transgressivo de afogamento da bacia, em condições de baixa energia, em ambiente de inframaré e sob baixas concentrações de oxigênio (ARROUY et al., 2015).

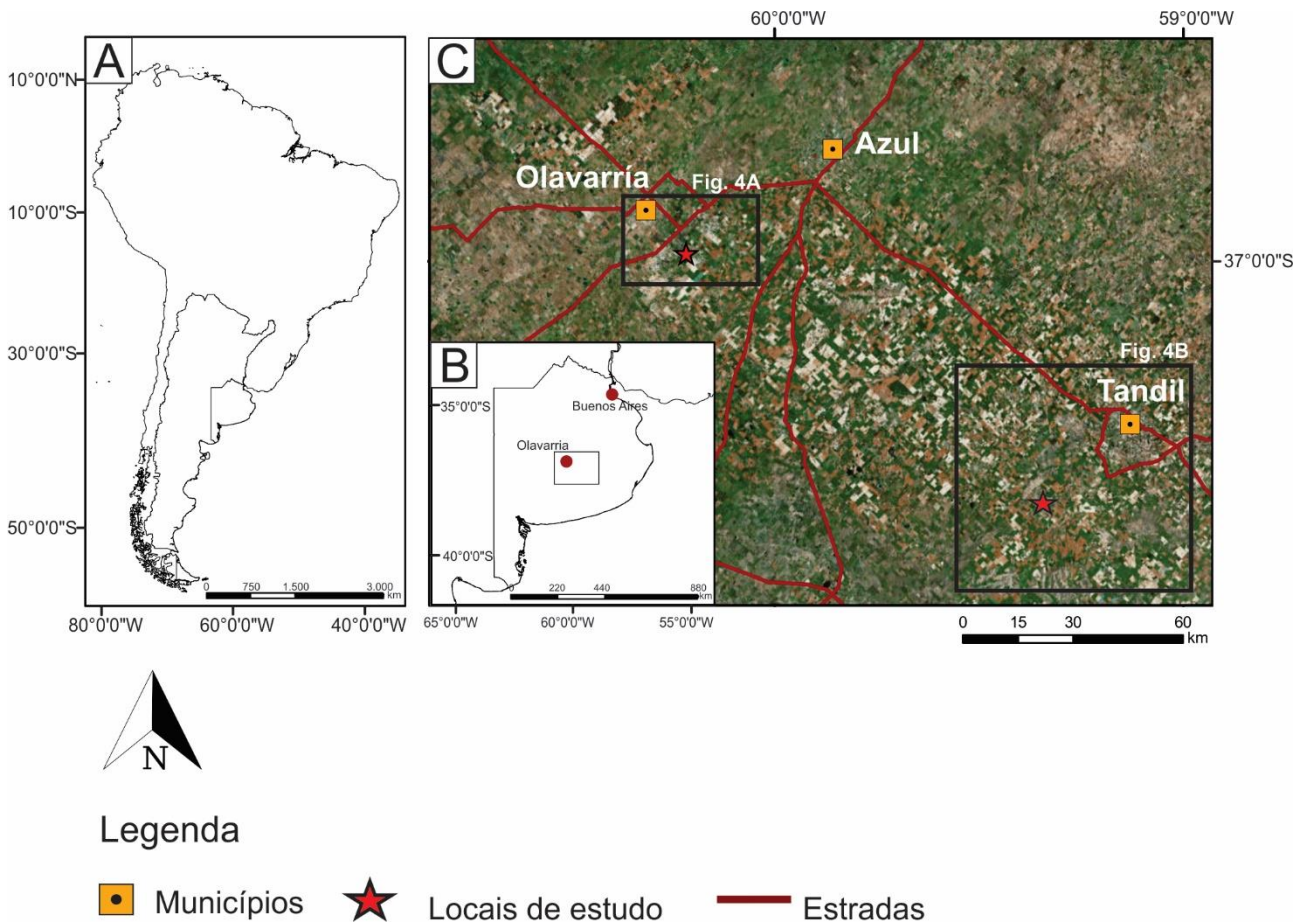
Após essa etapa, a reativação tectônica de estruturas presentes no embasamento paleoproterozoico foi responsável pelo desenvolvimento de falhas subverticais e consequente soerguimento de blocos (ARROUY et al. 2015). Tem-se então a formação de uma superfície erosiva que marca uma discordância entre a Formação Alicia e a Formação Cerro Negro acima. Esta é caracterizada por uma espessura de até 75 m e pela presença de uma associação de fácies com arenitos micáceos maciços, arenitos com estratificação cruzada, rochas heterolíticas com laminação cruzada por onda e argilitos maciços de coloração arroxeadada. A presença predominante de sedimentos na granulação areia muito fina a fina, a presença de pacotes ricos em estruturas indicativas de transporte por tração e por fluxo oscilatório (marcas onduladas simétricas), ocasionais gretas de contração, além da coloração arroxeadada de seus sedimentos podem indicar deposição em condições de águas rasas, oxidantes em ambiente de inter a submaré (ARROUY et al., 2015).

Outra importante feição presente nos depósitos da Formação Cerro Negro (ARROUY et al. 2016) é a presença de superfícies ricas em estruturas sedimentares desenvolvidas pela interação com esteiras microbiais, identificadas como MISS dos morfotipos *wrinkle marks*, *elephant skin* e *Arumberia*, esta última comumente associada a contextos ambientais de lâmina d'água muito delgada (HAGADORN & BOTTJER, 1997; NOFFKE, 2001, 2009; PORADA & BOUOUGRI, 2007; GEHLING & DROSER, 2009; KOLESNIKOV et al., 2012). Associadas a essas estruturas, foram descritos traços fósseis atribuídos preliminarmente ao icnogênero *Archaeonassa*, além de centenas a milhares de estruturas discoides interpretadas por Arrouy et al. (2016) como pertencentes ao *plexus Aspidella*. De acordo com os autores, a presença deste organismo fóssil nos estratos basais a intermediários da Formação Cerro Negro, reforçaria a correlação entre os depósitos ediacaranos argentinos e outras ocorrências fossilíferas de idade semelhante na América do Sul e África.

## 6. ÁREA DE ESTUDO

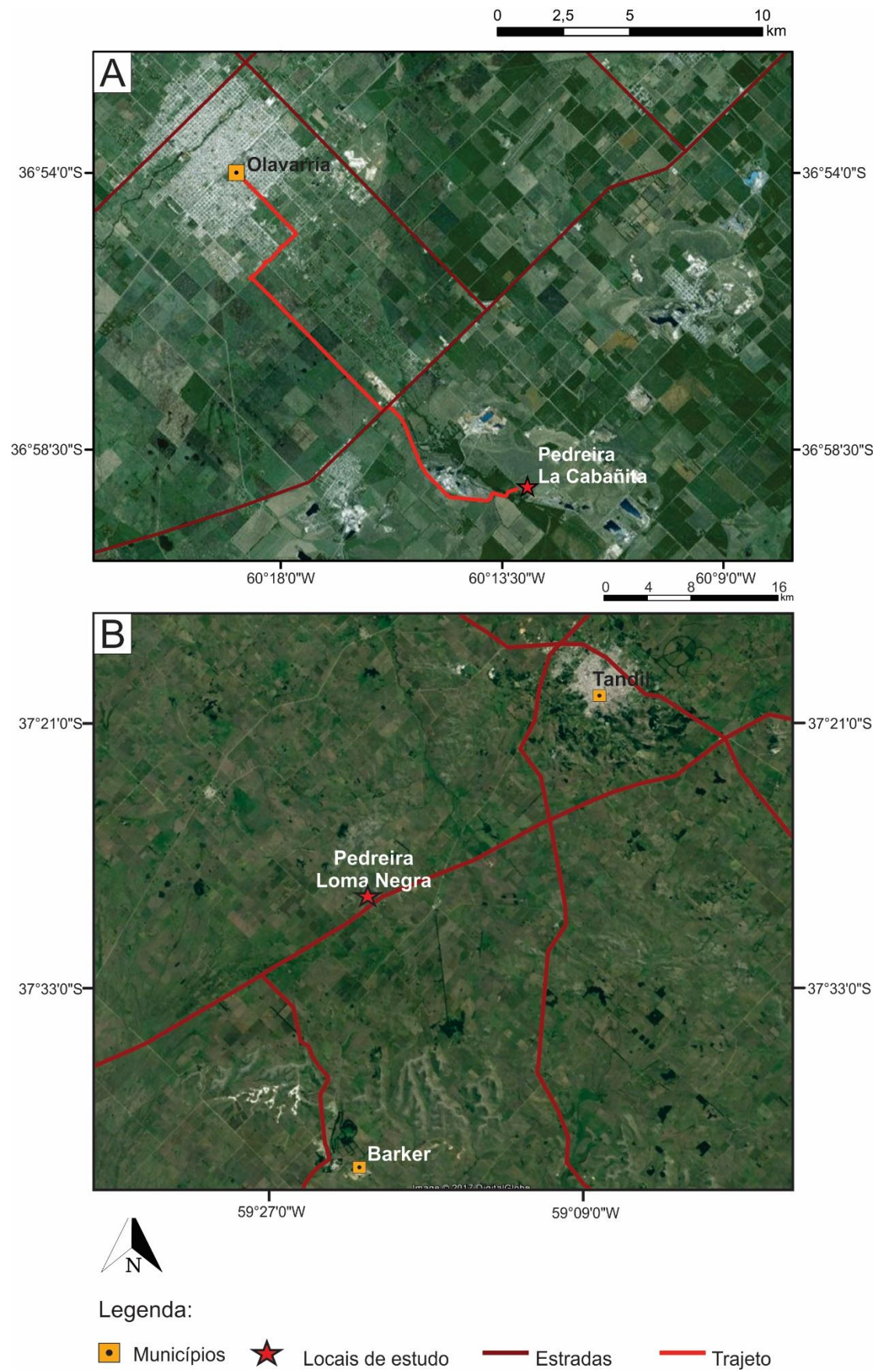
A área de estudo deste trabalho localiza-se na porção centro-sul da Província de Buenos Aires, Argentina, nas proximidades dos municípios de Olavarría, Azul e Tandil, o primeiro localizado a 355km da capital da província. O material coletado é proveniente da pedreira la Cabañita, localizada aproximadamente a 20km de distância do centro da cidade de Olavarría (Localidade 1). Observações complementares (sem coleta de amostras) foram realizadas na pedreira Loma Negra, em Barker, 60km a sul da cidade de Tandil (Localidade 2).

As figuras 5 e 6 ilustram a localização da área no contexto da América do Sul, bem como em relação aos principais municípios e as vias de acesso de Olavarría à pedreira La Cabañita. A figura 7, apresenta as unidades Neoproterozoicas expostas nas proximidades de Olavarría. Nota-se que a pedreira da qual foram coletadas as amostras analisadas, localiza-se em área de exposição de depósitos pleistocênicos, sendo que a formação Cerro Negro ocorre apenas em subsuperfície (Fig. 7).

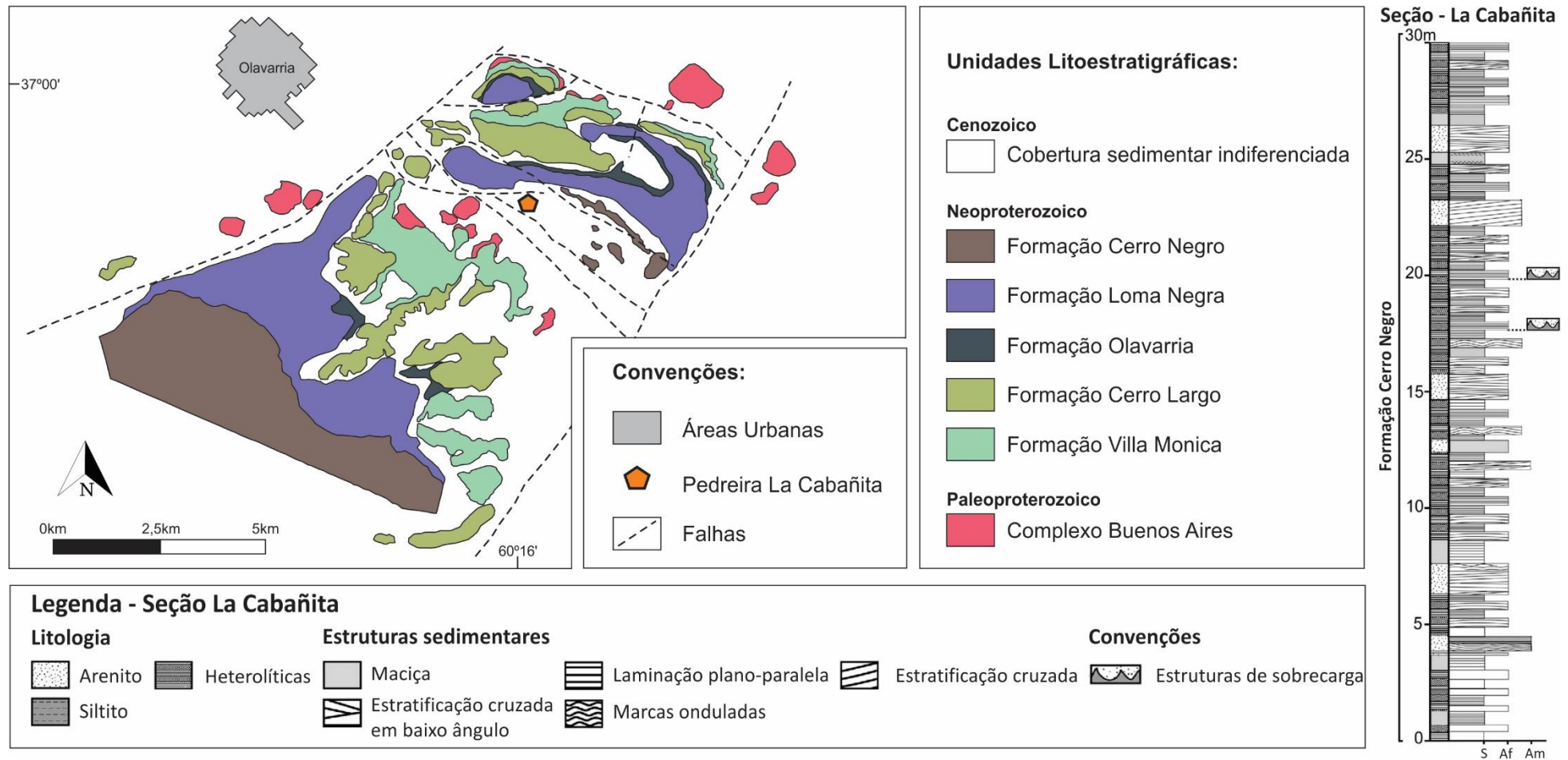


**Figura 6** - Localização da área de estudo. Retirado de *banco de dados do software Arcgis 10.2*





**Figura 7** - Localização dos locais de estudo. Retirado de *Banco de dados* do software Arcgis 10.2



**Figura 8** - Mapa geológico simplificado da região de estudo próxima ao município de Olavarría, província de Buenos Aires, com localização da pedreira La Cabañita, juntamente com seção colunar da área de estudo. Mapa geológico modificado de Arrouy et al. (2015). Seção colunar modificada de Arrouy et al. (2016).

## 7. METODOLOGIA

Este trabalho propõe a aplicação de diferentes técnicas investigativas a fim de auxiliar a compreensão de questões relativas à caracterização morfológica e a gênese de estruturas discoides presentes na Formação Cerro Negro, Grupo La Providencia, Argentina.

A primeira etapa do desenvolvimento da pesquisa constitui extenso levantamento bibliográfico. Este teve por objetivo o estabelecimento de critérios para comparação com ocorrências semelhantes, levando em consideração o contexto sedimentológico e paleobiológico da transição Ediacarano-Cambriano. Assim, esta etapa, desenvolvida de modo contínuo ao longo do projeto, buscou contribuir para a compreensão dos processos responsáveis pelo desenvolvimento de estruturas similares.

A etapa de campo realizada entre os dias 02/04 e 08/04 de 2016 consistiu na visita a frentes de lavra das pedreiras La Cabañita (Localidade 1) e Loma Negra (Localidade 2), localizadas nas proximidades das cidades de Olavarria e Barker, respectivamente. Durante a visita a esta mina foram acessadas exposições de rochas dos grupos Sierras Bayas e La Providencia.

Na pedreira La Cabañita foram analisados blocos da Formação Cerro Negro da pilha de rejeito da mineração de calcário proveniente da Formação Loma Negra (Grupo Sierras Bayas). As observações sedimentológicas referentes à caracterização das fácies, suas associações e geometrias foram realizadas levando em consideração as limitações relacionadas a natureza remobilizada do material (*ex situ*).

As estruturas discoides presentes em blocos de arenito maciço foram descritas e quantificadas seguindo protocolo desenvolvido em etapa anterior às atividades de campo. Tal procedimento consistiu de uma tabela (Anexo A) preenchida em campo, com a descrição de caracteres morfológicos e morfométricos.

Para a obtenção de medidas e coleta de amostras foram utilizadas ferramentas simples de campo, tais como réguas, trenas, talhadeiras, canivetes, martelos de geólogo e marretas.

As amostras coletadas foram em parte depositadas na coleção científica da Universidade Nacional de La Plata, sob os cuidados do Prof. Dr. Daniel Poiré e Dra. Maria Julia Arrouy e em parte no Laboratório de Sedimentologia do Departamento de Geologia Aplicada do IGCE-UNESP, Rio Claro (DGA) sob guarda do Prof. Dr. Lucas V. Warren.

Na etapa de laboratório, a preparação das amostras consistiu na limpeza com água de modo a retirar material particulado agregado. Técnicas de preparação mecânica ou química para realce de estruturas, ou feições diagnósticas não foram aplicadas ao material coletado, pois esse não pode ser mecanicamente removido da rocha encaixante devido à ausência de contraste composicional e granulométrico.

Após limpeza, o material foi devidamente fotografado utilizando câmera digital *Nikon* modelo D3100 com luz natural e eventual utilização de torre móvel estativa *Kaiser RTX*. Após registro, amostras de estruturas discoides foram selecionadas para confecção de secções polidas (*slabs* polidos) e de lâminas petrográficas no Laboratório de Laminação do Departamento de Petrologia e Metalogenia do IGCE-UNESP, Rio Claro (DPM). Posteriormente, estas foram escaneadas utilizando-se *Scanner Epson Perfection V700 PHOTO*, pertencente ao Laboratório de Estudos do Quaternário (LEQ) do DGA.

A análise dos *slabs* de rocha e das secções delgadas tiveram por objetivo acessar feições internas das estruturas além da caracterização petrográfica do material. Esta foi realizada com uso de luz transmitida e refletida, utilizando-se microscópio petrográfico *Zeiss Axioscop 40*, com câmera digital para captura de imagens modelo *Canon EOS 5D Mark II*, pertencentes ao Laboratório de Inclusões Fluidas do DPM do IGCE-UNESP.

Secções delgadas polidas de estruturas discoides, cobertas com carbono foram analisadas utilizando-se Microscópio Eletrônica de Varredura (MEV), modelo *JEOL SSM – 6010LA - Analytical Scanning Electron Microscope*, pertencente ao Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do DPM, para identificação de fases minerais e texturas não visíveis utilizando-se microscopia convencional. Para as análises foi utilizada uma configuração de 15kV e 15nA.

Algumas amostras foram ainda selecionadas para análise com Microtomografia Computadorizada (*Micro-CT*), para caracterização tridimensional do interior das estruturas discoides. As análises foram realizadas em Microtomógrafo de Raios X *Skyscan, modelo 1172*, pertencente ao Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

Por fim, o tratamento de dados quantitativos de medidas obtidas em campo foi realizado utilizando-se os *softwares OriginPro8 SR0 v8.0724 (B724)* e *Excel* do pacote *Microsoft Office 2013* enquanto o tratamento e edição de imagens foi feito por meio do *software CorelDRAW X5 10.0.0.486*.

## 8. RESULTADOS

### 8.1. CONTEXTO SEDIMENTOLÓGICO E PALEOBIOLÓGICO

Os depósitos da Formação Cerro Negro ocorrem muito mal expostos nas proximidades das cidades de Olavarria e Barker, de modo que são unicamente acessados em cavas a céu aberto para exploração dos calcários da Formação Loma Negra (sotoposta), em testemunhos de sondagem ou pilhas de rejeito da mineração de calcário proveniente do desmonte das frentes de lavra.

Tais condições de exposição da unidade dificultam a tarefa de estabelecer relações estratigráficas em campo entre as diferentes sucessões estudadas, bem como de definir com precisão sua distribuição espacial e arquitetura. Assim, Arrouy (2015) interpretou a Formação Cerro Negro como constituída por depósitos associados a porção inferior da zona de intermaré e parte da zona de inframaré utilizando em sua maior parte a análise de testemunhos de sondagem. Contudo, a observação de diferentes facies sedimentares nesse trabalho permitiu não apenas contextualizar o material estudado em termos do modelo de sistema deposicional adotado, como refinar as interpretações deposicionais e paleobiológicas de Arrouy et al. (2015) e Arrouy et al. (2016).

Na Pedreira Loma Negra, localizada próxima a cidade de Barker (cerca de 63 km ao sul da cidade de Tandil), os depósitos da Formação Cerro Negro ocorrem diretamente acima da superfície erosiva que separa o Grupo Sierras Bayas do Grupo La Providencia. Acima da superfície paleocárstica desenvolvida (POIRÉ et al., 2007), ocorre exposta a associação de fácies basal da unidade, caracterizada por fácies heterolíticas, arenitos finos a médios micáceos com estratificação cruzada de baixo ângulo ou acanalada, intercalados com argilitos de coloração castanha. Tal exposição apresenta aproximadamente 8 m de espessura e ocorre acima de 25-30 m de exposição das rochas da Formação Loma Negra impossibilitando o acesso direto a sucessão *in situ* da Formação Cerro Negro (somente acessada com a utilização de equipamentos de escalada apropriado).

Em raros blocos rolados das porções superiores da frente de lavra da pedreira foi possível observar a presença em grande quantidade de estruturas do tipo MISS, destacando o morfotipo *Kinneya* seguido pela, eventual presença de *Elephant Skin*.

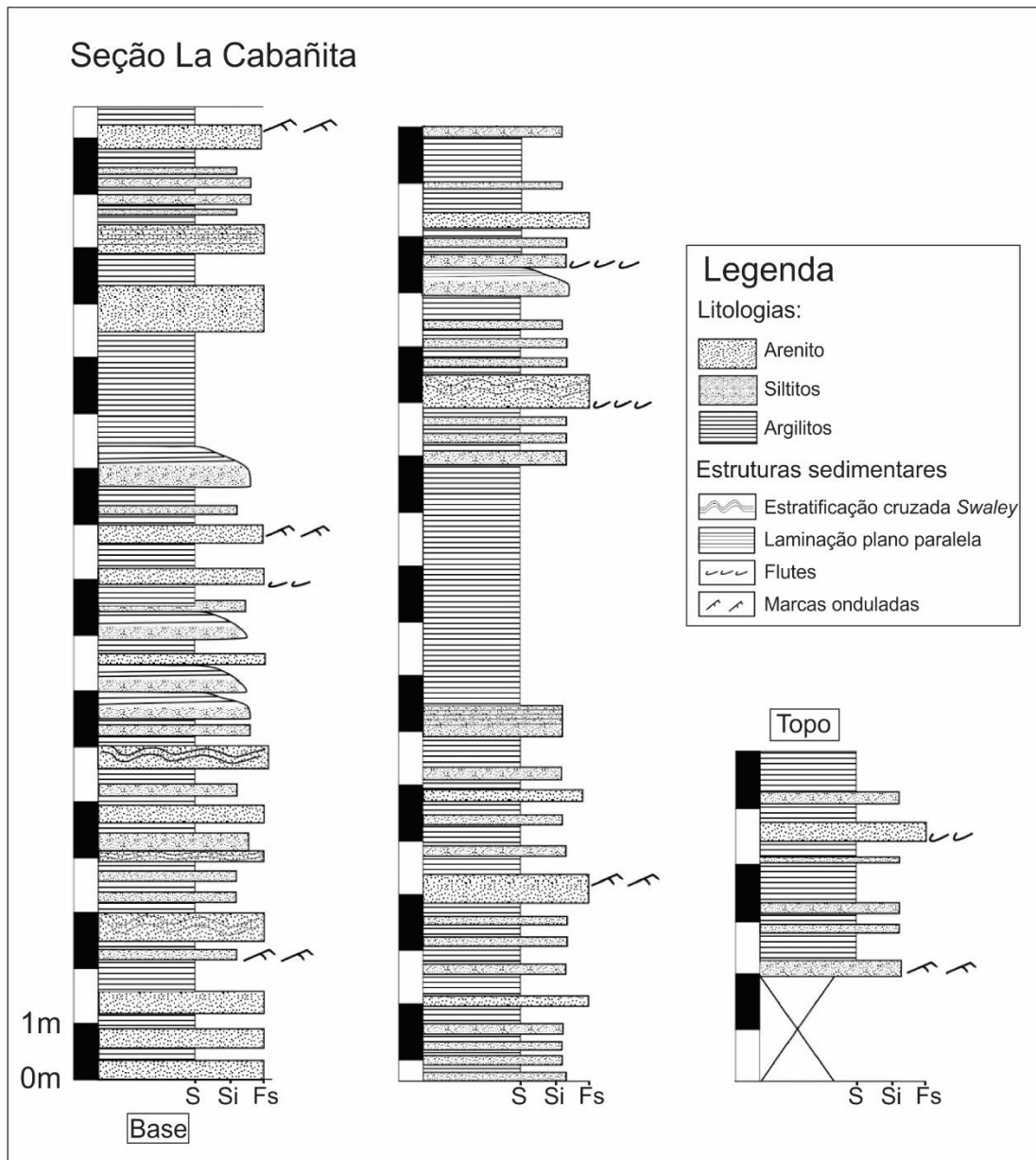
Notou-se ainda no topo de blocos de arenito fino maciço de coloração castanha, a presença de estruturas discoides de forma aproximadamente circular, preservadas em equirelevo positivo. Pontualmente, também observou-se a presença de camada centimétrica de argilito de coloração acastanhada associada a essas estruturas, com os sedimentos pelíticos se amoldando à feição de caráter tridimensional.

Diferentemente da ocorrência em Barker, a pedreira La Cabañita nas proximidades de Olavarría contém extensas pilhas de rejeito provenientes da Formação Cerro Negro, permitindo o acesso ao material rolado para descrições e caracterizações faciológicas e paleobiológicas. Além do mais, foi

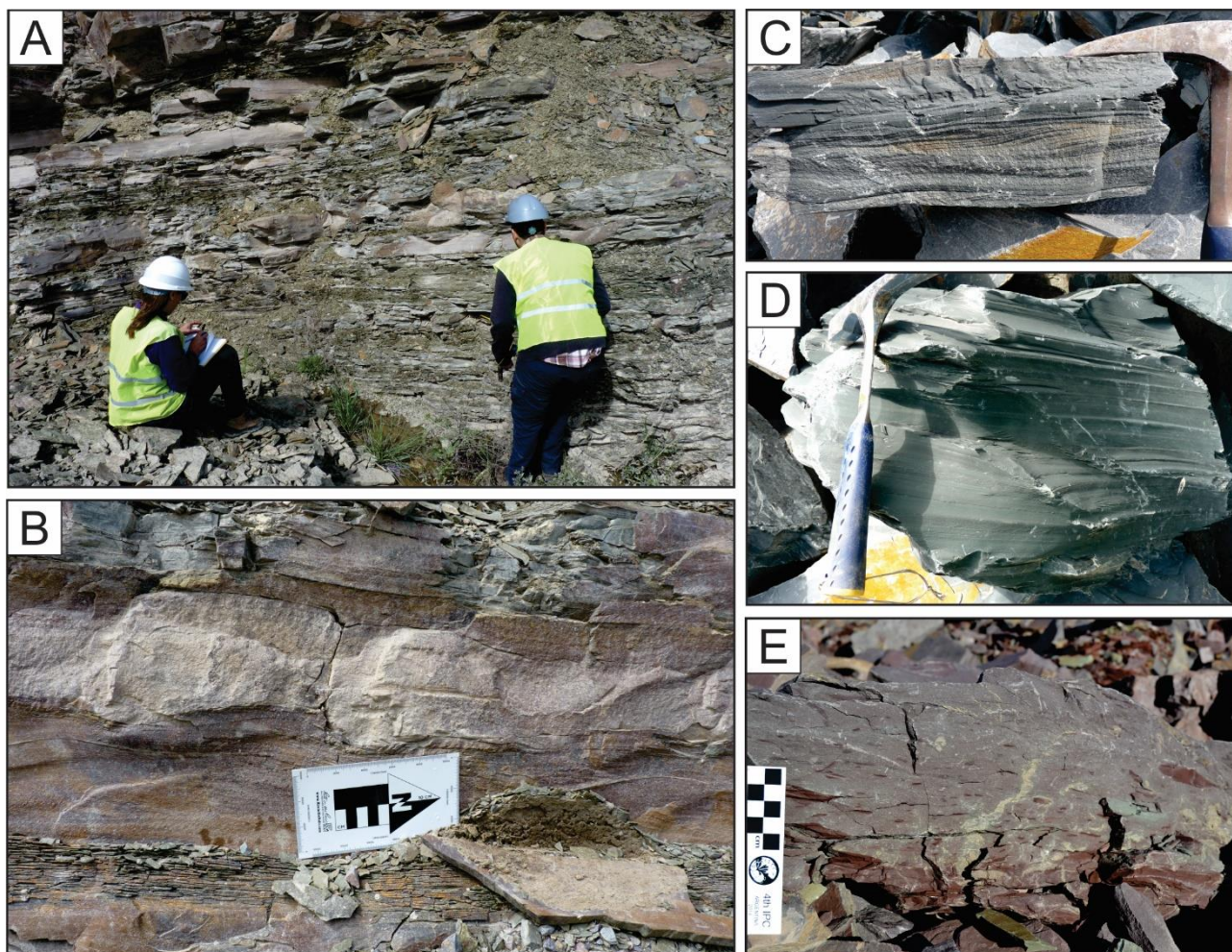


possível o acesso a aproximados 20 m de seção exposta nas frentes de lavra da pedreira, o que permitiu a análise dos depósitos *in situ* e o levantamento de uma seção estratigráfica (Fig. 9). Tal seção localiza-se estratigraficamente poucos metros acima do nível em que ocorrem as estruturas foco deste trabalho.

O material analisado na pedreira La Cabañita de forma semelhante ao observado na Loma Negra é marcado por associações de fácies arenosas intercaladas com fácies pelíticas, caracterizando uma sucessão heterolítica (Fig 10-A e B). Nota-se o predomínio de sedimento na fração areia fina a muito fina, com camadas de arenito arroxeadado, micáceo e apresentando laminação cruzada, plano paralela e estratificações cruzadas do tipo *swaley* e de baixo ângulo (Fig. 10-A, B e C). Em planta é possível observar marcas onduladas assimétricas e simétricas com cristas sinuosas associadas a esses níveis. Tais camadas ocorrem intercaladas com níveis de argilito e siltito de coloração esverdeada e arroxeadada, comumente alterados, com alto grau de empastilhamento desenvolvido (Fig. 10-B e D). Foram comumente observadas fácies de arenitos finos estruturalmente homogêneos ricos em clastos tabulares de argilito arroxeadado, com dimensões variando entre 0,5 e 5 cm em seu eixo maior (Fig 10-E). Ocasionalmente, foram ainda observados níveis de argilito gretados, sugerindo ressecamento por eventual exposição subaérea.



**Figura 9** – Seção colunar dos depósitos da Formação Cerro Negro expostos na Pedreira La Cabañita, Olavarria. S – Argila (*Shale*), Si – Silte (*Silt*), Fs – Areia fina (*Fine sand*).



**Figura 10** - Estruturas e feições sedimentares ilustrativas de diferentes fácies sedimentares. A – Intercalação de arenito fino com laminação cruzada, arenito maciço e argilitos laminados. B – Arenito fino com estratificação ondulada intercalado com argilitos laminados. C - Arenito fino com estratificação cruzada em baixo ângulo. D - Argilito laminado com coloração esverdeada e E – Arenito estruturalmente homogêneo rico em clastos de argilito arroxeados. Escalas: C e D: martelo com ~30cm de comprimento.

Outra importante feição observada nos depósitos da unidade são as numerosas estruturas identificadas como MISS, morfologicamente diversas e presentes em maior frequência associadas a fácies de arenitos micáceos podendo, contudo, ocorrer em fácies de siltitos e argilitos. Foram observadas estruturas do tipo *Kinneya* como o morfotipo dominante, ocorrendo em fácies de arenito fino com laminação plano paralela ou ainda nas calhas de marcas onduladas assimétricas (Figs. 11-A, B e C). De forma semelhante ocorrem com menor frequência estruturas-*Honeycomb* (“Favos de Mel”), com enrugamento em padrão poligonal, ou ainda estruturas-*Elephant Skin*. Ocasionalmente foram observadas estruturas descritas como “*erosional pockets*” (*sensu* NOFFKE 1999), interpretados comumente como remanescentes de processos erosivos, devido a proteção fornecida por biofilmes. Tais feições ocorrem com texturas classificadas como *Kinneya* e *Elephant Skin*, demonstrando sua afinidade com processos microbiais (Fig. 11-D). São também comuns estruturas tentativamente assinaladas como pertencentes ao morfotipo *Arumberia*, formas de caráter mais

complexo associados a níveis de arenito micáceo fino, ricos em marcas de sola, indicando deposição em condições de alta energia (Fig. 11-E e F).

Essas feições se desenvolvem pela impressão, em epirelevo, ou hiporelevo dos padrões de estruturação e deformação de esteiras microbiais. Sua preservação está intimamente relacionada à coesão fornecida ao sedimento inconsolidado pelo EPS microbial, permitindo a impressão de estruturas orgânicas originais ou deformadas pelas condições de fluxo então atuantes durante a deposição da camada.

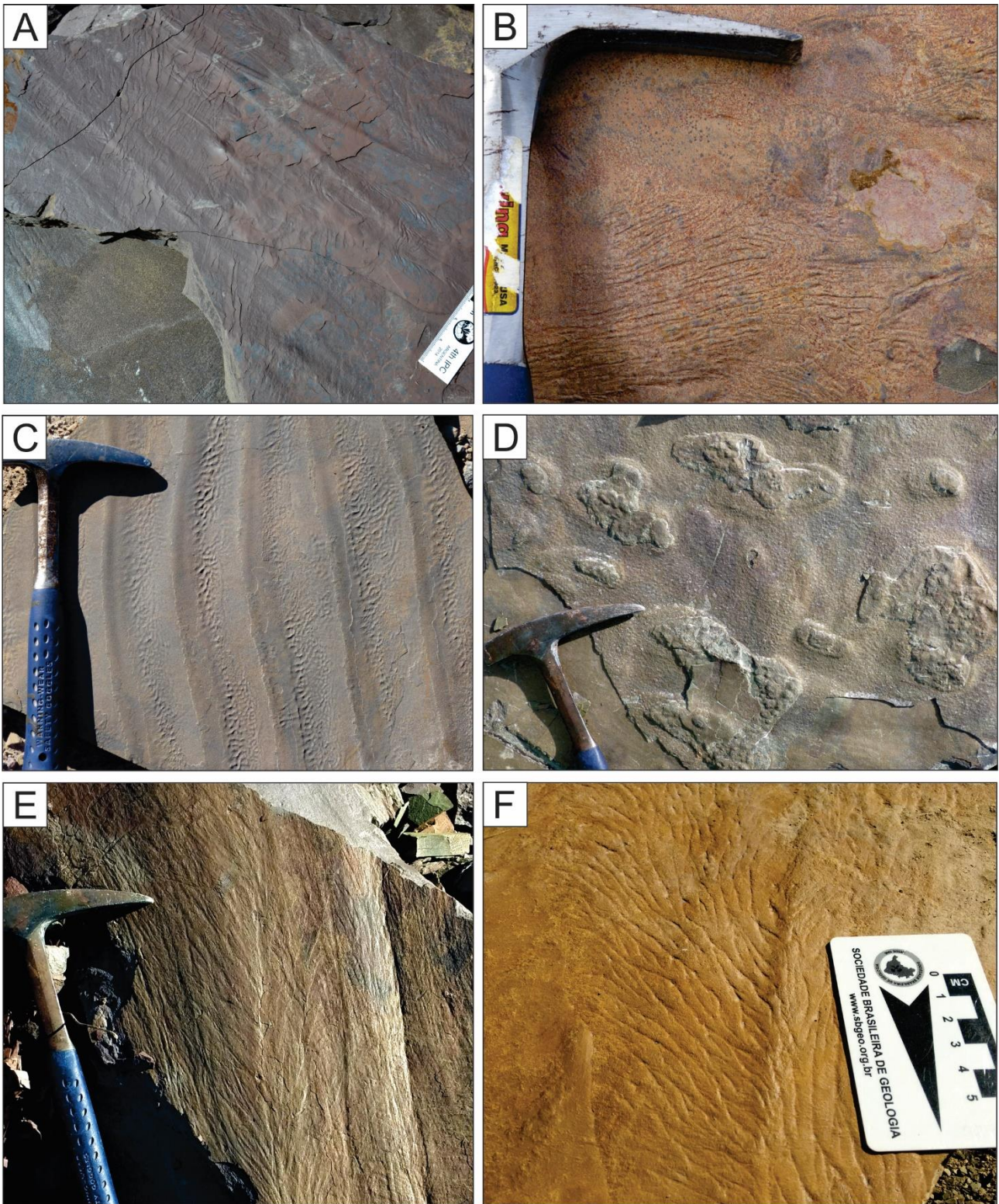
Ao microscópio petrográfico, fácies ricas em estruturas do tipo *Kinneya* foram caracterizadas como arenitos finos a muito finos, bem selecionados, compostos aproximadamente por 70% de grãos de quartzo com alto grau de esfericidade e baixo arredondamento, ocorrendo em média 12% de grãos de filossilicatos. Entre esses, 4% foram caracterizados como grãos de muscovita, estando também presentes grãos de clorita ou biotita secundários. Os restantes 8% foram caracterizados como grãos de hábito placoide e opacos à luz transmitida. Com auxílio de luz refletida e MEV, tais grãos foram identificados como filossilicatos manteados, ou sobrecrecidos por minerais opacos, tais como óxidos de ferro e manganês e sulfetos. Foram ainda observados aproximadamente 10% de grãos de feldspato, sendo o restante (5% do arcabouço) composto por minerais de importância secundária tais como minerais pesados, inossilicatos entre outros. O cimento, comumente calcítico representa em média 10% do total, sendo estimado 5% de porosidade.

Os minerais de hábito placoide ocorrem comumente com seu maior eixo paralelo ao acamamento sedimentar, sendo comum observar baixo grau de empacotamento, com contato pontual a retilíneo entre os grãos.

É observado comumente quantidades significativas de aglomerados de aspecto grumoso de minerais de hábito globular, opacos ou de cor castanha nas porções intergranulares da rocha, conferindo-lhe coloração escura. Tais aglomerados são possivelmente compostos de óxidos ou hidróxidos de ferro que em certas porções das lâminas constituem o componente dominante, preenchendo poros de maneira pervasiva (Fig. 12-A e B).

Nas fácies caracterizadas como biolaminitos, nas quais nota-se a sobreposição em escala milimétrica de lâminas ricas em estruturas do tipo *Kinneyia* e “Favo de Mel” foi observada a presença de filmes de óxido e/ou hidróxido de ferro. Tais filmes tendem a marcar a laminação observada ao microscópio, delimitando superfícies bem definidas e contornando os grãos do arcabouço (Fig. 12-C a F).





**Figura 11** - Estruturas de origem microbiana (MISS) observadas em campo. A, B e C – Marcas enrugadas (*wrinkle marks*) classificadas como do tipo *Kinneya*. Em A nota-se a associação com possíveis lineações de corrente, perpendiculares ao padrão de enrugamento. Em C, tem-se a presença de enrugamento preservado nas calhas de marcas onduladas simétricas. D – “*Erosional pockets*” (Sensu Noffke 1999), associado a padrão de enrugamento microbiano classificado como “*Elephant skin*”. E e F – padrão morfológicamente complexo com possível afinidade com estrutura do tipo *Arumberia*. Escalas: comprimento do martelo: ~30 cm

Como complemento ao registro paleobiológico preservado na unidade, tem-se raras ocorrências de traços horizontais, ocasionalmente sinuosos, associados a fácies ricas em texturas microbiais. Tais traços apresentam-se por vezes como elevações ou lobos em relevo positivo separados por um sulco em relevo negativo em seu eixo central, interpretados como icnofósseis bilobados do gênero *Archaeonassa* por Arrouy et al. (2016) (Fig. 13-B, C e D). Foram ainda observados ocasionalmente traços horizontais simples, aproximadamente tubulares e sinuosos, preservados em relevo positivo, tentativamente relacionados ao gênero *Palaeophycus* (Fig. 13-A).

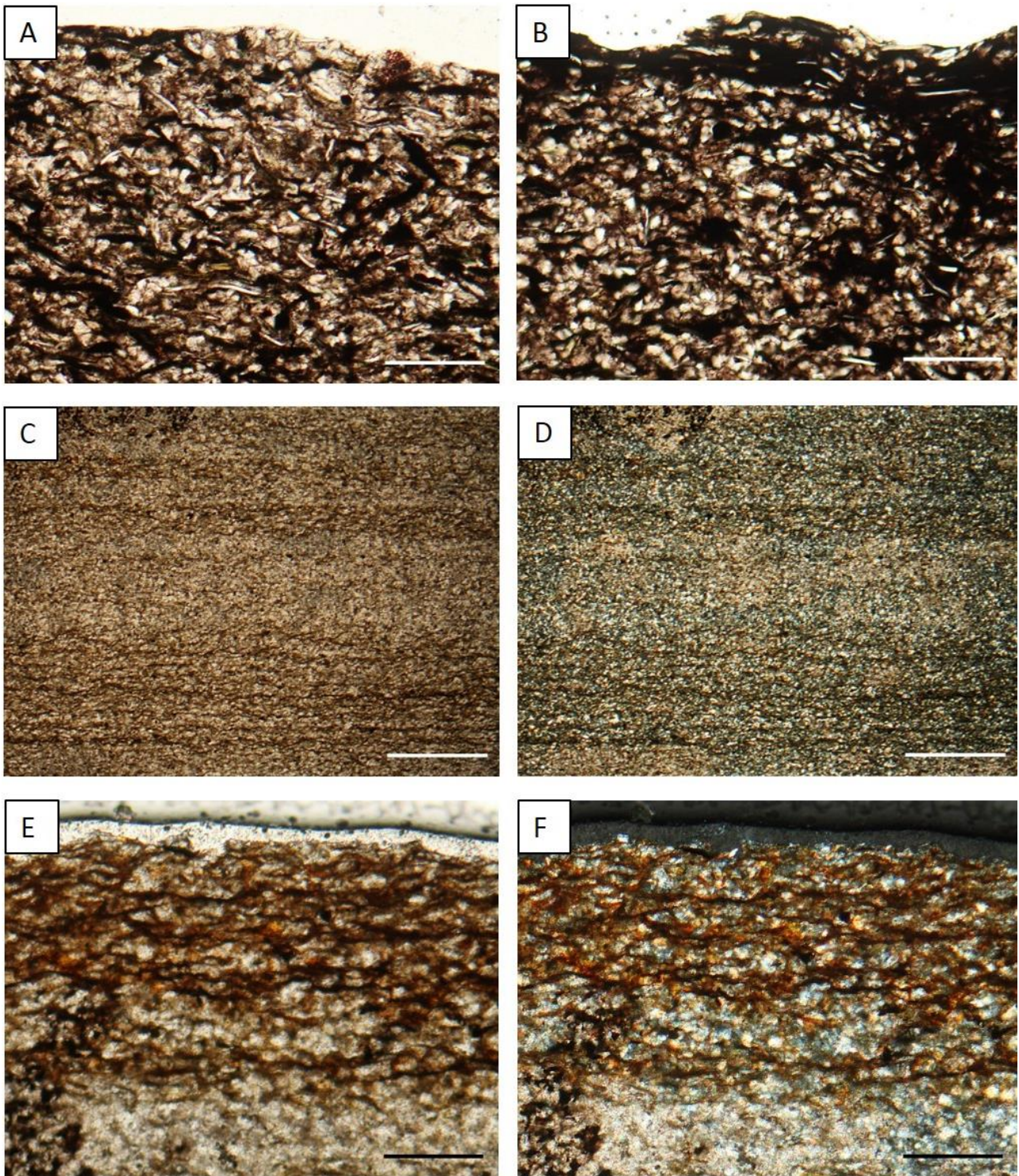
De modo geral, os icnofósseis apresetam em média 0,5cm de largura, sendo contínuos por aproximados 10 cm e foram observados em fácies de arenito fino, micáceo. Ocasionalmente, ocorrem associados a estruturas discoides (Fig. 13-C e D)

Outra fácies sedimentar bastante comum é a de arenitos finos, micáceos, de coloração lilás acinzentada, texturalmente homogêneos, com base erosiva, ricos em clastos de argilitos e com porções com laminação convoluta (arenito com laminações convolutas – *Alc*) (Fig. 14-A, B e G). Tal fácies é frequentemente marcada por uma série de estruturas discordantes, com orientação subvertical, com espessura submilimétrica e comprimento subcentimétrico (Fig. 14-D, E e F).

A fácies *Alc* apresenta comumente marcas de sola e padrões erosivos importantes, utilizados para a definição de critérios de orientação dos blocos observados, em termos de topo e base da camada. Dessa forma, foi possível caracterizar depósitos da fácies *Alc*, da base para o topo, como uma sucessão em geral de aproximadamente 30 a 50 cm de arenitos com marcas de sola e estruturas de corrente na base, seguidos por nível com laminação plano paralela, comumente deformadas seguidos de arenitos finos a muito finos de aspecto maciço, ricos em clastos de argila de dimensões centimétricas. Acima ocorre a superfície marcada pela presença das estruturas discoides (interpretadas como espécimes de *Aspidella* por Arrouy et al. em 2016), semelhantes àquelas observadas na Pedreira Loma Negra (Fig. 14 – C), comumente recobertas por sedimento pelítico, pontualmente com gradação normal (de siltito para argilito).

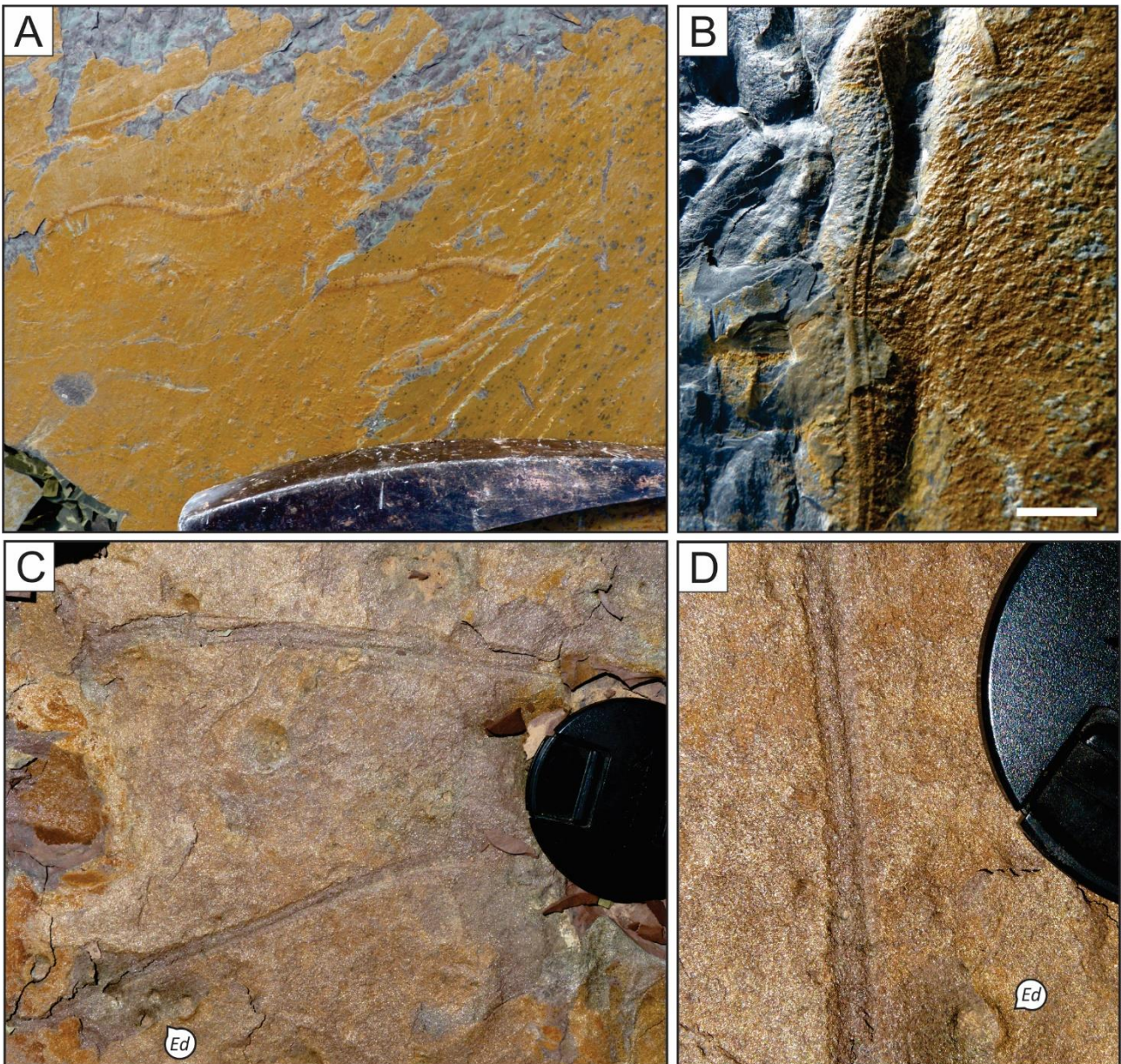
Por ser a fácies na qual foram observadas as estruturas discoides, foco principal desse trabalho, aspectos referentes à petrografia dos depósitos da fácies *Alc* serão apresentados na Seção 8.3, a fim de dar um maior enfoque na relação entre as feições intrínsecas às estruturas e àquelas observadas nesta fácies como um todo.





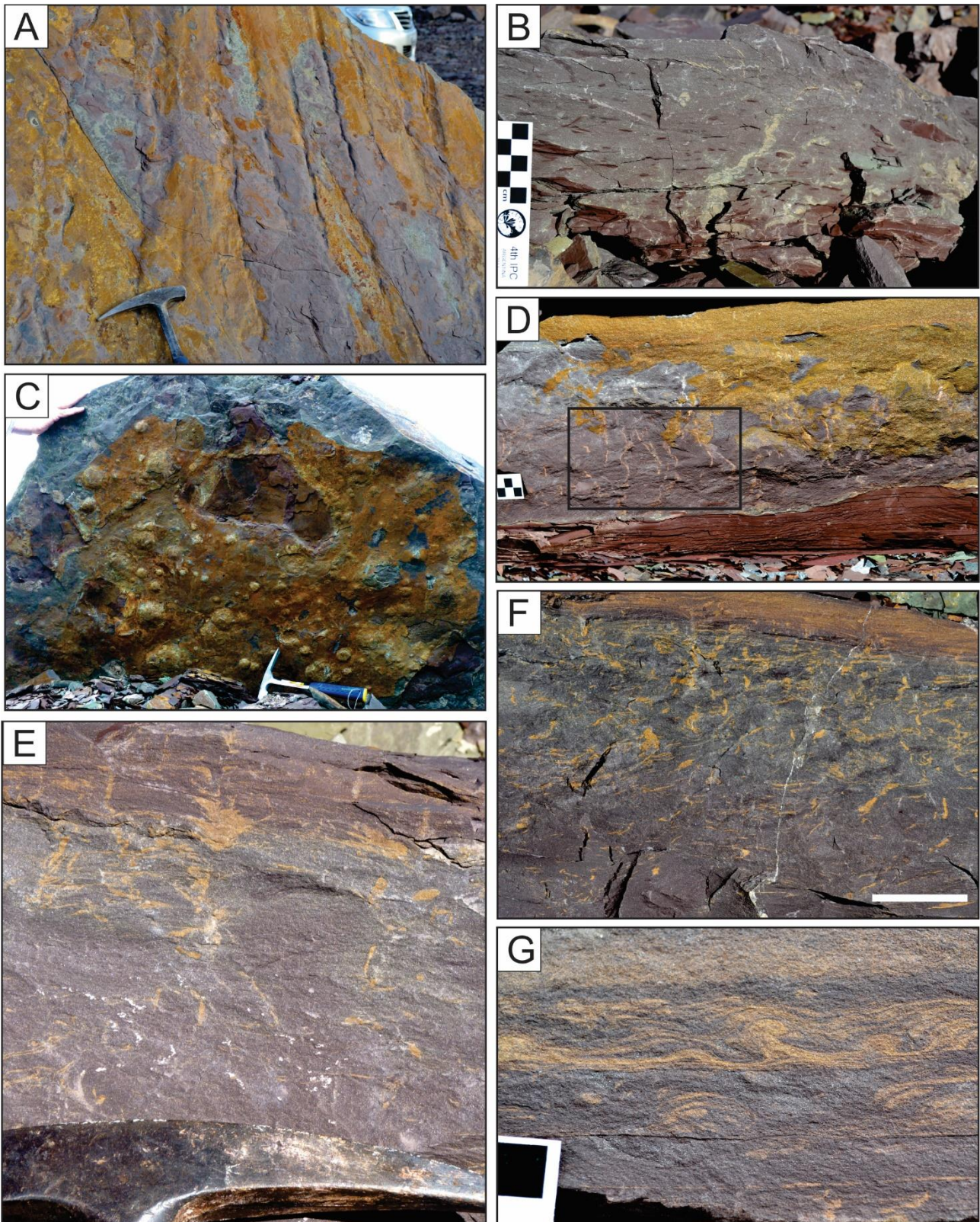
**Figura 12** - Fotomicrografias obtidas a partir de sessões delgadas de amostras contendo estruturas microbiais. A- Distribuição de minerais opacos associados a grãos de filossilicatos, comumente orientados paralelos ao acamamento sedimentar. B – Concentração de minerais opacos, com aspecto grumoso na porção superior da camada contendo MISS. Notar crenulação da marca enrugada (*wrinkle*) visível ao microscópio. C e D – Fotomicrografias em nicóis paralelos (C) e cruzados (D) de amostra finamente laminada (biolaminito) com laminação controlada pela intercalação de filmes de minerais opacos. E e F – detalhe em nicóis paralelos (E) e cruzados (F) da superfície do biolaminito apresentado em (C) e (D). Notar concentração de filme de minerais opacos próximo a superfície. Escalas: A, B, E e F: 0,25 mm; C e D: 1 mm





**Figura 13** – Icnofósseis da Formação Cerro Negro. A – Traços simples, aproximadamente cilíndricos e sinuosos identificados como *Palaeophycus* isp. B e C – Icnofósseis bilobados em relevo positivo identificados como *Archaeonassa* isp. D – Detalhe de *Archaeonassa* ilustrado em C. Notar diminutas estruturas discoides marcadas como *Ed*.





**Figura 14** - Detalhes da fácies *A1c*. Topo e base inferidos com base nas estruturas sedimentares em A e D. A – Marcas de sola e feições erosivas indicadoras de topo e base no bloco observado em C – B - Arenito fino texturalmente homogêneo, rico em clastos de argilito arroxeadado. C – Estruturas discoides no topo da camada ilustrada em A. D – Arenito fino, texturalmente homogêneo, com base erosiva, depositado sobre argilito de coloração arroxeadada. Notar detalhe na moldura preta de estruturas discordantes milimétricas e subverticais. E e F – Estruturas discordantes e subverticais. G - Nível marcado por laminação convoluta. Escalas: A, C e E: Cabeça de martelo ~15cm; F: 5 cm



## 8.2. ESTRUTURAS DISCOIDES DA FORMAÇÃO CERRO NEGRO

A análise de exposições dos depósitos da Formação Cerro Negro, e principalmente dos blocos de rochas pertencentes à unidade e presentes nas pilhas de rejeito da mineração de calcário, permitiu identificar uma série de estruturas caracterizadas como circulares a levemente elípticas em planta e com epirelevo positivo com diâmetros variando entre 3 mm e 140 mm.

Em campo, destacam-se visualmente duas classes principais dessas estruturas. Uma delas é marcada por distintos padrões de enrugamento, definidas preliminarmente como “ornamentações”. Estruturas com esse caractere foram então agrupadas e denominadas como Estruturas Discoides Ornamentadas (EDO) e pertencem à mesma classe estudada por Arrouy et al. (2016) e interpretadas como ocorrências do *plexus Aspidella*. Essas foram observadas nas Localidades 1 e 2, de forma restrita nas exposições das frentes de lavra da Pedreira La Cabañita (município de Olavarria), e em grandes quantidades em blocos de rejeito nesta pedreira e na Pedreira Loma Negra (município de Barker). As EDO apresentam diâmetros entre 5 e 140 mm, com médias de aproximadamente 31mm.

Outras estruturas observadas, entretanto, chamam atenção por suas pequenas dimensões, com diâmetros entre 0,5 e 7 mm, com médias de aproximadamente 3mm. Tais estruturas são morfologicamente muito mais simples, sendo ausentes padrões de enrugamento em seu interior. Assim, foram denominadas Estruturas Discoides Simples (EDS).

As Estruturas Discoides Ornamentadas (EDO) ocorrem geralmente associadas a fácies de arenitos finos texturalmente homogêneos, com laminações perturbadas (fácies *Alc*), caracterizam feições em relevo positivo e tridimensionais e expressam-se como protuberâncias circulares a levemente elípticas em planta, comumente com área discretamente deprimida na região central (Fig. 15-A).

A presença de marcas de sola descrita nos blocos de arenito da fácies *Alc* (observados na Localidade 1) permitiu a orientação dos mesmos e sua caracterização como feições em epirelevo. Sua superfície é marcadamente lisa e caracterizada por vezes pela presença de cobertura oxidada de coloração castanha avermelhada (Fig. 15-A). Em alguns blocos foi observada cobertura pelítica na porção superior dos blocos, acima da superfície oxidada.

Ao ser destacada a porção superior das estruturas, é possível notar feições presentes em sua porção inferior, correspondente ao hiporelevo positivo, quanto ao epirelevo negativo (Fig 15 – B e C). Em ambas as superfícies, nota-se a presença de padrão de enrugamento do sedimento arenosiltoso o qual hospeda a estrutura (Fig. 15-C). As rugas, quando bem desenvolvidas apresentam comumente padrão radial (Fig. 15- B e C), podendo ainda apresentar padrão lobado, no qual uma série de protuberâncias, ou lóbulos aproximadamente circulares se distribuem ao longo da área da estrutura (Fig. 15 – D e E). Esses padrões de rugosidade marcam a região marginal dos discos

enquanto a região central apresenta-se comumente lisa e marcada por estrutura circular milimétrica e de coloração mais escura no centro (Fig. 15-E, F e G).

Finalmente, outra importante característica observada refere-se aos exemplares que ocorrem em contato uns com os outros, formando estruturas duplas ou até pequenos grupos (*clusters*) de três ou quatro exemplares. Comumente, exemplares em contato aparentam deformar-se mutuamente, desenvolvendo clara superfície de contato entre eles (Fig. 15-F e G).

De modo geral, as estruturas discoides associadas a fácies *Alc*, observadas na Pedreira La Cabañita chamam maior atenção, devido tanto ao grande número de exemplares bem preservados quanto a complexidade morfológica observada na porção interna inferior.

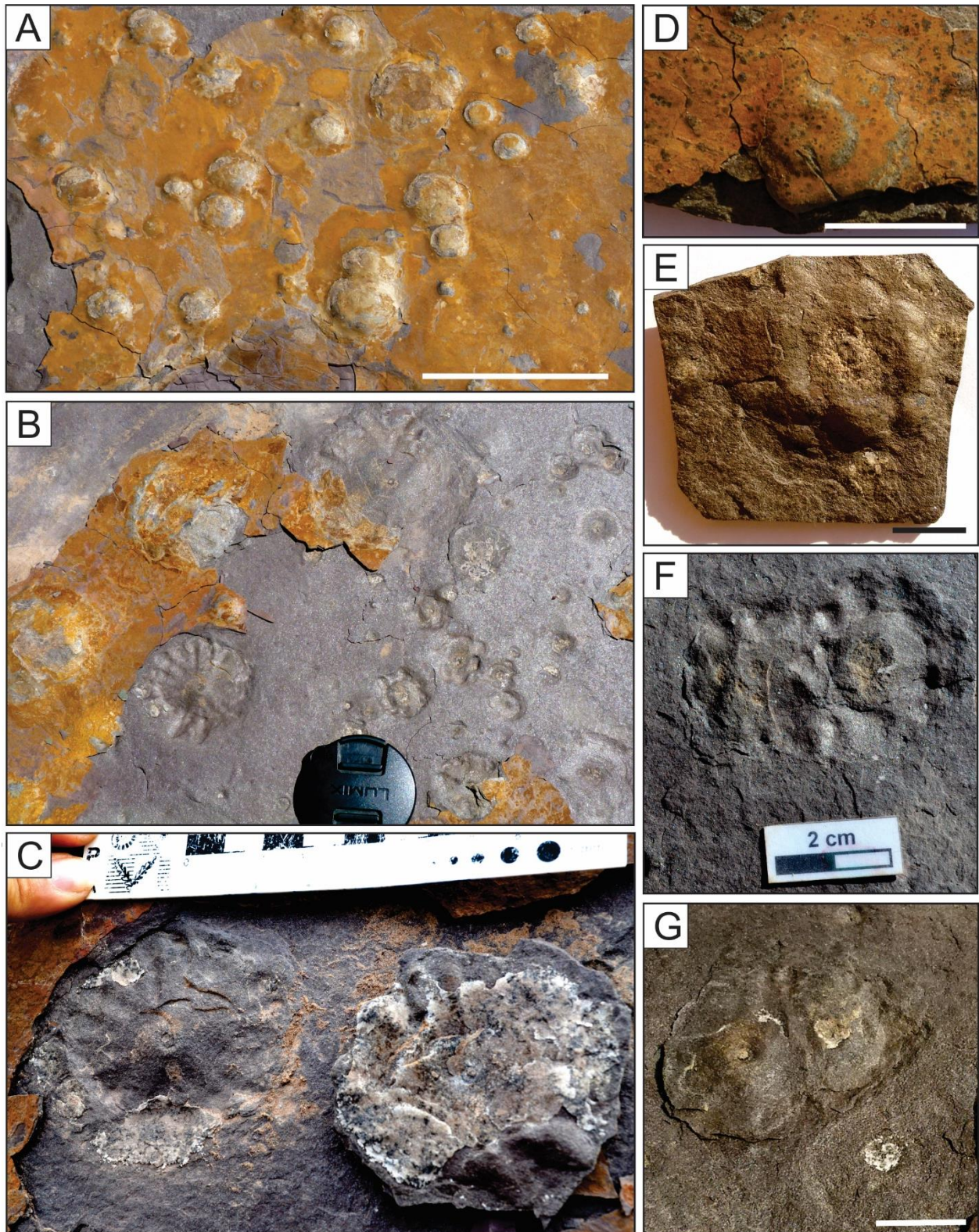
Nessa ocorrência foram observados apenas algumas poucas unidades de estruturas discoides, diferentemente da norma em que em um metro quadrado comumente apresenta muitas dezenas delas.

Na ocorrência observada na Pedreira Loma Negra (Localidade 2), próxima a cidade de Barker, as EDO apresentam diâmetros entre 12 mm e 125 mm, com uma média de 39 mm. Os discos tendem a ocorrer como feições em relevo positivo no contato entre fácies de arenito fino maciço de coloração castanha e fácies de argilito (Fig. 16-A e B). Tais depósitos pelíticos aparentemente se amoldam às estruturas discoides. Essas apresentam caráter tridimensional, sendo compostas pelo mesmo material sedimentar do pacote arenoso no qual ocorrem.

Devido ao contraste reológico entre os diferentes tipos litológicos, os blocos com estruturas discoides tendem a se fragmentar no contato entre o arenito e o argilito, revelando a porção interna ou inferior das EDO. Tais porções apresentam região central marcada por estrutura circular milimétrica de coloração amarelada e regiões periféricas marcadas por feições de enrugamento sem padrão bem definido (Fig. 16-C).

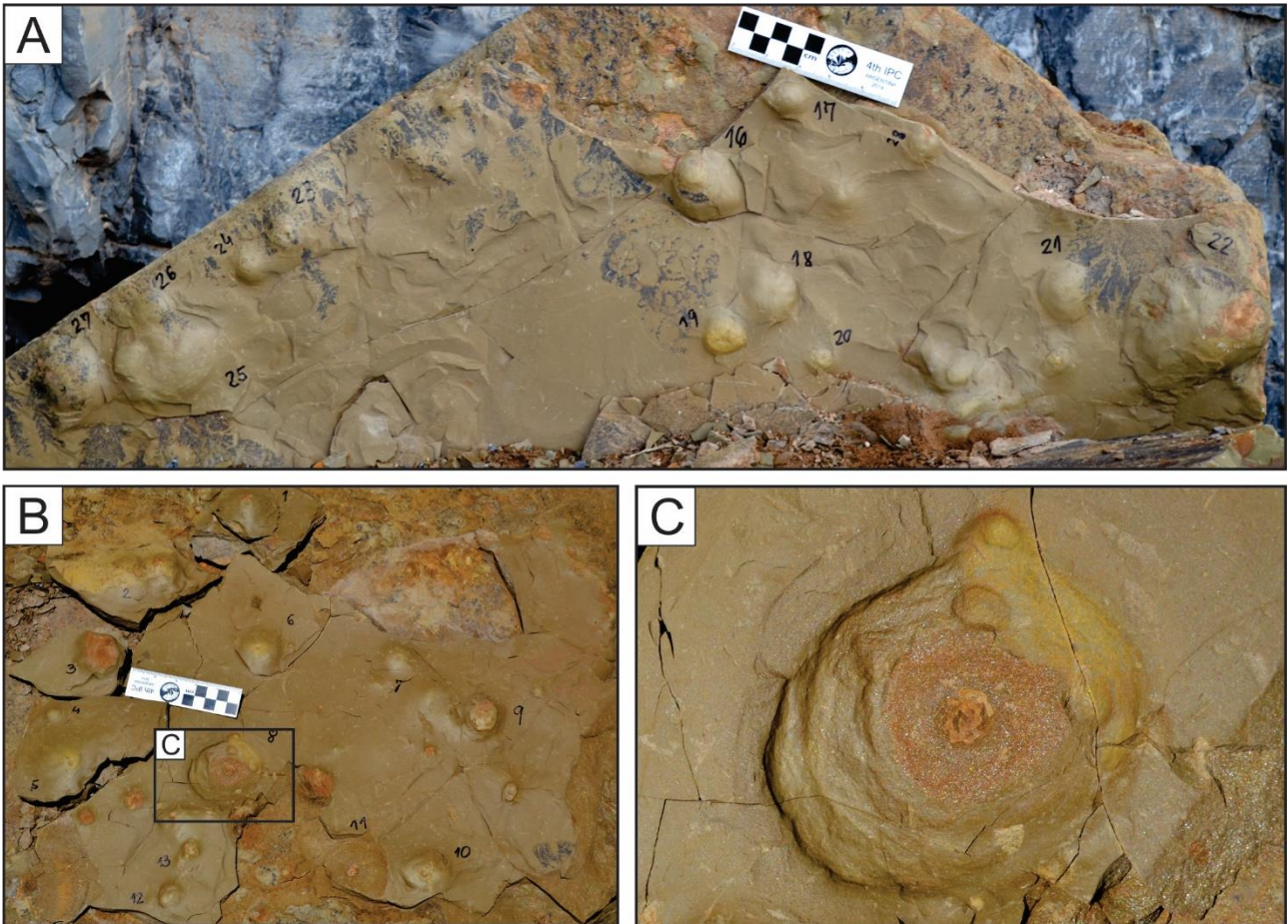
A presença de estruturas do tipo EDO, associadas ao topo de camadas ricas em marcas onduladas assimétricas foi observada em apenas um bloco. Nessa superfície, as estruturas ocorrem por vezes nas calhas das formas de leito, por vezes nas cristas, apresentando-se deformadas acompanhado a morfologia do substrato (Fig. 17-A e B).





**Figura 15** – Estruturas Discoides Ornamentadas (EDO) em blocos *ex situ* da Formação Cerro Negro (Pedreira La Cabañita – Loc. 1). A – Exemplos no topo de camada de *Alc*, em relevo positivo. B – Exemplos semelhantes aos ilustrados em A, com porção inferior exposta. Notar padrão de enrugamento radial. C – EDO com sua porção superior retirada, expondo seu hiporelevo positivo a direita e epirelevo negativo a esquerda. D e E – EDO com padrão de enrugamento lobado visíveis em epirelevo positivo (D) e hiporelevo positivo (E). F e G – Exemplos em contato com deformação mútua. Escalas: A: 15 cm; B: tampa de câmera: ~5 cm; D e G: 2 cm; E: 1 cm.





**Figura 16** – EDO em blocos *ex situ* da Pedreira Loma Negra (Loc. 2). A e B – Exemplares em relevo positivo recobertos por camada de sedimento pelítico. C – Detalhe de EDO ilustrada em B (destacada pelo quadro preto) no qual nota-se padrão de ornamentação mal desenvolvido, com poucos lobos dispersos pela área da estrutura.

Por sua vez, Estruturas Discoides Simples (EDS) foram descritas de maneira mais pontual, observação possivelmente enviesada devido à natureza mais discreta dessas estruturas, chamando menos atenção do observador. Ocorrem comumente associadas a níveis de arenito fino, texturalmente homogêneo, contudo, nos casos observados não foi notada a presença de laminação convoluta ou perturbada. Sua distribuição parece também não ser limitada a uma única fácies, sendo observadas raramente em blocos de siltito (Fig. 17-C).

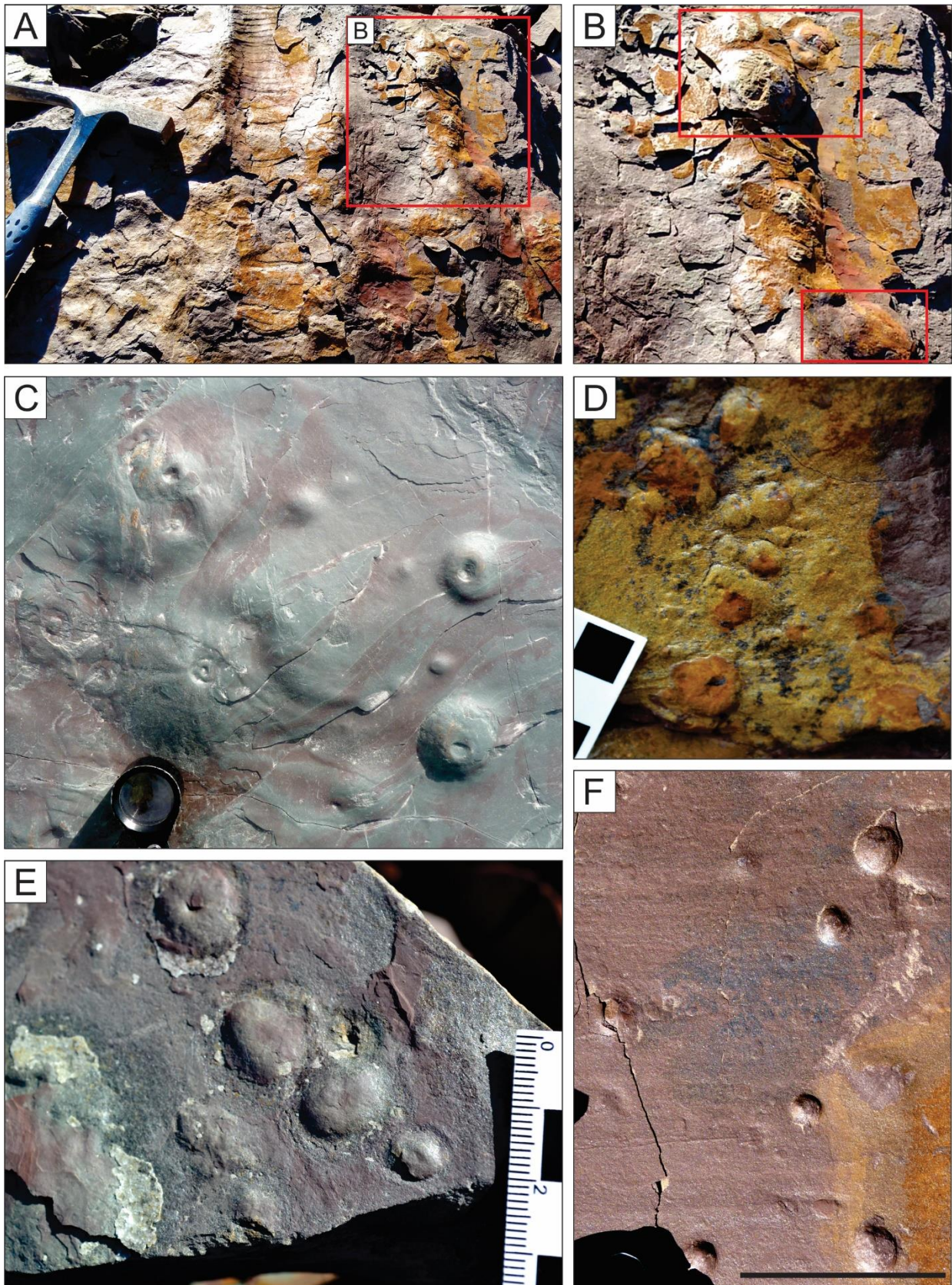
Uma das ocorrências de EDS foi observada em um bloco com nível de arenito maciço, caracterizado pela intercalação de arenito fino micáceo, sem estruturação visível e níveis descontínuos de argilito de coloração arroxeada. Sem a possibilidade de inferir topo ou base da camada (devido à ausência de estruturas sedimentares diagnósticas), as estruturas discoides caracterizam-se como feições em relevo positivo (Fig. 17-E). Apresentam diâmetros entre 0,5 e 1,5 cm, eventualmente com porção central levemente deprimida, podendo ocorrer sem esse caractere.

Ocorrem na superfície entre a fácies arenosa e a fácies argilosa, sendo compostas do mesmo arenito fino e micáceo que caracteriza a fácies na qual ocorrem (Fig. 17-E).

Outras ocorrências foram observadas como protuberâncias circulares, por vezes irregulares, milimétricas nas superfícies de camadas de arenito fino a muito fino (Fig. 17-D e F). Tais feições ocorrem em grupos dispersos (Fig. 17-F), podendo ocorrer como pequenos *clusters*, nos quais é observada deformação de exemplares quando em contato uns com os outros (Fig. 17-E).

Outra feição observada foi caracterizada como estruturas em relevo positivo em fácies de arenito fino a muito fino, rico em grãos de mica. As estruturas apresentam depressão bem marcada na porção central, com dimensões variando entre 1 e 7 mm de diâmetro (Fig. 18-C). Ocorrem associadas a feições alongadas que se prolongam a partir da região central das estruturas discoides, projetando-se orientadas em uma mesma direção. Tais estruturas são interpretadas por Warren et al. (2018 *em preparação*) como estruturas do tipo ILS (*Intrites Like Structures*) (*sensu* MENON et al. 2016), sendo assim, feições produzidas pela interação entre escape de fluidos e substratos bioestabilizados. Para efeitos descritivos, entretanto, tais estruturas podem ser incluídas na categoria EDS.





**Figura 17** – Estruturas discoides em blocos *ex situ* e exposições na Localidade 1. A – EDO dispersas na superfície de bloco da fácies *Alc* com marcas onduladas. B – Detalhe das EDO ilustradas em A. C – Estruturas discoides sem ornamentação aparente em epirelevo positivo (EDS?), observadas em blocos *ex situ* na Localidade 1 (foto sedida por L. Warren). D – EDS em bloco de arenito muito fino. E – EDS alinhadas em arenito fino texturalmente homogêneo. F – EDS dispersas no topo de bloco de arenito fino. Escala: A: comprimento do martelo: ~30 cm; F: 5 cm



Para uma análise morfológica quantitativa do material, em campo foram medidas e contabilizadas um total de 477 ( $n=477$ ) estruturas EDO distribuídas na superfície de blocos *ex situ*. As estruturas ocorrem em padrão de alta densidade populacional, com uma média de 108 exemplares/m<sup>2</sup> (Fig. 18 – A e B). Dentro desse  $n$  amostral, suas dimensões variam entre 4 e 106 mm de diâmetro, com uma média de 31 mm. A distribuição dos exemplares com diferentes dimensões obedece um padrão normal com assimetria positiva da curva, indicando uma maior frequência de exemplares com diâmetros menores em relação aqueles com diâmetros maiores (Fig. 19 – Graf.1).

Em uma tentativa de quantificar os aspectos morfológicos descritos para as EDO, foram atribuídos valores de 0 a 3 aos exemplares nos quais foi possível a observação da porção inferior (hiporelevo positivo e/ou epirelevo negativo). Nesta classificação, 0 indica a ausência do caractere rugosidade, 1 indica sua presença incipiente, 2 a presença de rugosidade bem desenvolvida e 3 quando este ocorre de forma clara e bem marcada. Dessa forma, excluindo-se os exemplares nos quais foi possível apenas a observação do epirelevo positivo, utilizou-se um  $n = 370$ .

Dentro desse espaço amostral, notou-se uma correlação entre os padrões morfológicos de enrugamento observados (0, 1, 2 e 3) e as classes de diâmetro das estruturas. De modo geral, exemplares com as menores dimensões tendem a não apresentar padrão de enrugamento, ou quando apresentam, esse é incipiente (valores 0 e 1), enquanto em estruturas maiores, o padrão de enrugamento tende a se apresentar de forma mais clara (valores 2 e 3) (Fig. 19 - Graf. 2).

Tais análises quantitativas têm sido utilizadas com frequência na literatura para a interpretação do desenvolvimento de comunidades bentônicas ediacaranas (GEHLING et al. 2000, TARHAN et al. 2010, 2015 entre outras). Assim, nesse trabalho foram usadas duas populações controle, de modo a comparar a morfologia das curvas de frequência com que ocorrem diferentes classes de tamanho.

Como primeira população controle, foi utilizado um bloco de estruturas discoides interpretadas por Warren et al. (2018 *em preparação*) como estruturas ILS (Fig. 18 – C). Dessa forma e de acordo com a interpretação assumida, tais estruturas seriam resultantes de processos físicos (e naturais).

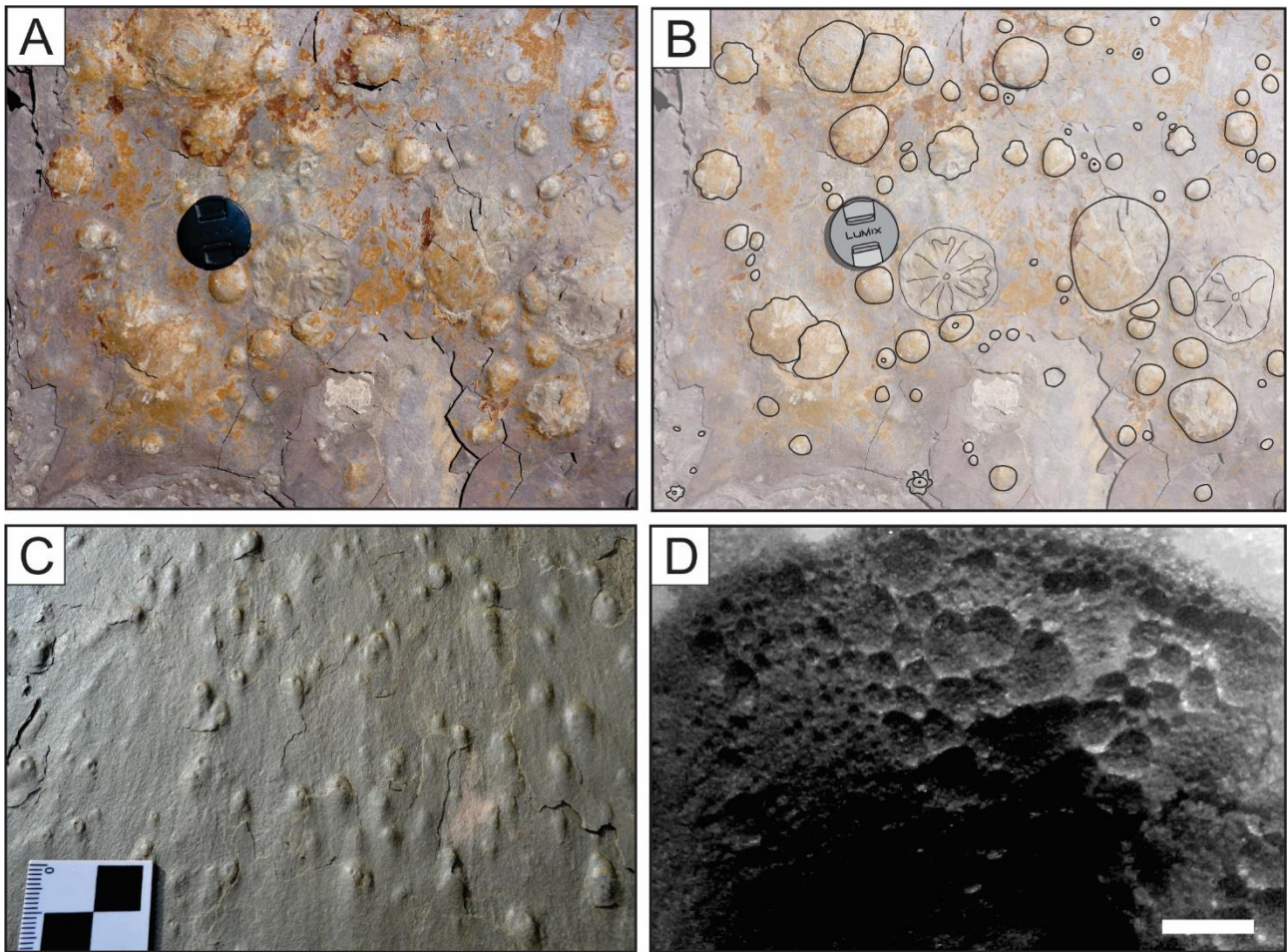
Observadas em ao menos três blocos, as estruturas distribuem-se em padrão de alta densidade populacional (83/dm<sup>2</sup>), contabilizando um  $n$  de 248 exemplares em um bloco analisado. A confecção de um gráfico de correlação entre os diferentes diâmetros observados e a frequência com que ocorrem aponta para uma distribuição normal, semelhante ao observado para as EDO (Fig. 19 - Graf. 3).

A segunda população controle foi utilizado um conjunto de bolhas impressas em “pó de café” em um filtro comum, após a filtragem da bebida (Fig. 18 – D). Devido a relações de granulometria e interações com o fluido quente, o “pó de café” comporta-se como material com relativo grau de coesão, resultando na preservação da geometria das bolhas após passagem do fluido. Dessa forma foram contabilizadas 143 bolhas com diâmetros entre 1 e 9 mm, com média de 2,3mm. Essas apresentam geometria circular a elíptica, distribuindo-se com alta densidade populacional,

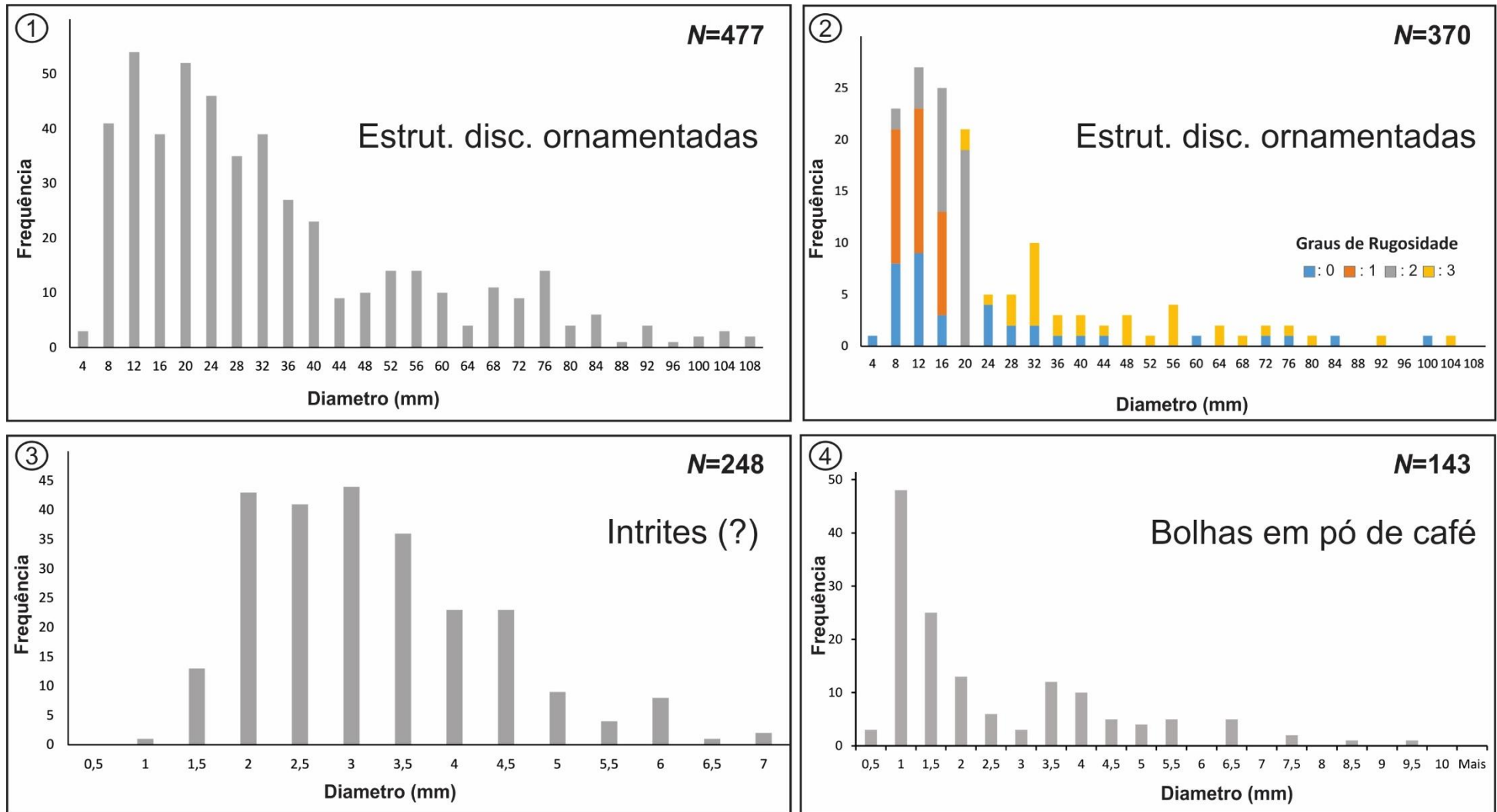


comumente deformando-se mutuamente quando em contato umas com as outras. Tal população foi escolhida devido a semelhança fortuita com estruturas discoides ediacaranas, e por sua aleatoriedade em termos de processo físico de desenvolvimento.

Como resultado, tem-se uma distribuição normal com assimetria para a esquerda das frequências com que ocorrem diferentes classes de diâmetros nas bolhas (Fig. 19-Graf. 4), muito semelhante ao observado nas populações de EDO e de ILS.



**Figura 18** – EDO e estruturas discoides controle utilizadas para análise quantitativa do material estudado. A e B – Exemplos de EDO em bloco *ex situ* na Localidade 1 e desenho com destaque para as estruturas (B). C – ILS em bloco *ex situ* na Localidade 1. D – Bolhas impressas em “pó de café”. Notar exemplares em contato com deformação mútua. Escalas: A e B: Tampa de câmera digital: ~5cm; D: 1 cm.



**Figura 19** – Gráficos das frequências de ocorrência de diferentes classes de tamanho das populações de EDO (Gráficos 1 e 2), ILS (Gráfico 3) e “Bolhas em pó de café” (Gráfico 4).

### 8.3. PETROGRAFIA E ESTRUTURAÇÃO INTERNA DAS ESTRUTURAS DISCOIDES

O estudo de estruturas sedimentares, seja qual for sua natureza, não está completo sem o acesso as suas feições internas, por meio da observação de cortes transversais em escala de afloramento, da análise de seções polidas em amostras de mão, ou mesmo da caracterização petrográfica do material por meio de seções delgadas.

O mesmo é válido para feições produzidas por processos biológicos, tais como traços fósseis, depósitos bioturbados, ou ainda estruturas de origem microbial, como estromatólitos e seus correspondentes em sistemas siliciclásticos e/ou evaporíticos. Desta forma, a mesma abordagem pode ser aplicada para fósseis e estruturas problemáticas associadas ao contexto paleobiológico do Ediacarano. Nestes casos, o emprego de técnicas não destrutivas, tais como tomografia computadorizada tridimensional tem se revelado ultimamente como fundamental, devido à raridade e importância desse material.

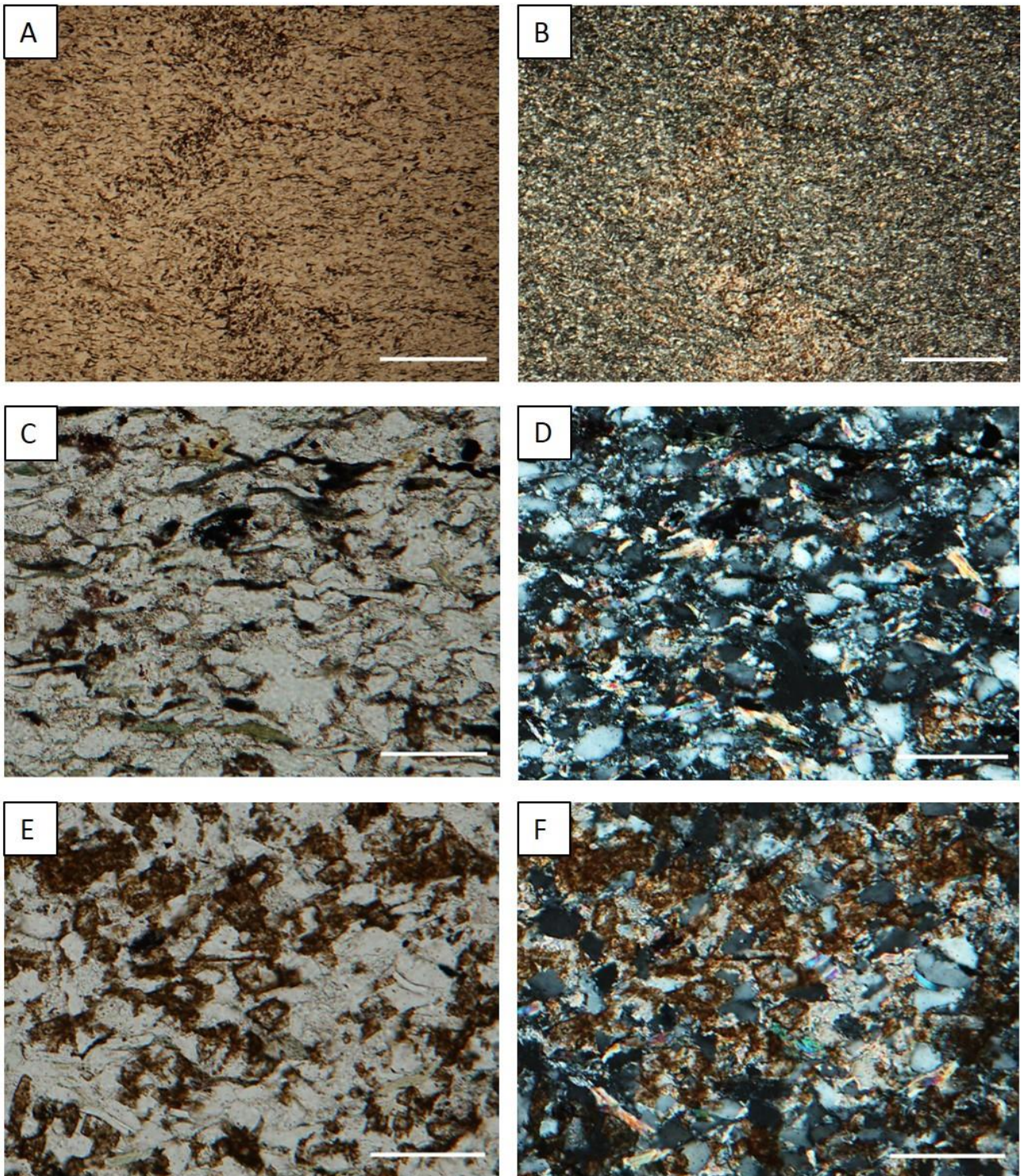
Neste trabalho, foi dado especial enfoque nas estruturas caracterizadas como EDO, sendo essas as feições discoides mais comumente observadas nos blocos *ex situ* nas Localidades 1 e 2. São essas também as estruturas interpretadas por Arrouy et al. (2016) como espécimes representantes do *plexus Aspidella*, justificando uma análise mais atenta desse material. Assim sendo, um número significativamente menor de exemplares de estruturas discoides não ornamentadas (Estruturas Discoides Simples – EDS) foi descrito e analisado, com o objetivo de compará-las com estruturas mais complexas.

Dessa forma, foram confeccionadas seções polidas e lâminas delgadas de amostras de estruturas discoides, bem como dos depósitos da fácies *Alc* nas quais ocorrem as feições ornamentadas (EDO), de forma a caracterizar estruturas, texturas e mineralogias que permitissem entender sua gênese e preservação.

O pacote de arenito de aspecto maciço no topo do qual ocorrem as estruturas discoides é caracterizado ao microscópio óptico por um arenito fino a muito fino (Fig. 20-A e B) composto majoritariamente por grãos de quartzo angulosos, por vezes caracterizados por extinção ondulante, ou ainda fragmentos líticos compostos por agregados de grãos de quartzo. O contato entre os grãos é predominantemente pontual a retilíneo (Fig. 20-C e D).

Nota-se a presença marcante de filossilicatos, predominantemente grãos de muscovita, ocorrendo também biotita e clorita, comumente orientados paralelamente ao acamamento sedimentar. São comuns também minerais opacos de hábito placoide, distribuídos em lâminas, ou caracterizando superfícies descontínuas de aspecto crenulado. Por vezes apresentam-se com aspecto intersticial, contornando a superfície de grãos de quartzo.





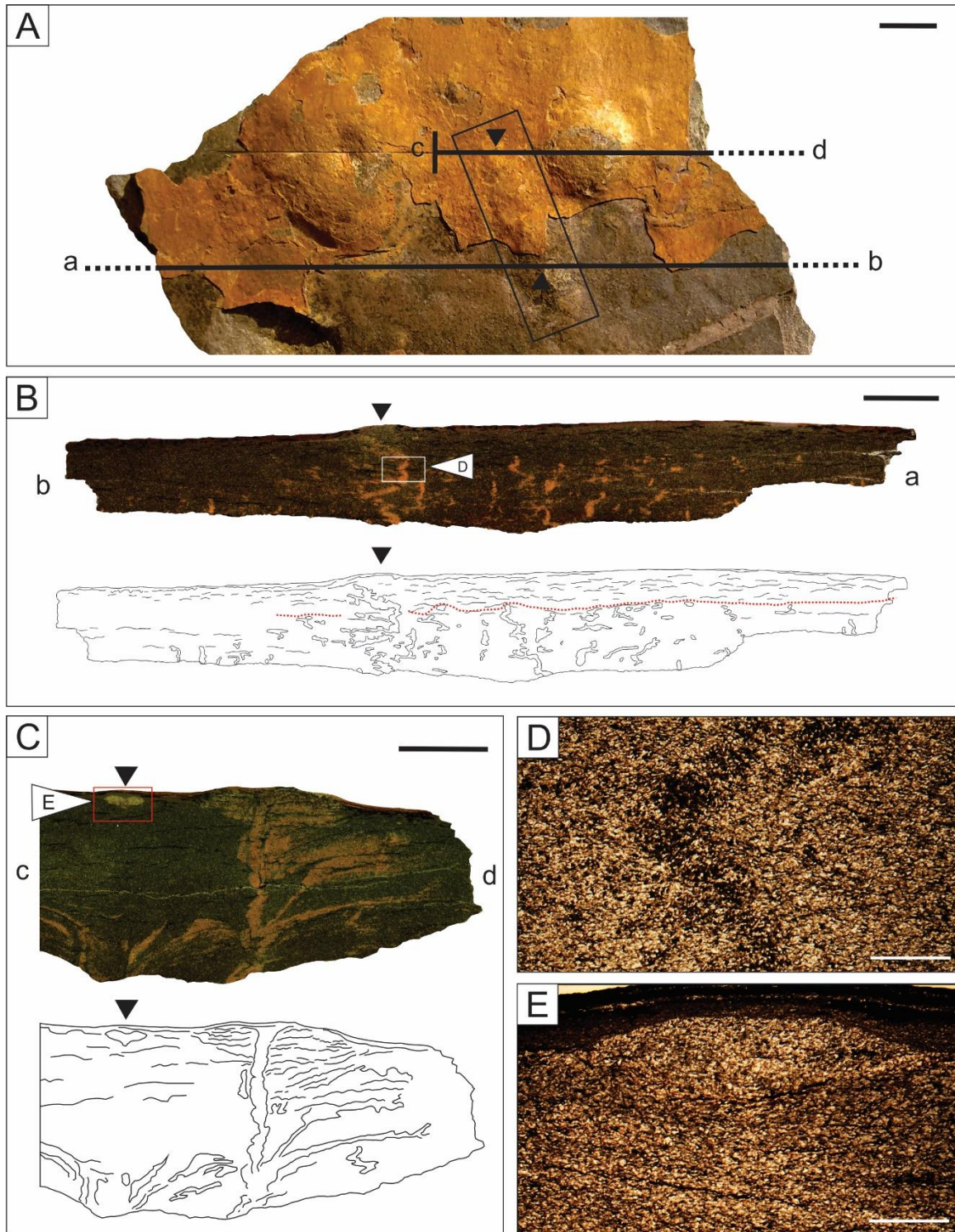
**Figura 20** - Fotomicrografias obtidas a partir de amostra de *Alc*. A e B - Arenito fino a muito fino cortado por estrutura discordante e subvertical observado com nicóis paralelos (A) e cruzados (B). C e D – Detalhe no qual observam-se grãos predominantemente angulosos com eixo maior paralelo ao acamamento sedimentar observado com nicóis paralelos (C) e cruzados (D). Notar presença de grãos de filossilicatos (clorita) paralelos ao acamamento e cimento de sílica (calcedônia). E e F – detalhes texturais da estrutura discordante observada em (A) e (B), observados com nicóis paralelos (E) e cruzados (F). Notar empacotamento aberto dos grãos e cimentação por calcita e minerais de coloração castanha (possivelmente óxidos/hidróxidos de ferro). Escalas: A e B: 1mm; C a F: 0,125 mm.

De modo geral, as porções intergranulares da rocha ocorrem preenchidas por calcedônia, caracterizada por baixa birrefringência e hábito fibroso identificado pelo padrão de extinção ondulante da massa criptocristalina, observada à luz polarizada (Fig. 20-D).

Nesses pacotes de arenito ocorrem ainda estruturas alongadas e sinuosas, que cortam o acamamento sedimentar subverticalmente e apresentam espessuras de 1 a 3 mm. Tais estruturas caracterizam-se pela presença de grãos de quartzo discretamente maiores (Fig. 20-A e B). Ainda é notável um menor grau de empacotamento, com predomínio de contato pontual ou flutuante, caso em que os grãos ocorrem parcialmente sustentados pelo cimento calcítico (Fig. 20-E e F). Tais estruturas são ricas também em cimento castanho avermelhado de provável composição de óxido ou hidróxido de ferro (Fig. 20-E e F). Tal feição é correlacionada às estruturas discordantes subverticais observadas em campo (Fig. 20-A e D).

Em corte, nota-se que a porção superior dos depósitos da fácies *Alc*, no topo da qual ocorrem as estruturas discoides, apresenta alta concentração dessas feições milimétricas discordantes, as quais encontram-se na maior parte dos casos interrompidas, ou truncadas no último 0,5 cm da camada (Fig. 21-B). Tais feições parecem dividir-se em duas classes principais: 1) Estruturas com geometria linear e tubular, que, quando rompem a porção superior da camada culminam nas feições tridimensionais, discoides em planta (EDO), ou 2) estruturas de geometria plana, semelhantes a diques clásticos em escala milimétrica que, quando rompem a superfície da camada, terminam em uma feição alongada em relevo positivo (Fig. 21 –A, B e C).





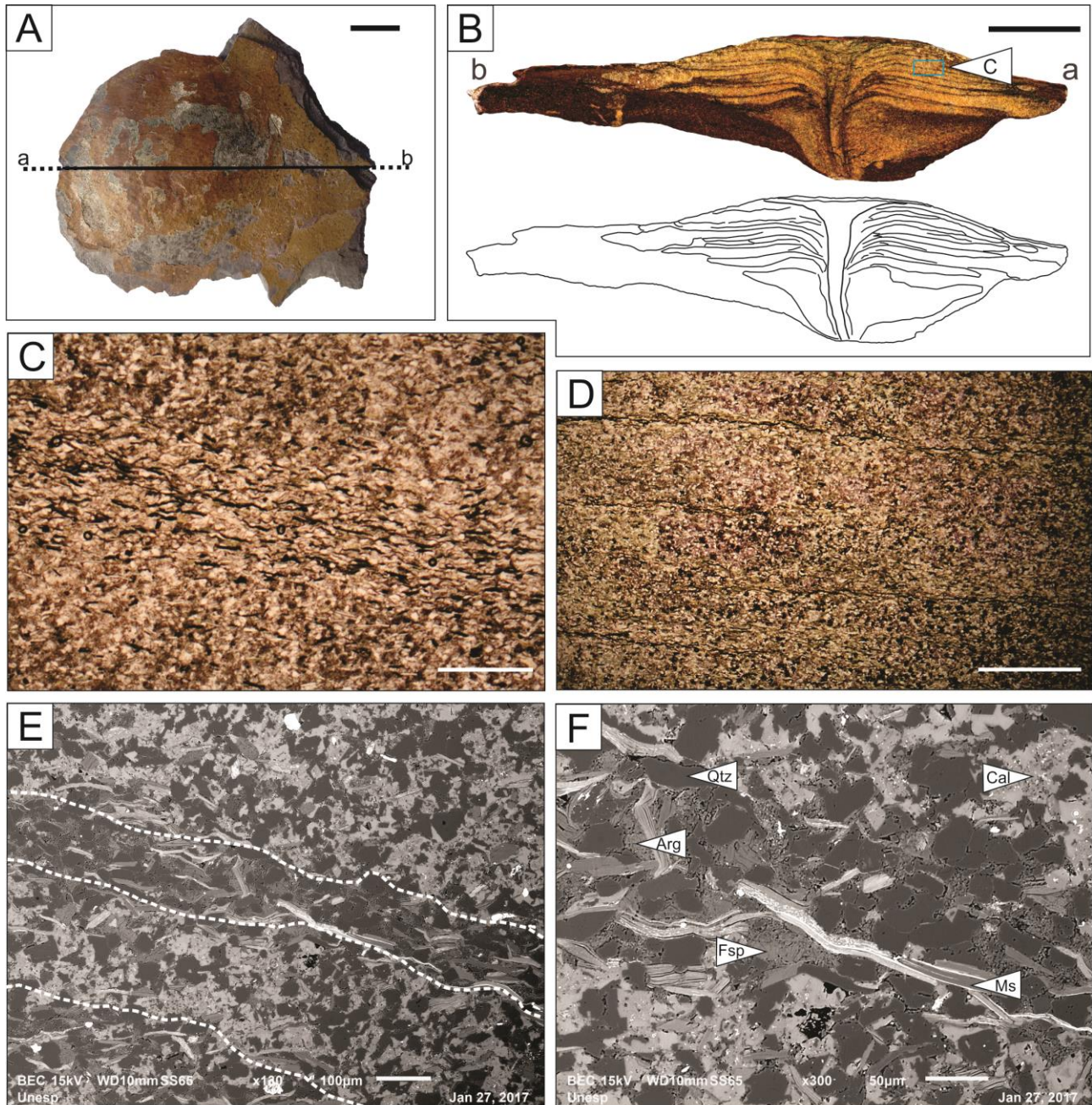
**Figura 21** - Detalhes de corte de amostra do topo da fácies *Alc*, observados em planta e em corte. A – Vista em planta na qual observam-se duas EDO e uma estrutura linear indicada pelo quadro preto. B – seção *a-b*, indicada em (A) na qual observa-se concentração de estruturas discordantes e subverticais com marcado truncamento em sua extremidade superior, determinados por superfície evidenciada no desenho interpretativo por tracejado vermelho. Notar que uma dessas estruturas discordantes rompe a superfície, culminando na feição elevada, destacada pelos triângulos pretos (observar em A). C – Detalhe em corte da seção *c-d* destacada em (A). Observa-se estrutura discordante culminando em uma EDO. Ao lado, expressão em corte com geometria lenticular de estrutura linear destacada em (A). D – Detalhe ao microscópio óptico de estrutura discordante destacada em (B). E – Fotomicrografia de estrutura lenticular destacada em (C). Escalas: A a C: 1cm; D e E: 1mm

As estruturas do tipo EDO, quando observadas em corte transversal radial (passando pelo centro da estrutura), apresentam-se como estruturas internamente laminadas. Tal laminação determina o relevo positivo das estruturas bem como os planos de fraqueza nos quais as feições comumente se fragmentam, sendo facilmente visíveis em amostras polidas devido a diferença de coloração (Figs. 15-C; 22-B).

A laminação com espessuras milimétricas a submilimétricas é determinada pela intercalação de 1) níveis de arenito fino a muito fino, com contato pontual a retilíneo entre os grãos cimentados por calcita; 2) níveis ricos em grãos de quartzo angulosos, com granulação areia muito fina a silte, com contato retilíneo entre os grãos e porções intergranulares preenchidas por argilominerais (detectados ao MEV) (Figs. 21-C, D e E). Tais níveis apresentam uma expressiva concentração de grãos de muscovita, biotita, clorita e minerais placóides opacos. Ao MEV foi possível identificar que os grãos de minerais placóides opacos são grãos de muscovita ou biotita cujos planos de clivagem foram aproveitados como superfícies para precipitação de óxidos de ferro e manganês diagenéticos. A presença pervasiva dessas fases minerais torna por vezes impossível observar os filossilicatos, sendo esses totalmente manteados ou até parcialmente substituídos pelos óxidos (Figs. 22-D e E).

Cada par de lâminas textural e mineralogicamente distintas aparenta se repetir aproximadamente de dez a doze vezes em cada estrutura, notando-se comumente uma tendência a um adelgaçamento das lâminas em direção às extremidades da estrutura. Nestas porções terminais das lâminas ocorre muitas vezes o desenvolvimento de padrões de injeção de sedimento arenoso em meio a sedimento inconsolidado, notando-se entre os dois materiais, baixo ou nenhum contraste granulométrico. Entre os padrões de injeção observados, destaca-se a reorientação de grãos de filossilicatos presentes no material encaixante das lâminas, amoldando-se à geometria dessas, encapsulando suas terminações, sendo observado maior grau de compactação na região próxima ao contato entre as lâminas e o sedimento encaixante.





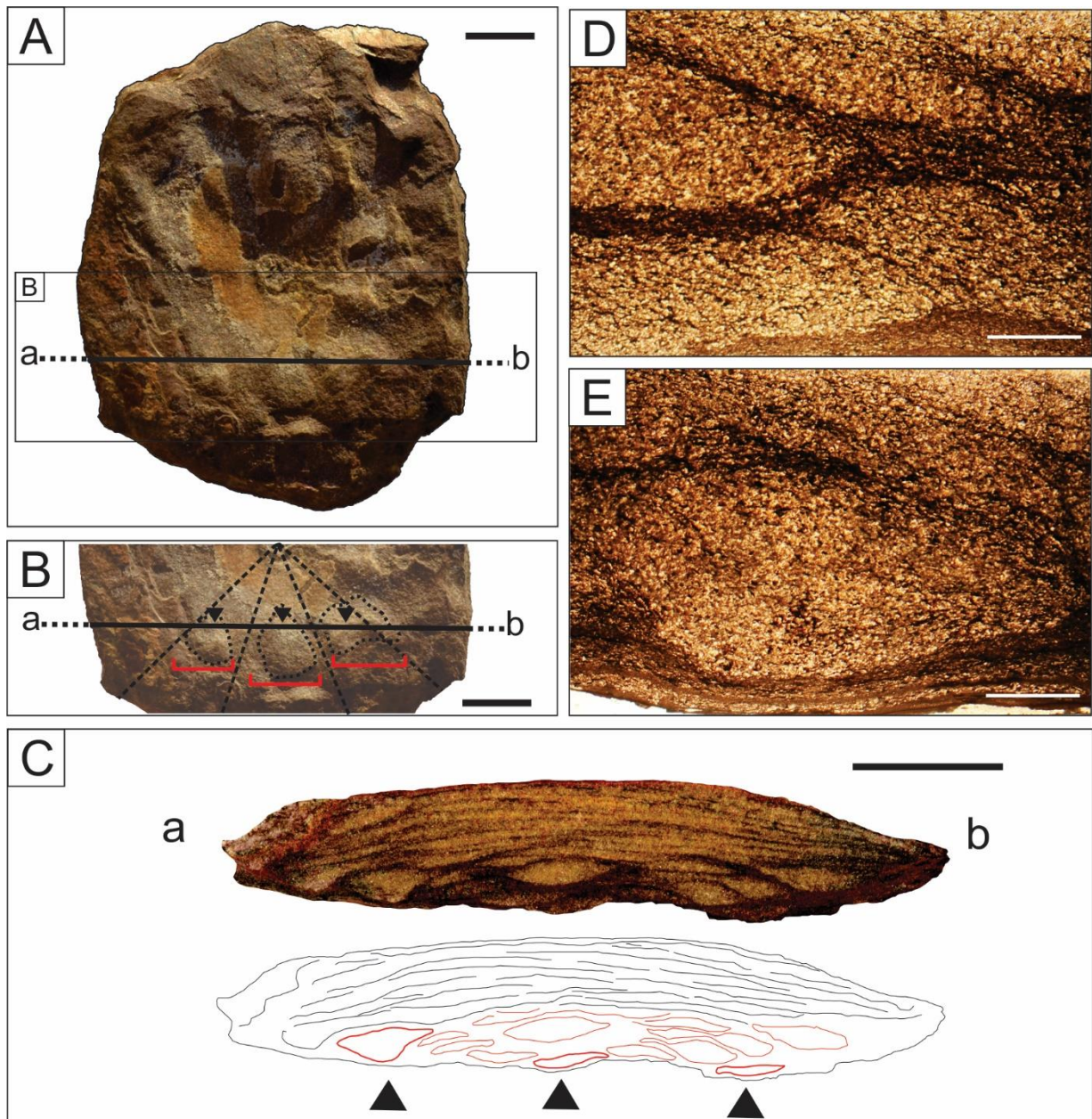
**Figura 22** - Detalhes da estrutura interna de exemplar de EDO. A – Vista em planta da estrutura em epirelief positivo. B – Seção *a-b* destacada em (A) com desenho interpretativo da laminação e da estrutura central verticalizada. C e D – Detalhe ao microscópio óptico de porção da laminação destacada em (B). Notar nível rico em grãos de filossilicatos com coloração escura. E – Detalhe ao MEV de laminação como apresentada em (C), evidenciada por linhas tracejadas. Notar diferentes graus de empacotamento e concentração de filossilicatos. F – Detalhe de nível rico em filossilicatos, apresentando concentrações de argilominerais nos interstícios dos grãos. *Qtz*: quartzo; *cal*: calcita; *fsp*: feldspato; *ms*: muscovita; *arg*: argilomineral. Escalas: A e B: 1 cm; C: 0,5 mm; D: 100 µm; E: 50 µm.

Tal padrão é observado de maneira mais clara em cortes realizados em seções periféricas às estruturas EDO (cortes distantes da seção radial). Nesses cortes, nota-se que a porção inferior perde o padrão fortemente laminado. Este é substituído pela presença de lentes subcentimétricas comumente descontínuas, porém por vezes interconectadas por nível delgado semelhante a laminação presente na



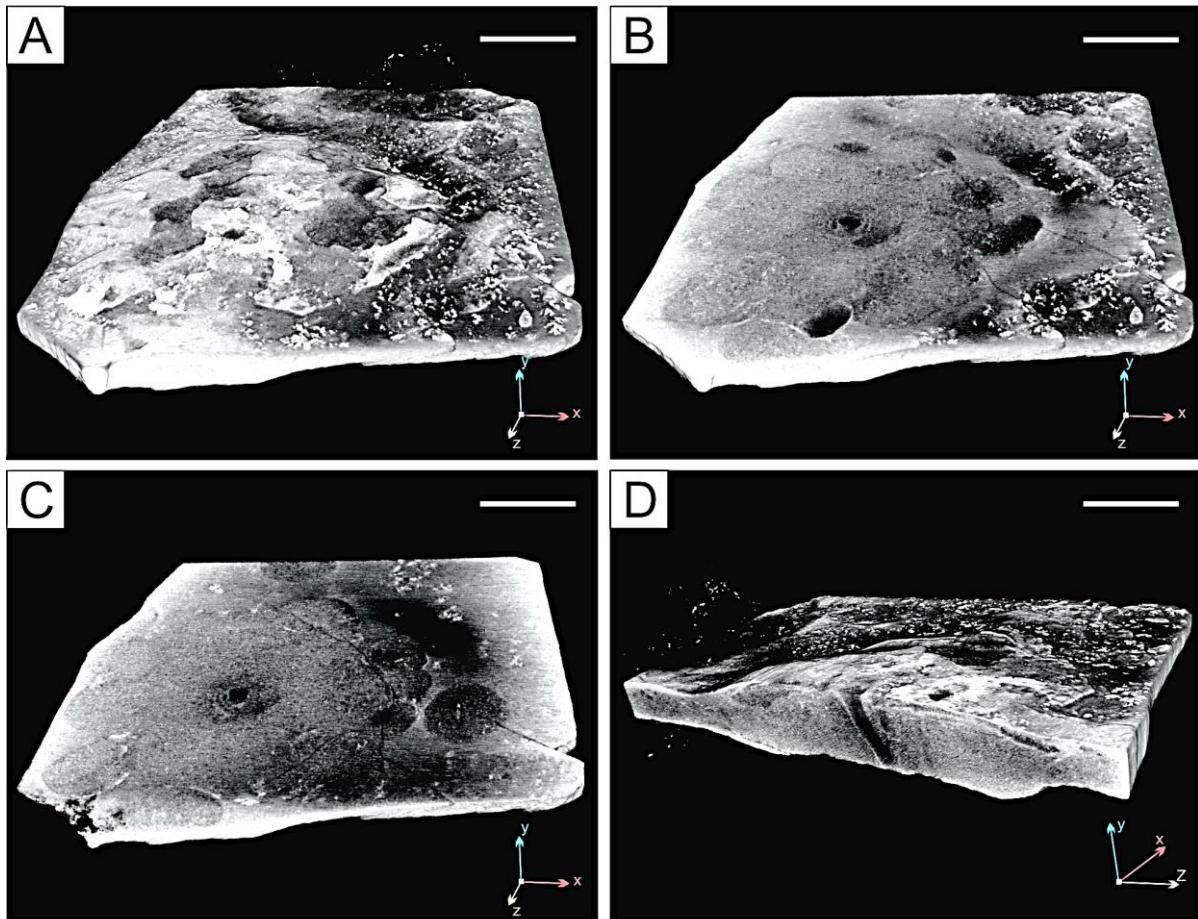
porção superior (Figs. 23-A, B e C). Tais lentes são caracterizadas pela presença em seu interior de grãos de quartzo com contato comumente retilíneo. Suas bordas são ricas em grãos de minerais placóides orientados de modo a se amoldarem a geometria da estrutura, conformando bolsões de sedimento encapsulados por grãos de filossilicatos (Figs.23-D e E). É notado ainda maior grau de compactação na região próxima ao contato entre as lentes e o sedimento encaixante (Figs.23-D e E).

Outra importante observação é a relação intrínseca entre a distribuição dessas lentes e a presença de padrão de enrugamento radial ou tuberoso observado em planta nas porções inferiores a essa (hiporelevo positivo e epirelevo negativo). Em corte que secciona a superfície ondulada (enrugada), nota-se que este é determinado pela presença das lentes de sedimento, sendo a presença delas as cristas e a ausência delas os vales (áreas deprimidas) observados (Fig 23-A, B e C).



**Figura 23** - Detalhes da estruturação interna de exemplar de EDO. A – Vista do hiporelevo de EDO, na qual é possível observar distinto padrão de enrugamento radial. B – Detalhe do hiporelevo com três lobos destacados por tracejado (A). C – Seção periférica *a-b* destacada em (A) e (B) na qual se observa padrão laminado em sua porção superior e padrão lenticular na base. Notar como cada lente parece se relacionar a cristas da crenulação observada em planta, destacadas com triângulos pretos (observar triângulos em B). D e E – detalhes ao microscópio óptico das lentes ou bolsões de sedimento. Escalas: A a C: 1 cm; D e E: 1 mm.

As imagens obtidas por meio de Microtomografia Computadorizada (Micro-CT) realizada em amostra de EDO com claro desenvolvimento de padrão de enrugamento do tipo lobado revelam relações similares. Calibrada para evidenciar pequenos contrastes de densidade, as imagens permitem visualizar pequenas variações na granulação do material sedimentar. Assim, ao acessar diferentes níveis num eixo *y* e posicionado perpendicular ao plano de acamamento sedimentar é possível observar o aspecto tridimensional, com geometria circular em planta, de bolsões de sedimento que se distribuem ao longo da área da estrutura discoide (Fig. 24-A a C).



**Figura 24** - Imagens obtidas por meio de Microtomografia Computadorizada (Micro-CT) de exemplar de EDO com padrão de enrugamento lobado. A – Vista oblíqua da estrutura com superfície lisa no epirelevé. B a C – cortes sucessivamente mais profundos no plano  $xz$ , nos quais é possível identificar lentes tridimensionais de sedimento controlando a distribuição do padrão de enrugamento. D – Corte transversal radial no plano  $yz$  no qual é visível estrutura central verticalizada e com geometria aproximadamente cônica. Escalas: 1 cm.

A região central dos discos, que em planta caracteriza-se pela presença de padrão circular bem definido, em corte radial é marcada pela presença de estrutura subvertical discordante que penetra o sedimento arenoso sotoposto às estruturas, caracterizando comumente feição tubular em profundidade que grada para uma feição cônica em sua porção superior (Figs. 21-C, 22-B e 20-D). Em um fragmento singular de uma EDO (Fig. 25-E), foi possível observar tal feição como uma expressão tridimensional (não seccionada), a qual demonstrou que a geometria tubular se estende até o topo da estrutura, perto do qual o tubo aparenta se inclinar e se encaixar em uma zona de sedimento perturbado com morfologia cônica. Nesta amostra, o tubo apresenta em seu interior uma série de discretas laminações, sub-horizontais, levemente côncavas para o topo. Ao microscópio, a região do tubo é definida por uma perturbação no arranjo dos grãos do arcabouço. Dentre as feições observadas destacam-se: 1) Aparente encurvamento da laminação determinada por filmes de minerais placóides, com desenvolvimento de formas parabólicas com convexidade voltada para baixo; 2) Reorientação dos grãos do arcabouço, desenvolvendo sutil bandamento granulométrico subverticalizado e que acompanha a geometria parabólica positiva, provavelmente efeito de corte devido à sua geometria

cilíndrica; 3) Orientação dos grãos de filossilicatos em posição subvertical nas proximidades da estrutura central; 4) Relações de corte e preenchimento da estrutura (Fig.25-B e C); 5) Truncamento da estrutura central com a superfície da camada e da estrutura (Figs. 22-B e 25-B e C); 6) Inclinação ou deslocamento lateral de sua porção superior (Fig. 25-B, C e D).

Entre os aspectos que puderam ser detalhados com a confecção de cortes nas estruturas, encontra-se a deformação observada em planta entre exemplares contíguos (Figs. 15-Fe G, 25-A e 26-A). Em corte, tais exemplares apresentam feições que indicam interação entre as lâminas de sedimento que compõem sua estruturação interna. Lâminas presentes na porção da estrutura em contato com outra apresentam tendência a encurtamento, em comparação às lâminas presentes na porção diametralmente opostas (Figs. 25-B e 26-B).

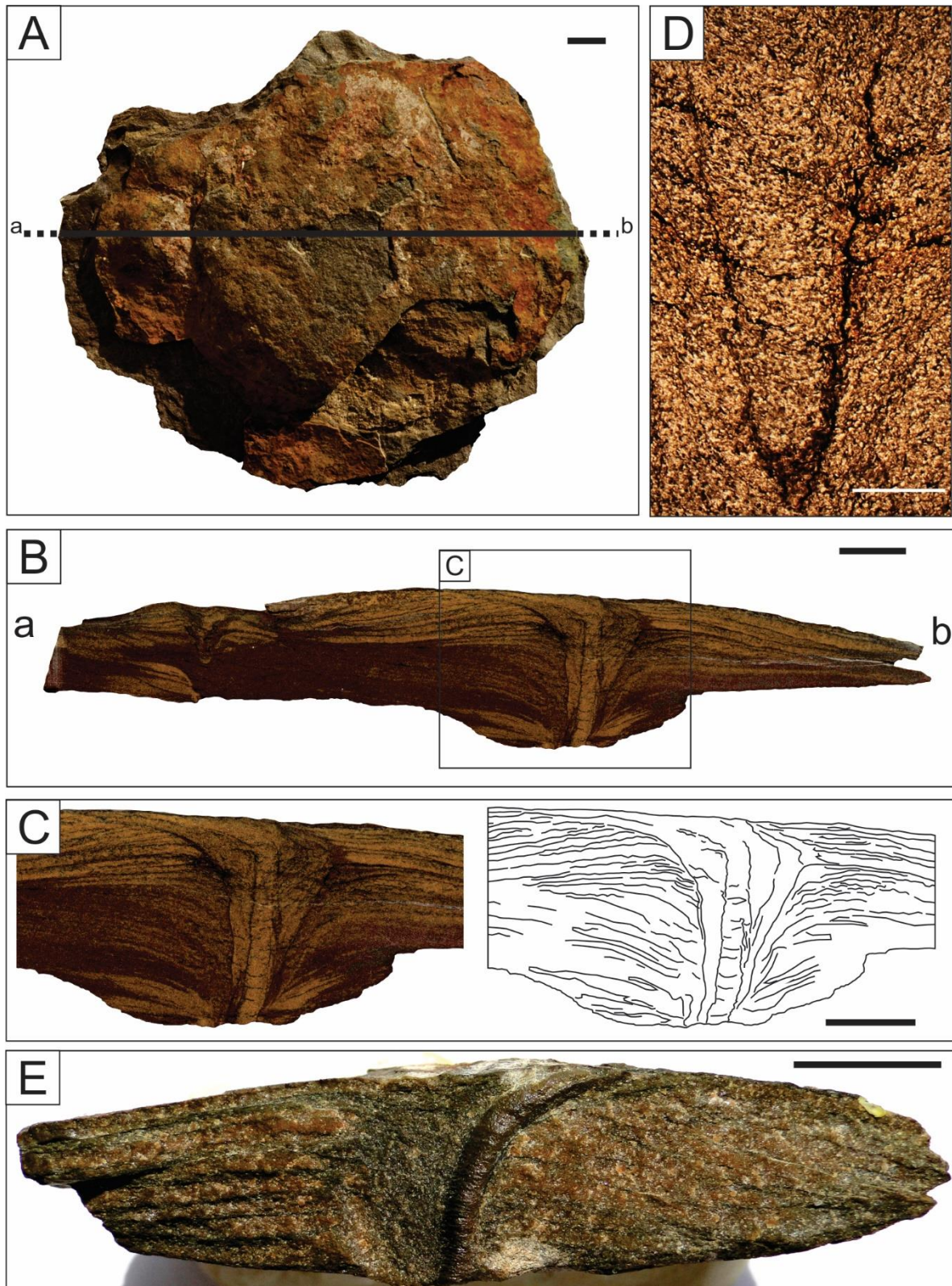
As lâminas encurtadas apresentam terminações totalmente encapsuladas por concentrações de minerais de hábito placóide, sendo notável o maior grau de empacotamento na região de contato entre as lâminas. Tal concentração de filossilicatos está sempre presente, não sendo observada evidência de rompimento do mesmo, ou mistura de material sedimentar proveniente de diferentes estruturas discoides. Nota-se ainda comumente padrão de interdigitação entre as lâminas de diferentes estruturas (Fig. 26-D).

Outra feição que parece indicar a interação entre exemplares é notada nas Figuras 26-B e C, nas quais é possível observar a presença de um nível de descontinuidade horizontal deslocando a porção superior da estrutura discoide maior em relação a sua porção inferior. Nota-se que tal deslocamento ocorre no mesmo horizonte em que a estrutura discoide menor parece fazer contato com a maior (Fig. 26-B).

Por fim, foram realizados cortes em estruturas caracterizadas como EDS. Tais feições foram observadas em campo com frequência consideravelmente menor do que as EDO, justificando o número menor de amostras coletadas para análises em laboratório. Outro fator limitante refere-se às dimensões reduzidas dessas estruturas. Dada a espessura da lâmina da serra de rocha utilizada, com dimensões na mesma ordem de grandeza do diâmetro das estruturas, cortes precisos que seccionem as feições em regiões específicas foram inviabilizados.

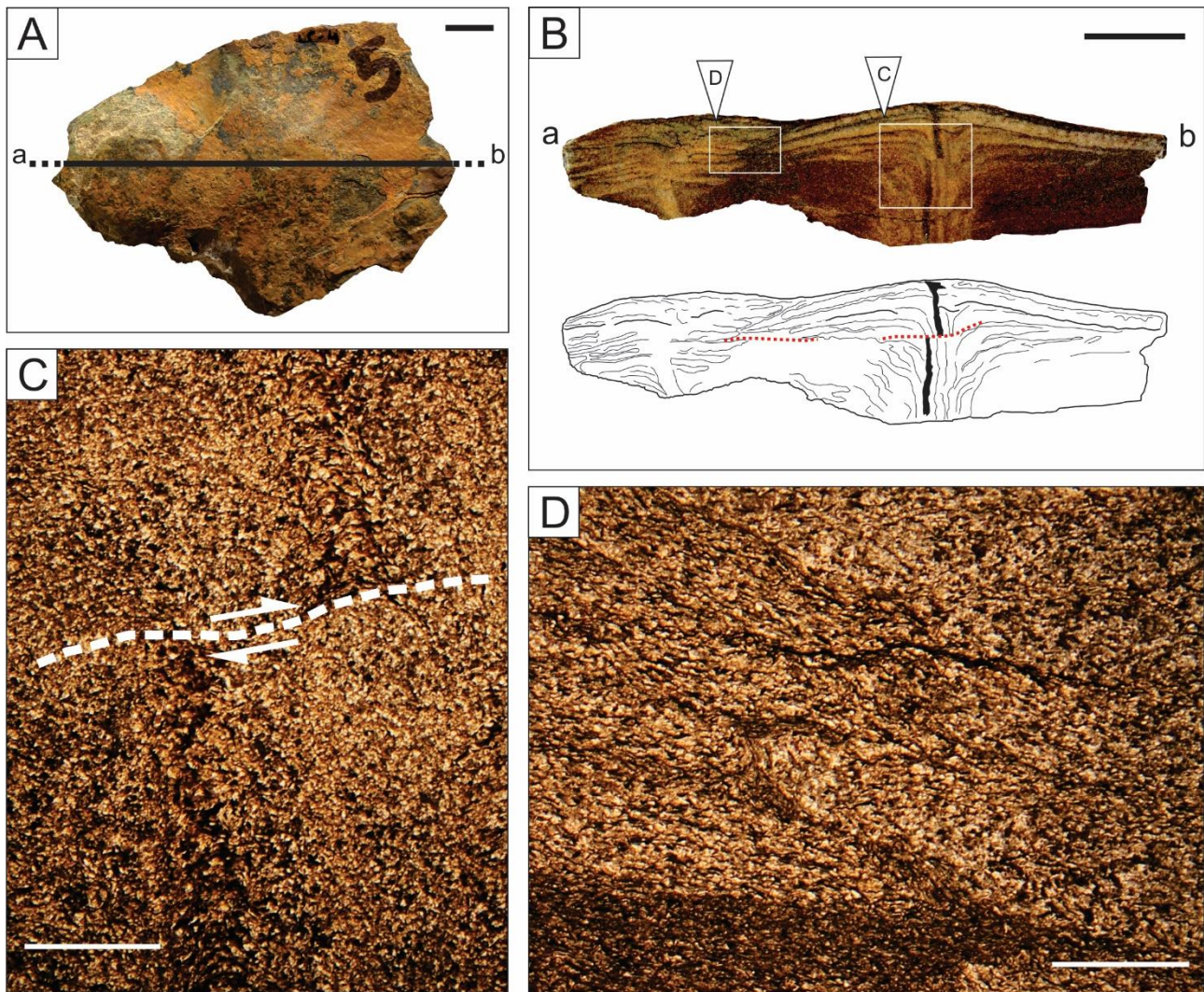
Contudo, as seções polidas revelaram que todas as estruturas discoides observadas apresentam um prolongamento subvertical que se estende para baixo (Fig. 27-B e C). Tal prolongamento caracteriza-se como uma feição aproximadamente cilíndrica e que grada para um cone em direção ao topo. Aparentemente o cone de sedimento perturbado marca a própria geometria tridimensional das EDS e, diferentemente das EDO, não foram observadas laminações internas (Fig. 27-E). No caso das EDS observadas na Figura 27-A a C, o prolongamento apresenta aproximadamente o mesmo diâmetro das estruturas observadas em planta, ocorrendo de forma sinuosa e irregular em suas porções inferiores.



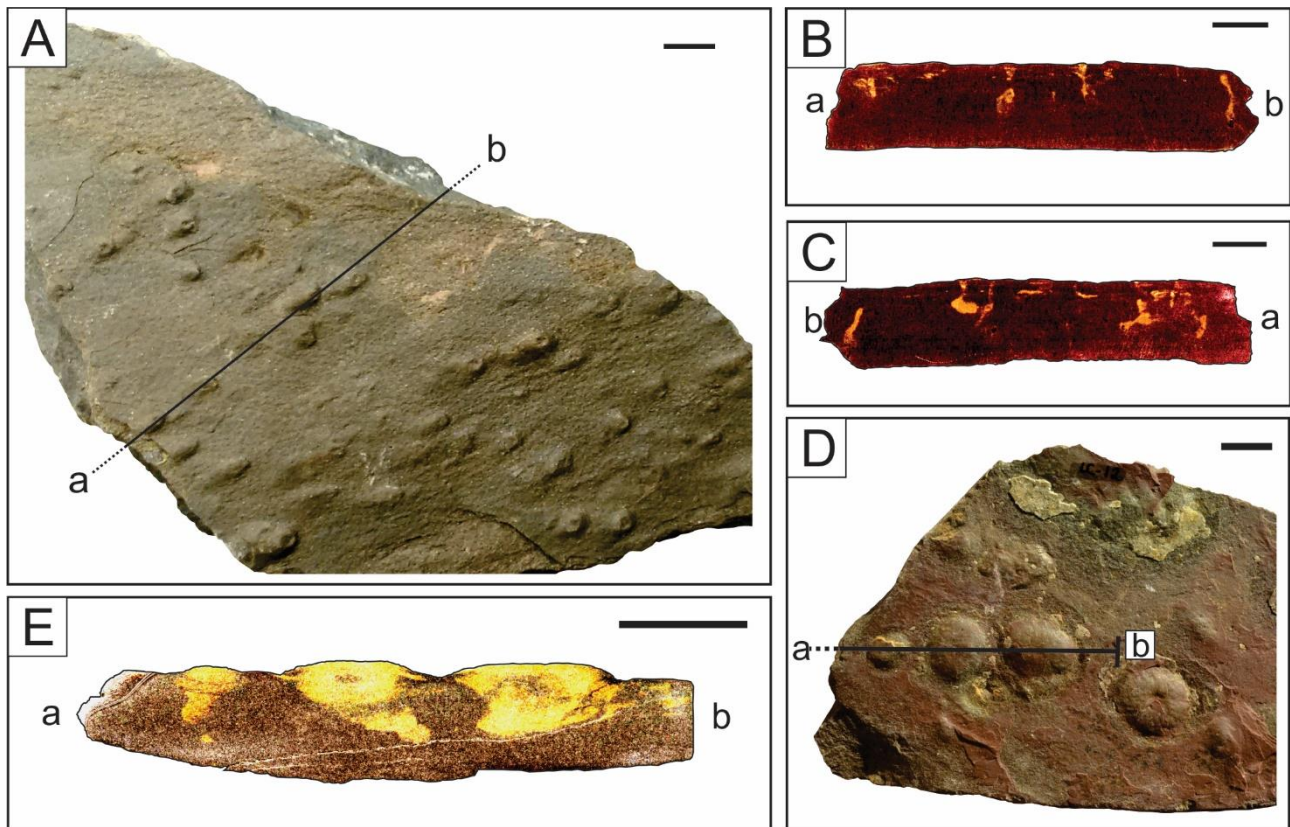


**Figura 25** – Detalhes da estrutura interna de exemplar de EDO de grandes dimensões e detalhe ao microscópio óptico de estrutura central. A – Vista em planta da estrutura. B – Seção *a-b* destacada em A. C – Detalhes da porção central da estrutura, no qual nota-se feições de corte e preenchimento. D – Detalhe ao microscópio óptico de uma estrutura central tubular típica da EDO. Geometria parabólica é devido a efeito de corte. E – Amostra fragmentada em seu eixo radial, com estrutura tubular preservada tridimensionalmente. Escalas: A a C e E: 1cm; D: 1 mm.





**Figura 26** - Detalhes da estruturação interna de exemplares de EDO em contato lateral e mutuamente deformados. A – Vista do epirelevo positivo das duas estruturas. B – Seção *a-b* destacada em (A) na qual nota-se laminação da estrutura menor encurtada e linha de deslocamento sub-horizantal desenvolvida no mesmo nível em que as estruturas se tocam, como no desenho interpretativo em destaque com tracejado branco. C – Detalhe da linha de descontinuidade destacada em (B) (quadro branco à direita). D – Detalhe destacado em (B) (quadro branco à esquerda) do contato entre as laminações das duas estruturas. Notar padrão de interdigitação desenvolvido. Escalas: A e B: 1 cm; C a E: 1 mm.



**Figura 27** - Estruturas Discoides Simples (EDS) em seções polidas. A – EDS vistas em planta, tentativamente interpretadas como Estruturas-*Intrites* (ILS – *Intrites Like Structures*). Topo inferido para cima e seção *a-b* destacada. B e C – Seções polidas *a-b* e *b-a*. D – EDS parcialmente alinhadas em arenito fino texturalmente homogêneo. Topo inferido para cima e seção *a-b* indicada. E – Seção *a-b* indicada em D.

A Tabela 1 abaixo sumariza as principais semelhanças e diferenças observadas nas Estruturas EDO e EDS em termos de morfologia, associação faciológica, estruturação interna e possíveis mecanismos geradores descritos na literatura específica.

**Tabela 1** - Sistematização das principais informações levantadas referentes às Estruturas Discoides Ornamentadas (EDO) e Simples (EDS).

<b>Estrutura Discoide</b>	<b>Ornamentada (EDO)</b>	<b>Simples (EDS)</b>
<b>Amostragem</b>	<i>ex situ</i>	<i>ex situ</i>
<b>Descrição</b>	Estrutura em epirelevo positivo, internamente laminadas, com bolsões de sedimento em padrão radial ou lobado em seu interior e estrutura discordante, tubular e subvertical em seu centro. Presença de alta densidade populacional com presença de deformação entre exemplares em contato lateral. Ausência de clara sobreposição de exemplares	Estrutura em epirelevo positivo, internamente homogêneas, sem padrão radial ou lobado e presença de feição tubular subvertical em seu centro. Variação na densidade populacional, com ausência de deformação entre exemplares em contato lateral. Ocasional sobreposição de exemplares.
<b>Fácies</b>	Depósitos tabulares de arenitos finos, texturalmente homogêneos, com base erosiva rica em marcas de sola, estruturas de deformação como laminações convolutas e rompidas. Presença de estruturas subverticais milimétricas no topo da camada que culminam ou não em EDOs. Topo plano, ocasionalmente com marcas onduladas assimétricas. Raramente associada ao icnogênero <i>Archaeonassa</i> .	Depósitos tabulares de arenitos finos, texturalmente homogêneos, ou laminados, micáceos, ocasionalmente com lineações de corrente. Presença de estruturas milimétricas subverticais na porção superior das camadas que culminam em EDSs.
<b>Interpretação - Literatura</b>	<i>plexus Aspidella</i> , Arrouy et al. (2016)	<i>Intrites Like Structure (ILS)</i> , Warren et al. (2018 <i>no prelo</i> )
<b>Figuras</b>	Figs. 15, 16, 17-A e B, 18-A e B, 21 a 26	Figs. 17-C a F, 18-C e 27



## 9. DISCUSSÃO

### 9.2. CONTEXTO DEPOSICIONAL

Considerados os dados referentes às observações de campo, bem como às análises laboratoriais realizadas no material coletado na Pedreira La Cabañita, é possível induzir alguns aspectos relacionados à gênese e a preservação das estruturas discoides, bem como sua correlação com o contexto paleoambiental e paleobiológico da Formação Cerro Negro. Tal contexto foi feito parte foi feito com base nos dados e interpretações apresentados por Arrouy (2015) e Arrouy et al. (2015), em associação às observações aqui apresentadas.

Desta forma, assumindo o ambiente deposicional da unidade como fortemente influenciado por processos de maré, o predomínio de fácies arenosas e siltosas observado é sugestivo de ambiente de inter- a inframaré. Contudo, considerando o alto grau de empastilhamento de fácies pelíticas observado, tal predomínio de arenitos nos blocos *ex situ* pode ser interpretado como um viés relacionado às limitações impostas pelas condições do material proveniente do rejeito da mineração. Contudo, a associação de fácies apresentadas na seção colunar da Figura 8, confeccionada por Arrouy et al. (2016), contribui para o modelo no qual o intervalo estratigráfico estudado tenha se depositado sob a atuação de correntes em contexto de intermaré inferior a inframaré.

Feições como MISS, ou estruturas discoides, foco desse estudo, tornam-se evidentes principalmente nos planos de acamamento, sendo raramente visíveis ou identificáveis em testemunhos de sondagem. Dessa forma, não é viável posicioná-las estratigraficamente na seção, com base nos dados disponíveis.

De qualquer modo, a grande frequência com que ocorrem estruturas do tipo *Kinneya*, *Honeycomb*, *Elephant Skin* e *Arumberia* sugerem ampla distribuição de comunidades microbiais bentônicas em fácies de inframaré, indicando disponibilidade de recursos tais como luz e nutrientes necessários para seu desenvolvimento. Contudo, comunidades microbiais modernas apresentam altas tolerâncias a condições ecologicamente estressantes, com quantidades limitadas de recursos. Dessa forma, a correlação direta entre ampla distribuição de esteiras microbiais em depósitos precambrianos e abundância de nutrientes pode não ser verdadeira.

No contexto deposicional inferido (intermaré inferior a inframaré), os sedimentos arenosos são comumente depositados em canais de maré bem como em porções mais distais associados a porções terminais de canais, produzindo estruturas típicas de migração de formas de leito resultantes de fluxos unidirecionais (laminações cruzadas). A região localizada entre canais de maré, por sua vez, está sujeita a decantação de sedimentos pelíticos.

Observações na seção exposta da unidade, estratigraficamente acima da porção na qual ocorrem as Estruturas Discoides Ornamentadas (EDO), demonstraram a presença de intercalação de fácies

pelíticas com fácies de arenitos fino. Nessas observou-se o predomínio de fácies de arenitos, ricos em estruturas indicativas de transporte por tração, bem como marcas de sola (*flute marks*) e estruturas de sobrecarga. Tal cenário é condizente com a deposição de sedimentos em ambiente dominado por tempestade e não por marés, pelo menos para as porções mais superiores da unidade.

Em relação a fácies *Alc*, na qual ocorrem as EDO, é possível constatar que a presença de estruturas indicativas de processos erosivos em sua base, como marcas de sola (*flute marks*), demonstram a atuação de evento de alta energia sobre depósitos de sedimentos com alta coesão (argilitos e siltitos). O caráter homogêneo desta fácies, com poucas estruturas associadas a processos de transporte trativo dos grãos pode ser explicada pelos seguintes processos: 1 – ausência de contraste granulométrico no pacote de sedimentos, devido a um alto grau de seleção dos grãos, conferindo-lhe homogeneidade textural, 2 – a uma alta densidade do fluxo de água, devido à alta concentração de carga sedimentar transportada, o que resulta em um fluxo não laminar, produzindo camadas maciças, 3 – a processos de liquidação do pacote de sedimentos arenosos saturados em água.

A descrição petrográfica realizada para caracterização da fácies *Alc*, demonstrou que essa de fato apresenta alto grau de seleção granulométrica. Contudo, a baixa amostragem (com enfoque nas porções superiores onde ocorrem as estruturas EDO) pode representar um viés dessa análise. Fluxos de alta densidade, são comuns e podem se desenvolver como resposta a tempestades, coerente com o caráter energético (base erosiva) presente na fácies. Ademais, arenitos laminados (pois afinal, a facies era originalmente laminada, como observado localmente) são típicos de fluxos de alta energia (fluxo superior) e, portanto, perfeitamente coerentes com a deposição por eventos pontuais de tempestade.

A presença de rara laminação plano paralela na base da camada, sucedida frequentemente por laminações convolutas, com dobras bem desenvolvidas e rompimento da laminação (Figs. 11-C e D), indica a atuação de processos de deformação sinsedimentar associados a liquefação da camada. Por outro lado, a obliteração completa das estruturas sedimentares, em especial nas porções superiores da camada, pode ser resultante de processos de fluidificação, como discutido por Lowe (1975). Segundo o autor, o aumento de pressão dos fluidos intersticiais gerado durante a liquefação do sedimento ocorre de forma mais acentuada nas porções superiores das camadas, em especial quando a migração ascendente dos fluidos é dificultada por anteparos naturais (discutidos mais à frente).

A ocorrência de estruturas discordantes, irregulares e orientadas subverticalmente, especialmente concentradas nas porções superiores da camada, são coerentes com o modelo de migração de fluidos, representando condutos desenvolvidos pela fluidificação dos sedimentos (condizentes com o modelo de Lowe de 1975). Outro aspecto notável é a geometria plana da superfície superior da camada. Aspecto que embora possa ser produzido por uma série de processos sedimentares, é comumente observado em camadas que sofreram liquefação. Uma exceção seria bloco no qual são observadas marcas onduladas (Figs. 14-A e B) no topo de camadas da fácies *Alc*. Contudo, as marcas onduladas

parecem difusas, o que pode ser resultado da má preservação do bloco, ou ainda efeito de processos incompleto de liquidação. Tal ocorrência também será melhor discutida à frente.

Em termos dos processos possivelmente responsáveis pela liquefação de sedimentos incoesos, é possível citar uma série deles, como apresentado na Sessão 4.2.. Assim, apesar de um modelo genético envolvendo a transmissão de ondas sísmicas (tectônicas ou atectônicas) através de sedimentos apareça com frequência na literatura, não existem evidências suficientes de acordo com este trabalho, ou nos trabalhos de Arrouy (2015) e Arrouy et al. (2015) que sustentem essa hipótese. Assim sendo, dentre as possibilidades para a liquidação é possível citar a atuação de esforços associados à: 1) oscilação da coluna de água com o avanço e recuo das marés; 2) ao impacto relacionado à quebra de ondas ou ainda 3) à rápida sedimentação (sobrecarga). De acordo com o modelo deposicional assumido e interpretado para a unidade, as opções 1 e 3 parecem as mais coerentes.

## 9.2. ORIGEM BIÓTICA VS. ABIÓTICA: GÊNESE E PRESERVAÇÃO DAS ESTRUTURAS DISCOIDES

Dentro da principal problemática e pergunta central desse trabalho, tem-se a gênese das estruturas discoides associadas a fácies *Alc*, descritas na Pedreira La Cabañita e sua relação com outras estruturas semelhantes descritas na unidade. A discussão surge tendo como base algumas premissas sugeridas por Arrouy (2015) e Arrouy et al. (2015) dentre elas: 1 - O contexto tectonoestratigráfico, o qual indica uma idade de deposição da unidade entre o Neoproterozoico tardio e o Paleozoico inicial, 2 – o contexto paleobiológico sugerido pela ausência de bioturbação e traços fósseis diagnósticos do Paleozoico associada a presença de microfósseis identificados como parte da Palinoflora Leiosphaeridia, indicativa de idade Ediacarana (intervalo entre 575 e 542 Ma) (ARROUY et al. 2015, HUNTLEY et al. 2006) .

Nesse contexto, tem-se a identificação das estruturas discoides por Arrouy et al. (2016), associadas a ampla distribuição de MISS com alta diversidade morfológica além de traços fósseis identificado como pertencente aos icnogêneros *Archaeonassa* (ARROUY et al. 2016) e *Palaeophycus* (WARREN et al. 2018 *em preparação*) Tal associação paleobiológica, vinculada aos dados bioestratigráficos de Arrouy (2015) são fortes indicativos de um contexto paleoecológico e paleobiológico favorável ao desenvolvimento de organismos com afinidade com assembleias ediacaranas.

Assim sendo, os autores utilizam de argumentos intuitivamente convincentes (baseados principalmente em Gehling et al., 2000; Narbonne, 2005; Tarhan et al., 2010, 2015) para a caracterização das estruturas como ocorrências do *plexus Aspidella*, definindo-as como expressões tafonômicas das estruturas de fixação ao substrato de macrorganismos bentônicos. Entre os

argumentos é possível citar: 1 - alta densidade populacional, 2- padrão de distribuição dos exemplares com diferentes dimensões semelhante ao apresentado por comunidades bentônicas fósseis, 3 - padrão morfológicamente complexo (enrugamento radial ou lobado) e 4 - deformação lateral entre exemplares em contato.

Tal modelo originalmente proposto, caracterizado como Hipótese 0, apresenta-se como de grande interesse, caso verdadeiro, dadas as inúmeras implicações paleobiológicas, bioestratigráficas e paleogeográficas. O que certamente justificou uma análise atenta do material. Contudo, as análises laboratoriais executadas no desenvolvimento dessa pesquisa, permitiram falsear esta hipótese original, tornando possível elencar ao menos duas hipóteses alternativas para o desenvolvimento dessas estruturas. Cada uma delas, com diferentes probabilidades de aproximação da verdade.

#### 9.2.1. ESCAPE DE FLUIDO EM UM PAVIMENTO LIQUIDIFICADO - HIPÓTESE ALTERNATIVA I

Como discutido, as Estruturas Discoides Ornamentadas (EDO) ocorrem diretamente sobre camada cujos aspectos texturais e estruturais sugerem atuação de processos de liquidificação. Dentre as estruturas que puderam ser identificadas por meio da análise de seções polidas de rocha, encontram-se as estruturas discordantes, subverticais, com espessuras milimétricas, interpretadas como condutos de migração ascendente de fluidos (água e sedimento arenoso fluidificado).

As estruturas como observado na Figura 21-B, ocorrem altamente concentradas na porção superior da camada, como esperado de acordo com o modelo de Lowe (1975). Contudo, o truncamento presente na extremidade superior da maior parte das estruturas, em um mesmo nível, milímetros antes de romper a superfície sugere a presença de anteparos para migração dos fluidos. De acordo com Lowe (1975), tais anteparos podem ser caracterizados como: 1) a concentração progressiva de grãos finos para o topo em um depósito com gradação normal, 2) níveis ricos em sedimentos pelíticos ou ainda 3) a presença de matéria orgânica. Dada a ampla distribuição de estruturas microbiais, presentes em diferentes fácies na unidade, considera-se aqui a possibilidade de processos de bioestabilização do substrato por comunidades microbiais como uma hipótese plausível para o barramento de fluidos.

Tais condutos, ao romperem o nível superficial bioestabilizado (entende-se aqui como superfície o limite superior da camada, e não a interface água-sedimento, cujas implicações serão abordadas a frente) quando tubulares, expressam-se na superfície como as estruturas discoides. Contudo, quando planares (pequenos diques clásticos), expressam-se como estruturas alongadas e lineares (Figura 21-A a E).

Esse modelo (resumido na Fig. 28), em sua forma simples e atualista, não poderia explicar algumas particularidades das feições observadas, tais como a presença de laminação interna, padrões de enrugamento e de deformação de exemplares em contato. Contudo, ao ser considerado um modelo



de bioestabilização do substrato por comunidades microbiais, é possível obter algumas explicações coerentes com esse contexto. Como apresentado na Seção 3.1., o aumento na coesão de sedimentos arenosos fornecido pela presença de EPS microbial resulta no desenvolvimento de estruturas que de outra forma não seriam possíveis. Assim, apresenta-se a seguir um modelo proposto para o desenvolvimento de cada uma das feições observadas no interior das estruturas EDO.

- a) *Injeção de sedimento*: O desenvolvimento dos condutos está intimamente relacionado ao acúmulo de pressão nos fluidos intersticiais nas porções superiores da camada fluidificada. Contudo o rompimento de um possível nível bioestabilizado ocorreu em apenas alguns casos (como observado na Fig. 21-B). Ao ser rompido esse nível, tem-se o desenvolvimento de uma estrutura central com geometria cônica circundado por lamina de sedimento radialmente distribuídas. Relações de corte e preenchimento são indicativos de sucessivos pulsos de injeção de sedimento, sugerindo reaproveitamento de condutos previamente desenvolvidos.
- b) *Padrões de laminação interna*: A laminação das estruturas, sugere atuação de repetidos pulsos de fluidificação e injeção de sedimento. Em cada um dos pulsos, material seria trazido da camada sotoposta e injetado horizontal e radialmente de acordo com planos de fraqueza presentes no suposto nível bioestabilizado. Dentre as possíveis causas para tais heterogeneidades, é possível citar: 1) estrutura acamadada de comunidades microbiais, com sucessões de diferentes associações bacterianas (fotossintezantes e sulfato redutoras p. ex), 2) diferentes graus de coesão fornecida por matéria orgânica em diferentes estágios de decomposição ou ainda 3) estruturação fornecida pela orientação de grãos e níveis ricos em grãos de filossilicatos. Seria possível ainda contar com uma associação dos três fatores. De qualquer maneira e independentemente das causas (que se apresentam com relativo grau de conjectura), as laminações ocorrem sumariamente como feições intrusivas. Evidência clara dessa interpretação é observada na Figura 26-B, na qual se observa que as laminações da porção inferior da estrutura menor ocorrem abaixo da superfície da camada na qual ocorrem, sendo assim feições subsuperficiais. Além disso, laminações com terminações encapsuladas por filossilicatos e aumento da compactação nas porções periféricas sugerem injeção forçada de material, e não derramamento ou extrusão de sedimento incoeso. Por fim, embora intuitivo, ressalta-se aqui que a laminação (incluindo aqui as lentes e bolsões de sedimento na base) desenvolveu-se de baixo para cima (como numa sucessão de deposição convencional). Assim, lamina inferiores seriam mais antigas do que lâminas superiores. Assim interpreta-se que em todas as estruturas analisadas, o conduto central (fonte do sedimento fluidificado) corta todas as lâminas, sendo assim o último pulso foi responsável

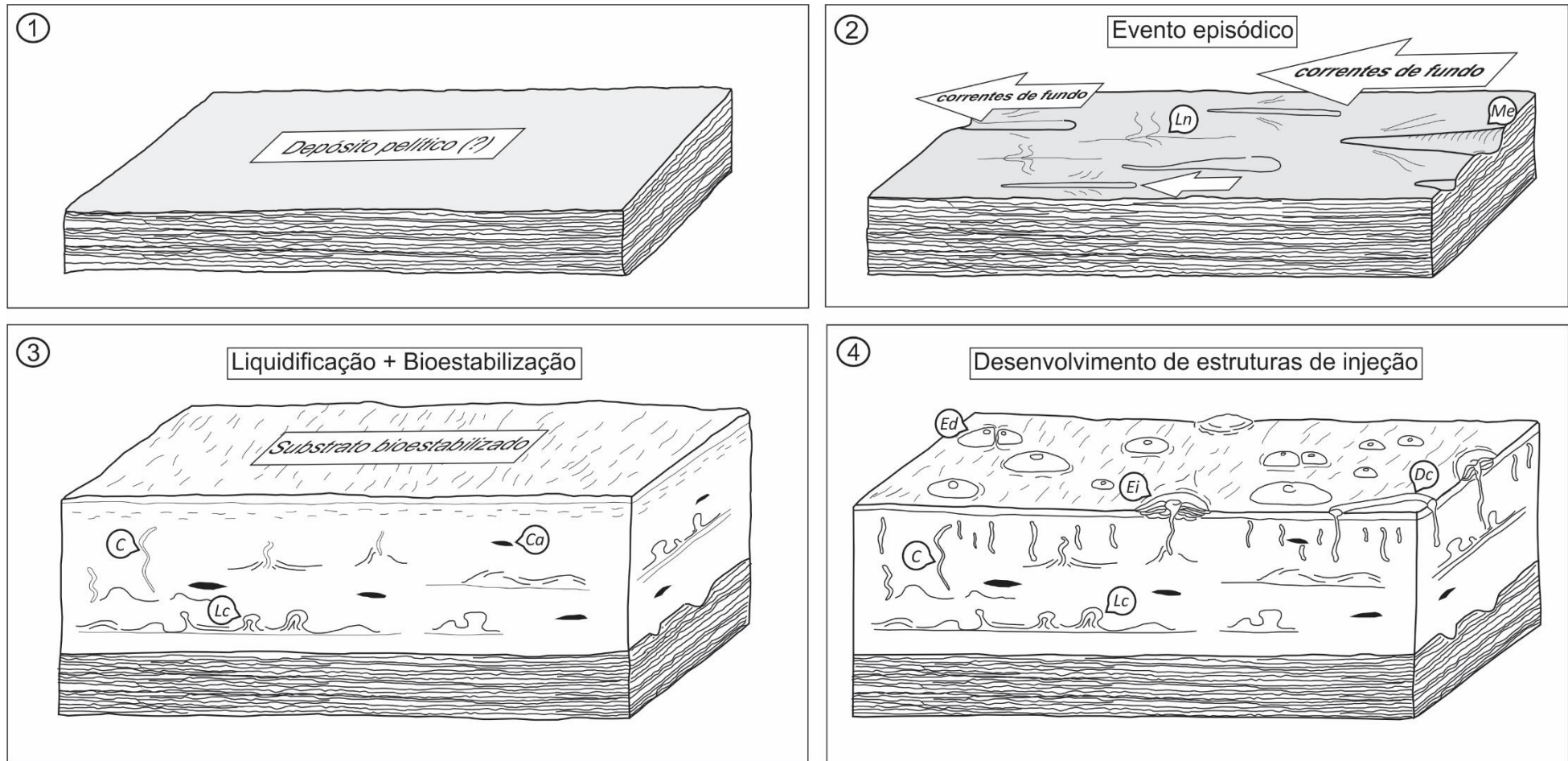
pela colocação de material no nível mais acima (e não preservado, como será discutido adiante).

- c) *Deformação mútua de exemplares em contato*: Dentre as feições consideradas problemáticas e difíceis de serem explicadas, encontra-se a deformação mútua apresentada por exemplares em contato. Entre eles ocorre com frequência clara superfície de contato, observada em planta (Fig. 15- F e G) demonstrando ausência de coalescência entre as estruturas, caracterizando-as como entidades individualizadas. Dentro do modelo no qual o sedimento fluidificado interage com sedimentos bioestabilizados e comunidades microbiais, a presença de EPS e matéria orgânica filamentosas, pode explicar o comportamento coeso e plástico do sedimento arenoso. Não é necessário então recorrer a presença de tecidos orgânicos complexos (como o colágeno presente em metazoários). Ao se ter acesso às feições internas de estruturas em contato é possível fazer as seguintes considerações: O padrão de interdigitação de laminações pode sugerir a injeção sincrônica de material fluidificado proveniente de diferentes condutos, em ao menos parte do material observado. Contudo, o encurtamento da laminação em apenas uma das estruturas em contato associado a presença de plano de deslocamento horizontal sindeposicional, é indicativo da não simultaneidade do desenvolvimento das estruturas.
- d) *Padrão de distribuição morfométrica das estruturas*: Ao serem confeccionados gráficos que relacionam a frequência com que ocorrem diferentes classes de diâmetro das estruturas, foram obtidas curvas normais com assimetria para a esquerda como observado nos gráficos da Figura 19 (Fig. 19-1 e 2). Essa distribuição é comumente identificada em comunidades marinhas bentônicas viventes e fósseis como resultado da alta taxa de mortalidade de indivíduos menores e juvenis (CUMMINS et al. 1986, TARHAN et al. 2010 entre outros). O padrão observado representaria uma norma quanto as dimensões dos membros da população, com indivíduos maduros porém com dimensões intermediárias. Por fim, a frequência de indivíduos maiores e mais velhos tenderia a ser reduzida devido igualmente a mortalidade. Tal argumento é utilizado com frequência como evidência da natureza biológica de estruturas problemáticas em estratos ediacaranos (GEHLING et al. 2000, TARHAN et al. 2015, ARROUY et al. 2016). Contudo, como demonstrado ao se observar a distribuição de classes dimensionais em bolhas em “pó-de-café” (Figs. 18-D e 19-4), esse padrão parece não ser exclusivo de materiais de origem biológica. No caso do experimento realizado, a origem de tal padrão parece estar relacionada a diferenças na estabilidade de bolhas maiores em relação a bolhas menores devido a tensão superficial. Dessa maneira, embora os fenômenos físicos relativos a dinâmica dos fluidos (água + vapor + “pó-de-café”) não sejam do interesse desse trabalho, o experimento demonstra que tal distribuição não pode ser utilizada como argumento para a natureza biológica de estruturas com gênese desconhecida.

Com base nesse modelo, contudo, algumas questões continuam abertas à discussão. Dado o caráter *ex situ* do material analisado, seria possível que as feições intrusivas tenham se desenvolvido na interface entre duas fácies distintas, como por exemplo, abaixo da fácies pelítica observada acima das estruturas (como delgado filme por vezes preservado na Localidade 1 - Pedreira La Cabañita e bem preservado na Localidade 2 – Pedreira Loma Negra)? A resposta é positiva nesse caso. Contudo, algumas evidências discutidas nesse trabalho apontam para o desenvolvimento das estruturas em interação com esteiras microbiais, nas proximidades da interface água-sedimento. Entre elas as feições indicativas de aumento na coesão do sedimento arenoso, e o truncamento dos condutos em superfície milímetros abaixo do limite superior da camada. Essa segunda feição não seria esperada caso a barreira para migração ascendente do fluido fosse uma camada pelítica localizada imediatamente acima.

Outra questão envolve o caráter intrusivo das estruturas. A intercalação de lâminas ricas em filossilicatos e com concentrações de argilominerais apresenta semelhanças texturais com depósitos nos quais atuaram processos de *trapping* e *binding* microbial. Assim, a concentração de minerais de hábito placoide e minerais finos em lâminas também ricas em minerais opacos seria sugestivo de antigas superfícies nas quais se desenvolveram comunidades microbiais e permitiram a captura desses grãos. Nesse modelo, cada pulso de sedimento seria sucedido por momento de maior estabilidade no qual a comunidade bacteriana voltaria a ocupar a área sobre o sedimento recém ejetado. Embora interessante, tal modelo não é coerente com as evidências texturais observadas nas lâminas, as quais sugerem processos de injeção e não ejeção de material. Assim, seria possível considerar a concentração de minerais finos em certos níveis como resultantes de processos físicos. O que contudo não explica o encapsulamento das lâminas e lentes por filossilicatos, processo que de alguma forma deve envolver a interação com biofilmes ricos em EPS e filamentos microbiais. De qualquer modo, a concentração de argilominerais associados a esses níveis é consistente com estudos realizados em outros depósitos contendo MISS (MENON et al. 2016, TU et al. 2016, LIU 2016, YANG et al. 2016). Segundo esses autores, lâminas ricas em argilominerais como illita e esmectita teriam se desenvolvido em estágios eodiagenéticos, devido a diminuições do pH relacionados a degradação de matéria microbial (CALLOW & BRASIER 2009).

Dentro desse cenário, as estruturas EDS representariam produtos de processos semelhantes de defluidificação de sedimentos, seja pelo escape de gases provenientes da degradação de matéria orgânica, seja pela expulsão de sedimento fluidificado por processos físicos de liquidificação. As diferenças observadas entre as EDO e as diversas formas de EDS seriam resultantes dos seguintes aspectos: 1) Natureza (gases, água, ou água +sedimento p.ex.) e dinâmica dos fluidos em interação com distintos parâmetros sedimentológicos e petrográficos, 2) volume e velocidade de migração dos fluidos e 3) grau de bioestabilização do substrato.



**Figura 28** - Modelo genético para o desenvolvimento das estruturas discoides de Olavarria (EDO). 1 – Depósito pelítico inferido. 2 – Evento episódico de alta energia e produção de estruturas erosivas no sedimento coeso abaixo. 3 – Após rápida sedimentação e sob provável influência de processos de maré, atuam processos de liquidificação, com o desenvolvimento de estruturas de deformação sinsedimentar. Concomitantemente, o pavimento é colonizado por comunidades microbiais tornando sua superfície bioestabilizada. 4 – Acúmulo de fluidos (água + sedimento) sob pressão nos níveis superiores da camada, induzem a fluidificação do sedimento e migração ascendente de fluidos. Estes aprisionados por comunidades microbiais produzem estruturas de injeção em padrão radial (discos) e ocasionalmente lineares/planares (diques clásticos). Legenda: *Ln* – lineações de corrente; *Me* – marcas erosivas; *Ca* – clastos de argila; *Lc* – laminações convolutas; *C* – condutos; *Ei* – estruturas de injeção; *Ed* – estruturas deformadas; *Dc* – diques clásticos.



Dessa forma, tais estruturas seriam de fato semelhantes em gênese às aquelas descritas por Menon et al. (2015) e Menon et al. (2016), podendo ser categorizadas como parte das Estruturas *Intrites* (*ILS – Intrites Like Structures*), como feito por Warren et al. (2018 *em preparação*). A distribuição normal de classes de diâmetro com assimetria para a esquerda observada em exemplares de EDS e interpretadas como ILS, seria resultante da dinâmica dos fluidos em interação com sedimentos e possivelmente esteiras microbiais.

#### 9.2.2. ICNITOS DE ALIMENTAÇÃO/EXCREÇÃO – HIPÓTESES ALTERNATIVA II

Como apresentado na Seção 4.1., o registro icnofóssil é rico em feições resultantes de processos etológicos de alimentação, excreção ou habitação, cujas expressões nos planos de acamamento (seja na interface água-sedimento, ou entre distintas fácies sedimentares) são caracterizadas como feições radiais, circulares ou discoides.

Considerando então diversos aspectos das estruturas analisadas nesse trabalho, entre as quais, uma estrutura tubular que culmina no plano de acamamento em uma estrutura discoide, com feições de injeção radial, seria possível traçar alguns paralelos com traços fósseis dos grupos dos Asterosomídeos e dos Gyrophyllitídeos. Ambos, interpretados como estruturas de alimentação e excreção de dejetos, são fortemente caracterizadas por feições semelhantes. Considera-se dessa forma, uma segunda hipótese alternativa para o desenvolvimento das estruturas EDO.

Assim, de modo semelhante ao apontado por Strzebónski & Uchman (2015), um organismo metazoário, ao se alimentar da matéria orgânica presente nos sedimentos (argiloso no caso de Gyrophyllitídeos e arenoso no caso dos Asterosomídeos), produziria as feições de perfuração tubular e as intrincadas feições de injeção radial de sedimento.

De acordo com esse modelo, um organismo com dimensões milimétricas (dimensão igual ou inferior ao diâmetro dos tubos), extrai nutrientes de matéria orgânica em decomposição no sedimento abaixo de esteiras microbiais. A orientação vertical dos tubos indicaria baixa disponibilidade de nutrientes nas porções superficiais do depósito, e adaptação desses organismos a tais condições. Após buscar alimento alguns centímetros de profundidade, as excretas, ou resíduos metabólicos seriam então expulsos do tubo em direção à superfície.

Essa atividade, sugere a princípio alguns aspectos referentes a fisiologia desse organismo: 1) aparato muscular significativamente desenvolvido, capaz de remobilização ativa de sedimento em busca de recursos e 2) sistema digestório adaptado a ingestão de sedimentos.

Ainda dentro desse modelo, o organismo ao empurrar o sedimento excretado para fora do tubo alcançaria uma barreira física, determinada pela lâmina superficial de sedimentos mais coesa devido ao EPS microbial. Dessa forma, organismos pequenos, ou imaturos, não seriam capazes de romper a barreira de sedimento bioestabilizado, deixando apenas o tubo em subsuperfície posteriormente

abandonado. Organismos maduros por outro lado, seriam capazes de romper parcialmente essa barreira, injetando forçadamente material radialmente na área adjacente a saída da perfuração. As injeções ocorreriam ciclicamente, respeitando as atividades metabólicas do organismo e explicando aspectos que indicam recorrência nos pulsos de sedimento injetado, tais como laminação interna e relações de corte e preenchimento. Ainda, as injeções ocorreriam de forma a sobrepor material anteriormente injetado, sendo assim, lâminas ou lobos inferiores seriam mais “antigos” do que aqueles injetados acima.

Esse cenário condiz de maneira geral com as observações petrográficas e pode explicar por que as porções inferiores são dominadas por feições radiais e lobadas, enquanto as porções superiores são ausentes dessas feições. A parte que contém lobos e raios representaria os primeiros pulsos de sedimento, e assim, encontrariam maior quantidade de EPS e filamentos microbiais confinando o fluxo de material. O organismo então seria obrigado a ativar e forçadamente empurrar o sedimento radialmente, desenvolvendo os bolsões e lobos de material. Após romper a maior parte dos obstáculos o padrão lobado daria lugar a sucessivas lâminas de material excretado.

Essa proposta possibilita explicar não apenas o padrão complexo de preenchimento das estruturas, mas também o padrão meniscado (*spreiten*) observado no interior dos tubos (Fig. 25-C, D e E), ambos produtos da repetida atividade desses organismos no interior das escavações. Outro aspecto relevante, refere-se à continuidade da geometria tubular até a superfície da camada, sem evidência de colapso, feição esta esperada em uma estrutura desenvolvida por escape de fluidos (Fig. 25-E). A extensão e manutenção da geometria dessa estrutura poderia ser explicada pela estabilização fornecida por substâncias viscosas secretadas pelo organismo, como observado em muitos casos da meio-infauna moderna.

Nesse modelo, variações observadas na morfologia e distribuição das classes de diâmetro podem ser explicadas de forma coerente com o esperado para comunidades biológicas viventes ou fósseis (quando preservadas sem seleção ontológica dos indivíduos, como em caso de mortalidade em massa).

Outra questão a ser ressaltada relaciona-se a homogeneidade textural, estruturas discordantes e laminações convolutas presentes na fácies *Alc*, feições cuja gênese e relação com as Estruturas Discoides pode ser explicada de duas maneiras: 1) As feições sedimentares presentes seriam resultantes de processos de liquidificação, como explicado pela Hipótese Alternativa I, não havendo qualquer relação direta de causalidade entre elas e as EDO. Assim, considerando a gênese de arenitos finos, com base erosiva como depósitos de tempestade, é possível que a remobilização de nutrientes, de sedimentos e oxigênio tenham condicionado o aparecimento de organismos capazes de realizar perfurações verticais. A liquidificação da camada seria, da mesma forma, inerente ao processo de deposição, resultando provavelmente de sobrecarga sedimentar, devido à rápida sedimentação. 2)

Uma segunda possibilidade seria a de que todas as estruturas observadas seriam resultantes de atividade biológica. Essa hipótese explica a recorrente associação entre as estruturas de deformação e as EDO, bem como a semelhança morfológica entre estruturas discordantes presentes na fácies e a porção central dos discos. Nesse cenário, a fácies *Alc* representaria um depósito intensamente bioturbado, com uma icnotrama composta por estruturas tipo-*Asterosoma* (EDO), por tubos simples tipo-*Skolithos* (demais estruturas discordantes) e feições de bioturbação genéricas, responsáveis pela deformação e obliteração de estruturas sedimentares e homogeneização textural do depósito.

Contudo, a hipótese de organismos perfuradores apresenta alguns problemas. É conhecido o registro de perfurações verticais no Neoproterozoico, com ocorrências do icnogênero *Skolithos* em diversas regiões do mundo (JENSEN 2003, JENSEN et al. 2006). Contudo, o grau de complexidade das estruturas aqui apresentadas seria sugestivo de considerável sofisticação etológica. Tal aspecto, seria coerente para o registro paleobiológico posterior a *Revolução Cambriana do Substrato* (ERWIN et al. 2011). Nesse caso, para ser verdadeira, essa hipótese deve supor que, ou as idades para a deposição da Formação Cerro Negro são muito menores do que o inferido por Arrouy (2015) e Arrouy et al. (2015), ou o surgimento de organismos bilaterais, com trato digestório sofisticado, tamanho relativamente grande, com modo de vida endobentônico tenha se desenvolvido ainda no Ediacarano.

Entretanto, dados de campo, sugerem ampla distribuição de comunidades microbiais morfológicamente diversas, indicando que a deposição da unidade ocorreu em momento anterior a qualquer “Revolução do Substrato” (SEILACHER 1999). Além disso, a única evidência apontada para a existência definitiva de metazoários, seria a presença dos icnogêneros *Archaeonassa* e *Palaeophycus*, expressões de modos de vida relacionados a obtenção de recursos por pastagem nas esteiras microbiais (SEILACHER 1999, ARROUY et al. 2016). Tal associação paleoicnológica é coerente com idades ediacaranas inferida para a unidade.

### 9.2.3. ESTRUTURAS SEDIMENTARES PROBLEMÁTICAS E A BUSCA PELA ABORDAGEM MAIS SIMPLES E

#### PARCIMONIOSA

De acordo com o apresentado na Seção 2.2, defende-se que o trabalho com dubiofósseis e estruturas sedimentares problemáticas demanda a consideração de princípios filosóficos fundamentais de simplicidade e parcimônia. Estes devem condicionar a escolha de hipóteses que expliquem sua gênese e caráter biótico ou abiótico, fato especialmente verdadeiro no que se refere ao registro sedimentar e paleobiológico do Pré-Cambriano.

Nesse sentido, é possível levantar algumas questões, entre elas: 1) Quais critérios utilizar para a caracterização de uma hipótese como a mais simples e parcimoniosa para o desenvolvimento de estruturas com pouco ou nenhum análogo moderno? 2) Hipóteses que considerem origem biológica para casos problemáticos devem ser consideradas sempre mais complexas e assim menos prováveis?

Para responder a essas perguntas, considera-se a discussão proposta por autores como Popper (1972) e Schulz (2012), os quais sugerem que hipóteses preferíveis devem ser 1) testáveis por meio de experimentação, 2) consistentes com dados disponíveis e 3) coerentes com modelos vigentes. Interpreta-se então que a quebra de paradigmas, ou a proposição de novos modelos, é recomendada caso após experimentação e obtenção de dados, o fenômeno não possa ser explicado por modelos antigos.

Os dados apresentados e discutidos nesse trabalho podem ser classificados de modo geral como evidências de natureza paleontológica, sedimentológica e petrográfica, como apresentado na Tabela 2. Essa tabela organiza os dados coletados nesta pesquisa indicando-os (em verde) ou não (em vermelho) como evidências que ajudem a sustentar as Hipóteses 0, I e II. Em termos da hipótese originalmente considerada (Hipótese 0) as estruturas EDO estariam relacionadas a impressão, réplica ou preenchimento de uma estrutura de ancoragem utilizada por organismos multicelulares. Como discutido, essa interpretação leva em consideração o contexto geocronológico, paleoambiental, bem como aspectos morfológicos (Tabela 2 – caracteres 1 a 4 e 12). Contudo a observação de feições internas das estruturas, assim como o detalhamento de aspectos sedimentológicos e tafonômicos dificultam sua compreensão como macrofósseis corpóreos. Os modelos tafonômicos de preservação desses organismos atualmente conhecidos (apresentados na Seção 3.2.2.) preveem o preenchimento do organismo por processos sedimentares passivos, associados a eventos episódicos (GEHLING 1999, NARBONNE 2005, MACGABHANN, 2007 e TARHAN et al. 2015). Contudo, os dados de campo e laboratório demonstram que as EDO ocorrem na superfície superior de uma camada de evento, com claros indicativos de pulsos repetidos de injeção forçada de material sedimentar, proveniente de depósito sotoposto.

Esses dados (Tabela 2 – caracteres 5 a 11), não permitem a associação direta da ocorrência estudada com fósseis discoides ediacaranos descritos na literatura. Dentre possíveis explicações para a presença das feições observadas no interior das estruturas, pode-se considerar o preenchimento ativo de sedimento com o organismo ainda em vida, como forma de sustentação ou fixação. Contudo, do mesmo modo que o modelo envolvendo traços fósseis, a hipótese associada a macrorganismos requer o estabelecimento de novos modos de preservação ou novos grupos de organismos até então não descritos. Desse modo, a sustentação da Hipótese 0 só é possível com a proposição de novos modelos de preservação desses fósseis, ou ainda a criação de uma nova categoria de organismos, capazes de mecanicamente bombear sedimento do substrato para cavidades internas, implicando em fisiologia mais complexa do que aquela observada em outros fósseis com morfologia discoide.

Ao propor um modelo de fluidos em interação com esteiras microbiais, a Hipótese Alternativa I explica a gênese das EDO, correlacionando-a ao contexto sedimentar da unidade e especificamente da fácies na qual ocorrem (Tabela 2 – caracteres 5 e 6). O modelo também sistematiza a natureza de



distintas estruturas discoides (EDO e EDS), relacionando-as como resultantes de um mesmo processo físico (interação entre fluidos e esteiras microbiais) expresso com diferentes intensidades. Isso significa que a Hipótese I independe de dados de geocronologia e bioestratigrafia, dependendo apenas dos parâmetros físicos específicos para o desenvolvimento das ED.

Entretanto, o modelo proposto por essa hipótese apresenta falhas, sendo incapaz de explicar de maneira satisfatória uma série de aspectos observados, entre eles: 1) O arranjo laminado do material no interior das EDO controlado pela presença de filossilicatos, 2) o padrão morfologicamente complexo das lâminas e bolsões de sedimento e 3) a presença de possíveis meniscos no interior da estrutura vertical e cilíndrica no centro dos discos (Tabela 2 – caracteres 7, 9, 10 e 11). Essa dificuldade se dá, pois a Hipótese I só se sustenta se considerarmos a não atualidade dessa classe de estruturas sedimentares, ou seja a ausência, até o momento, de análogos modernos ou de modelos experimentais que reproduzam seu desenvolvimento. Assim, para justificar os aspectos listados (1, 2 e 3), o modelo prevê a consideração de hipóteses adicionais (*ad hoc*), ainda não testadas.

A Hipótese Alternativa II e sua proposta de caracterização das EDO como icnofósseis por outro lado consegue explicar a presença desses aspectos problemáticos (Tabela 2 – caracteres 7 a 11). Isso porque a interação de um organismo metazoário com o substrato não depende de modelos físicos de difícil compreensão ou reprodução em laboratório. Dessa maneira, o modelo propõe novas formas de comportamento e interação com o sedimento até então não registradas para o Ediacarano, quebrando paradigmas bioestratográficos e paleontológicos. Ademais, o modelo não explica de modo satisfatório a relação entre as estruturas EDO e EDS, ou entre essas e as feições de deformação sinssedimentar observadas na fácies *Alc*. Em relação a esse aspecto, é possível considerar dois desdobramentos dentro desse modelo: 1) caso as estruturas EDO tenham gêneses distintas das estruturas EDS e de feições de deformação, deve-se considerar que sua associação é resultado de acaso. Ou seja, a Hipótese II tem um poder de sistematização inferior àquele apresentado pela Hipótese I, tornando-a mais complexa. 2) Caso as EDO tenham a mesma gênese de outras estruturas de perturbação, assim resultantes da atividade de organismos bioturbadores, quebram-se os paradigmas paleontológicos de maneira ainda mais acentuada. Isso se dá pois seria necessário explicar a existência de bioturbações em profundidade no substrato (até 50cm, no caso das estruturas apresentadas nesse trabalho).

**Tabela 2** - Lista de caracteres observados nas Estruturas Discoides Ornamentadas e sua relação de afinidade (verde) ou não afinidade (vermelho) com os modelos apresentados pelas hipóteses 0, I e II. Os pontos de interrogação representam caracteres duvidosos, cuja presença só pode ser explicada por um modelo após adição de hipóteses *ad hoc*.

	Caracteres	Afinidade biológica A (Macrofossil corpóreo) - Hipótese 0	Afinidade abiótica - influência microbial - Hipótese Alternativa I	Afinidade biológica B (Icnofóssil) - Hipótese Alternativa II
1	Alta densidade de exemplares			
2	Co-ocorrência de exemplares com diferentes dimensões			
3	Distribuição normal das classes de diâmetros medidas para as estruturas			
4	Deformação de exemplares em contato (não coalescência ou sobreposição de exemplares)		?	
5	Associação com estruturas sugestivas de processos de liquidificação			
6	Caráter pelítico da camada sobreposta aos discos			
7	Presença de laminação interna - evento de preenchimento complexo			
8	Estrutura tubular verticalizada com prolongamento para a camada sotoposta			
9	Presença de lâminas marcadas pela presença de filossilicatos		?	
10	Caráter morfológicamente complexo das lamina internas		?	
11	Padrão meniscado da estrutura tubular central			
12	Idade dos depósitos			?

A discussão é extensa e apresenta ao mesmo tempo o potencial e fragilidade de cada hipótese levantada, possibilitando uma análise crítica de ambas e fornecendo argumentos para a escolha daquela que se julgue a mais próxima da verdade. Desse modo, considera-se aqui que as EDO sejam interpretadas como pseudofósseis de acordo com a Hipótese I, justificando-se essa escolha pelos seguintes parâmetros:

- a) Potencial de síntese e sistematização das feições sedimentares e biossedimentares observadas em associação com as Estruturas Discoides;
- b) Coerência com o contexto geobiológico registrado na unidade, o qual indica ampla distribuição de comunidades microbiais bentônicas. Esse cenário é característico do período anterior à *Revolução Cambriana do Substrato*, tornando pouco provável o desenvolvimento de uma meio- ou infauna complexa;
- c) Confluência com as ideias defendidas por Pickerill (1979), Seilacher et al. 2005, Hagadorn & Miller (2011) e Menon et al. (2015 e 2016) em relação a materiais com características semelhantes às EDOs;
- d) Falseabilidade: o desenvolvimento de novos experimentos em laboratório que simulem substratos bioestabilizados em diversos contextos deposicionais, em associação com a busca por análogos naturais modernos, tem o potencial de testar a veracidade do modelo;

Por fim, o avanço dos estudos envolvendo a paleontologia do Ediacarano permitirá identificar novos padrões evolutivos, tafonômicos e geobiológicos que eventualmente tenham se preservado. Assim, é possível que se confirme a presença de organismos bioturbadores no Ediacarano em outras localidades, devendo-se então rever a interpretação aqui apresentada.

## 10. CONCLUSÕES

Diante da pergunta inicialmente proposta em relação a gênese e natureza biótica ou abiótica das Estruturas Discoïdes da Formação Cerro Negro, esta pesquisa propõe mais questões do que soluções e respostas para o problema. Contudo, a utilização de análises diversificadas, que permitiram alto grau de detalhamento no estudo do material mostrou-se essencial para a compreensão das ED em sua complexidade e implicações paleoambientais e paleontológicas. Sendo assim, recomenda-se fortemente a reprodução dessa metodologia de trabalho no estudo de estruturas sedimentares problemáticas.

De modo geral, discos simples e ornamentados (EDO e EDS) caracterizam estruturas de deformação sinsedimentar, marcados pela injeção de material fluidificado e interação desse com comunidades microbiais, resultando por vezes em padrões radiais de simetria. Assim, o material aqui descrito apresenta natureza semelhante às estruturas interpretadas por Menon et al. (2015 e 2016) como estruturas tipo-*Intrites*, sendo então considerado uma Estrutura Sedimentar Microbialmente Controlada. Do mesmo modo, sugere-se que estruturas anteriormente identificadas com os gêneros *Astropolithon* e *Mawsonites* (SEILACHER et al. 2005, VAN LOON 2008), por exemplo, sejam reinterpretadas como vulcões de areia em interação com EPS microbial, e sejam também incluídas nessa mesma categoria.

A pesquisa demonstrou ainda a importância de se atentar para conceitos da filosofia da ciência na avaliação e escolha de hipóteses. No estudo da paleontologia da transição Proterozoico-Fanerozoico, tais conceitos podem ser utilizados como argumentos que justifiquem a caracterização de uma estrutura problemática como um fóssil ou pseudofóssil. Dessa maneira sugere-se que o raciocínio seja aplicado de forma parecida no estudo de casos semelhantes.

A Hipótese Alternativa II é aqui considerada menos provável. Contudo, contribui para a discussão envolvendo a evolução de metazoários no final do Neoproterozoico e sua interação com os sedimentos que culminaram na *Revolução Cambriana do Substrato*. Caso se prove verdadeiro, o modelo paleoicnológico representa descoberta paleontológica de grande impacto, recuando no tempo o aparecimento das primeiras escavações verticais. Para isso, mais estudos em seções com idades semelhantes a da Formação Cerro Negro são necessários, de modo a demonstrar a presença desses organismos em outras localidades.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALFARO, P. et al. Liquefaction and fluidization structures in Messinian storm deposits ( Bajo Segura Basin , Liquefaction and fluidization structures in Messinian storm deposits. **Int J Earth Sci**, v. 91, p. 505–513, 2002.
- ALLABY, M. (Ed.), *Oxford Dictionary of Earth Sciences*, 2008, Disponível em <<http://www.oxfordreference.com/view/10.1093/acref/9780199211944.001.0001/acref-9780199211944-e-93?rskey=SgucjCj&result=100>>, acessado em 20 de junho 2016.
- ALLEN, J. R. L. Earthquake magnitude-frequency, epicentral distance and soft-sediment deformation in sedimentary basins. **Sedimentary Geology**, v. 46, p. 67–75, 1986.
- ALLEN, J. R. L. Liquidization, Liquidized Sediment, and the Sedimentation of Dense Particle Dispersions. In: **Developments in Sedimentology - Sedimentary Structures their character and physical basis**. Amsterdam - Oxford - New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1982a.
- ALLEN, J. R. L. Soft-Sediment Deformation Structures. In: **Developments in Sedimentology - Sedimentary Structures their character and physical basis**. Amsterdam - Oxford - New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1982b.
- ALLEN, J. R. L. The possible mechanics of convolute lamination in graded sand beds. **Geological Society, London**, v. 134, p. 19–31, 1977.
- ALPERT, S. P. Bergaueria Prantl (Cambrian and Ordovician), a probable Actinian trace fossil. **Journal of Paleontology**, v. 47, n. 5, p. 919–924, 1973.
- ALVAREZ, W. et al. Synsedimentary deformation in the Jurassic of southeastern Utah — A case of impact shaking? n. 7, p. 579–582, 1998.
- ANDERSON, R. P. et al. Macroscopic structures in the 1.1. Ga continental copper Harbor Formation: concretions or fossils? **Palaios**, v. 31, n. 7, p. 327–338, 2016.
- ANTCLIFFE, J. B.; BRASIER, M. D. Charnia and sea pens are poles apart. **Journal of the Geological Society**, v. 164, p. 49–51, 2007.
- ARROUY, M. J. et al. Ediacaran discs from South America: probable soft-bodied microfossils unlock the paleogeography of the Clymene Ocean. **Scientific Reports**, v. 6, n. April, p. 30590, 2016.
- ARROUY, M. J. et al. Sedimentología y Estratigrafía del Grupo La Providencia ( nom . nov .). **Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis**, v. 22, n. 2, p. 171–189, 2015.
- ARROUY, M. J. **Sedimentología y estratigrafía de los depósitos ediacaranos-paleozoicos, suprayacentes a las calizas del precámbrico del Sistema de Tandilia, Provincia de Buenos Aires, Argentina**. [s.l.] Universidad Nacional de La Plata, 2015.
- BOSE, P.K. ERIKSSON, P.G. SARKAR, S. WRIGHT, D.T. SAMANTA, P. MUKHOPADHYAY, S. MANDAL, S. BANERJEE, S. ALTERMANN W., Sedimentation patterns during the Precambrian: a unique record?, **Journal of Marine and Petroleum Geology**, v.33, p. 34–68, 2012
- BOTTJER, D.; HAGADORN, J. W.; DORNBOS, S. Q. The Cambrian Substrate Revolution. **Geological Society of America Today**, v. 10, p. 1–7, 2000.
- BOTTJER D.J. & CLAPHAM M.E.. Evolutionary paleoecology of Ediacaran benthic marine animals. In: Xiao S.& Kaufman A.J. (Eds.), **Neoproterozoic Geobiology and Paleobiology**, Springer, Dordrecht, Netherlands, pp. 91–114, 2006

- BUATOIS, L. A. et al. Colonization of Brackish-Water Systems through Time : Evidence from the Trace-Fossil Record. *Palaios*, v. 20, p. 321–347, 2005.
- BUSS, L. W.; SEILACHER, A. the Phylum Vendobionta - a Sister Group of the Eumetazoa. *Paleobiology*, v. 20, n. 1, p. 1–4, 1994.
- CALLOW, R. H. T.; BATTISON, L.; BRASIER, M. D. Diverse microbially induced sedimentary structures from 1Ga lakes of the Diabaig Formation, Torridon Group, northwest Scotland. *Sedimentary Geology*, v. 239, n. 3–4, p. 117–128, 2011.
- CALLOW, R. H. T.; BRASIER, M. D. Remarkable preservation of microbial mats in Neoproterozoic siliciclastic settings: Implications for Ediacaran taphonomic models. *Earth-Science Reviews*, v. 96, n. 3, p. 207–219, 2009.
- CINGOLANI, C. A. The Tandilia system of Argentina as a southern extension of the Río de la Plata craton: An overview. *International Journal of Earth Sciences*, v. 100, n. 2, p. 221–242, 2011.
- CLOUD, P. Pseudofossils: A plea for caution. *Geology*, v. 1, n. 3, p. 123–127, 1973.
- CUADRADO, D. G. et al. Microbially-induced sedimentary structures (MISS) as record of storm action in supratidal modern estuarine setting. *Sedimentary Geology*, v. 296, p. 1–8, 2013.
- CUMMINS, H. et al. The size-frequency distribution in palaeoecology: Effects of taphonomic processes during formation of molluscan death assemblages in texas bays. *Palaeontology*, v. 29, n. 3, p. 495–518, 1986.
- DALLA SALDA, L.; BOSSI, J.; CINGOLANI, C. The Rio de la Plata Cratonic Region of Southwestern Gondwanaland. *EPISODES*, v. 11, n. 4, p. 263–269, 1988.
- DAVIES, N. S. et al. Resolving MISS conceptions and misconceptions: A geological approach to sedimentary surface textures generated by microbial and abiotic processes. *Earth-Science Reviews*, v. 154, p. 210–246, 2016.
- DE, C. Possible organisms similar to Ediacaran forms from the bhandar Group, Vindhyan Supergroup, Late Neoproterozoic of India. *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 21, n. 4, p. 387–395, 2003.
- DONALDSON, J. A.; ERIKSSON, P. G.; ALTERMANN, W. Actualistic Versus Non-Actualistic Conditions in the Precambrian Sedimentary Record: Reappraisal of an Enduring Discussion. *Precambrian Sedimentary Environments: A Modern Approach to depositional Systems*, n. May, p. 1–13, 2002.
- EKDALE, A. A.; BROMLEY, R. G.; PEMBERTON, S. G. **The use of trace fossils in sedimentology and stratigraphy**. Tulsa, Oklahoma: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1984.
- EL ALBANI, A. et al. The 2.1 Ga old Francevillian biota: Biogenicity, taphonomy and biodiversity. *PLoS ONE*, v. 9, n. 6, 2014.
- ERIKSSON, P. G. et al. Patterns of sedimentation in the Precambrian. *Sedimentary Geology*, v. 176, n. 1–2 SPEC. ISS., p. 17–42, 2005.
- ERWIN, D. H. et al. The Cambrian Conundrum: Early Divergence and Later Ecological Success in the Early History of Animals. *Science*, v. 334, n. 6059, p. 1091–1097, 2011.
- FAIRCHILD, T. R. et al. Evolution of Precambrian life in the Brazilian geological record. *International Journal of Astrobiology*, v. 11, n. 4, p. 309–323, 2012.

- FITZPATRICK, S., Simplicity in the Philosophy of Sciences, *The Internet Encyclopedia of Philosophy*, ISSN 2161-0002, <http://www.iep.utm.edu/>, acessado em 03 de Agosto de 2017 [199-].
- FORD, T. D. B. Y. Pre-Cambrian Fossils From Charnwood Forest. **Proceedings of the Yorkshire Geological Society**, v. 31, n. 3, p. 211–217, 1958.
- GEHLING, J. G. Microbial mats in terminal Proterozoic siliciclastics; Ediacaran death masks. **Palaios**, v. 14, n. 1, p. 40–57, 1999.
- GEHLING, J. G.; DROSER, M. L. Textured organic surfaces associated with the Ediacara biota in South Australia. **Earth-Science Reviews**, v. 96, n. 3, p. 196–206, 2009.
- GEHLING, J. G.; NARBONNE, G. M.; ANDERSON, M. M. The first named Ediacaran body fossil, *Aspidella terranovica*. **Palaeontology**, v. 43, n. 3, p. 427–456, 2000.
- GERDES, G.; KLENKE, T.; NOFFKE, N. Microbial signatures in peritidal siliciclastic sediments: A catalogue. **Sedimentology**, v. 47, n. 2, p. 279–308, 2000.
- GLAESSNER, M. F.; WALTER, M. R. Alcheringa : An Australasian Journal of Palaeontology New Precambrian fossils from the Arumbera Sandstone , Northern Territory , Australia. n. October 2014, p. 37–41, 1975.
- GOODMAN, N. Ciência e Simplicidade. In: MORGENBESSER, S. (Ed.). . **Filosofia da Ciência**. [s.l.] Editora Cultrix, 1975. p. 231–244.
- GRAZHDANKIN, D.; GERDES, G. Ediacaran microbial colonies. **Lethaia**, v. 40, n. 3, p. 201–210, 2007.
- GREB, S. F.; ARCHER, A. W. Soft-sediment deformation produced by tides in a meizoseismic area , Turnagain Arm , Alaska. **Geology**, p. 435–438, 2007.
- GUHMAN, A. I.; PEDERSON, D. T. Boiling sand springs , Dismal River , Nebraska : Agents for formation of vertical cylindrical structures and geomorphic change. **Geology**, v. 20, p. 8–10, 1992.
- HAGADORN, J. W.; BOTTJER, D. J. Wrinkle structures : Microbially mediated sedimentary structures common in subtidal siliciclastic settings at the Proterozoic-Phanerozoic transition. **Geology**, v. 25, n. 11, p. 1047–1050, 1997.
- HAGADORN, J. W.; MILLER, R. F. Hypothesized Cambrian Medusae from Saint John, New Brunswick, reinterpreted as sedimentary structures. **Atlantic Geology**, v. 47, n. May, p. 66–80, 2011.
- HALL, R.P. & HUGHES, D. J., Early Precambrian crustal development: changing styles of mafic magmatism, **Journal of Geological Society of London**, v.150, p. 625-635, 1993.
- HÄNTZSCHEL, W. **Treatise on invertebrate paleontology - Miscellanea, Trace fossils and problematica**. 2nd. ed. [s.l.] The Geological Society of America Inc., 1975.
- HARRIS, C.; URTON, J. M.; DAVIES, M. C. R. Soft-sediment deformation during thawing of ice-rich frozen soils : results of scaled centrifuge modelling experiments. **Sedimentology**, v. 47, p. 687–700, 2000.
- HOFMANN, H. J. First record of a late Proterozoic faunal assemblage in the North American Cordillera. **Lethaia**, v. 14, p. 303–310, 1981.
- HOYAL CUTHILL, J. F.; CONWAY MORRIS, S. Fractal branching organizations of Ediacaran rangeomorph fronds reveal a lost Proterozoic body plan. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 111, n. 36, p. 13122–6, 2014

- HUNTLEY et al. On the Morphological History of Proterozoic and Cambrian Acritarchs *In: Xiao S. & Kaufman A.J. (Eds.), Neoproterozoic Geobiology and Paleobiology*, Springer, Dordrecht, Netherlands, pp. 91–114, 2006
- IÑIGUEZ, A.M., DEL VALLE, A., POIRÉ, D, SPALLETTI, L., ZALBA, P., Cuenca Precámbrica-Paleozoico inferior de Tandilia, Provincia de Buenos Aires. *In: Chebli, G., Spalletti, L.A. (eds) Cuencas Sedimentarias Argentinas. Instituto Superior de Correlación Geológica, Universidad Nacional de Tucumán, Serie Correlación Geológica*, v.6, p. 245–263, 1989
- JAMTVEIT, B. et al. Hydrothermal vent complexes associated with sill intrusions in sedimentary basins. *In: BREITKREUZ, C.; PETFORD, N. (Eds.). Physical geology of High level Magmatic Systems*. London: Geological Society, London, Special Publications, 2004. p. 233–241.
- JENSEN, S. The Proterozoic and Earliest Cambrian Trace Fossil Record ; Patterns , Problems and Perspectives. *Integrative and Comparative Biology*, v. 43, p. 219–228, 2003.
- JENSEN, S.; DROSER, M. L.; GEHLING, J. G. A Critical Look at the Ediacaran Trace Fossil Record. *Fossils*, p. 115–157, 2006.
- JENSEN, S.; DROSER, M. L.; GEHLING, J. G. Trace fossil preservation and the early evolution of animals. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 220, n. 1–2, p. 19–29, 2005.
- KAHLE, C. F. J. Subaerial gutter marks. raindrop impressions, scour marks and other sedimentary structures, silurian tymochtee dolomite, waterville, ohio. *Carbonates and Evaporites*, v. 24, n. 1, p. 33–44, 2009.
- KELLY, K. T. Ockham ’ s Razor , Truth , and Information. *Dietrich College of Humanities and Social Sciences at Research Showcase @ CMU*, p. 1–39, 2007.
- KIRKLAND, C. L. et al. Cryptic disc structures resembling ediacaran discoidal fossils from the lower Silurian Hellefjord Schist, Arctic Norway. *PLoS ONE*, v. 11, n. 10, p. 1–21, 2016.
- KNOLL, A. H.; BAMBACH, R. K. Directionality in the history of life: diffusion from the left wall or repeated scaling of the right? *Paleobiology*, v. 26, n. sp4, p. 1–14, 2000.
- KOLESNIKOV, A. V; GRAZHDANKIN, D. V; MASLOV, A. V. Arumberia-type structures in the Upper Vendian of the Urals. *Doklady Earth Sciences*, v. 447, n. 1, p. 1233–1239, 2012.
- LIU, A. G. Framboidal pyrite shroud confirms the “death mask ” model for moldic preservation of Ediacaran soft-bodied organisms. *Palaios*, v. 31, n. May, p. 259–274, 2016.
- LONGHITANO, S. G. et al. Tidal depositional systems in the rock record: A review and new insights. *Sedimentary Geology*, v. 279, p. 2–22, 2012.
- LOWE, D. R. Water escape structures in coarse grained sediments. *Sedimentology*, v. 22, n. 2, p. 157–204, 1975.
- MACEACHERN, J. A. et al. Ichnology and Facies Models. *In: JAMES, N. P.; DALRYMPLE, R. W. (Eds.). Facies Models. 4. ed. [s.l.] Geological Association of Canada*, 2011. p. 19–58.
- MACGABHANN, B. A. Discoidal fossils of the Ediacaran biota: a review of current understanding. *Geological Society, London, Special Publications*, v. 286, p. 297–313, 2007.
- MACGABHANN, B. A. There is no such thing as the “Ediacara Biota”. *Geoscience Frontiers*, v. 5, n. 1, p. 53–62, 2014.
- MÁNGANO, M. G. & BUATOIS, L. A. The Cambrian explosion, *In: MÁNGANO, M. G. & BUATOIS, L. A (Eds.), The trace-fossil record of major evolutionary events*, Topics on Geobiology, Springer, 39, 73–126, 2016.



- MARCONATO, A.; PAES, R.; ALMEIDA, D. Pre-vegetation fluvial floodplains and channel-belts in the Late Neoproterozoic – Cambrian Santa Bárbara group ( Southern Brazil ). *Sedimentary Geology*, v. 300, p. 49–61, 2014.
- MARGULIS, L., DOLAN, M. F., *Early Life: Evolution on the Precambrian Earth, 2<sup>a</sup>Ed. Jones and Bastlett Publishers, Sudbury, Massachusetts, 168pp., 2002*
- MARSHALL, C. R. Explaining the Cambrian “ Explosion ” of Animals. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, n. 34, p. 355–384, 2006.
- MATOS, S. A. et al. Paleoecology and paleoenvironments of Permian bivalves of the Serra Alta Formation , Brazil : Ordinary ... Alta Formation , Brazil : Ordinary suspension feeders or Late Paleozoic. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 77, p. 21–41, 2017.
- MATSUMOTO, D. et al. Truncated flame structures within a deposit of the Indian Ocean Tsunami : evidence of syn-sedimentary deformation. **Sedimentology**, v. 55, p. 1559–1570, 2008.
- MCCALL, G. J. H. The Vendian (Ediacaran) in the geological record: Enigmas in geology’s prelude to the Cambrian explosion. **Earth-Science Reviews**, v. 77, n. 1–3, p. 1–229, 2006.
- MENON, L. R. et al. The dynamic influence of microbial mats on sediments: fluid escape and pseudofossil formation in the Ediacaran Longmyndian Supergroup, UK. **Journal of the Geological Society**, v. 173, n. April, p. 177–185, 2016.
- MENON, L. R.; MCILROY, D.; BRASIER, M. D. “ Intrites ” from the Ediacaran Longmyndian Supergroup , UK : a new form of microbially-induced sedimentary structure ( MISS ), *In: Brasier, A. T., McIlroy, D. & McLoughlin, N. (eds) Earth System Evolution and Early Life: a Celebration of the Work of Martin Brasier. Geological Society, London, Special Publications, 448, <http://doi.org/10.1144/SP448>., 2016.*
- METZ, R. Why Not Raindrop Impressions? **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 51, n. 1, p. 265–267, 1981.
- MOCZYDŁOWSKA, M.; MENG, F. The Ediacaran *Aspidella* -type impressions in the Jinxian successions of Liaoning Province , northeastern China. v. 49, 2016.
- MORETTI, M. et al. Asymmetrical Soft-sediment Deformation Structures Triggered by Rapid Sedimentation in Turbiditic Deposits ( Late Miocene , Guadix Basin , Southern Spain ). **Facies**, v. 44, p. 283–294, 2001.
- MOUSSA, M. T. Rain-drop impressions? **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 44, n. 4, p. 1118–1121, 1974.
- NARBONNE, G. M. The Ediacara Biota: Neoproterozoic Origin of Animals and Their Ecosystems. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 33, n. 1, p. 421–442, 2005.
- NARBONNE, G. M.; HOFMAN, H. J. Ediacaran biota of the Wernecke Mountains, Yukon, Canada. **Palaeontology**, v. 30, n. 4, p. 647–676, 1987.
- NOFFKE, N. Erosional remnants and pockets evolving from biotic-physical interactions in a recent lower supratidal environment. **Sedimentary Geology**, v. 123, n. 3–4, p. 175–181, 1999.
- NOFFKE, N. et al. Microbially induced sedimentary structures indicating climatological, Hydrological and depositional conditions within recent and pleistocene coastal facies zones (Southern Tunisia). **Facies**, v. 44, n. 1, p. 23–30, 2001.
- NOFFKE, N. The criteria for the biogenicity of microbially induced sedimentary structures (MISS) in Archean and younger, sandy deposits. **Earth-Science Reviews**, v. 96, n. 3, p. 173–180, 2009.

- NOFFKE, N.; GERDES, G.; KLENKE, T. Benthic cyanobacteria and their influence on the sedimentary dynamics of peritidal depositional systems (siliciclastic, evaporitic salty, and evaporitic carbonatic). **Earth-Science Reviews**, v. 62, n. 1–2, p. 163–176, 2003.
- OWEN, G.; MORETTI, M.; ALFARO, P. Recognising triggers for soft-sediment deformation : Current understanding and future directions ☆. **Sedimentary Geology**, v. 235, n. 3–4, p. 133–140, 2011.
- PANKHURST, R. J.; RAMOS, A.; LINARES, E. Antiquity of the Río de la Plata Craton in Tandilia, southern Buenos Aires Province, Argentina. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 16, n. 1, p. 5–13, 2003.
- PICKERILL, R. K. On the holotype of “Astropolithon hindii”. **Maritime sediments and atlantic geology**, n. 20, p. 79–81, 1984.
- PICKERILL, R. K.; HARRIS, I. M. A reinterpretation of *Astropolithon hindii* Dawson 1878. **Journal of Sedimentary Petrology**, n. 49, p. 1029–1036, 1979.
- POINCARÉ, H. **A Ciência e a Hipótese**. 2nd. ed. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1988.
- POIRÉ Neoproterozoic/lower Paleozoic sedimentary successions of the Tandilia System, Argentina, **IGCP**, v. 478, p. 1-57, 2002
- POIRÉ, D.G., C. GAUCHER Y G. GERMS La Superficie “Barker” y su importancia regional, Neoproterozoico del Cratón del Río de La Plata. 6 Jornadas Geológicas y Geofísicas Bonaerenses, **Acta de Resúmenes**, Mar del Plata, v.36., 2007.
- PÕLDSAAR, K.; AINSAAR, L. Extensive soft-sediment deformation structures in the early Darriwilian ( Middle Ordovician ) shallow marine siliciclastic sediments formed on the Baltoscandian carbonate ramp , northwestern Estonia. **Marine Geology**, v. 356, p. 111–127, 2014.
- POPPER, K. R. **A Lógica da Pesquisa Científica**. 2nd. ed. São Paulo: Editora Cultrix, 1972.
- PORADA, H.; BOUOUGRI, E. H. Wrinkle structures-a critical review. **Earth-Science Reviews**, v. 81, n. 3–4, p. 199–215, 2007.
- PORADA, H.; BOUOUGRI, E. Neoproterozoic trace fossils vs. microbial mat structures: Examples from the Tandilia Belt of Argentina. **Gondwana Research**, v. 13, n. 4, p. 480–487, 2008.
- PRINGLE, J. K. et al. Sand Volcanoes of the Carboniferous Ross Formation, County Clare, Western Ireland: 3-D Internal Sedimentary Structure and Formation. **Sand injectites: Implications for hydrocarbon exploration and production**, n. 87, p. 227–231, 2007.
- REID, C. et al. Sand volcanoes in the Avon–Heathcote Estuary produced by the 2010–2011 Christchurch Earthquakes: implications for geological preservation and expression. **New Zealand Journal of Geology and Geophysics**, v. 55, n. March 2015, p. 249–254, 2012.
- RODRIGUEZ-PASCUA, M. A.; PEREZ-LOPEZ, R. POLIGENETIC SAND VOLCANOES GENERATED BY A SINGLE EVENT : THE EARTHQUAKE OF THE EMILIA ROMAGNA ... **3rd INQUA-IGCP-567 International Workshop on Active Tectonics, Paleoseismology and Archaeoseismology**, p. 165–168, 2012.
- SCHLIRF, M. Upper Jurassic trace fossils from the Boulonnais ( northern France ). **Geologica et Paleontologica**, n. 34, p. 145–213, 2000.
- SCHOPF, J. W. et al. Precambrian microbe-like pseudofossils : A promising solution to the problem. **Precambrian Research**, v. 179, n. 1–4, p. 191–205, 2010.
- SCHULZ, D. B. **Simplicity in science**. [s.l.] University of Iowa, 2012.

- SCORZATO, L. On the role of simplicity in science. **Synthese**, n. 190, p. 2867–2895, 2013.
- SEILACHER, A. Begriff und Bedeutung der Fossil-Lagerstätten: **Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie**. Monatshefte (*in German*) p. 34–39, 1970
- SEILACHER, A. Biomat-related lifestyles in the Precambrian. **Palaios**, v. 14, n. 1, p. 86–93, 1999.
- SEILACHER, A. Sedimentological classification and nomenclature of trace fossils. **Sedimentology**, v. 3, p. 253–256, 1964.
- SEILACHER, A. **Trace Fossil Analysis**. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- SEILACHER, A. Vendobionta and Psammocorallia - lost constructions of Precambrian evolution. **J. Geol. Soc. London**, n. 149, p. 607–613, 1992.
- SEILACHER, A. Vendozoa: organismic construction in the proterozoic biosphere. **Lethaia**, v. 22, p. 229–239, 1989.
- SEILACHER, A.; BUATOIS, L. A.; M??NGANO, M. G. Trace fossils in the Ediacaran-Cambrian transition: Behavioral diversification, ecological turnover and environmental shift. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 227, n. 4, p. 323–356, 2005.
- SPRIGG, R. C., Early Cambrian (?) jellyfishes from the Flinders Ranges, South Australia, **Transactions of the Royal Society of South Australia**, v.71, p. 212–224, 1947
- STRZEBONSKI, P.; UCHMAN, A. The trace fossil Gyrophyllites in deep-sea siliciclastic deposits of the Istebna Formation ( Upper Cretaceous – Palaeocene ) of the Carpathians : An example of biologically controlled distribution. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 426, p. 260–274, 2015.
- SUN WEIGUO, Precambrian medusoids: The Cyclomedusa plexus and Cyclomedusa-like pseudofossils. **Precambrian Research**, v. 31, n. 4, p. 325–360, 1986.
- TAJ, R. J.; AREF, M. A. M.; SCHREIBER, B. C. The influence of microbial mats on the formation of sand volcanoes and mounds in the red sea coastal plain, south Jeddah, Saudi Arabia. **Sedimentary Geology**, v. 311, n. August, p. 60–74, 2014.
- TARHAN, L. G. et al. Taphonomy and morphology of the Ediacara form genus *Aspidella*. **Precambrian Research**, v. 257, p. 124–136, 2015.
- TARHAN, L. G.; DROSER, M. L.; GEHLING, J. G. Taphonomic Controls on Ediacaran Diversity: Uncovering the Holdfast Origin of Morphologically Variable Enigmatic Structures. **Palaios**, v. 25, n. 12, p. 823–830, 2010.
- TU, C. et al. Proliferation of MISS-related microbial mats following the end-Permian mass extinction in terrestrial ecosystems: Evidence from the Lower Triassic of the Yiyang area, Henan Province, North China. **Sedimentary Geology**, v. 333, p. 50–69, 2016.
- VAN LOON, A. J. The nature of Mawsonites (Ediacara fauna). **Gondwana Research**, v. 14, n. 1–2, p. 175–182, 2008. Van Loon, A.J., 2008, The nature of Mawsonites (Ediacara fauna), *Gondwana Research*, **14**: 175–182
- VAN LOON, A. J.; MAULIK, P. Abraded sand volcanoes as a tool for recognizing paleo-earthquakes, with examples from the Cisuralian Talchir Formation near Angul (Orissa, eastern India). **Sedimentary Geology**, v. 238, n. 1–2, p. 145–155, 2011.
- VICKERS-RICH, P, FEDONKIN M.A., The background: The Archean (4500 to 2500 millions of years ago), *In*: Fedonkin, M.A., Gehling J.G., Grey, K., Narbonne, G.M., Vickers-Rich, P., *Rise of*

*Animals: Evolution and diversification of the Kingdom Animalia*, (Ed).The Johns Hopkins University Press, Baltimore, 331pp., 2007a

VICKERS-RICH, P, FEDONKIN M.A., The background: The Proterozoic (2500 to 542 millions of years ago), *In: Fedonkin, M.A., Gehling J.G., Grey, K., Narbonne, G.M., Vickers-Rich, P., Rise of Animals: Evolution and diversification of the Kingdom Animalia*, Ed.The Johns Hopkins University Press, Baltimore, 331pp., 2007b

WADE, M. Hydrozoa and Scyphozoa and other medusoids from the Precambrian Ediacara fauna, South Australia, **Palaeontology**, 1972. Disponível em: <[http://palaeontology.palass-pubs.org/pdf/Vol 15/Pages 197-225.pdf](http://palaeontology.palass-pubs.org/pdf/Vol%2015/Pages%20197-225.pdf)>

WADE, M. Medusae From Uppermost Precambrian or Cambrian Sandstones, Central Australia, **Palaeontology**, 1969.

WALTER, M. R. Tectonically deformed sand volcanoes in a Precambrian greywacke , northern territory of Australia. **Journal of the Geological Society of Australia**, v. 18, p. 395–399, 1972.

WARD, P.; BROWNLEE, D. **Rare Earth – why complex life is uncommon in the universe**, Copernicus Publishers, New York, 2003.

WESTON, T. C. Notes on concretionary structures. **transactions of the Nova Scotian Institute of Science**, p. 137–142, 1891.

YANG, H.; CHEN, Z. Q.; FANG, Y. Microbially induced sedimentary structures from the 1.64Ga Chuanlinggou Formation, Jixian, North China. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, 2016.

### ANEXO – A

Anexo 1: Tabela de caracterização morfométrica de estruturas discoides ediacaranas

N°	Diâmetro do disco(mm)		Diâmetro da projeção central (mm)	espessura*		Modo de ocorrência		Ornamentação **						Observações	
	maior	menor		max	min	epirelevo	hiporelevo	Não	tipo1	tipo2	tipo3	tipo4	n° de rugas		

\* medida a partir da replica

\*\* tipo 1: apenas invaginação central; tipo 2: presença de knob; tipo 3: invaginação + enrugamento discreto; tipo 4: claro zoneamento e rugosidade (rugosidade contadas nas cristas)