

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**MICROBIALITOS DA FORMAÇÃO BOCAINA – GRUPO CORUMBÁ:  
IMPLICAÇÕES PALEOAMBIENTAIS NO EDIACARANO TARDIO**

Mário Yoshiaki Kato Myakava

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Juliana de Moraes Leme Basso

Coorientador: Dr. Guilherme Raffaeli Romero

MONOGRAFIA DO TRABALHO DE FORMATURA

(TF – 21/32)

SÃO PAULO

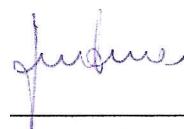
2021

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**MICROBIALITOS DA FORMAÇÃO BOCAINA – GRUPO CORUMBÁ:  
IMPLICAÇÕES PALEOAMBIENTAIS NO EDIACARANO TARDIO**



Mário Yoshiaki Kato Myakava



Profª. Drª. Juliana de Moraes Leme Basso

SÃO PAULO

2021

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar os meus mais sinceros agradecimentos às diversas pessoas e instituições que contribuíram para a realização desse Trabalho de Formatura, dentre esses:

À Orientadora, Profa. Dra. Juliana de Moraes Leme (IGc/USP) pelo profissionalismo, excelência, dedicação e amor à docência e à pesquisa.

Ao Coorientador, Dr. Guilheme Raffaeli Romero (Pós-Doutorando, IGc/USP), pelo comprometimento, paciência e humildade para passar seus conhecimentos adiante.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo financiamento concedido no âmbito do Projeto Temático (16/06114-6) “The Neoproterozoic Earth System and the rise of biological complexity”, ao qual este Trabalho de Formatura foi vinculado.

Ao Instituto de Geociências, ao Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental e ao Laboratório de Estudos Paleobiológicos (USP), pela infraestrutura oferecida.

Aos pesquisadores Prof. Dr. Isaac Daniel Rudnitzki (UFOP) e Dra. Luana Pereira Costa de Moraes (Pós-Doutoranda IAG/USP) pelo auxílio teórico e discussões na elaboração desse trabalho.

À mineradora EDEM (Empresa De Desenvolvimento em Mineração e Participações Ltda.), em nome do Sr. Luiz Antonio Vessani e do Sr. Lincoln Gambier, e à mineradora HORII, em nome da família Horii, pela permissão de coleta e acesso ao material estudado.

A Deus e à minha família, que são minha base para viver; à minha grande companheira Amanda Alves Ferreira, de quem sempre tive o maior apoio emocional; à minha amiga Geovana Leite Geraldo, que me ajudou a construir este trabalho, e a todos os amigos que a geologia me proporcionou.

## RESUMO

O presente Trabalho de Formatura propôs um estudo sobre os microbialitos de idade ediacarana (635 - 541 Ma) da Formação Bocaina, localizada na região oeste do estado do Mato Grosso do Sul, pertencente ao Grupo Corumbá. O trabalho teve como objetivo geral o melhor entendimento do contexto paleoambiental durante a deposição da Formação Bocaina, a partir do estudo das características morfométricas e petrográficas dos microbialitos que ocorrem nos dolomitos e fosforitos dessa formação. Para o cumprimento dos objetivos deste trabalho, foram analisadas amostras dos microbialitos da Formação Bocaina de trincheiras e de testemunhos de sondagem de Bodoquena (MS), cedidas pelas mineradoras de fosfato EDEM (Empresa De Desenvolvimento em Mineração e Participações Ltda.) e HORII. Os microbioalitos foram analisados sob os seguintes níveis de resolução: megascópico, macroscópico, mesoscópico e microscópico. Com esse estudo, notou-se que cinco diferentes morfotipos de microbialitos ocorrem em profundidades diversas nos testemunhos de sondagem e nas trincheiras, sendo eles: os estromatólitos estratiformes, os estromatólitos colunares, os pseudo-colunares, os complexos estromatolíticos e os trombólitos. São aqui descritos, pela primeira vez, na Formação Bocaina, os morfotipos dos complexos microbialíticos e os trombólitos, indicando maior variedade de estruturas do que se conhecia e permitindo melhor entendimento do paleoambiente da Formação Bocaina. A análise em detalhe desses microbialitos revelou importantes informações de âmbito local, como as variações paleoambientais dos depósitos da Formação Bocaina. Os estromatólitos com natureza estratiforme sugerem um ambiente deposicional relativamente calmo, planar, caracterizado por correntes fracas, que permite a conexão lateral das esteiras sem formar domos. A ocorrência de estromatólitos colunares aponta aumento de energia e formação em ambiente de planície de maré, fechando os ciclos de raseamento. Estromatólitos pseudo-colunares e suas associações com estruturas planares indicam águas mais rasas, límpidas e oxigenadas, com energia moderada para a formação de colunas, no qual haveria intensa proliferação microbiana. Os complexos microbialíticos poderiam se encaixar em um contexto semelhante, uma vez que também apresentam uma mistura de morfologias microbialíticas. Os trombólitos calcificados sugerem um ambiente de formação de águas rasas. O estudo dessas amostras possibilitou a descoberta de novos fósseis melhor preservados, com melhor controle estratigráfico; o que auxiliou no entendimento sobre as mudanças paleoambientais nesse intervalo de tempo, fundamentais para o esclarecimento dos eventos biológicos e geológicos que ocorreram no Neoproterozoico do Sul do Gondwana.

**Palavras-chave:** Microbialitos, Ediacarano, Formação Bocaina, Grupo Corumbá.

## ABSTRACT

The present Formation Work proposed a study on Ediacaran age microbialites (635 - 541 Ma) from the Bocaina Formation, located in the western region of the state of Mato Grosso do Sul, belonging to the Corumbá Group. The work had as general objective the better understanding of the paleoenvironmental context during the deposition of the Bocaina Formation, from the study of the morphometric and petrographic characteristics of the microbialites that occur in the dolomites and phosphorites of this formation. In order to fulfill the objectives of this work, samples of microbialites from the Bocaina Formation were analyzed from trenches and from boreholes in Bodoquena (MS), provided by the phosphate miners EDEM (Empresa De Desenvolvimento em Mineração e Participações Ltda.) and HORII. The microbialites were analyzed under the following resolution levels: megascopic, macroscopic, mesoscopic and microscopic. With this study, it was noticed that five different morphotypes of microbialites occur at different depths in the drill cores and in the trenches, namely: the stratiform stromatolites, the columnar stromatolites, the pseudo-columnar, the stromatolytic complexes and the thrombolites. The morphotypes of microbialitic complexes and thromboliths are described here, for the first time, in the Bocaina Formation, indicating a greater variety of structures than previously known and allowing a better understanding of the paleoenvironment of the Bocaina Formation. The detailed analysis of these microbialites revealed important local information, such as the paleoenvironmental variations of the Bocaina Formation deposits. Stromatolites with a stratiform nature suggest a relatively calm, planar depositional environment characterized by weak currents, which allows the lateral connection of the mats without forming domes. The occurrence of columnar stromatolites indicates an increase in energy and formation in a tidal flat environment, closing the shallowing cycles. Pseudo-columnar stromatolites and their associations with planar structures indicate shallower, clearer and oxygenated waters, with moderate energy for the formation of columns, in which there would be intense microbial proliferation. The microbialitic complexes could fit into a similar context, as they also have a mixture of microbialitic morphologies. Calcified thrombolites suggest an environment of shallow water formation. The study of these samples enabled the discovery of new fossils that were better preserved, with better stratigraphic control; which helped to understand the paleoenvironmental changes in this period of time, which are fundamental for the clarification of the biological and geological events that occurred in the Neoproterozoic of Southern Gondwana.

**Key words:** Microbialites, Ediacaran, Bocaina Formation, Corumbá Group.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	3
1 INTRODUÇÃO.....	6
2 METAS E OBJETIVOS .....	7
3 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO .....	7
3.1 Microbialitos.....	7
3.2 Contexto geológico da área de estudo.....	9
4 MATERIAIS E MÉTODOS .....	15
5 RESULTADOS OBTIDOS .....	18
5.1 Perfis litoestratigráficos dos testemunhos de sondagem e das trincheiras.....	18
5.2 Análise megascópica e macroscópica das estruturas dos microbialitos em escala de afloramento (trincheiras).....	19
5.3 Análise mesoscópica das estruturas dos microbialitos nas amostras dos testemunhos de sondagem .....	21
5.4 Análise mesoscópica das estruturas dos microbialitos nas lâminas petrográficas .	25
5.5 Análise microscópica das estruturas dos microbialitos nas lâminas petrográficas .	27
6 INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	29
6.1 Biogenicidade .....	29
6.2 Paleoambiente da Formação Bocaina .....	31
7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	34
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36

## 1 INTRODUÇÃO

Localizado na Faixa Paraguai Sul, o Grupo Corumbá apresenta uma das maiores e mais diversificadas assembleias de formas de vida neoproterozoicas registradas na América do Sul (Almeida, 1965; Fairchild et al., 2012; Romero et al., 2016; Walde et al., 2016; Parry et al., 2017; Adorno et al., 2017; Becker-Kerber et al., 2017, 2019; Oliveira et al., 2019; Amorim et al., 2020). Nas últimas décadas, estudos paleontológicos realizados revelaram a existência de organismos que se mostraram importantes para a identificação da transição Proterozoico/Cambriano no Brasil (vide revisão em Fairchild et al., 2012). Tal conteúdo fossilífero encontra-se na porção Ediacarana do Grupo Corumbá, nas formações Bocaina (microbialitos, *Vase-Shaped Microfossils* – VSMs) e Tamengo (microfósseis, metáfitas, icnofósseis e metazoários). Estes últimos constituem as mais antigas evidências da assembleia Nama na América do Sul (Fairchild et al., 2012). Portanto, o estudo paleontológico de detalhe do Grupo Corumbá apresenta informações fundamentais na elucidação da história da explosão adaptativa de metazoários macroscópicos, que marcou a transição do Proterozoico para o Fanerozoico.

Apesar do grande número de trabalhos na Formação Tamengo (Almeida, 1945, 1964, 1965, 1968, 1984; Glaessner, 1984; Zaine, 1991; Boggiani, 1998; Babcock et al., 2005; Warren et al., 2011, 2012; Pacheco, 2012; Pacheco et al., 2011, 2015; Van Iten et al., 2016; Becker-Kerber et al., 2017, 2019; Parry et al., 2017; Adorno et al., 2017; Amorim et al., 2020), as pesquisas sobre microbialitos na Formação Bocaina têm se desenvolvido de forma paulatina (Zaine, 1991; Nogueira, 2003; Nogueira et al., 2003, Font et al., 2006; Morais, 2013; Romero, 2015; Romero et al., 2016), ou seja, poucos estudos paleontológicos foram realizados, sendo a maioria dos trabalhos concentrados em descrições da morfologia de microbialitos expostos em afloramentos de pequenas dimensões, representados por morros baixos e isolados (e.g. Fontaneta, 2012; Morais, 2013; Romero et al., 2016). Dessa forma, os estudos sobre esse tema ainda apresentam caráter descritivo, com informações locais sobre o paleoambiente e a estratigrafia sem relacionar os microbialitos a questões globais do Pré-Cambriano, como o declínio dos microbialitos, além de suas implicações bioevolutivas (Bosak et al., 2013).

Portanto, o presente Trabalho de Formatura propôs um estudo sobre os microbialitos de idade Ediacarana (635 - 541 Ma) da Formação Bocaina, localizada na região oeste do Estado do Mato Grosso do Sul, pertencente ao Grupo Corumbá. Esta proposta está vinculada com o projeto temático da FAPESP (nº do processo 16/06114-6) “*The Neoproterozoic Earth System and the rise of biological complexity*”, que trata da integração de dados sobre a

composição química dos oceanos, a evolução da vida e a configuração paleogeográfica do planeta entre o Criogeniano e o Cambriano Inferior.

Nesse Trabalho de Formatura foi possível acessar amostras de trincheiras e de testemunhos de sondagem da Formação Bocaina, em Bodoquena (MS), cedidas pelas mineradoras de fosfato EDEM (Empresa De Desenvolvimento em Mineração e Participações Ltda.) e HORII. O estudo dessas amostras abriu a possibilidade de descoberta de novos fósseis bem preservados (Morais et al., 2019), que apresentavam melhor controle estratigráfico, de modo que auxiliou no entendimento das condições paleoambientais em que esses depósitos foram formados. Portanto, aqui são apresentados os principais resultados e discussões sobre o estudo das características morfométricas e petrográficas dos microbialitos que ocorrem na Formação Bocaina (Grupo Corumbá), bem como as suas implicações paleoambientais locais.

## **2 METAS E OBJETIVOS**

Este Trabalho de Formatura teve como meta o melhor entendimento do contexto paleoambiental durante a deposição da Formação Bocaina, através do estudo das características morfométricas e petrográficas dos microbialitos que ocorrem nos dolomitos e fosforitos desta formação.

Considerando o propósito geral, os objetivos específicos foram: (1) descrever a morfologia, a microestrutura e os modos de ocorrência dos microbialitos; (2) reconstituir a morfogênese dos microbialitos para a interpretação de biogenicidade; (3) caracterizar o paleoambiente colonizado pelos microbialitos.

## **3 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO**

### **3.1 Microbialitos**

Microbialitos são estruturas biossimentares que se formam através da interação de diversos grupos de microrganismos com processos sedimentares (Riding, 2000, 2011). No registro fóssil, estão dentre as primeiras evidências de vida na Terra e são evidências diretas da presença de organismos capazes de produzir oxigênio através de fotossíntese e consumi-lo através da respiração aeróbica (Grotzinger e Knoll, 1999; Schopf, 2001). De acordo com Grotzinger e Knoll (1999), são três os principais processos envolvidos na formação dessas

estruturas: (I) o crescimento das esteiras microbianas, (II) a deposição sedimentar, e (III) a precipitação mineral.

As esteiras microbianas são sistemas compostos por biofilmes (estruturas polissacarídicas complexas, ou EPS, que contêm enzimas, lipídios, DNA extracelular, proteínas e ácidos nucleicos) e comunidades microbianas (Dupraz et al., 2009). O biofilme é responsável pela aderência de sedimentos detriticos em camadas, formando a unidade básica de grande parte dos microbialitos: a laminação (Grotzinger e Knoll, 1999; Riding, 2000, 2011; Schopf, 2001). Além disso, o biofilme atua no transporte de nutrientes, pode ser hidrolisado e digerido pela comunidade em períodos de escassez de nutrientes, e serve como proteção contra raios UV (Dupraz et al., 2009).

As comunidades microbianas não são fixas no biofilme, mas movem-se em sua mucilagem, e são comumente divididas em zonas, de acordo com seus processos metabólicos. No topo dos microbialitos, ocorre a zona de crescimento. Ela é comumente formada por cianobactérias, que possuem várias formas, sendo as mais comuns: cocoidal, elipsoidal e filamentosa (Romero, 2015).

Logo abaixo das esteiras de cianobactérias existe a zona intermediária, a qual apresenta espessura de poucos milímetros, composta de bactérias e microrganismos aeróbicos facultativos. É nessa zona que a litificação precoce dos estromatólitos ocorre (Horodyski et al., 1975; Margulis, et al., 1981; Schopf, 2001; Riding, 2011).

A zona anóxica é a mais basal de um microbialito. Possui centímetros de comprimento e é caracterizada pela presença de bactérias e de arqueas anaeróbicas obrigatórias, incluindo organismos quimiotróficos que reduzem sulfato e produzem metano, o que deixa no registro geológico um marcador com sinal isotópico típico desses organismos (Margulis et al., 1981; Grotzinger e Knoll, 1999; Schopf, 2001).

O acúmulo de sedimentos e matéria orgânica das comunidades microbianas pode formar estruturas laminadas fixas no substrato, que se denominam *estromatólitos* (Awramik e Semikhatov, 1979). Quando há laminação interna e a estrutura não está fixa ao substrato, assumindo uma forma arredondada, esta passa a se chamar *oncóide* (Dahanayake, 1978; Riding, 2000, 2011). Caso a estrutura formada não apresente laminação claramente visível, mas uma textura interna caracterizada por peloídes, organizada em conjuntos irregulares (grumos), a estrutura passa a ser chamada de *trombólito*, podendo exibir morfologia externa igual a dos estromatólitos (Aitken, 1967; Riding, 2011) (Figura 1).

Alguns microbialitos crescem de maneira arbustiforme, refletindo o hábito dos microrganismos da comunidade microiana, que pode abranger cianobactérias e pequenas algas eucarióticas multicelulares. Durante seu desenvolvimento ou, precocemente, durante

sua diagênese, esses microrganismos ficam incrustados por micrita, que se apresenta tanto na escala dos indivíduos como das colônias, apresentando aspecto dentrítico a arbustiforme; daí a denominação *dentrólito* (Morais, 2013).

O registro de estromatólitos e oncoïdes é muito amplo – desde o Arqueano – enquanto que os trombólitos aparecem no início do Neoproterozoico e, os dentrólitos, mais próximos do fim dessa era. Todas as quatro categorias de microbialitos continuam existindo até hoje (Riding, 2011; Morais, 2013) (Figura 1).

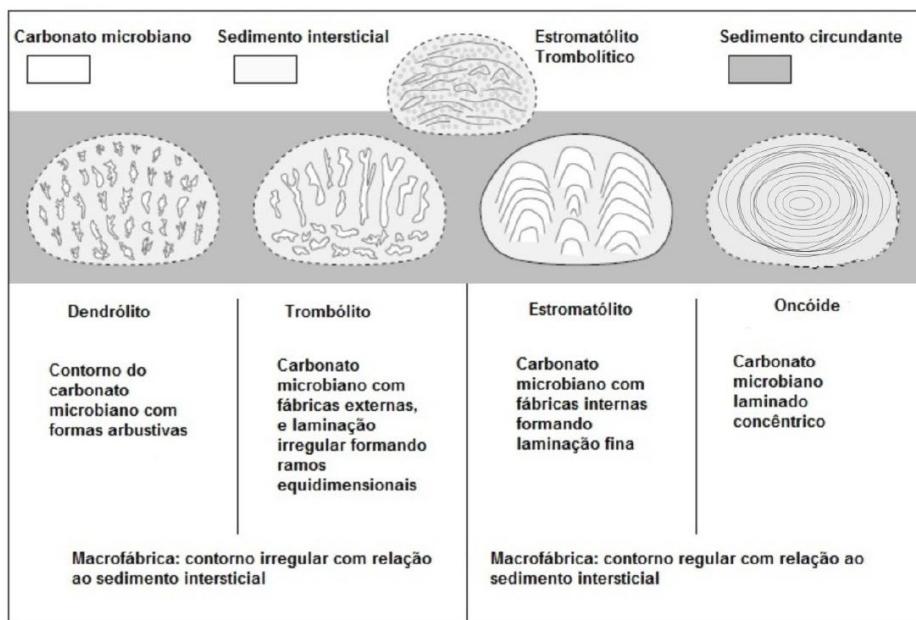


Figura 1: Exemplos de microbialitos descritos mundialmente. Fonte: Riding, 2011.

### 3.2 Contexto geológico da área de estudo

A Faixa Paraguai é uma unidade tectônica pertencente à Província do Sudeste do Tocantins (Almeida, 1984; Cordani et al., 2000). Com cerca de 1200 km de extensão, a porção brasileira dessa faixa é disposta em um arco que se abre para sudeste, orientado na direção N-S na porção sul do estado do Mato Grosso do Sul (Serra da Bodoquena, Maciço do Urucum e Serra do Amolar), e curvando-se para nordeste em sua porção norte. No estado do Mato Grosso, possui continuidade em direção ao sul, com afloramentos no Paraguai (Warren et al., 2012) (Figura 2).

A formação da Faixa Paraguai se deu pela colisão dos blocos continentais Amazônico, São Francisco e Paraná (Alkmim et al., 2001), com o consequente fechamento do oceano Brasilides, durante a amalgamação final da porção oeste do supercontinente Gondwana, no final do evento Brasiliano/Pan-Africano, no Cambriano Médio (~520 Ma) (Almeida, 1984; Alvarenga et al., 2000). A faixa foi cortada imediatamente pelo magmatismo granítico pós-orogênico de aproximadamente 500 Ma (Almeida e Mantovani, 1975). McGee e colaborares

(2012) consideraram a idade do granito de São Vicente ( $518 \pm 4$  Ma) como uma restrição da idade mínima de deformação e metamorfismo na Faixa Paraguai e, consequentemente, a idade final da assembleia do supercontinente Gondwana na América do Sul.

Registros do evento colisional que originou a Faixa Paraguai são observados principalmente em rochas metamorfizadas do Grupo Cuiabá. Já os depósitos intracratônicos pós-colisionais e não metamorfizados são representados por depósitos glaciogênicos marinoanos, carbonatos ediacaranos e rochas siliciclásticas cambrianas-ordovicianas (Nogueira et al., 2019).

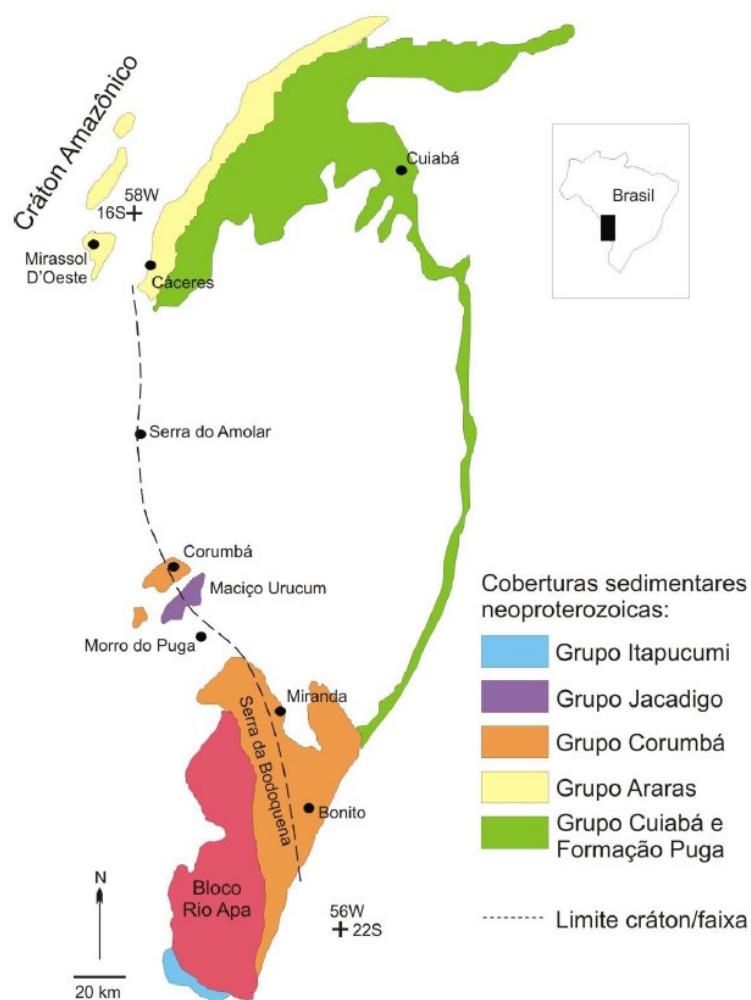


Figura 2 – Mapa geológico simplificado da Faixa Paraguai. Modificado de Boggiani et al. (2010). Extraído de Morais (2013).

O Grupo Corumbá, inserido na Faixa Paraguai Sul, representa um conjunto de unidades sedimentares e metassedimentares siliciclásticas e carbonáticas, de aproximadamente 600 m de espessura, depositadas em margem continental estável, em um contexto de rifte no Neoproterozoico (Parry et al., 2017). Aflora nas adjacências do município de Corumbá e na porção leste da Serra da Bodoquena, no estado do Mato Grosso do Sul. O

grupo foi subdividido da base para o topo, segundo Boggiani (1998), nas seguintes formações (Figura 3):

- Formação Cadieus, representada por conglomerados e arcóseos, interpretados como produtos de leques aluviais, e folhelhos roxos de ambiente lacustre depositados em uma bacia do tipo rifte (Boggiani, 1998). Esses sedimentos estão dispostos sobre embasamento granítico-gnáissico, com exposições restritas à porção oeste da Serra da Bodoquena (Fontaneta, 2012);

- Formação Cerradinho, aflorante também na borda oeste da Serra da Bodoquena, é representada por arenitos, siltitos, argilitos, calcários e dolomitos, interpretados como continuidade lateral aos leques aluviais que depositaram a Formação Cadieus, representando fácies distais de planície de maré. Sobre o embasamento, há uma superfície de aplainamento pré-cambriana sobre a qual, com elevação do nível eustático, permitiu o ingresso de águas oceânicas de forma ampla sobre o bloco cratônico. Desta forma, propiciou-se ampla sedimentação carbonática, sob condições de águas rasas e quentes, favoráveis à intensa proliferação microbiana, na forma de estromatólitos, e à origem de extensos e espessos depósitos de dolomitos da Formação Bocaina (Boggiani, 1998).

- Formação Bocaina, que aflora na região de Corumbá e na Serra da Bodoquena, e é caracterizada por dolomitos com estromatólitos, oncólitos, oóides, estratificações cruzadas, brechas intraformacionais, estruturas *tepees*, além de rochas fosfáticas no topo da sucessão. Na região de Corumbá, onde foi estudada em maior detalhe por Oliveira (2010), a Formação Bocaina é atribuída a um ambiente de planície de intermaré, com intensa atividade microbiana, e baixios de submaré, como parte da rampa interna, sujeita esporadicamente a eventos de sismicidade (Oliveira, 2010).

- Formação Tamengo, que compreende calcários carbonosos, tipicamente de cor preta, com frequentes intercalações de pelitos siliciclásticos. Na base da formação encontram-se brechas intraformacionais, com clastos de litologias da Formação Bocaina e também do embasamento. Os afloramentos ocorrem na Serra da Bodoquena, expressos em morros alongados com altitude superior aos morros da Formação Bocaina, e também na região de Corumbá, onde foram encontrados fósseis dos metazoários *Cloudina* e *Corumbella*, relacionados ao período Ediacarano (Boggiani, 1998).

- Formação Guaicurus, definida por um espesso pacote de folhelhos posicionado no topo do Grupo Corumbá. Suas exposições são comumente muito intemperizadas e cobertas por camadas de quartzo esbranquiçado. Esta fácie, relativamente homogênea, é interpretada como depósito de plataforma afogada (Almeida, 1968; Boggiani, 1998), representando um evento de transgressão. O aumento do nível d'água e o maior aporte de sedimentos

siliciclásticos inviabilizaram a sedimentação carbonática, permitindo a instalação de uma plataforma terrígena durante o final da sedimentação do Grupo Corumbá.

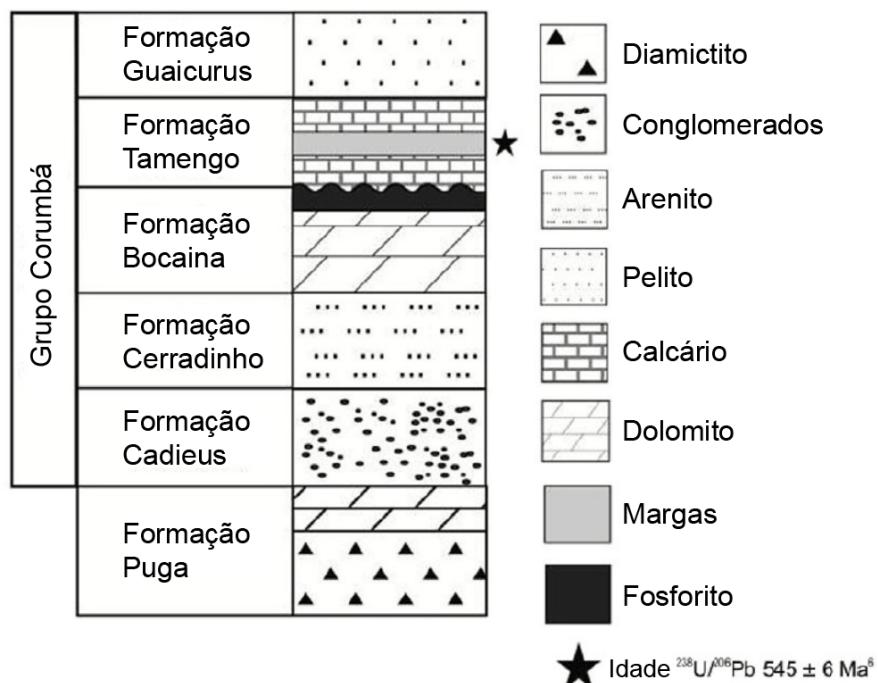


Figura 3 – Quadro litoestratigráfico simplificado do Grupo Corumbá, no sul da Faixa Paraguai. Fonte: Romero et al. (2016).

A Formação Bocaina, foco do estudo do presente Trabalho de Formatura, teve sua denominação dada por Almeida (1945). O nome Bocaina se deve a uma garganta do rio homônimo, situada a 4 km a sudeste da cidade de Corumbá. A formação é interpretada como uma deposição em extensa planície de maré, com transição a leste para uma plataforma marinha, na qual teriam se originado as rochas fosfáticas associadas a eventos de correntes marinhas de ressurgência. O ambiente de águas rasas e bem iluminado permitiu a proliferação de microbialitos, com destaque para estromatólitos e oncólitos (Morais, 2013). Em relação à evolução da bacia, a formação representa a transição de uma bacia restrita, do tipo rifte, para uma bacia marinha, durante fase de abertura oceânica (Boggiani, 1998).

A Formação Bocaina tem contatos transicionais com as formações Cerradinho (inferior) e Tamengo (superior). Recobre de maneira discordante as rochas do Complexo Rio Apa e, em discordância paralela, a Formação Urucum, do Grupo Jacadigo (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – CPRM).

Apesar de apresentar contato com a Formação Tamengo, a relação estratigráfica entre esta e a Formação Bocaina é ainda incerta e existe a possibilidade de não haver correlação lateral entre as duas. Desta forma, a brecha polimítica basal da Formação Tamengo representaria um significativo rebaixamento eustático, com exposição da Formação Bocaina

e seu retrabalhamento. Após isto, com a subida do nível do mar, ocorreu a deposição das porções médias e superiores da Formação Tamengo (Boggiani et al., 2010).

Apesar da dificuldade de correlacioná-las devido às grandes variações laterais de fácies, distribuídas por extensões de centenas de quilômetros, as fácies sedimentares da Formação Bocaina foram definidas por Boggiani (1998). A síntese das fácies é apresentada na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Síntese das fácies sedimentares da Formação Bocaina. Fonte: Boggiani (1998).

Fácies	Descrição	Estruturas Sedimentares	Ambiente de Deposição
Pisóide rudstone	Oóides > 2mm, córtex concêntrico		Costeiro (baixios oolíticos)
Rochas fosfáticas	Microfosforito maciço, estromatólitos e laminações algáceas fosfatizadas	Maciça a estromatolítica	Costeiro sujeito a upwellings
Dolomitos estromatolíticos	Laminações algáceas, estromatólitos bulbosos e colunares	Maciça, laminada e estromatolítica	Inframare
Mudstones alternados com silexitos	Camadas centimétricas de mudstones dolomíticos alternadas com camadas de silexito incolor	Estratificação plano-paralela	Inframare
Flakestones	Brecha carbonática com clastos na forma de placas	Placas imbricadas tepees	Inter e supramaré
Mudstones dolomíticos estratificados	Estratificação plano-paralela (1-2 cm de espessura)	Estratificação plano-paralela	Inframare
Estromatólitos LLH	Espesso pacote basal de estromatólitos com laminações ligadas lateralmente (LLH) formando pseudo-colunas	estromatolítica	Inframare

Os calcários laminados avermelhados da Formação Bocaina com valores de  $\delta^{13}\text{C}$  em torno de  $-5\text{\textperthousand}$  foram considerados inicialmente como depósitos de capa carbonática do Evento Glacial Marinoano, indicando uma idade de  $\sim 635$  Ma, base do Ediacarano (Boggiani et al., 2010). Porém, o calcário não é micrítico ou dolomicrítico e não foram observadas outras características diagnósticas das capas carbonáticas marinoanas, tais como macropeloides e marcas de ondulação gigantes (Nogueira et al., 2019). Além disso, a estrutura tubular descrita por esses autores para a Formação Bocaina, na região de Corumbá, tem sido interpretada como fraturas sin-sedimentares (Oliveira, 2010) ou, mais recentemente, como estromatólitos colunares (Romero, 2015; Romero et al., 2016).

Parry et al. (2017) dataram zircões de tufo vulcânico utilizando o método U-Pb em três horizontes no Grupo Corumbá (Figura 4). A camada de cinzas do topo da Formação Bocaina (em Porto Morrinhos) proveu uma idade média de  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  de  $555,18 \pm 0,30/0,34/0,70$  Ma, que é considerada a idade aproximada da amostra e a idade máxima para o início da sucessão sedimentar da Formação Tamengo sobrejacente, indicando então que a Formação Bocaina depositou-se no Ediacarano Tardio. Além disso, valores negativos de  $\delta^{13}\text{C}$  consistentes com a anomalia Shuram-Wonoka, característica do final do Ediacarano, foram

encontrados na porção inferior da Formação Tamengo (Boggiani et al. 2010). Ainda no trabalho de Parry et al. (2017), duas outras camadas de cinzas foram coletadas do topo da Formação Tamengo, e os zircões proveram idades de U-Pb CA-ID-TIMS que variaram de 541,2 a 548 Ma e 537 a 552 Ma.

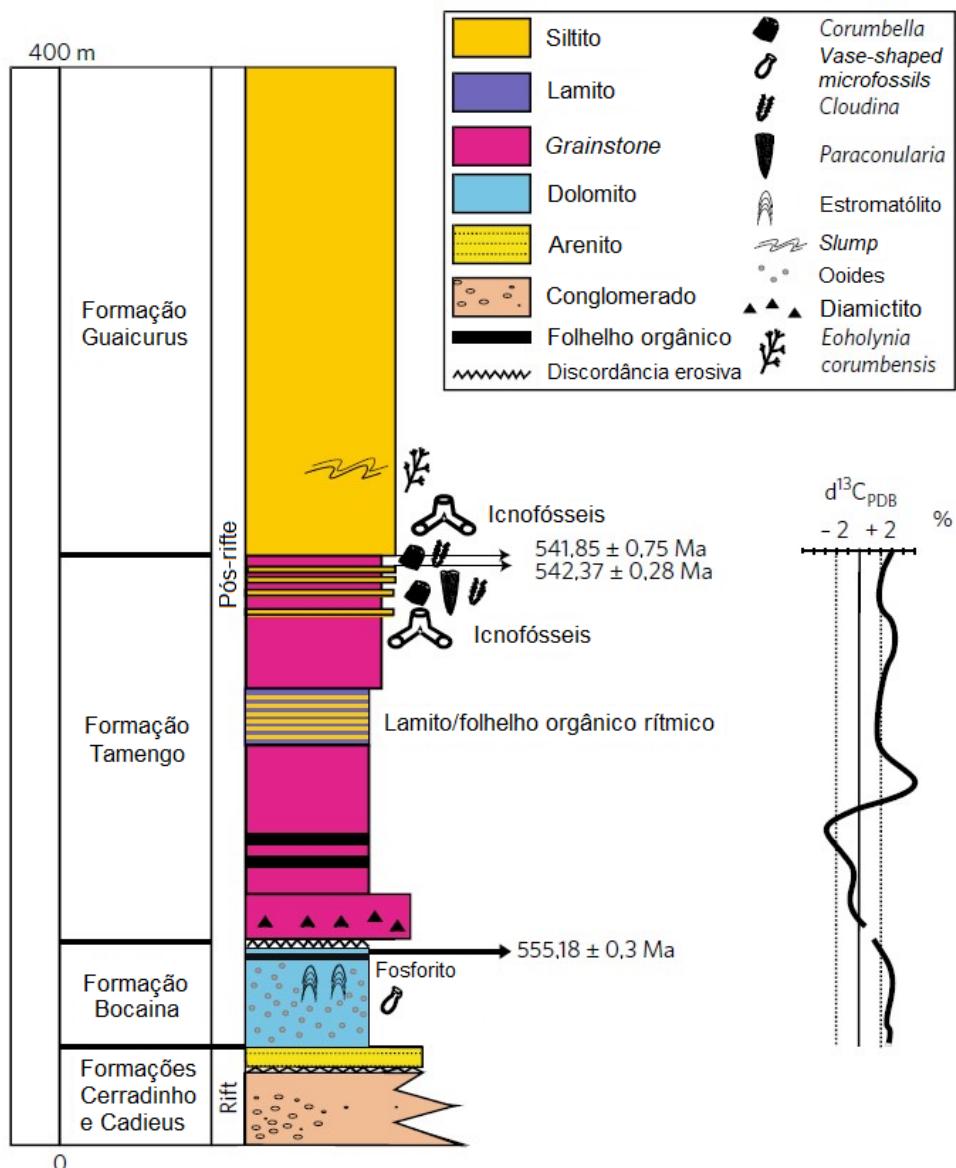


Figura 4 – Coluna estratigráfica do Grupo Corumbá confeccionada a partir de logs de sondagem na região de Corumbá (Ladário), no Mato Grosso do Sul, Brasil. Notar a posição estratigráfica dos tufos datados. Modificado de Parry et al. (2017).

Assim, os dados indicam uma idade de ~542 Ma para o topo da Formação Tamengo, restringindo a idade do Grupo Corumbá superior como Ediacarano Tardio (formações Bocaina-Tamengo, 555-542 Ma) até o início do Cambriano (Formação Guaicurus Inferior, <542 Ma). A idade ediacarana tardia da Formação Tamengo também é confirmada com base na presença do fóssil índice do metazoário *Cloudina* Germs, 1972 (Beurlen e Sommer, 1957; Zaine e Fairchild, 1985; Grant, 1989; Zaine, 1991). A Formação Bocaina, portanto, tem a idade

absoluta do seu topo determinada, mas a idade da base se dá por datação relativa, sendo posterior às capas carbonáticas da Formação Puga, de idade Marinoana (~630 Ma) (Parry et al., 2017).

#### 4 MATERIAIS E MÉTODOS

As resoluções de estudos abordadas no Trabalho de Formatura são apresentadas na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 - Escalas de observação adotadas para este estudo. Fonte: Romero (2015).

Resolução do estudo	Parâmetros analisados	Local da análise	Informações esperadas
Megascópico	Microbialitos no contexto geológico, visando morfologia do conjunto e de posição na estratigrafia estromatolítica	Em afloramentos	Paleoambiente, direção das marés, batimetria.
Macroscópico	Morfologia e morfometria dos estromatólitos	Em afloramento	Paleoambiente, paleocorrente, batimetria e papel da paleobiota na sucessão estratigráfica
Mesoscópico	Padrão na laminação estromatolítica	Em afloramento e laboratório com esteromicroscópio	Dinâmica sedimentar e crescimento da comunidade
Microscópico	Textura	Em laboratório com microscópio petrográfico	Interação biota/sedimento e ecologia da biota

As análises megascópica e macroscópica foram realizadas através da descrição dos microbialitos a partir de fotos dos afloramentos e dos testemunhos de sondagem. A descrição nessas escalas baseou-se no guia gráfico para descrição de microbialitos, especialmente estromatólitos, que consta no livro *Microbialitos do Brasil do Pré-Cambriano ao Recente: um atlas*, nas páginas 15 a 17 (Fairchild et al., 2015).

A análise mesoscópica foi feita através de um esteromicroscópio ZEISS (Stemi 2000-C), no qual foi analisado o padrão na laminação estromatolítica nas lâminas petrográficas confeccionadas a partir das amostras dos testemunhos de sondagem e das trincheiras, a fim

de se observar com mais detalhe as texturas e estruturas dos microbialitos e, com isso, auxiliar a caracterização da dinâmica sedimentar e do crescimento da comunidade microbiana.

A análise microscópica foi feita através de um microscópio petrográfico ZEISS (Axiolab 5), na qual procurou-se levar em consideração os parâmetros propostos em Bertrand-Sarfati (1976), como feições primárias, que incluem variedade cristalina dos minerais, textura, relações genéticas entre os cristais e a estrutura da laminação (plana, curva ou ondulada); feições diagenéticas, como cimentação e compactação; e feições originadas em fases tardias e muito tardias da diagênese, tal como dissolução, precipitação, substituição e fraturamento, complementadas eventualmente por evidências de microfósseis.

As fotomicrografias (Figuras 14 e 15) foram obtidas utilizando-se os softwares correspondentes de cada aparelho ZEISS.

As trincheiras e os testemunhos de sondagens, nos quais foram analisados os afloramentos e as amostras, localizam-se na região de Bodoquena, no estado do Mato Grosso do Sul, a leste de Pitangueira e Três Morros, nas proximidades das fazendas Lagoa Encantada, Santa Maria da Floresta e Ceita Corê (Figura 5).

Os testemunhos DD-003, DD-004 e DD-007 foram realizados pela empresa mineradora EDEM (Empresa de Desenvolvimento em Mineração e Participações Ltda.) e o testemunho W-001 foi realizado pela empresa mineradora HORII. Esta última não cedeu a localização exata do testemunho dentro da mina, mas sua área localiza-se a cerca de 30 km a norte da região da Figura 5.

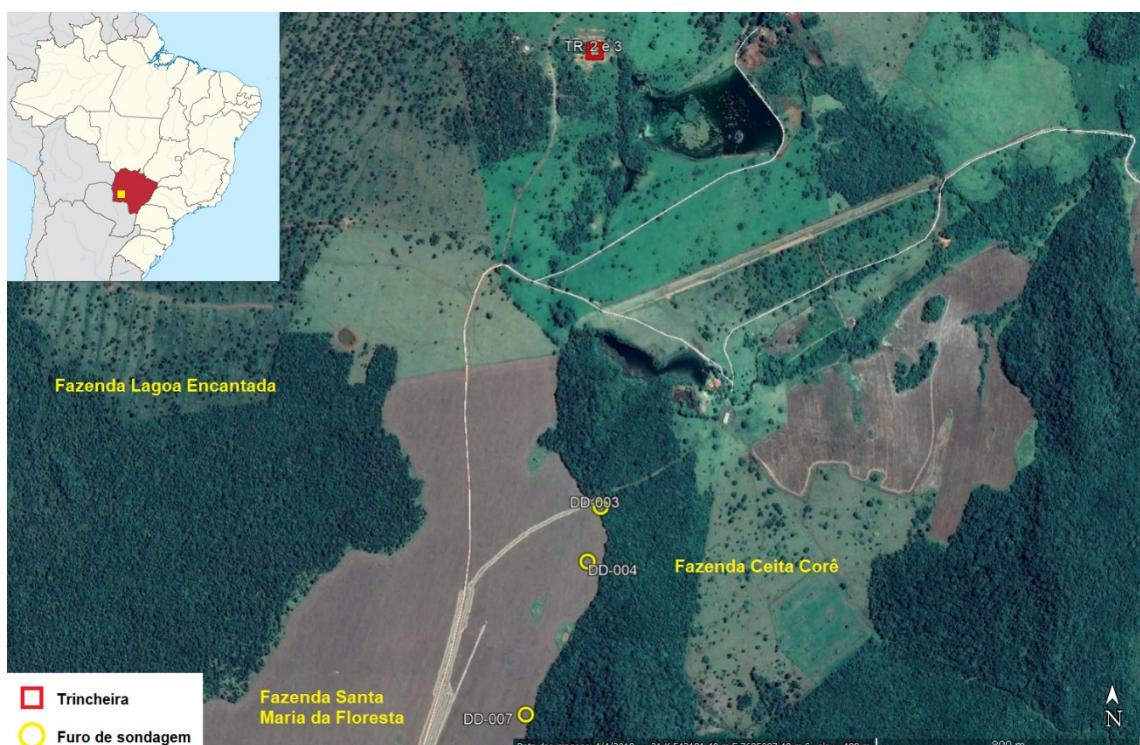


Figura 5 – Localização das trincheiras e testemunhos de sondagem em Bodoquena (MS). As trincheiras 2 e 3 estão destacadas em vermelho, ao norte do mapa, e os testemunhos DD-003, DD-004 e DD-007 estão destacados em amarelo, ao sul. Imagem de satélite obtida através da ferramenta *Google Earth*.

Na Figura 6 é possível observar as dimensões das trincheiras, que foram cavadas preteritamente a fim de prospecção de fosforito, em extensões de vários metros, possuindo cerca de 1,5 m de altura, bem como a disposição dos testemunhos dos furos de sondagem em caixas lado a lado, em ordem de profundidade.



Figura 6 – Locais e materiais utilizados para a análise das estruturas, amostras e confecção dos perfis litoestratigráficos: trincheiras preteritamente cavadas (esquerda) e os testemunhos dos furos de sondagem (direita).

Devido à pandemia do COVID-19 houve algumas restrições quanto ao acesso às amostras e aplicações de métodos de análises. Não foi possível participar de atividades de campo e consequentemente ter acesso às amostras pessoalmente, o que limitou o estudo das escalas megascópica e macroscópica em análises das fotografias de campo. Além disso, por conta de as informações coletadas em campo terem sido novidade em relação ao estado da arte do tema do presente estudo, ainda não foi possível correlacionar com clareza as amostras dos testemunhos de sondagem e das trincheiras. Também não foi possível aplicar métodos laboratoriais para diferenciação dos minerais carbonáticos e fosfáticos das lâminas petrográficas. O processo de tingimento com corante para a diferenciação de calcita e dolomita não foi realizado por conta da utilização futura, em breve, das lâminas em outro projeto, onde será realizada análise composicional dos fósseis e o tingimento pode interferir nessa análise.

Em relação ao Projeto Inicial, houve mudanças em relação à descrição dos microbialitos. Antes fora estabelecido que a resolução do estudo seria limitada às escalas mesoscópica e microscópica, segundo a tabela de Romero (2015). Porém, a análise das estruturas dos microbialitos em escala megascópica e macroscópica foi possível de ser realizada após a disponibilização dos registros fotográficos da equipe de campo. No início também fora estabelecido a quantidade de em torno de 50 lâminas petrográficas a serem analisadas. Esse número foi reduzido para 37 lâminas, pois foram retiradas lâminas que não seriam relevantes para a proposta deste Trabalho de Formatura.

## 5 RESULTADOS OBTIDOS

### 5.1 Perfil litoestratigráficos dos testemunhos de sondagem e das trincheiras

Perfis litoestratigráficos foram confeccionados pela equipe de pesquisadores do projeto temático que participou do trabalho de campo, Dr. Isaac Daniel Rudnitzki, Dr. Bernardo Tavares Freitas e Dra. Luana Pereira Costa de Moraes, com base nas descrições dos testemunhos de sondagem disponibilizados pelas mineradoras EDEM e HORII e das amostras das trincheiras (Figura 5). Os perfis encontram-se no Anexo A.

A Tabela 3 resume as ocorrências de microbialitos observadas nos perfis dos testemunhos da mineradora EDEM (Anexo A, Figuras A1, A2 e A3), da mineradora HORII (Anexo A, Figura A4) e nos perfis das trincheiras (Anexo A, Figuras A5 e A6):

Tabela 3 – Resumo das ocorrências de microbialitos nos perfis dos testemunhos de sondagem e das trincheiras.

MICROBIALITO	LOCAL	PROFUNDIDADE (m)
Estromatólito estratiforme	Testemunhos (todos)	19 a 70
	Trincheiras	0 a 124
Estromatólitos colunares	Testemunhos DD-003, DD-004 e W-001	32 a 34; 40; e 51 a 56
Estromatólito pseudo-colunar	Trincheiras	118,44 a 118,8
Complexo microbialítico	Testemunho DD-003	28 a 32
Trombólito	Testemunhos (todos)	22 e 53

Os estromatólitos estratiformes ocorrem muitas vezes associados a trombólitos e a intraclastos de dolomito e, por vezes, associados a estromatólitos colunares.

Os microbialitos encontram-se intercalados com camadas de dolomitos acinzentados claros e escuros, de granulometria fina a média, por vezes arenosos, com camadas de fosforitos cinza-escuros a pretos, de granulometria fina e com intraclastos dessas duas rochas. Vale ressaltar que a maior profundidade na estratigrafia relatada na região das trincheiras deve-se à verticalidade de suas camadas (subverticais) e à extensão em comprimento das próprias trincheiras.

## **5.2 Análise megascópica e macroscópica das estruturas dos microbialitos em escala de afloramento (trincheiras)**

### Estromatólitos estratiformes

É possível observar, em afloramento, exposições de estromatólito estratiforme de aproximadamente 0,5 m de altura por 1,5 m de largura. A litologia é caracterizada por dolomitos de cor marrom acinzentado, de granulometria fina a média, intemperizados e que apresentam estrutura com dobras (Anexo A, Figura A5).

O estromatólito observado trata-se de um biostroma (corpo tabular lateralmente contínuo), possui preservação mediana, com margens e laminação alteradas, mas ainda reconhecíveis. A sua laminação apresenta relevo sinóptico baixo a expressivo, mesclando o ondulado, o enrugado e o abobadado. A regularidade do empilhamento é baixa a moderada, há presença de microdiscordâncias e as lâminas infletem em algumas porções, mas não recobrem laminações anteriores (Figura 7). Na amostra (Figura 8) também é possível observar camadas possivelmente ricas em matéria orgânica e/ou fosfatizadas (cinza escuro) e o contorno de estruturas erodidas (preto) que seguem o formato do estromatólito, no topo da mostra.

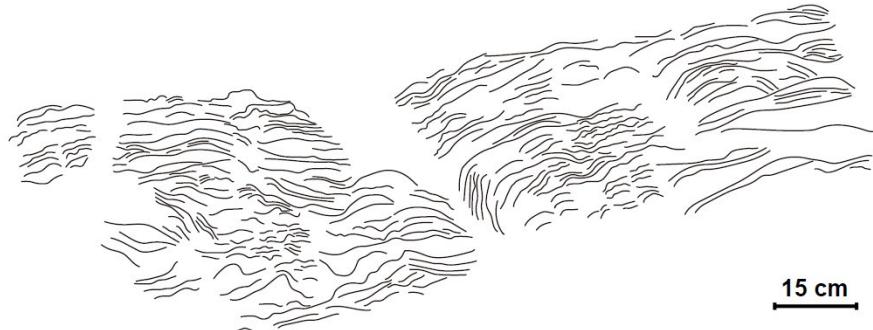


Figura 7 – Estromatólitos estratiformes no topo do afloramento da Trincheira 2 (Anexo A, Figura A5) e desenho representativo das laminações.

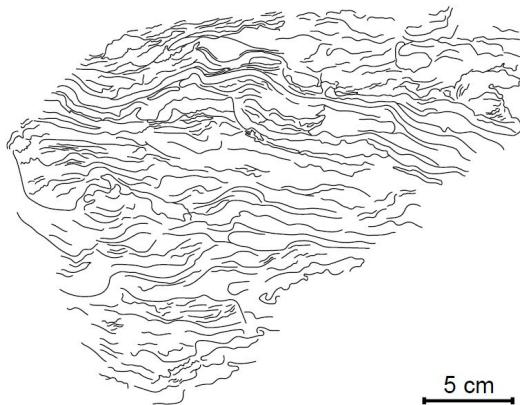


Figura 8 – Amostra de estromatólito estratiforme retirada na Trincheira 2 (Anexo A, Figura A5), com desenho representativo das laminações. Nota-se camadas possivelmente ricas em matéria orgânica e/ou fosfatizadas (cinza escuro) e o contorno de estruturas erodidas (preto) que seguem o formato do estromatólito, no topo da amostra. Em sua base a preservação é ruim, o que inibe, no desenho representativo, observar a continuidade lateral da laminação.

### Estromatólitos pseudo-colunares

Exposições de estromatólito pseudo-colunar são observados em dimensões de aproximadamente 40 cm de largura por 30 cm de altura. A litologia é caracterizada por

dolomitos de cor marrom acinzentada, de granulometria fina a média, intemperizados (Anexo A, Figura A5).

O estromatólito analisado possui preservação mediana, com margens e laminação alteradas, mas ainda reconhecíveis, e ocorre em conjuntos pouco densos (estruturas verticalizadas representadas na Figura 9). A forma colunar é subcilíndrica, de crescimento sinuoso, em estruturas de relevo sinóptico alto, formando domos. Não é possível identificar ramificações claras, mas pode-se dizer que o padrão da largura colunar possui saliências irregulares encaroçadas. A conexão entre estruturas próximas se dá por pontes, o perfil laminar é pouco convexo e a regularidade do empilhamento laminar é baixa. Há presença de microdiscordâncias e as lâminas se infletem, mas não recobrem lâminas anteriores.



Figura 9 – Estromatólito pseudo-colunal no afloramento da Trincheira 2 (Anexo A, Figura A5), com desenho representativo das colunas e laminações. Notar as conexões laterais, que o fazem ser classificado como pseudo-colunar.

### 5.3 Análise mesoscópica das estruturas dos microbialitos nas amostras dos testemunhos de sondagem

#### Estromatólito estratiforme

O estromatólito estratiforme analisado possui litologia caracterizada por dolomito acinzentado, fino a médio. A dolomita também ocorre em hábito drusiforme preenchendo as laminações. Além disso, há presença de intraclastos dolomíticos de bordas arredondadas a angulosas e de estruturas discordantes (esbranquiçadas, em formato de veio) com a laminação do microbialito, que por sua vez é convoluta, representada pela alternância de laminação submilimétrica escura (possivelmente rica matéria orgânica e/ou fosfatada) e clara (testemunho de sondagem DD-003, Anexo A, Figura A1 e Figura 10).

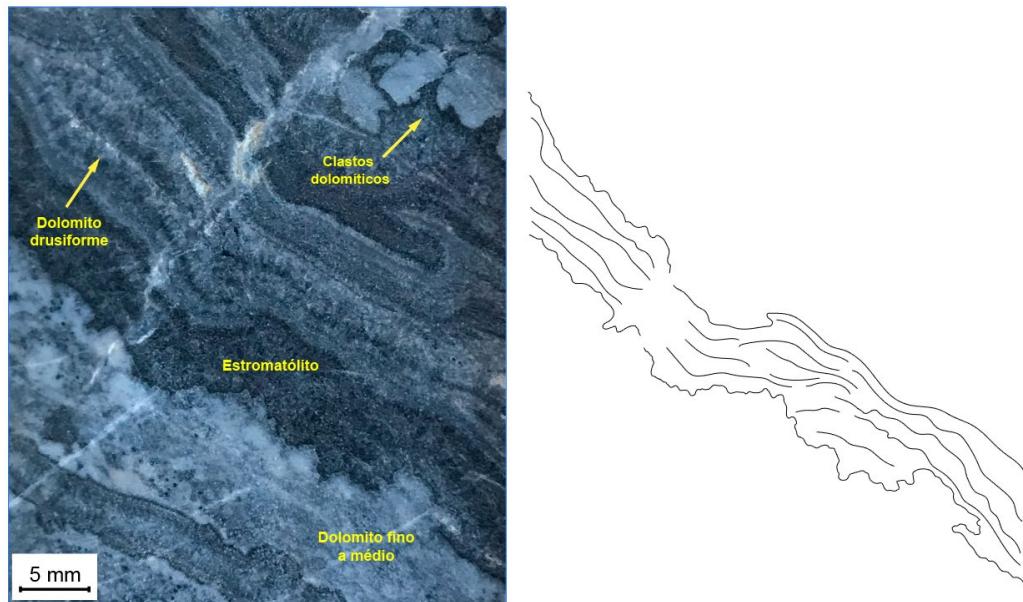


Figura 10 – Estromatólito estratiforme do testemunho de sondagem DD-003 (Anexo A, Figura A1), com desenho representativo das laminationes do estromatólito.

#### Estromatólito colunar

A litologia do estromatólito colunar observado é caracterizada por dolomito acinzentado fino. Sua lamination é convoluta, com alternância laminar cinza-claro e escura (possivelmente rica em matéria orgânica e/ou fosfatizada). Em sua base apresenta-se como uma estrutura estratiforme com relevo sinóptico baixo, que grada para um formato colunar subcilíndrico, alongado, reto, sem ramificações aparentes, para o topo. O traço laminar é parabólico e a regularidade do empilhamento é baixa, com microdiscordâncias presentes. Além disso, as lâminas se infletem com recobrimento extenso (parede), com margem lisa e manto parcial (testemunho de sondagem DD-003, Anexo A, Figura A1 e Figura 11).

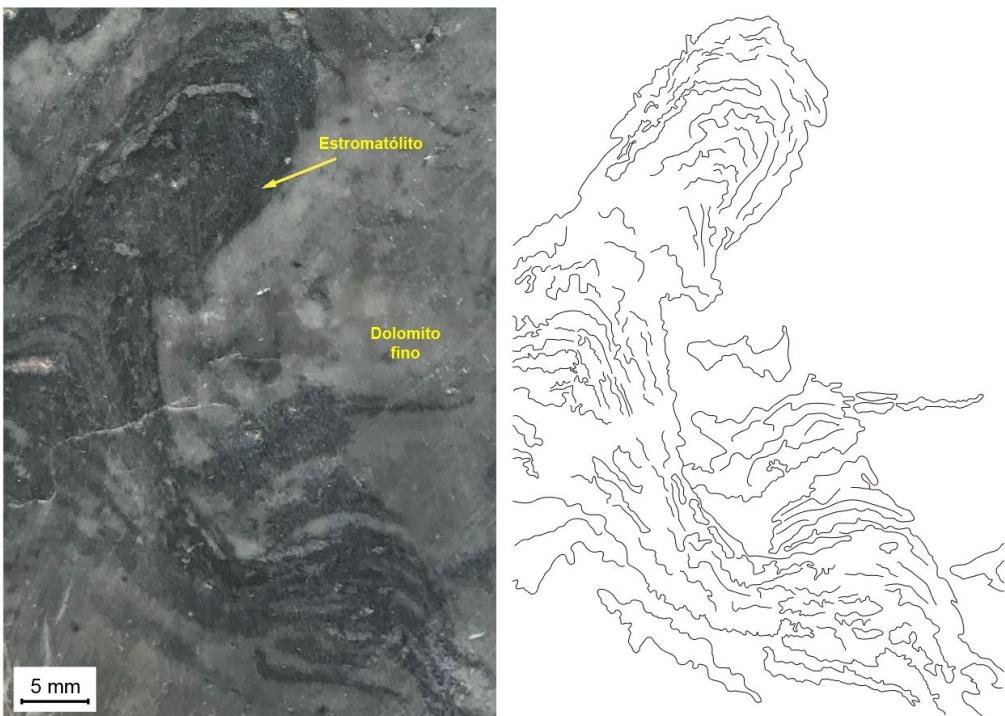


Figura 11 – Estromatólito colunar do testemunho de sondagem DD-003 (Anexo A, Figura A1), com desenho representativo das laminações do estromatólito, no qual é possível observar a gradação, da base para o topo, de uma estrutura estratiforme com relevo sinóptico baixo para um formato colunar subcilíndrico, alongado, reto, sem ramificações aparentes.

### Complexo microbialítico

O complexo microbialítico examinado possui litologia caracterizada por dolomito acinzentado fino e morfologia e relevo variados. A laminação é composta pela alternância de cores claras e escuras (possivelmente ricas em matéria orgânica e/ou fosfatizadas), sendo que a base da amostra é convoluta, de relevo sinóptico médio a alto, com maior densidade de lâminas, caracterizada por corpos de perfil pouco convexo a retangular (porção inferior), onde as laminações se infletem com recobrimento parcial. Em direção ao topo, mas ainda na base da amostra, há gradação para formas estratiformes mais lisas, com relevo sinóptico mais baixo. Do meio da amostra para o topo, a laminação apresenta-se menos densa, mais caótica e a sinuosidade torna-se mais alta novamente (testemunho de sondagem DD-003, Anexo A, Figura A1 e Figura 12).



Figura 12 – Complexo microbialítico do testemunho de sondagem DD-003 (Anexo A, Figura A1), com desenho representativo das laminações, onde é possível observar as diferenças de padrão de morfologia e relevo da base para o topo.

### Trombólitos

Os trombólitos que ocorrem nos testemunhos possuem cor acinzentada escura, com morfologia em grumos irregulares e bordas lobadas, que possuem aproximadamente o mesmo tamanho. As maiores formas aparecem ser um conjunto constituído de formas menores de tamanho semelhante (testemunho de sondagem DD-003, Anexo A, Figura A1 e Figura 13).



Figura 13 – Amostra de trombólito do testemunho de sondagem DD-003 (Anexo A, Figura A1), com desenho representativo dos grumos.

#### **5.4 Análise mesoscópica das estruturas dos microbialitos nas lâminas petrográficas**

Com o uso do estereomicroscópio, foram analisadas trinta e sete (37) lâminas petrográficas confeccionadas a partir das amostras dos testemunhos de sondagem e das trincheiras, a fim de se observar algumas das estruturas e texturas descritas nos itens anteriores desta mesma Seção 5 e outras mais, em escala de lâmina petrográfica, antes de partir para a análise da petrografia microscópica.

A Figura 14 apresenta segmentos de algumas lâminas selecionadas, onde foi possível observar, em maior detalhe, as laminações milimétricas convolutas e a alternância das lâminas claras e escuras do estromatólito estratiforme, bem como a presença das estruturas discordantes e de fenestras de coloração esbranquiçada, tanto verticais quanto horizontais (Figuras 14A, 14B e 14C); o contorno do trombólito e sua ocorrência associada a intraclastos dolomíticos (Figura 14D); os grumos peloidais dolomicríticos de cor marrom acinzentada e formato arredondado, com espaços intersticiais preenchidos por dolomita fina (Figura 14E); e também a laminação com alternância de camadas dolomíticas finas (brancas-acinzentadas, camada superior), de fosforito fino (preto, camada central) e de fosforito fino com siliciclásticos (camada inferior), além das estruturas discordantes à laminação (Figura 14F).

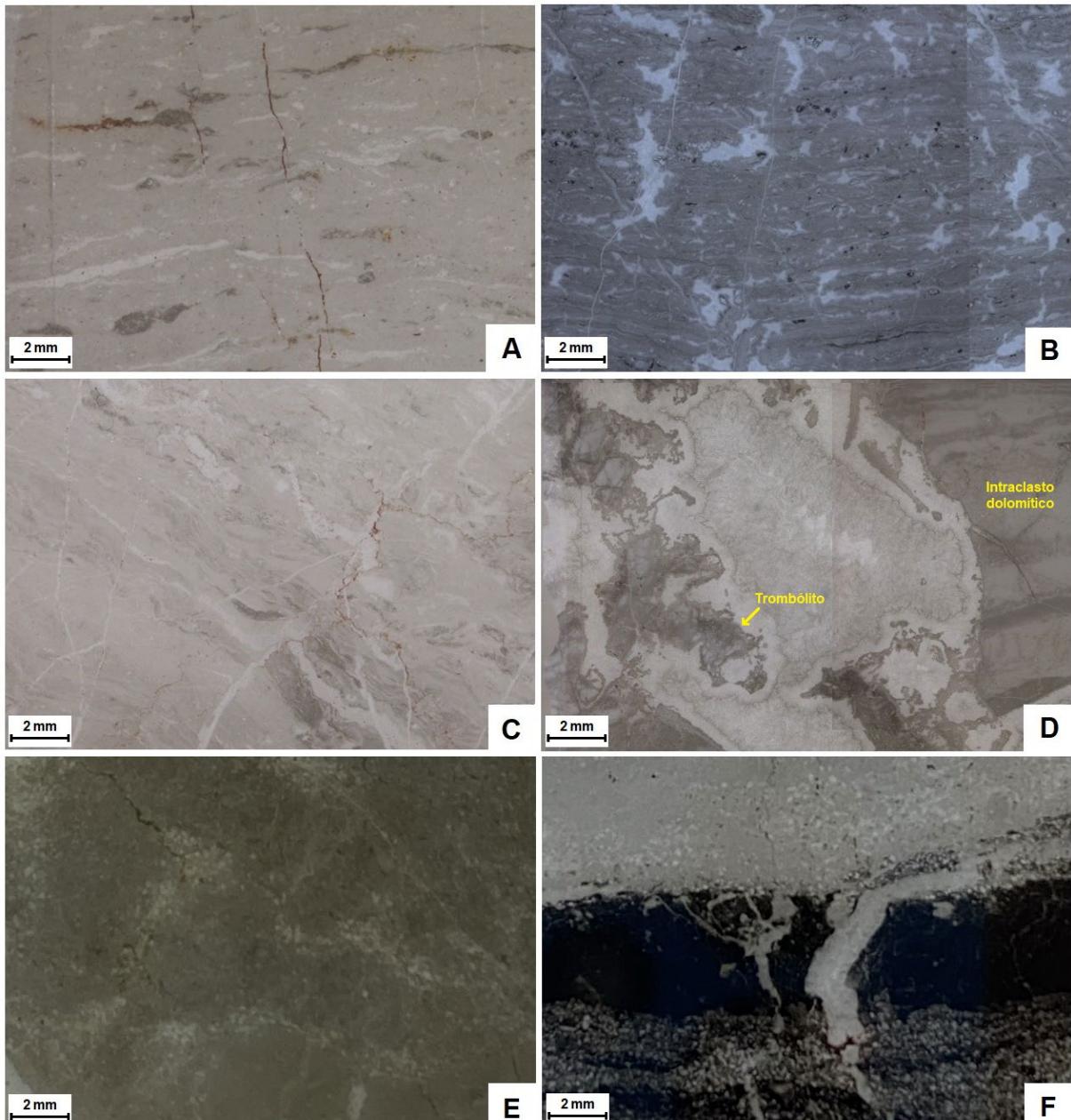


Figura 14 – Fotomicrografia de (A) Lâmina de estromatólito estratiforme (4FR19-200A, Anexo A, Figura A2 - Testemunho DD-004). (B) Lâmina de estromatólito estratiforme (3FR19-68, Anexo A, Figura A1 - Testemunho DD-003). (C) Lâmina de estromatólito estratiforme (4FR19-175, Anexo A, Figura A2 - Testemunho DD-004). (D) Lâmina de trombólito e intraclasto dolomítico (4FR19-186, Figura A2 – Testemunho DD-004). (E) Lâmina de estromatólito estratiforme (1MH19-4B, Figura A4 - Testemunho W-001). (F) Lâmina de estromatólito estratiforme e fosforito (1MH19-7, Figura A2 - Testemunho W-001). (A), (B) e (C) apresentam laminationes milimétricas convolutas, com alternância de camadas claras e escuras do estromatólito estratiforme, e a presença das estruturas discordantes e de fenestras de coloração esbranquiçada. Em (D) é possível notar o contorno do trombólito, em maior detalhe, e sua ocorrência associada a intraclastos dolomíticos. Em (E) observa-se grumos peloidais dolomicríticos, com espaços intersticiais preenchidos por dolomita fina. (F) apresenta lamination com alternância de camadas dolomíticas, de fosforito e de fosforito com siliciclásticos, com estruturas discordantes à lamination.

## **5.5 Análise microscópica das estruturas dos microbialitos nas lâminas petrográficas**

Com o uso do microscópio petrográfico, trinta e sete (37) lâminas petrográficas puderam ser analisadas com maior precisão em termos de mineralogia, textura e estruturas. A partir disso, foram descritas diferentes microfácies que ocorrem nos testemunhos e nas trincheiras (Figura 15).

Na microfácie estromatólito estratiforme, pôde-se observar a laminação estromatolítica convoluta com intercalação de camadas de dolomícrita escura e dolomito fino a médio cinza-claro. Em algumas porções nas camadas dolomíticas cinza-claro (em destaque na Figura 15A), nota-se um hábito drusiforme, com transição do arranjo acicular da dolomita das paredes para um mosaico romboédrico ao centro. A Figura 15B mostra a dolomita a nicóis cruzados, apresentando cor de interferência de alta ordem, que corresponde a uma birrefringência bastante elevada, evidenciada pela coloração esbranquiçada, com tons esverdeados e róseos suaves. Em algumas amostras, o estromatólito estratiforme se apresenta com lâminas convolutas dolomícríticas mais densas, intercalando com lâminas convolutas dolomíticas cinza-claro mais finas (Figura 15C).

A microfácie trombólito é caracterizada por conjuntos irregulares micríticos, em grumos, que não apresentam laminação visível. É possível notar que o preenchimento do restante do espaço dá-se por dolomita fina a média, de coloração cinza-claro (Figura 15D).

Na Figura 15E, a fácie é descrita como um *grainstone* dolomítico, onde os grãos dolomíticos finos a médios que sustentam a rocha possuem coloração escura, são subédricos a anédricos e intercalam com lâminas de dolomita fina a média, de coloração cinza-claro e hábito drusiforme. Além disso, é possível observar relictos de grãos carbonáticos marcados por halo micrítico escuro, preenchido por mosaicos de dolomita fina cinza-clara.

A Figura 15F apresenta a fácie fosforito fino (preto) com camadas siliciclásticas de grãos quartzosos finos (embaixo). Também se destaca a estrutura discordante composta de dolomita fina a média, cinza-claro, em mosaico romboédrico, com clivagem característica visível, que é interrompida de maneira abrupta na camada siliciclástica.

Por último, tem-se a fácie doloarenito do estromatólito estratiforme das trincheiras, onde camadas de dolomita fina granular, cinza-escuro, intercalam com camadas de quartzo fino subédrico, de contatos côncavo-convexos (Figuras 15G e 15H).

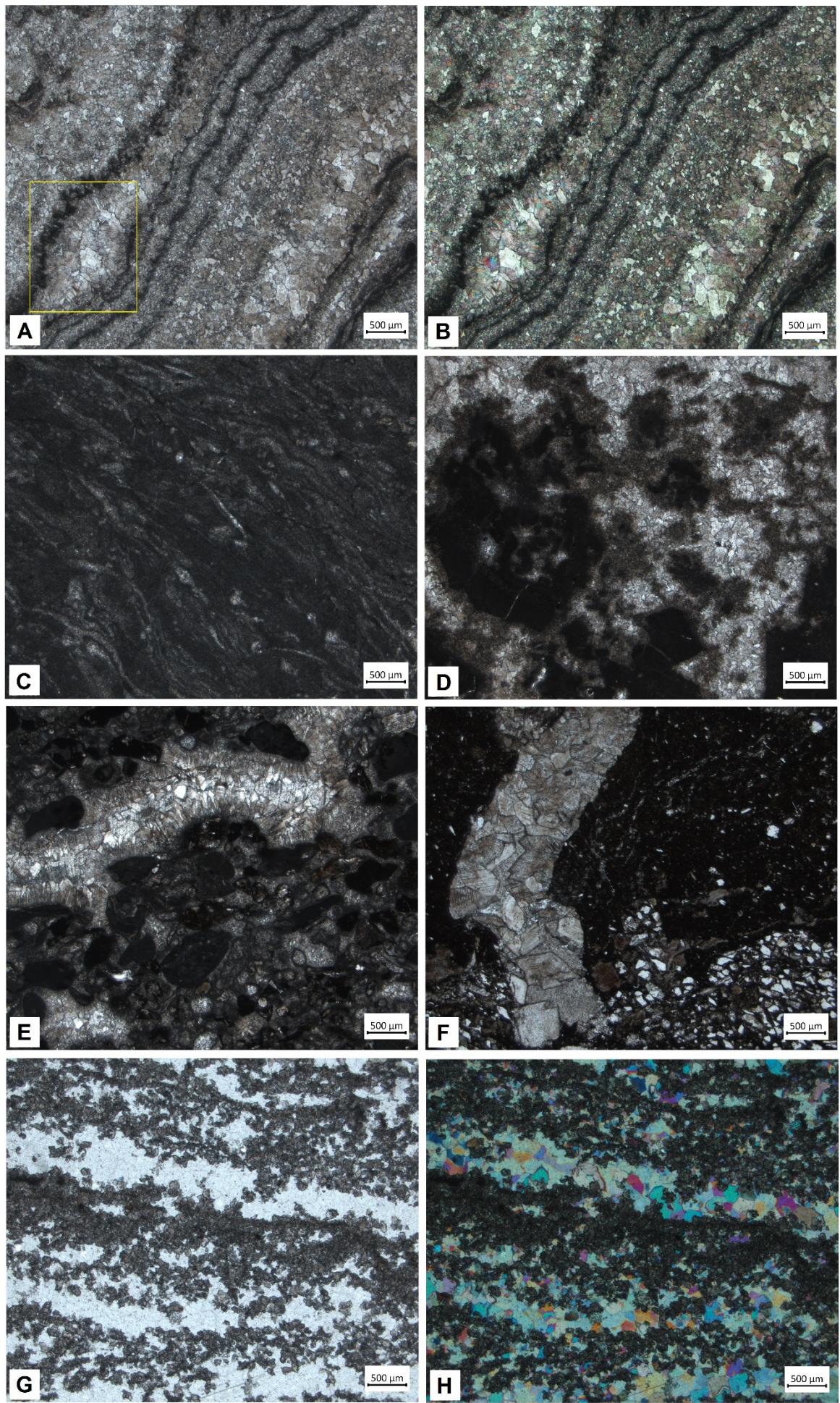


Figura 15 – Fotomicrografia de (A) Lâmina de estromatólito estratiforme (3FR19-30, Anexo A, Figura A1 - Testemunho DD-003), em destaque, aspecto drusiforme, com transição do arranjo acicular da dolomita nas das paredes para um mosaico romboédrico ao centro. (B) Lâmina do item (A) sob nicóis cruzados, apresentando cor de interferência de alta ordem. (C) Lâmina de estromatólito estratiforme (4FR19-175, Anexo A, Figura A2 - Testemunho DD-004). (D) Lâmina de trombólito (4FR19-186, Anexo A, Figura A2 - Testemunho DD-004). (E) Lâmina de estromatólito estratiforme (3FR19-70B, Anexo A, Figura A1 - Testemunho DD-003), fácies *grainstone* dolomítico. (F) Lâmina de estromatólito estratiforme e fosforito (1MH19-5A(C), Anexo A, Figura A4 - Testemunho W-001), fácies fosforito fino (preto) com camadas siliciclásticas (embaixo) de grãos quartzosos finos. (G) Lâmina de estromatólito estratiforme (TR02-16, Anexo A, Figura A6 - Trincheira 2). (H) Lâmina do item (G) sob nicóis cruzados e compensador de gipso. Optou-se por utilizar o compensador para melhorar a visualização dos cristais de quartzo.

## 6 INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A interpretação e a discussão dos resultados foram desenvolvidas a partir das evidências de biogenicidade das amostras analisadas, ou seja, das evidências de que os materiais de estudo são, de fato, microbialitos, com a análise das descrições mega, macro, meso e microscópica. Adicionalmente, é apresentada a contribuição desses microbialitos para a caracterização do paleoambiente da Formação Bocaina.

### 6.1 Biogenicidade

Microbialitos são registros de atividade biológica encontradas desde o Arqueano até os dias de hoje (Chacón, 2010) e são as evidências mais antigas formas de vida na Terra, bem como indicadores de condições geoquímicas e outras condições paleoambientais (Bosak et al. 2013; Grotzinger e Knoll, 1999). A captura de sedimentos detriticos pelo biofilme microbiano dominam os modelos clássicos de formação de estromatólitos e são comuns em exemplos marinhos modernos (e.g., Gebelein, 1969; Reid et al., 2000). No entanto, há também evidências, a partir de modelos de agregação de partículas (sedimentos, íons e nutrientes) e de cimentação, de que algumas estruturas semelhantes a estromatólitos podem ser criadas abiogênicamente (e.g., Grotzinger e Knoll, 1999; Grotzinger e Rothman, 1996; Knoll e Semikhatov, 1998). Além disso, a morfologia e a microestrutura dos estromatólitos também mudaram ao longo do tempo geológico (e.g., Grotzinger e Knoll, 1999; Riding, 2011) e, portanto, é provável que os processos para formar estromatólitos também tenham mudado ao longo do tempo (Bosak et al., 2013).

Uma série de tentativas foram realizadas para estabelecer critérios para determinar a biogenicidade dos microbialitos, ou seja, a origem biogênica do microbialito (e.g. Buick et al., 1981; Hofmann et al., 1999; Walter, 1983). Alguns exemplos são: presença de matéria

orgânica e microfósseis na rocha; laminationes onduladas ou enrugadas ricas em materiais detriticos, com grãos presos além do ângulo de repouso (e.g., Buick et al., 1981), o que sugere que o bloqueio do movimento do grão ou adesão ao EPS produzido pelas comunidades microbianas desempenhou um papel na formação dos estromatólitos (e.g., Riding, 2000); e estruturas e poros fenestrais provavelmente resultantes da produção fotossintética de O<sub>2</sub> e outros gases originados da decomposição de matéria orgânica (Bosak et al., 2009, 2010).

Estromatólitos estratiformes (Figuras 7, 8 e 10), pseudo-colunares (Figura 9) e estromatólitos colunares (Figura 11) são um registro fóssil abundante no Ediacarano (Riding, 2011) e estão presentes na literatura para a Formação Bocaina (Oliveira, 2010; Fontaneta, 2012; Morais, 2013; Romero, 2015; Parry et al. 2017), no contexto dos dolomitos estromatolíticos associados a brechas intraformacionais e níveis de fosforito. Adicionalmente, foram observados microbialitos inéditos para a Formação Bocaina, como os complexos microbialíticos (Figura 12) e os trombólitos (Figura 13). O primeiro se destaca pelas diferenças de padrão de morfologia apresentados no mesmo segmento de rocha, onde a laminação varia muito em relação ao relevo sinóptico e abundância, e essas características permitem a classificação dada pelo guia gráfico para descrição de microbialitos, especialmente estromatólitos, do atlas de Fairchild et al. (2015). Já o segundo, se encaixa nas descrições feitas por Aitken (1967) e Riding (2011), as quais apontam uma estrutura com textura interna caracterizada por peloïdes, organizada em grumos irregulares, e com ausência de laminação claramente visível.

Nas Figuras 14A, 14B e 14C é possível notar as diferentes laminationes milimétricas convolutas, que apresentam uma alternância bimodal da laminação. As camadas de coloração mais escura representam as mais micríticas e possivelmente ricas em matéria orgânica, enquanto que as mais claras apresentam menor concentração proporcional de micrita e provável matéria orgânica, como já descrito na literatura (Oliveira, 2010; Riding, 2011, Fontaneta, 2012; Morais, 2013). A laminação é composta por grumos peloïdais micríticos (Figura 14E), que possuem tamanhos e bordas arredondadas regulares, com espaços preenchidos por dolomita fina, e que se assemelham aos descritos na literatura (e.g. Morais, 2013; Romero et al. 2016, 2020), os quais são interpretados como resultado da micritização de colônias de cianobactérias fotossintetizantes cocoidais durante a diagênese precoce.

A ocorrência de texturas fenestrais orientadas paralelamente e discordantemente à laminação nos microbialitos (Figura 14B) também reforça o caráter microbiano destas estruturas. Fenestras são poros interpeloïdais interpretados como características de processos de escape de gases devido à degradação de matéria orgânica, metabolismo microbiano ou fototropismo durante o desenvolvimento das esteiras microbianas (Grover e Read, 1978; Mata et al., 2012; Romero et al., 2020).

Em relação à composição mineralógica dos microbialitos, observa-se cristais de dolomita límpidos, subédricos a euédricos, com textura xenotópica, aparentemente recristalizando as lamiações estromatolíticas (Figura 15), não podendo se afirmar que estes dolomitos são primários. Segundo Fontaneta (2012) a dolomita observada na Formação Bocaina é diagenética tardia, possivelmente formada na mesodiagênese. Nessa hipótese, inicialmente haveria a formação de lâminas de calcita ou aragonita, cujos cristais foram precipitados e/ou aprisionados nas esteiras microbianas, intercaladas às lâminas de matéria orgânica. Na eodiagênese, as lâminas de carbonato de cálcio foram convertidas para dolomita, devido à intensa taxa de evaporação e refluxo das águas oceânicas ricas em magnésio (Tucker e Wright, 1990). Na Figura 15A, na área em destaque, é possível notar textura que possivelmente representa fases de cimentação, com a transição do mineral carbonático de hábito acicular (provavelmente calcita/aragonita) das bordas para os mosaicos de dolomita ao centro. Tal feição pode ser interpretada como uma estrutura reliquiar de diagênese em zona vadosa, similar à estrutura em franja descrita por Fontaneta (2012). Ainda na eodiagênese, a matéria orgânica das esteiras é degradada, liberando  $\text{PO}_4^{3-}$  nas águas intersticiais, induzindo a precipitação e/ou substituição por minerais de fosfato (minerais de coloração preta, opacos, representados nas Figuras 14F e 15F), possivelmente bioinduzida (Soudry e Champetier, 1983; Lucas e Prévôt, 1985; Rao et al., 1992; Compton et al., 1993) em ambiente geoquímico redutor, como demostrado por Pufahl & Grimm (2003).

## 6.2 Paleoambiente da Formação Bocaina

Microbialitos são, desde sua primeira descrição, excelentes proxies para batimetria e condições hidrodinâmicas do meio, sendo muito utilizados em estudos que envolvem reconstituições paleoambientais (e.g., Oliveira, 2010; Fontaneta, 2012; Morais, 2012; Romero, 2015; Romero et al. 2016; Shiraishi et al. 2019; Santos et al., 2021; Sanders e Grotzinger, 2021). O registro fossilífero inserido nessas rochas auxilia na compreensão da paleobiota e permite a correlação entre os microbialitos inseridos na mesma bacia. A evolução de inúmeros riftes em escala global possivelmente permitiu a geração de assolhos oceânicos, o que teria possibilitado o avanço do mar sobre regiões de águas rasas e a formação de mares epicontinentais. Nestas condições, os microbialitos teriam sido originados em ambientes de águas pouco energéticas, provavelmente lagunares, possibilitando a formação dos extensos corpos estromatolíticos na Formação Bocaina (Fontaneta, 2012). Devido à proveniência das amostras estudadas no presente trabalho ser de trincheiras extensas, porém com camadas verticalizadas, e de testemunhos de sondagem, a representatividade em termos de extensão lateral foi limitada. Dessa maneira, os resultados obtidos e suas interpretações foram encaixados em um contexto previamente estabelecido e já estudado de corpos

estromatolíticos lateralmente contínuos que ocorrem na Formação Bocaina (Oliveira, 2010; Fontaneta, 2012; Morais, 2013; Romero, 2015).

A morfologia dos microbialitos pode variar com a energia do meio (ondas e marés), taxa de sedimentação, profundidade da lâmina d'água e frequência de exposição subaérea (Logan et al., 1964; Tucker, 2001). Os microbialitos descritos no presente trabalho apresentam pouca variedade de morfotipos (Tabela 3), o que sugere um número reduzido de paleoambientes de formação diferentes.

Os perfis da Formação Bocaina (Anexo A) apresentam ciclos de raseamento (regressão) e afogamento (transgressão) marcados por mudanças de morfotipos microbialíticos, por estruturas sedimentares típicas de exposição subaérea, como as gretas de contração e tepees, e pelas sequências sedimentares típicas de ambientes subaquosos, como folhelhos e siltitos, sendo todas essas fácies retratadas na literatura da Formação Bocaina (Oliveira, 2010; Fontaneta, 2012; Morais, 2013; Romero, 2015; Romero et al., 2016).

Os estromatólitos estratiformes (e.g., Figuras 7, 8, 10) sugerem um ambiente deposicional relativamente calmo, planar, caracterizado por correntes fracas, que permite a conexão lateral das esteiras sem formar domos (Sami & James 1993). Por outro lado, os estromatólitos colunares, comumente associados a intraclastos dolomíticos (como é possível observar nos perfis estratigráficos), apontam aumento de energia e formação em ambiente de planície de maré, fechando os ciclos de raseamento (Sami & James 1993). Estromatólitos pseudo-colunares (Figura 9) e suas associações com estruturas planares (estromatólitos estratiformes) indicam águas mais rasas, límpidas e oxigenadas, com energia moderada para a formação das colunas, no qual haveria intensa proliferação microbiana (Fontaneta, 2012). Os complexos microbialíticos (Figura 12), ainda não relatados na literatura, aqui foram interpretados como estruturas que poderiam se encaixar em um contexto paleoambiental semelhante ao dos estromatólitos pseudo-colunares, uma vez que também apresentam uma mistura de morfologias microbialíticas (Fairchild et al., 2015). A energia moderada do ambiente de formação poderia contribuir no desenvolvimento das estruturas de laminação mais sinuosa. Por fim, os trombólitos calcificados também sugerem um ambiente de formação de águas rasas (Riding, 2011). Isso se reforça com a presença de intraclastos dolomíticos angulosos (Figuras 10 e 14D) provavelmente associados às brechas intraformacionais, num contexto de exposição subaérea, rompimento desses sedimentos e retrabalhamento com a subida novamente do nível do mar (Oliveira, 2010; Fontaneta, 2012; Morais, 2013).

Em relação aos fosforitos, representados nas Figuras 14F e 15F, sua formação acontece principalmente dentro de mares epicontinentais rasos (Cook e Shergold, 1984; Krajewski et al., 1994; Drummond et al., 2015), onde a maior parte da matéria orgânica foi soterrada em área onde não ocorre ressurgência e onde sedimentos deltaicos, estuarinos e

de plataforma são depositados (Berner, 1990; Papineau, 2010). As estruturas discordantes representadas nas Figuras 10, 14F e 15F podem ser interpretadas como espaços resultantes da formação de gretas de contração, preenchidos pela cimentação dolomítica. Essas estruturas deformam a laminação estromatolítica e também ocorrem associadas a intraclastos dolomíticos, possivelmente produtos da quebra por ressecamento superficial, em eventos de raseamento. Outra interpretação possível é a relação dessas estruturas com processos de liquefação e fluidificação, possivelmente induzidos por eventos e sismicidade (Oliveira, 2010).

Um outro aspecto observado é a presença de siliciclásticos em abundância restrita nos estromatólitos estratiformes das trincheiras (Figura 15G e 15H). A partir disso, dos resultados apresentados e discutidos e da posição geográfica e estratigráfica das amostras, é possível sugerir, preliminarmente, um cenário em que os microbialitos localizados na área dos testemunhos de sondagem faziam parte de um antigo complexo de estromatólitos isolados, distantes da porção continental, em uma região de laguna de baixa energia, praticamente isentos de *input* de materiais terrígenos (Figura 16a), enquanto os locais de formação dos microbialitos na área das trincheiras se posicionavam em regiões de laguna de maior energia, mais próximos em relação à plataforma continental, onde há o aporte dos siliciclásticos, como mostra a Figura 16b, em duas possíveis localidades.

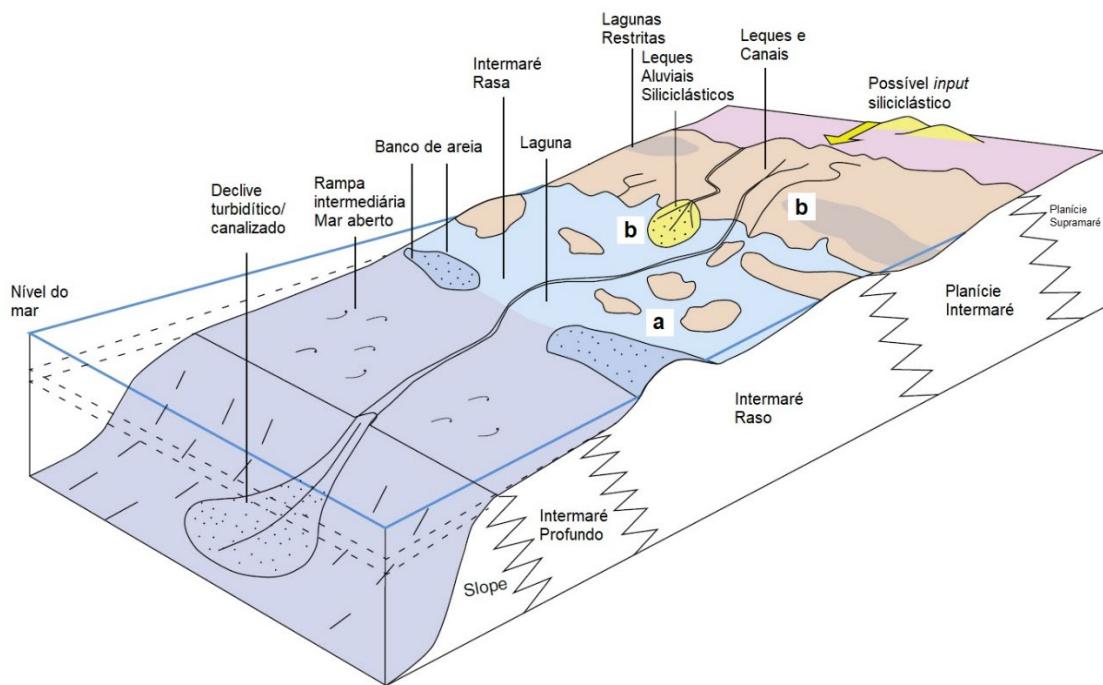


Figura 16 – Bloco diagrama esquemático dos possíveis locais de formação dos microbialitos dos testemunhos de sondagem (a) e das trincheiras (b) no contexto do paleoambiente. Modificado de Seyedmehdi et al. (2016).

As interpretações e discussões dos resultados corroboram com as descrições das associações de fácies da Formação Bocaina de Oliveira (2010); com a gênese de dolomitos

e fosforitos que não estão diretamente relacionadas entre si, sendo esses minerais produzidos por processos distintos, explicado por Fontaneta (2012); e com a descrições dos microbialitos e interpretações paleoambientais associadas à Formação Bocaina realizadas por Morais (2013) e Romero (2015). Como complemento a esses trabalhos, foram identificados microbialitos inéditos na literatura da formação em estudo – os complexos microbialíticos e os trombólitos – e foi apresentada a sugestão para os possíveis locais de formação dos microbialitos dos testemunhos de sondagem e das trincheiras no contexto do paleoambiente, o que contribui para as futuras pesquisas que utilizarão as amostras recentemente coletadas em Bodoquena (MS).

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Foram observadas ocorrências de cinco diferentes morfotipos de microbialitos em profundidades diversas nos testemunhos de sondagem e nas trincheiras. São eles, os estromatólitos estratiformes, os estromatólitos colunares, os pseudo-colunares, os complexos microbialíticos e os trombólitos. De maneira geral, as rochas em questão possuem matriz micrítica e cimentação dolomítica e fosfática.

São aqui descritos, pela primeira vez para a Formação Bocaina, os morfotipos complexo microbialítico e trombólito, indicando maior variedade de estruturas e permitindo melhor entendimento do paleoambiente.

Todos os microbialitos descritos, salvo os inéditos, correspondem aos da literatura para a Formação Bocaina, no contexto dos dolomitos estromatolíticos associados a brechas intraformacionais. A biogenicidade deles está atrelada a esses estudos pretéritos consolidados e a critérios abrangentes que indicam contribuição de atividade biogênica na construção da estrutura da rocha, como as laminationes convolutas, com porções dolomicríticas possivelmente ricas em matéria orgânica; texturas fenestrais discordantes e paralelas às laminationes; presença de grumos peloídais micríticos; e texturas minerais que corroboram com a sua biogênese.

A análise em detalhe desses microbialitos revelou importantes informações de âmbito local, como as variações paleoambientais dos depósitos da Formação Bocaina. Os estromatólitos com natureza estratiforme sugerem um ambiente deposicional relativamente calmo, planar, caracterizado por correntes fracas, que permite a conexão lateral das esteiras sem formar domos. A ocorrência de estromatólitos colunares aponta aumento de energia e formação em ambiente de planície de maré, fechando os ciclos de raseamento. Estromatólitos pseudo-colunares e suas associações com estruturas planares indicam águas mais rasas, límpidas e oxigenadas, com energia moderada para a formação de colunas, no qual haveria

intensa proliferação microbiana. Os complexos microbialíticos poderiam se encaixar em um contexto semelhante, uma vez que também apresentam uma mistura de morfologias microbialíticas. Os trombólitos calcificados sugerem um ambiente de formação de águas rasas.

A presença de siliciclásticos em abundância restrita nos estromatólitos estratiformes das trincheiras e a descrição das fácies microbialíticas permitiram, preliminarmente, a sugestão de um cenário em que os microbialitos localizados na área dos testemunhos de sondagem faziam parte de um antigo complexo de estromatólitos isolados, distantes da porção continental, em uma região de laguna de baixa energia, praticamente isentos de *input* de materiais terrígenos, enquanto os locais de formação dos microbialitos na área das trincheiras se posicionavam em regiões de laguna de maior energia, mais próximos em relação à plataforma continental, onde há o aporte dos siliciclásticos.

Finalmente, o estudo corroborou com as descrições dos microbialitos, das associações de fácies, das interpretações paleoambientais e com a gênese de dolomitos e fosforitos já consolidados na literatura Formação Bocaina, além acrescentar a descrição de microbialitos inéditos e a sugestão, preliminar, de um paleoambiente para formação de dessas estruturas no contexto das novas amostras provenientes da Formação Bocaina.

Em relação aos futuros trabalhos com as novas amostras e perfis confeccionados, recomenda-se o estudo mais detalhado da assembleia mineralógica, incluindo métodos analíticos para a diferenciação dos minerais carbonáticos e fosfáticos, e da interpretação dos ciclos de afogamento e raseamento registrados nos afloramentos dos testemunhos e das trincheiras.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adorno R. R. et al., 2017, *Cloudina lucianoi* (Beurlen and Sommer, 1957), Tamengo Formation, Ediacaran, Brazil: taxonomy, analysis of stratigraphic distribution and biostratigraphy: Precambrian Research, v. 301, p. 19–35.
- Aitken, J. D., 1967, Classification and environmental significance of cryptagal limestones and dolomites, with illustrations from the Cambrian and Ordovician of southwestern Alberta: Journal of Sedimentology Petrology, v. 37, p. 1163-1178.
- Alkmim, F. F., Marshak, S., Fonseca, M. A., 2001, Assembly Western Gondwana in the Neoproterozoic: clues from the São Francisco craton region, Brazil: Geology, v. 29, p. 319–322.
- Almeida, F. F. M., 1945, Geologia do sudeste mato-grossense: Boletim da Divisão de Geologia e Mineralogia, Departamento Nacional de Produção Mineral, v. 116, p. 1–118.
- Almeida, F. F. M., 1964, Geologia do centro-oeste mato-grossense: Boletim da Divisão de Geologia e Mineralogia, Departamento Nacional de Produção Mineral, Rio de Janeiro, v. 215, p. 137.
- Almeida, F. F. M., 1965, Geologia da Serra da Bodoquena (Mato Grosso): Boletim da Divisão de Geologia e Mineralogia, Departamento Nacional de Produção Mineral, v. 219, p. 1–96.
- Almeida, F. F. M., 1968, Evolução tectônica do centro oeste brasileiro no Proterozoico Superior, in Suplementos de Simpósio de Manto Superior: Anais da Academia Brasileira de Ciência, no. 40, p. 285–296.
- Almeida, F. F. M., 1984, Província Tocantins. Setor sudoeste, in Almeida, F.F.M., Hasuy, Y. coord., O Pré-Cambriano do Brasil: São Paulo, Edgard Blücher, p. 265-281.
- Almeida, F. F. M., Mantovani, M. S. M., 1975, Geologia e geocronologia do Granito São Vicente, Mato Grosso: Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 47, p. 451–458.
- Alvarenga, C. J. S., Boggiani, P. C., Babinski, M., Dardenne, M. A., Figueiredo, M. F., Santos, R. V., Dantas, E. L., 2009, The Amazonian Paleocontinent, in Gaucher, C., Sial, A. N., Halverson, G. P., Frimmel, H. E., eds., Neoproterozoic-Cambrian tectonics, global change and evolution: a focus on southwest Gondwana: Amsterdam, Elsevier, p. 498.
- Alvarenga, C. J. S., Moura, C. A. V., Gorayeb, P. S. S., Abreu, F. A. M., 2000, Paraguay and Araguaia Belts, in Cordani U. G., Milani, E. J., Thomaz Filho, A., Campos, D. A., Eds., Tectonic Evolution of South America, 31° International Geological Congress, SBG: Rio de Janeiro, p. 183-194.

- Amorim, K. B., Afonso, J. W. L., Leme, J. M., Diniz, C. Q. C., Rivera, L. C. M., Gutiérrez, J. C. G., Boggiani, P. C., Trindade, R. I. F., 2020, Paleoenvironment and biota distribution in the Ediacaran-Cambrian mixed carbonate ramp of Tamengo Formation (Upper Corumbá Group, Brazil): Sedimentology, (in press).
- Awramik, S. M., Semikhatov, M. A., 1979, The relationship between morphology, microstructure and microbiota in Gunflint stromatolites: Canadian Journal of Earth Sciences, v. 16, no. 3, p. 484-495.
- Babcock, L. E., Grunow, A. M., Sadowski, G. R., Leslie, S. A., 2005, *Corumbella*, an Ediacaran-grade organism from the Late Neoproterozoic of Brazil: Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, v. 220, p. 7-18.
- Becker-Kerber, B., Pacheco, M. L. A. F., Rudnitzki, I. D., Galante, D., Rodrigues, F., Leme, J. M., 2017, Ecological interactions in *Cloudina* from the Ediacaran of Brazil: implications for the rise of animal biomineralization: Scientific Reports, v. 7, no. 5482, p. 1-11.
- Becker-Kerber, B., Silva, F. R., Amorim, K. B., Pacheco, M. L. F., Leme, J. M., 2019, Cart before the horse: an example of how the lack of taphonomical approaches still misleads paleobiological studies in the late Ediacaran: Precambrian Research, (in press).
- Berner, R. A. Atmospheric carbon dioxide levels over Phanerozoic time. Science, v.249, p.1382-1386, 1990.
- Bertrand-Sarfati, J., Trompette, R., 1976, Use of stromatolites for intrabasinal correlation: example from the Late Proterozoic of the northwestern margin of the Taoudenni Basin, in Walter, M. R., ed., Stromatolites, Developments in Sedimentology, Elsevier, v. 20, p. 517-522.
- Beurlen, K., Sommer, F. W., 1957, Observações estratigráficas e paleontológicas sobre o calcário Corumbá: Boletim da Divisão de Geologia e Mineralogia, DNPM, v. 168, p. 35.
- Boggiani, P. C., 1998, Análise Estratigráfica da Bacia Corumbá (Neoproterozoico) - Mato Grosso do Sul [Tese de Doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, p. 181.
- Boggiani, P. C., Alvarenga, C. J. S., 2004, Faixa Paraguai, in Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, A. D. R., Brito-Neves, B. B., ed., Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida: São Paulo, Beca Editora, p.113-122.
- Boggiani, P. C., Ferreira, V. P., Sial, A. N., Babinski, M., Trindade, R. I. F., Acenolaza, G., Toselli, A. J., Parada, M. A., 2003, The cap carbonate of the Puga Hill (Central South America) in the context of the post-Varanger Galciation, in IV South American Symposium on Isotope Geology: Salvador, Brasil.

- Boggiani, P. C., Gaucher, C., Sial, A. N., Babinski, M., Simon, C. M., Riccomini, C., Ferreira, V. P., Fairchild, T. R., 2010, Chemostratigraphy of the Tamengo Formation (Corumbá Group, Brazil): A contribution to the calibration of the Ediacaran carbon-isotope curve: Precambrian Research, v. 182, p. 382-401.
- Bosak, T., Bush, J., Flynn, M., Liang, B., Ono, S., Petroff, A. P., Sim, M.S., 2010. Formation and stability of oxygen-rich bubbles that shape photosynthetic mats. *Geobiology* 8, 45–55.
- Bosak, T., Liang, B., Sim, M. S., Petroff, A. P., 2009. Morphological record of oxygenic photosynthesis in conical stromatolites. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 106, 10939–10943.
- Bosak, T., Mariotti, G., Macdonald, F. A., Perron, J. T., Pruss, S. B., 2013, Microbial sedimentology of stromatolites in Neoproterozoic cap carbonates: The Paleontological Society Papers, v. 19, p. 51-77.
- Buick, R., Dunlop, J. S. R., Groves, D. I., 1981. Stromatolite recognition in ancient rocks; an appraisal of irregularly laminated structures in an Early Archean chert-barite unit from North Pole, Western Australia. *Alcheringa* 5, 161–181.
- Chacón, E. 2010. Microbial mats as a source of biosignatures. In: *Microbial Mats - Cellular Origin, Life in Extreme Habitats and Astrobiology*. Amesterdam: Springer, Vol. 14, pp 149-181.
- Compton, J. S.; Hodell, D. A.; Garrido, J. R.; Mallinson, D. J. Origin and age of phosphorite from the south-central Florida Platform: Relation of phosphogenesis to sea-level fluctuations and  $[\delta]^{13}\text{C}$  excursions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v.57, n.1, p.131-146, 1993.
- Cook, P. J.; Shergold, J. H. Phosphorus, phosphorites and skeletal evolution at the Precambrian-Cambrian boundary. *Nature*, v.308, p.231-236, 1984.
- Cordani, U. G., Sato, K., Texeira, W., Tassinari, C. C. G., Basei, M. A. S., 2000, Crustal evolution of the South American platform, *in* Cordani U. G., Milani, E. J., Thomaz Filho, A., Campos, D. A., Eds., *Tectonic Evolution of South America*, 31° International Geological Congress, SBG: Rio de Janeiro, v. 31, p. 19–40.
- Dahanayake, K., 1978, Classification of oncoids from Upper Jurassic carbonates of the French Jura: *Sedimentology Geology*, v. 18, p. 337-353.
- Drummond, J. B. R., Pufahl, P. K., Porto, C. G., Carvalho, M., 2015. Neoproterozoic peritidal phosphorite from the Sete Lagoas Formation (Brazil) and the Precambrian phosphorus cycle. *Sedimentology* 62, 1978–2008.
- Dupraz, C., Reid, R. P, Braissant, O., Decho, A., 2009, Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats: *Earth-Science Reviews*, v. 96, no. 3, p. 141-162.

- Fairchild, T. R., Rohn, R., Dias-Brito, D., eds., 2015, Microbialitos do Brasil do Pré-Cambriano ao Recente: um atlas: Rio Claro, UNESP, p. 15-17.
- Fairchild, T. R., Sanchez, E. A. M., Pacheco, M. L. A. F., Leme, J. M., 2012, Evolution of Precambrian life in the Brazilian geological record: International Journal of Astrobiology, v. 11, p. 309 – 323.
- Font, E., Nédelec, A., Trindade, R. I. F., Macouin, M., Charriere, A., 2006, Chemostratigraphy of the Neoproterozoic Mirassol D'Oeste cap dolostones (Mato Grosso, Brazil): an alternative model for Marinoan cap dolostone formation: Earth and Planetary Science Letters, v. 205, no. 1-2, p. 89-103.
- Fontaneta, G. T., 2012, Dolomitização e Fosfogênese na Formação Bocaina, Grupo Corumbá (Ediacarano) [Dissertação de Mestrado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, p. 148.
- Gaucher, C., Boggiani, P. C., Sprechmann, P., Sial, A. N., Fairchild, T. R., 2003, Integrated correlation of the Vendian to Cambrian Arroyo del Soldado and Corumbá Group (Uruguay and Brazil): palaeogeographic, palaeoclimatic and palaeobiologic implications: Precambrian Research, v. 120, p. 241-278.
- Gebelein, K. D., 1969. Distribution, morphology, and accretion rate of recent subtidal algal stromatolites, Bermuda. *J. Sediment. Res.* 39, 49–69.
- Glaessner, M. F., 1984, The Dawn of Animal Life: A biohistorical study: Cambridge, Cambridge University Press, p. 244.
- Grant, S.W., 1989, Shell structure and distribution of Cloudina, a potential index fossil for the terminal Proterozoic: *American Journal of Science*, v. 290, p. 261-294.
- Grotzinger, J. P., And Knoll, A. H., 1999, Stromatolites in Precambrian carbonates: evolutionary mileposts or environmental dipsticks?. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, v. 27, p. 313–358.
- Grotzinger, J. P., Rothman, D.H., 1996. An abiotic model for stromatolite morphogenesis. *Nature* 383, 423–425.
- Grover, G., Read, J. F., 1978. Fenestral and associated vadose diagenetic fabrics of tidal flat carbonates, Middle Ordovician New Market Limestone, southwestern Virginia. *J. Sediment. Petrol.* 48, 453–473.
- Hofmann, H. J., Grey, K., Hickman, A. H., Thorpe, R. I., 1999. Origin of 3.45 Ga coniform stromatolites in Warrawoona Group, Western Australia. *Geol. Soc. Am. Bull.* 111, 1256–1262.

- Horodyski, R. J., Vonder Haar, Stephen, P., 1975, Recent Calcareous Stromatolites from Laguna Mormona (Baja California) Mexico: Journal of Sedimentary Petrology, v. 45, no. 3, p. 894-906.
- Knoll, A. H., Semikhatov, M.A., 1998. The genesis and time distribution of two distinctive Proterozoic stromatolite microstructures. *Palaios* 13, 408–422.
- Krajewski, K. P., Van Cappellen, P., Trichet, J., Kuhn, O., Lucas, J., Martín-Algarra, A., Prévôt, L., Tewari, V. C., Gaspar, L., Knight, R. I., Lamboy, M., 1994. Biological processes and apatite formation in sedimentary environments. *Eclogae Geol. Helv.* 87, 701–745.
- Logan, B. W.; Rezak, R.; Ginsburg, R. N. Classification and environmental significance of algal stromatolites. *Journal of Geology*, v.72, p.68-83, 1964.
- Lucas, J.; Prévôt, L. The synthesis of apatite by bacterial activity: mechanism. *Sci. Geol. Mem.*, v.77, p.83-92, 1985.
- Margulis, L., To, L.T., Chase, D., 1981, Microtubules, Undulipodia and Pillotina spirochetes: *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 361, no.1, p. 356–368.
- Mata, et al., 2012. Influence of Gas Production and Filament Orientation on Stromatolite Microfabric. *Palaios*, Research Article. 27, 206–219. doi:10.2110/palo.2011.p11-088r.
- McGee, B., Collins, A. S., Trindade, R. I. F., 2012, G'day Gondwana – birth of a supercontinent: U/Pb ages for the post-orogenic São Vicente granite, Mato Grosso, Brazil: *Gondwana Research*, v. 21, p. 316–322.
- Morais, L., 2013, Paleobiologia da Formação Bocaina (Grupo Corumbá), Ediacarano, Mato Grosso do Sul [Dissertação de Mestrado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, p. 112.
- Morais, L.; Fairchild, T.; Leme, J. M.; Rudnitzki, I. D.; Freitas, B. T.; Boggiani, P. C.; Trindade, R. I. F. 2019. The new acritarch record of the Ediacaran Bocaina Formation (Corumbá Group, Brazil). International Meeting on Ediacaran and Ediacaran – Cambrian transition. Guadalupe, Extremadura, Espanha. Morais, L.; Fairchild, T.; Leme, J. M.; Rudnitzki, I. D.; Freitas, B. T.; Boggiani, P. C.; Trindade, R. I. F. 2019. The new acritarch record of the Ediacaran Bocaina Formation (Corumbá Group, Brazil). International Meeting on Ediacaran and Ediacaran – Cambrian transition. Guadalupe, Extremadura, Espanha.
- Nogueira, A. C. R. 2003, A plataforma carbonática Araras no sudeste do Cráton Amazônico, Mato Grosso: estratigrafia, contexto paleoambiental e correlação com os eventos glaciais do Neoproterozoico [Tese de Doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências.

- Nogueira, A. C. R., Riccomini, C., Sial, A. N., Moura, C. A. V., Fairchild, T. R., 2003, Soft-sediment deformation at the base of the Neoproterozoic Puga cap carbonate (southwestern Amazon craton, Brazil): confirmation of rapid icehouse to greenhouse transition in snowball Earth: *Geology*, v. 31, no. 7, 613-616.
- Nogueira, A. C. R., Romero, G. R., Sanchez, E. A. M., Domingos, F. H. G., Bandeira, J., Santos, I., M., Pinheiro, R. V. L., Soares, J. L., Lafon, J. M., Afonso, J. W. L., Santos, H. P., Rudnitzki, I. D., 2019, The Cryogenian-Ediacaran Boundary in the Southern Amazon Craton in Sial A. N., Gaucher C., Ramkumar, M., Ferreira, V. P., Eds., Chemostratigraphy Across Major Chronological Boundaries: *Geophysical Monograph* 240, First Edition, p. 89-114.
- Oliveira, R. S., 2010, Depósitos de rampa carbonática ediacarana do Grupo Corumbá, Região de Corumbá, Mato Grosso do Sul [Dissertação de Mestrado]: Belém, Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, 104 p.
- Oliveira, R. S., Nogueira, A. C. R., Romero, G. R., Truckenbrodt, W., Da Silva Bandeira, J. C., 2019, Ediacaran ramp depositional model of the Tamengo Formation, Brazil: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 96, no. 102348.
- Pacheco M. L. A. F., Galante D., Rodrigues F., Leme J. M., Bidola P., Hagadorn W., Stockmar M., Rudnitzki I., Pfeiffer F., Marques A. C., 2015, Insights into the skeletonization, lifestyle, and affinity of the unusual Ediacaran fossil *Corumbella*: *PLoS One*, doi: 10.1371/journal.pone.0114219.
- Pacheco, M. L. A. F., 2012, Reconstituição morfológica e análise sistemática de *Corumbella wernerii* (Hahn et al., 1982) (Formação Tamengo, Ediacarano, Grupo Corumbá), Mato Grosso do Sul, Brasil: implicações paleoecológicas e tafonômicas [Tese de Doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, p. 170.
- Pacheco, M. L. A. F., Leme, J. M., Machado, A. F., 2011, Taphonomic analysis and geometric modelling for the reconstitution of the Ediacaran metazoan *Corumbella wernerii*: *Journal of Taphonomy*, v. 9, no. 4, p. 269-283.
- Papineau, D., 2010. Global biogeochemical changes at both ends of the Proterozoic: insights from phosphorites. *Astrobiology* 10, 165–181.
- Parry, L. A. et al., 2017, Ichnological evidence for meiofaunal bilaterians from the terminal Ediacaran and earliest Cambrian of Brazil: *Nature Ecology & Evolution*, v. 1, no. 10, p. 1455.
- Parry, L. A., Boggiani, P. C., Condon, D. J., Garwood R. J., Leme, J. M., McIlroy, D., Brasier, M. D., Trindade, R., Campanha, G. A. C., Pacheco M. L. A. F., Diniz, C. Q. C., Liu, A. G., 2017, Ichnological evidence for meiofaunal bilaterians from the terminal Ediacaran and earliest Cambrian of Brazil: *Nature Ecology & Evolution*, v. 1, n. 10, p. 1455.

- Pufahl, P. K.; Grimm, K. A. Coated phosphate grains: Proxy for physical, chemical, and ecological changes in seawater. *Geology*, v.31, n.9, p.801-804, 2003.
- Rao, V. P.; Lamboy, M.; Natarajan, R. Possible microbial origin of phosphorites on Error Seamount, northwestern Arabian Sea. *Marine Geology*, v.106, n.1-2, p.149-164, 1992.
- Reid, R. P., Visscher, P. T., Decho, A. W., Stolz, J. F., Bebout, B. M., Dupraz, C., MacIntyre, I. G., Paerl, H. W., Pinckney, J. L., Profert-Bebout, L., Steppe, T. F., DesMarais, D. J., 2000. The role of microbes in accretion, lamination and early lithification of modern marine stromatolites. *Nature* 406, 989–992.
- Riding, R., 2000, Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms: *Sedimentology*, v. 47, p. 179-214.
- Riding, R., 2011, Microbialites, Stromatolites and Thrombolites, *in* Reitner, J., Thiel, V., eds., *Encyclopedia of Geobiology. Encyclopedia of Earth Science*: Heidelberg, Springer, p. 635-654.
- Romero, G. R., 2015, Geobiologia de microbialitos do Ediacarano da Faixa Paraguai e do sul do Cráton Amazônico (MS e MT): implicações paleoambientais, paleoecológicas e estratigráficas [Tese de Doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências.
- Romero, G. R., Sanchez, E. A. M., Morais, L., Boggiani, P. C., Fairchild, T. R., 2016, Tubestone microbialite association in the Ediacaran cap carbonates in the southern Paraguay Fold Belt (SW Brazil): Geobiological and stratigraphic implications for a Marinoan cap carbonate: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 71, p. 172-181.
- Romero, G.R., Sanchez, E.A.M., Soares, J.L., Nogueira, A.C.R., Fairchild, T.R., 2020. Waxing and waning of microbial laminites in the aftermath of the Marinoan glaciation at the margin of the Amazon Craton (Brazil). *Precambr. Res.* 348, 105856.
- Sami, T. T. & James, N.P. 1994. Peritidal carbonate platform growth and cyclicity in an early Proterozoic foreland basin, upper Pethei Group, Northwest Canada. *Journal of Sedimentary Research*; 64: 111-131
- Sanders C., Grotzinger, J. 2021. Sedimentological and stratigraphic constraints on depositional environment for Ediacaran carbonate rocks of the São Francisco Craton: Implications for phosphogenesis and paleoecology. Division of Geological and Planetary Sciences, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA.
- Schopf, J.W., 2001, Cradle of life: the discovery of Earth's earliest fossils. EUA: Princeton, Princeton University Press, p. 392.

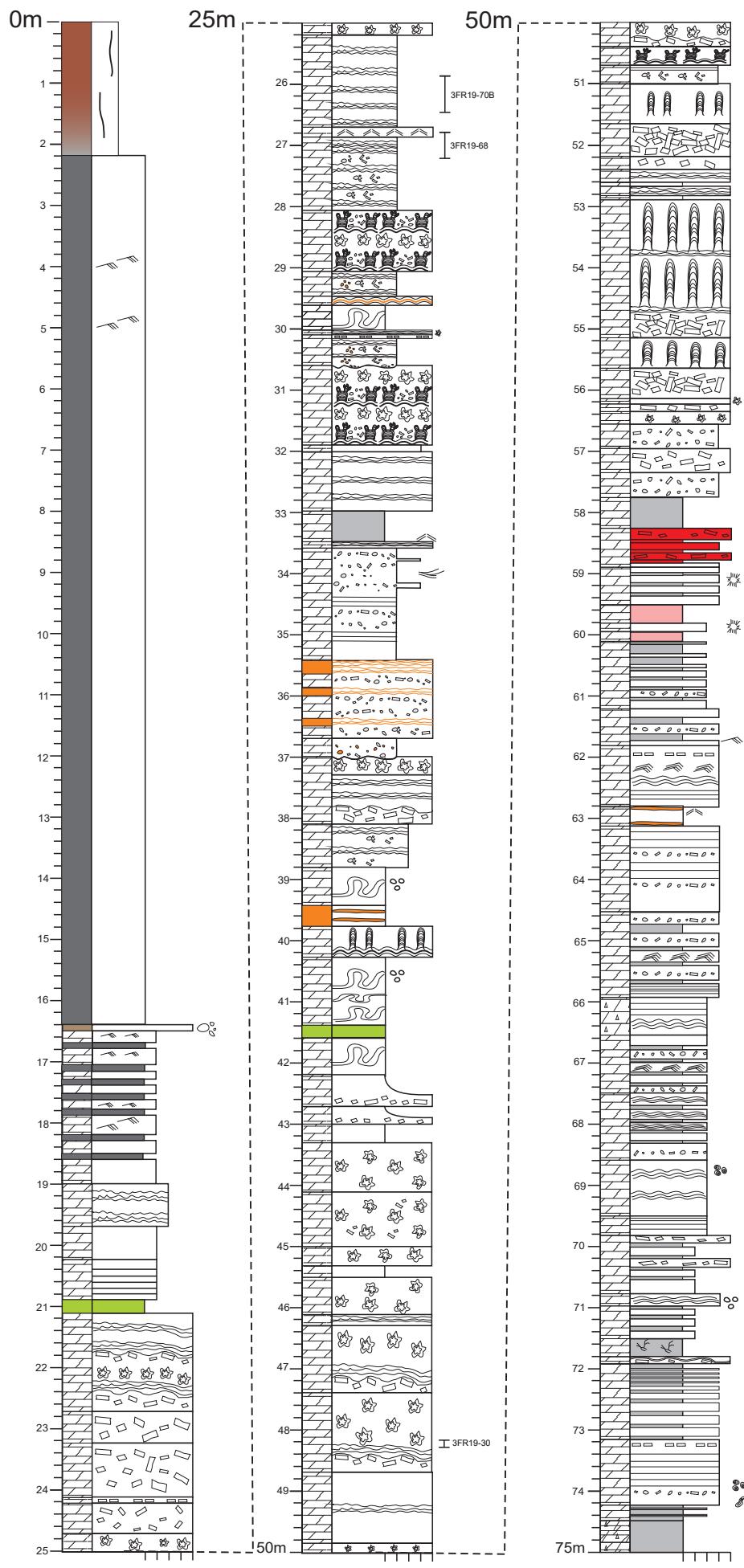
- Shiraishi, F.; Ohnishi, S.; Hayasaka, Y.; Hanzawa, Y.; Takashima, C.; Okumura, T.; Kano, A. 2019. Potential photosynthetic impact on phosphate stromatolite formation after the Marinoan glaciation: Paleoceanographic implications. Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University, Japan.
- Soudry, D.; Champetier, Y. Microbial processes in the Negev phosphorites (southern Israel). *Sedimentology*, v.30, n.3, p.411-423, 1983.
- Tucker, M. E. *Sedimentary Petrology. An Introduction to the Origin of Sedimentary Rocks*. 3. Oxford: Blackwell, 2001. 262p.
- Tucker, M. E.; Wright, V. P. *Carbonate Sedimentology*. Oxford: Blackwell Science, Blackwell Publishing, 1990. 482p.
- Van Iten, H., Leme, J. M., Pacheco, M. L. A. F., Simões, M. G., Fairchild, T. R., Rodrigues, F., Galante, D., Boggiani, P. C., Marques, A. C., 2016, Origin and Early diversification of Phylum Cnidaria: Key Macrofossils from the Ediacaran System of North and South America, *in* Goffredo, S., Dubinsky, Z., eds., *The Cnidaria, Past, Present and Future*: Springer International Publishing, p. 31–40.
- Walde, D. H. G, Weber, B., Erdtmann, B., Steiner, M., 2019, Taphonomy of *Corumbella werneri* from the Ediacaran of Brazil: sinotubulitid tube or conulariid test?. *Alcheringa: An Australasian Journal of Palaeontology*, v. 43, p. 1-16.
- Walde, D. H. G., Carmo, D. A., Guimarães, E. M., Vieira, L. C., Erdtmann, B. D., Sanchez, E. A. M., Adorno, R. R., Tobias, T. C., 2016, New aspects of Neoproterozoic-Cambrian transition in the Corumbá region (state of Mato Grosso do Sul, Brazil), *in* *Anales de Paléontologie*, v. 101, no. 3, p. 213-224.
- Walter, M. R., 1983. Archean stromatolites: Evidence of the Earth's earliest benthos. In: Schopf, J.W. (Ed.), *Earths Earliest Biosphere: Its Origin and Evolution*. Princeton University Press, Princeton, pp. 187–213.
- Warren, L. V., Fairchild, T. R., Gaucher, C., Boggiani, P. C., Poiré, D. G., Anelli, L. E., Inchausti, J. G., 2011, *Corumbella* and *in situ Cloudina* in association with thrombolites in the Ediacaran Itapucumi Group, Paraguay: *Terra Nova*, v. 23, p. 382–389.
- Warren, L. V., Pacheco, M. L. A. F., Fairchild, T. R., Simões, M. G., Riccomini, C., Boggiani P. C., Cáceres, A. A., 2012, The dawn of animal skeletogenesis: ultrastructural analysis of the Ediacaran metazoan *Corumbella werneri*: *Geology*, v. 40, n. 8, p. 691–694.
- Zaine, M. F., 1991, Análise dos fósseis da parte da Faixa Paraguai (MS, MT) e seu contexto temporal e paleoambiental [Tese de Doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 218 p.

Zaine, M. F., Fairchild, T. R., 1985, Comparison of *Aulophycus lucianoi* Beurlen & Sommer from Ladário (MS) and the genus *Cloudina* Germs, Ediacaran of Namibia: Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 57, no. 1, p. 130.

## **ANEXO A**

Perfis dos testemunhos de sondagem e das trincheiras

**Figura A1 - Euro DD-003**



### LEGENDA

#### Litologia

- Calcário
- Dolomito
- Dolomito Silicificado
- Arenito Dolomítico
- Marga
- Diamictito rico em ferro
- Diamictito
- Brecha siliciclástica
- Arenito
- Arenito arcóseo
- Lamito
- Folhelho
- Siltito
- Sílex/Chert
- Fosforito
- Embasamento

#### Estruturas Sedimentares

- |  |  |  |                                 |
|--|--|--|---------------------------------|
|  | Megaripples                                |  | Estrutura Flame                 |
|  | Estratificação cruzada Hummocky            |  | Deformação suave                |
|  | Estratificação cruzada Swaley              |  | Dobra                           |
|  | Estratificação cruzada Festonada           |  | Estromatólito colunar           |
|  | Estratificação cruzada tangencial          |  | Estromatólito estratiforme      |
|  | Laminação ondulada cavalgante supercritica |  | Complexo Microbialítico         |
|  | Laminação ondulada cavalgante subcritica   |  | Trombólito                      |
|  | Laminação cruzada baixa                    |  | Tepees                          |
|  | Laminação cruzada Chevron                  |  | Greta de contração              |
|  | Marca ondulada simétrica                   |  | Clastos Rip-up                  |
|  | Marca ondulada                             |  | Intraclasto tabular de dolomito |
|  | Laminação ondulada                         |  | Intraclasto tabular de sílica   |
|  | Laminação planar                           |  | Ooides                          |
|  | Laminação com matéria orgânica             |  | Pisooides                       |
|  | Acamamento heterolítico                    |  |                                 |
|  | Acamamento massivo                         |  |                                 |
|  | Sedimentos terrígenos                      |  | Nódulo de fosfato               |
|  | Intraclastos de carbonato                  |  | Crosta/Camada de fosfato        |
|  | Fragmentos de rocha                        |  | Massive silex                   |
|  | Clastos de fosfato                         |  | Cristais de pirita              |
|  | Nódulo de carbonato                        |  | Vénula de carbonato/sílex       |
|  |  |  | Vénula de jaspe                 |

#### Superfícies

- Superfície erosiva
- Superfície não erosiva

- Brecha/Microbialito
- Areia grossa
- Areia média
- Areia fina
- Pelito

**Figura A2 - Euro DD-004**



### LEGENDA

#### Litologia

Calcário
Dolomito
Dolomito Silicificado
Arenito Dolomítico
Marga
Diamictito rico em ferro
Diamictito
Brecha siliciclástica
Arenito
Arenito arcóseo
Lamito
Folhelho
Siltito
Sílex/Chert
Fosforito
Embasaamento

#### Estruturas Sedimentares

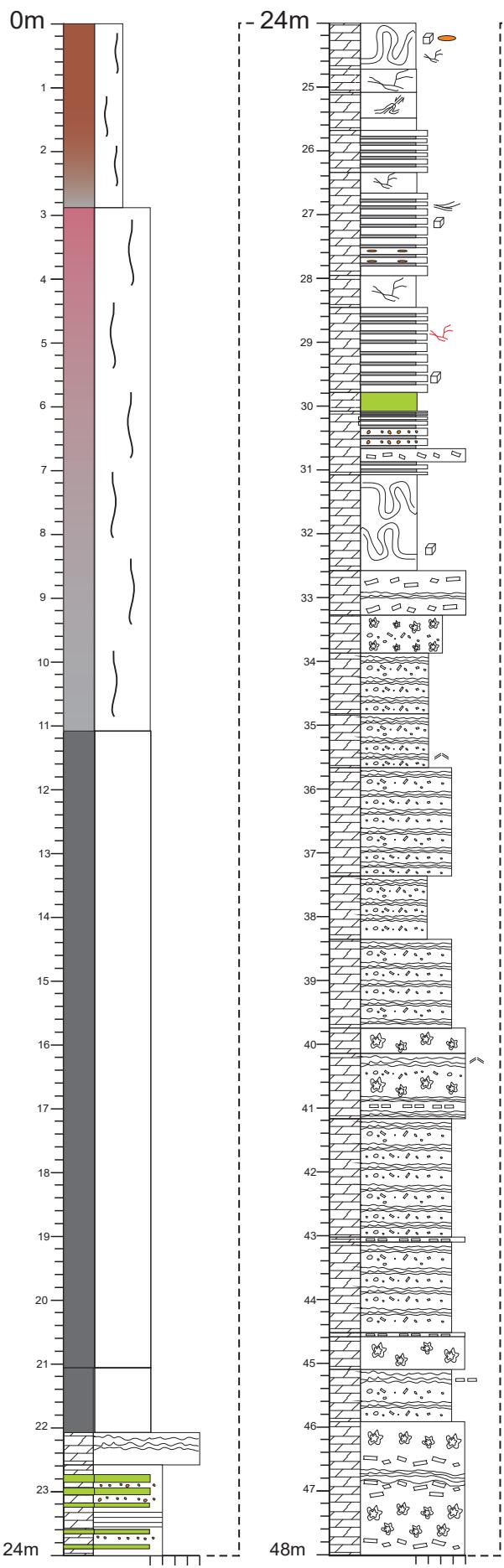
Megaripples	Estrutura Flame
Estratificação cruzada Hummocky	Deformação suave
Estratificação cruzada Swaley	Dobra
Estratificação cruzada Festonada	Estromatólito colunar
Estratificação cruzada tangencial	Estromatólito estratiforme
Laminação ondulada cavalgante supercrítica	Complexo Microbialítico
Laminação ondulada cavalgante subcrítica	Trombólito
Laminação cruzada baixa	Tepees
Laminação cruzada Chevron	Greta de contração
Marca ondulada simétrica	Clastos Rip-up
Marca ondulada	Intraclasto tabular de dolomito
Laminação ondulada	Intraclasto tabular de sílica
Laminação planar	Ooides
Laminação com matéria orgânica	Pisoides
Acamamento heterolítico	
Acamamento massivo	
Sedimentos terrígenos	Nódulo de fosfato
Intraclastos de carbonato	Crosta/Camada de fosfato
Fragmentos de rocha	Massive silex
Clastos de fosfato	Cristais de pirita
Nódulo de carbonato	Vênula de carbonato/sílex
	Vênula de jaspe

#### Superfícies

~~~~~	Superfície erosiva
—————	Superfície não erosiva

Brecha/Microbialito
Areia grossa
Areia média
Areia fina
Pelito

**Figura A3 - Euro DD-007**



## LEGENDA

### Litologia

	Calcário
	Dolomito
	Dolomito Silicificado
	Arenito Dolomítico
	Marga
	Diamictito rico em ferro
	Diamictito
	Brecha siliciclástica
	Arenito
	Arenito arcóseo
	Lamito
	Folhelho
	Siltito
	Sílex/Chert
	Fosforito
	Embasamento

### Estruturas Sedimentares

	Megaripples		Estrutura Flame
	Estratificação cruzada Hummocky		Deformação suave Dobra
	Estratificação cruzada Swaley		Estromatólito colunar
	Estratificação cruzada Festonada		Estromatólito estratiforme
	Estratificação cruzada tangencial		Complexo Microbialítico
	Laminação ondulada cavalgante supercrítica		Trombólito
	Laminação ondulada cavalgante subcrítica		Tepees
	Laminação cruzada baixa		Greta de contração Clastos Rip-up
	Laminação cruzada Chevron		Intraclasto tabular de dolomito
	Marca ondulada simétrica		Intraclasto tabular de sílica
	Marca ondulada		Ooides
	Laminação ondulada		Pisoides
	Laminação planar		
	Laminação com matéria orgânica		
	Acamamento heterolítico		
	Acamamento massivo		

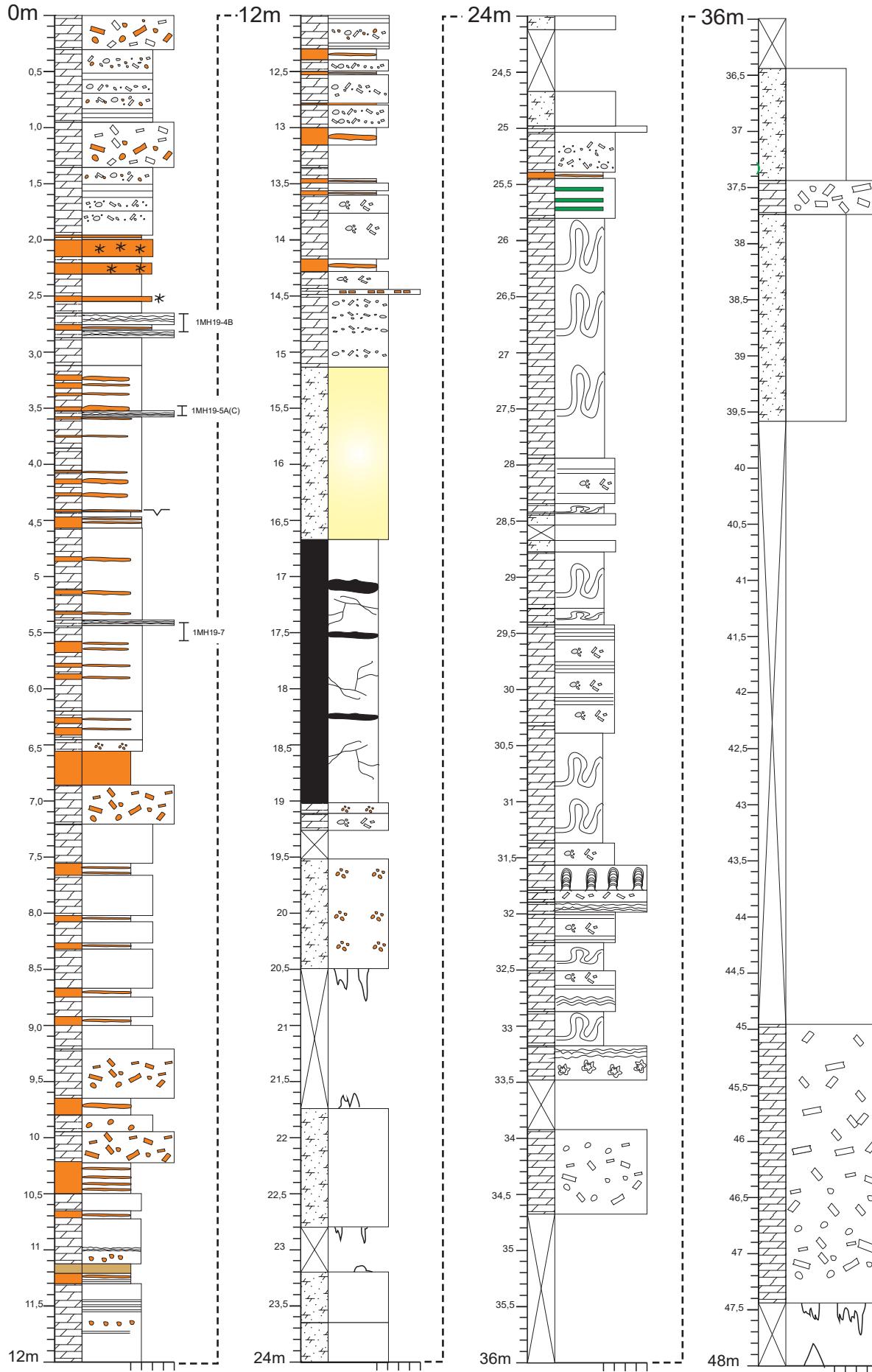
	Sedimentos terrígenos		Nódulo de fosfato
	Intraclastos de carbonato		Crosta/Camada de fosfato
	Fragmentos de rocha		Massive silex
	Clastos de fosfato		Cristais de pirita
	Nódulo de carbonato		Vênula de carbonato/sílex
			Vênula de jaspé

### Superfícies

	Superfície erosiva
	Superfície não erosiva

	Brecha/Microbialito
	Areia grossa
	Areia média
	Areia fina
	Pelito

**Figura A4 - Euro W-001**



### LEGENDA

#### Litologia

Calcário
Dolomito
Dolomito Silicificado
Arenito Dolomítico
Marga
Diamictito rico em ferro
Diamictito
Brecha siliciclástica
Arenito
Arenito arcóseo
Lamito
Folhelho
Siltito
Sílex/Chert
Fosforito
Embasamento

#### Estruturas Sedimentares

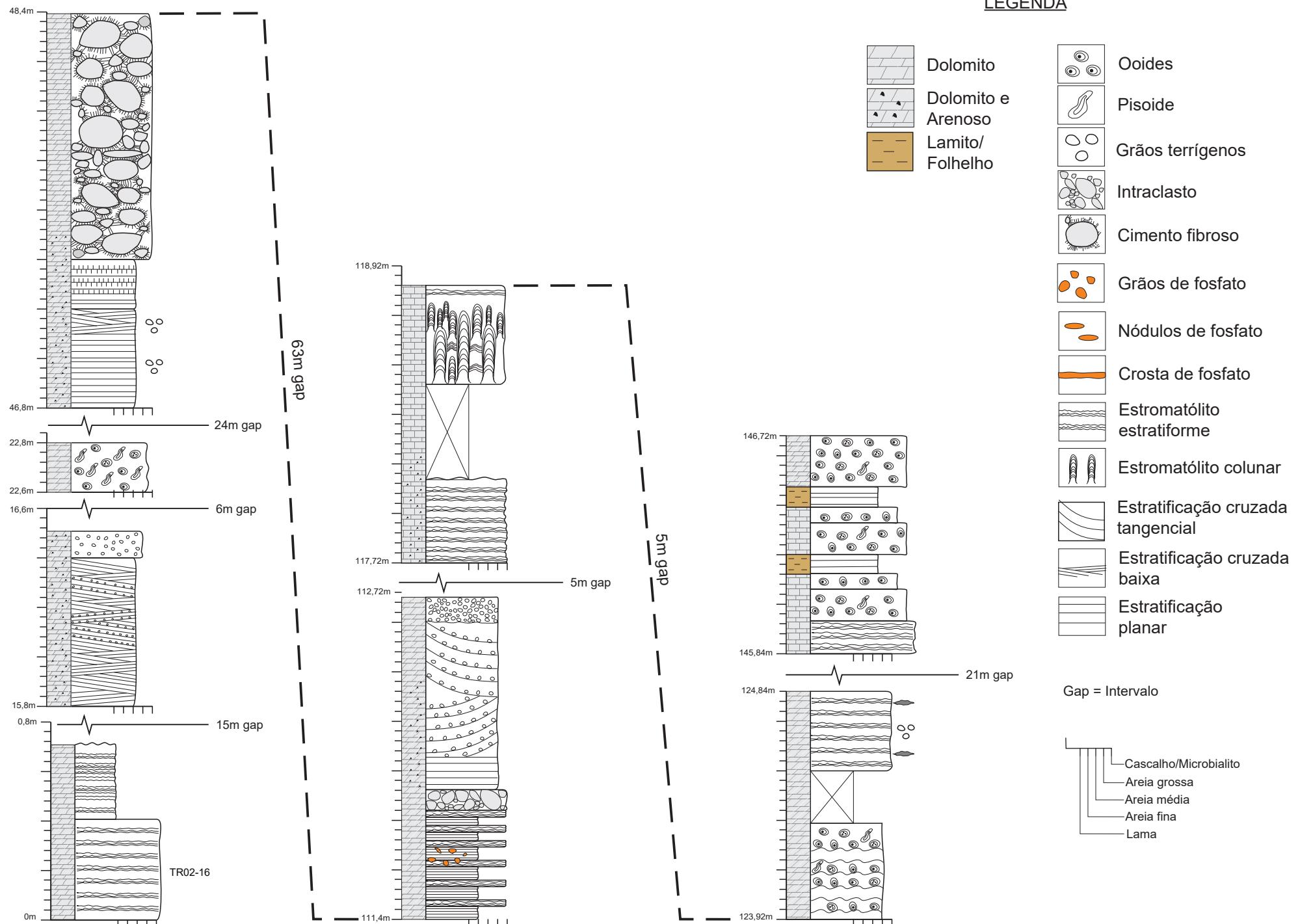
Megaripples	Estrutura Flame
Estratificação cruzada Hummocky	Deformação suave
Estratificação cruzada Swaley	Dobra
Estratificação cruzada Festonada	Estromatólito columnar
Estratificação cruzada tangencial	Estromatólito estratiforme
Laminação ondulada cavalgante supercrítica	Complexo Microbialítico
Laminação ondulada cavalgante subcritica	Trombólito
Laminação cruzada baixa	Tepees
Laminação cruzada Chevron	Greta de contração
Marca ondulada simétrica	Clastos Rip-up
Marca ondulada	Intraclasto tabular de dolomito
Laminação ondulada	Intraclasto tabular de sílex
Laminação planar	Ooides
Laminação com matéria orgânica	Pisoides
Acamamento heterolítico	
Acamamento massivo	
Sedimentos terrígenos	Nódulo de fosfato
Intraclastos de carbonato	Crosta/Camada de fosfato
Fragmentos de rocha	Massive silex
Clastos de fosfato	Cristais de pirita
Nódulo de carbonato	Vênula de carbonato/sílex
	Vênula de jaspe

#### Superfícies

~~~~~	Superfície erosiva
———	Superfície não erosiva

———	Brecha/Microbialito
—	Areia grossa
—	Areia média
—	Areia fina
—	Pelito

**Figura A5 - Trincheira 2**



**Figura A6 - Trincheira 3**

