

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

Júlia Peresin Carbonera

**DINÂMICA DE TEMPESTADES EM CARBONATOS PÓS SNOWBALL
DO CRIOGENIANO: UM ESTUDO DE CASO DA FORMAÇÃO
SALITRE, CHAPADA DIAMANTINA, BAHIA**

Porto Alegre, 2023

Júlia Peresin Carbonera

**DINÂMICA DE TEMPESTADES EM CARBONATOS PÓS SNOWBALL
DO CRIOGENIANO: UM ESTUDO DE CASO DA FORMAÇÃO
SALITRE, CHAPADA DIAMANTINA, BAHIA**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Geologia.

Orientador(a): Prof.^a Dr.^a Claiton Marlon dos Santos Scherer

Porto Alegre, 2023

CIP - Catalogação na Publicação

Carbonera, Júlia Peresin
Dinâmica de tempestades em carbonatos pós Snowball
do Criogeniano: um estudo de caso da Formação Salitre,
Chapada Diamantina, Bahia / Júlia Peresin Carbonera.
-- 2023.
51 f.
Orientador: Claiton Marlon dos Santos Scherer.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Geociências, Curso de Geologia, Porto Alegre,
BR-RS, 2023.

1. Formação Salitre. 2. Depósitos microbiais. 3.
Rampas carbonáticas. I. Scherer, Claiton Marlon dos
Santos, orient. II. Título.

Júlia Peresin Carbonera

**DINÂMICA DE TEMPESTADES EM CARBONATOS PÓS SNOWBALL DO
CRIOGENIANO: UM ESTUDO DE CASO DA FORMAÇÃO SALITRE, CHAPADA
DIAMANTINA, BAHIA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Geologia e aprovado em sua forma final pelo Curso de Geologia.

Porto Alegre, 31 de maio de 2023.

Profa. Dra. Lauren da Cunha Duarte
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:

Dra. Rosalia Barili
Instituto de Petróleo e Recursos Naturais (IPR-PUCRS)

MSc. Sabrina Altenhofen
Instituto de Petróleo e Recursos Naturais (IPR-PUCRS)

Profa. Dra. Maria Alejandra Pivel (UFRGS)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, sem os quais não estaria aqui hoje. Obrigada pelo apoio, carinho, incentivo e amor durante toda a jornada. Vocês são parte fundamental da minha história e é uma alegria compartilhar a vida ao lado de vocês.

Aos amigos que a vida me deu, especialmente à Geórgia, Lucas, Sara, Thaís e Edu, por todas as conversas, risadas, reflexões e momentos que tornaram os dias mais divertidos e leves.

Aos amigos que a geologia me trouxe e que permanecerão para a vida, obrigada por todas as memórias que construímos juntos durante esses cinco anos, com vocês a geologia se tornou ainda mais gratificante. Agradeço em especial à Alana, que esteve presente em todas as ocasiões, desde a recepção; às meninas da Faixa 1, Emília e Ingrid; e ao João Miguel, João Vitor, Lucas, Ronaldo e Silvia, por todas as risadas e companheirismo durante esse período.

Ao meu orientador Claiton, por toda a paciência e ajuda durante a realização deste trabalho e pela oportunidade de participar dos projetos do grupo. Agradeço também a todo o grupo de pesquisa da Estrati, que de uma forma ou outra, contribuíram para este trabalho.

Aos professores Luiz Fernando de Ros, Maria de Fátima Aparecida Saraiva Bitencourt e Amanda Goulart Rodrigues, por todos os conhecimentos geológicos ensinados durante esses anos, e a todos os outros professores que colaboraram para a minha formação.

À Isadora, por ter participado da minha jornada de autoconhecimento fora da geologia, fornecendo ferramentas e auxiliando no meu crescimento.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por toda estrutura e apoio durante a graduação. Ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP, pelo financiamento a esta pesquisa e pelo auxílio durante o projeto.

Enfim, a todos com quem pude compartilhar experiências e que me tornaram quem sou hoje.

Não sou nada.
Nunca serei nada.
Não posso querer ser nada.
À parte isso, tenho em mim todos os sonhos do mundo.

Tabacaria (Fernando Pessoa)

RESUMO

A Formação Salitre, (669 Ma +/- 14 Ma) pertencente ao Grupo Una/Supergrupo São Francisco, aflora na Bacia do Irecê, na porção central do Cráton São Francisco. Ela é composta por dolomitos e calcários divididos em 5 unidades informais, denominadas de Unidades C, B, B1, A e A1. Esta Formação é sobreposta à Formação Bebedouro, uma sequência glácio-marinha representada por diamictitos, pelitos e arenitos, datada em 874 Ma. A presença de camadas carbonáticas recobrando diamictitos neoproterozoicos é explicada pela teoria do *Snowball Earth*, a qual postula que a Terra foi recoberta, quase totalmente, por um manto de gelo e que o degelo aconteceu de forma acelerada, propiciando a precipitação de carbonato. O presente trabalho tem como objetivo final a proposição de um modelo deposicional para a área estudada. Para isso, foram analisadas e interpretadas as litofácies que ocorrem na região estudada. Estas litofácies foram agrupadas em três associações de fácies distintas, sendo elas: associação de fácies de rampa interna (intermaré proximal), associação de fácies de rampa interna (inframaré distal) e associação de fácies de rampa intermediária dominada por ondas de tempestade. Com base nessas associações foi proposto um modelo deposicional de uma rampa homoclinal dominada pela ação de ondas de tempestade para a área estudada. Além disso, com o auxílio de descrições petrográficas de lâminas delgadas, a porção da Formação Salitre foi analisada como um possível reservatório de hidrocarbonetos, sendo avaliado que, devido suas características, ela não funcionaria bem para tal. Porém, com o aumento dos estudos de reservatórios ligados a depósitos microbiais, ela pode ser utilizada em estudos mais aprofundado como um possível análogo.

Palavras-chave: Formação Salitre; Depósitos microbiais; Rampas carbonáticas

ABSTRACT

The Salitre Formation (669 Ma +/- 14 Ma), belonging to the Una Group/São Francisco Supergroup, outcrops in the Irecê Basin, in the central portion of the São Francisco Craton. It is composed of dolomites and limestones divided into 5 informal units, called Units C, B, B1, A, and A1. This formation is overlaid by the Bebedouro Formation, a glacio-marine sequence represented by diamictites, pelites, and sandstones, dated at 874 Ma. The presence of carbonate layers covering Neoproterozoic diamictites is explained by the Snowball Earth theory, which postulates that the Earth was covered almost entirely by an ice mantle and that the deglaciation occurred rapidly, leading to carbonate precipitation. The present work aimed to propose a depositional model for the studied area. Thus, the lithofacies occurring in the studied region were analyzed and interpreted. These lithofacies were grouped into three distinct facies associations, namely: inner ramp facies association - proximal intertidal, inner ramp facies association - distal subtidal, and intermediate ramp facies association dominated by storm waves. Based on these associations, a depositional model of a homoclinal ramp dominated by storm wave action was proposed for the studied area. In addition, with the aid of petrographic descriptions of thin sections, the portion of the Salitre Formation was analyzed as a possible hydrocarbon reservoir, and it was evaluated that, due to its characteristics, it would not work well for such. However, with the increasing study of reservoirs linked to microbial deposits, it may be used for further study as a possible analogue.

Keywords: Salitre Formation, Microbial limestone. Carbonate ramp.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS E METAS	10
3 JUSTIFICATIVA	11
4 ESTADO DA ARTE / REFERENCIAL TEÓRICO	11
4.1 CONTEXTO GEOLÓGICO	11
4.2 A FORMAÇÃO BEBEDOURO	12
4.3 A FORMAÇÃO SALITRE	13
4.4 O SNOWBALL EARTH E AS ROCHAS CARBONÁTICAS	14
4.5 RAMPAS CARBONÁTICAS E RESERVATÓRIOS DE HIDROCARBONETOS	16
5 MATERIAIS E MÉTODOS	18
5.1 PRÉ-CAMPO	18
5.1.1 Revisão Bibliográfica	18
5.2 CAMPO	19
5.2.1 Seções colunares	20
5.2.2 Análise Faciológica	22
5.3 LABORATÓRIO (PÓS-CAMPO)	24
5.3.1 Descrição Petrográfica	24
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
6.1 FÁCIES	26
6.1.1 Mudstone Maciço	26
6.1.2 Intercalação de microbial mats e mudstones	28
6.1.3 Estromatólito	30
6.1.4 Grainstone	32
6.1.5 Rudstone	34
6.2 ASSOCIAÇÃO DE FÁCIES	36
6.2.1 Associação de fácies de rampa interna - intermaré proximal (AF1)	36
6.2.2 Associação de fácies de rampa interna - inframaré distal (AF2)	38
6.2.3 Associação de fácies de rampa intermediária dominada por ondas de tempestade (AF3)	40
6.3 SISTEMA DEPOSICIONAL	43
6.4 RAMPAS CARBONÁTICAS COMO ANÁLOGOS A RESERVATÓRIOS DE HIDROCARBONETOS	46
7 CONCLUSÕES	47
REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

A porção central do Cráton São Francisco é composta pelo Aulacógeno Paramirim, que é dividido em dois supergrupos, o Supergrupo Espinhaço e o Supergrupo São Francisco. Este último, é composto pelas formações Bebedouro, composta por diamictitos, pelitos e arenitos glácio-marinhos, datados de 874 Ma, e Salitre, representada por uma sucessão carbonática depositada em uma plataforma do tipo rampa dominada por ondas, datada de 669 Ma (Almeida, 1977; Souza *et al*, 1993; Guimarães, 1996; Figueiredo, 2009; Sail, 2010; Santana, 2016).

A deposição de sequências carbonáticas sobrepostas a sequências glaciogênicas depositadas em baixas latitudes são explicadas pela teoria do *Snowball Earth*, que propõe que a Terra foi recoberta, quase totalmente, por uma camada de gelo e que a passagem de “ice house” para “greenhouse” ocorreu rapidamente, permitindo a precipitação de carbonatos (Kennedy, 1996; Hoffman, 1998; Hyde, 2000; Kirschvink, 2002).

O presente trabalho buscou entender a dinâmica de tempestades presentes nas rochas da Formação Salitre e a sua influência na deposição dos carbonatos. Para isso utilizou-se a descrição e análise faciológica e foram criadas associações de fácies a partir do levantamento de perfis colunares.

Além disso, com base nas associações faciológicas descritas, o projeto propôs um modelo deposicional para a área estudada, auxiliando no entendimento da deposição de rampas carbonáticas neoproterozoicas. Esse modelo pode auxiliar o estudo de reservatórios de hidrocarbonetos, sendo utilizado como análogo a reservatórios microbiais. Dessa forma, o trabalho forneceu novos dados aumentando o arcabouço de conhecimentos geológicos sobre a Formação Salitre.

2 OBJETIVOS E METAS

O trabalho tem como objetivo principal a caracterização estratigráfica e o estabelecimento do modelo deposicional para uma rampa carbonática dominada por ondas que recobre depósitos glaciais desenvolvidos no *snowball* do Criogeniano. Para isso, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- Identificar as diferentes litofácies e estabelecer as associações de fácies;

- Entender a dinâmica de tempestades que influencia na sedimentação desta rampa;
- Propor um modelo deposicional para esta rampa carbonática;
- Avaliar a área estudada como um possível reservatório para hidrocarbonetos.

3 JUSTIFICATIVA

Depósitos carbonáticos relacionados ao Neoproterozoico são identificados em diferentes regiões do planeta, porém, existem poucos exemplos e estudos sedimentológicos e estratigráficos detalhados dessas unidades. As rochas carbonáticas da Formação Salitre, associadas ao final de um período de *Snowball Earth*, já foram identificadas por diversos autores, mas carecem de trabalhos que descrevam e analisem a fundo suas feições. Além disso, o entendimento dos processos e modelos deposicionais dessas unidades é algo que ainda precisa ser revisado. Outro fator de importância desse estudo é a utilização dele como modelo análogo de reservatórios carbonáticos similares em bacias brasileiras.

4 ESTADO DA ARTE / REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 CONTEXTO GEOLÓGICO

A Formação Salitre, pertencente ao Grupo Una/Supergrupo São Francisco, aflora na Bacia do Irecê, na porção central do Cráton São Francisco. O Cráton São Francisco representa porções de um paleocontinente neoproterozoico preservado da Orogenia Brasileira Pan-Africana. Os limites desse Cráton com os cinturões Brasília, Araçuaí, Rio Pardo, Sergipano, Riacho do Pontal e Rio Preto são marcados por intenso dobramento, já os sedimentos que o recobrem sofreram pouca ou nenhuma deformação e ocorrem em dois domínios tectônicos distintos: a Bacia do São Francisco e o Aulacógeno Paramirim (Almeida, 1977; Sial, 2010).

As duas principais unidades do Aulacógeno Paramirim (Fig 1) são os Supergrupos Espinhaço e São Francisco. O Supergrupo Espinhaço é dividido nos grupos Rio dos Remédios, Paraguaçu e Chapada Diamantina e representa uma sequência siliciclástica, depositada entre 1.8 e 0.9 Ga, em condições intracratônicas.

O Supergrupo São Francisco é composto pelas formações Bebedouro e Salitre, que preenchem a Bacia do Irecê. Essas formações equivalem, respectivamente, aos grupos Macaúbas e Bambuí (Alkmin e Martins- Neto, 2012). As sinclinais de Irecê, Ituaçu, Salitre e Una- Utinga presentes na Chapada Diamantina são as principais áreas de exposição dessas rochas.

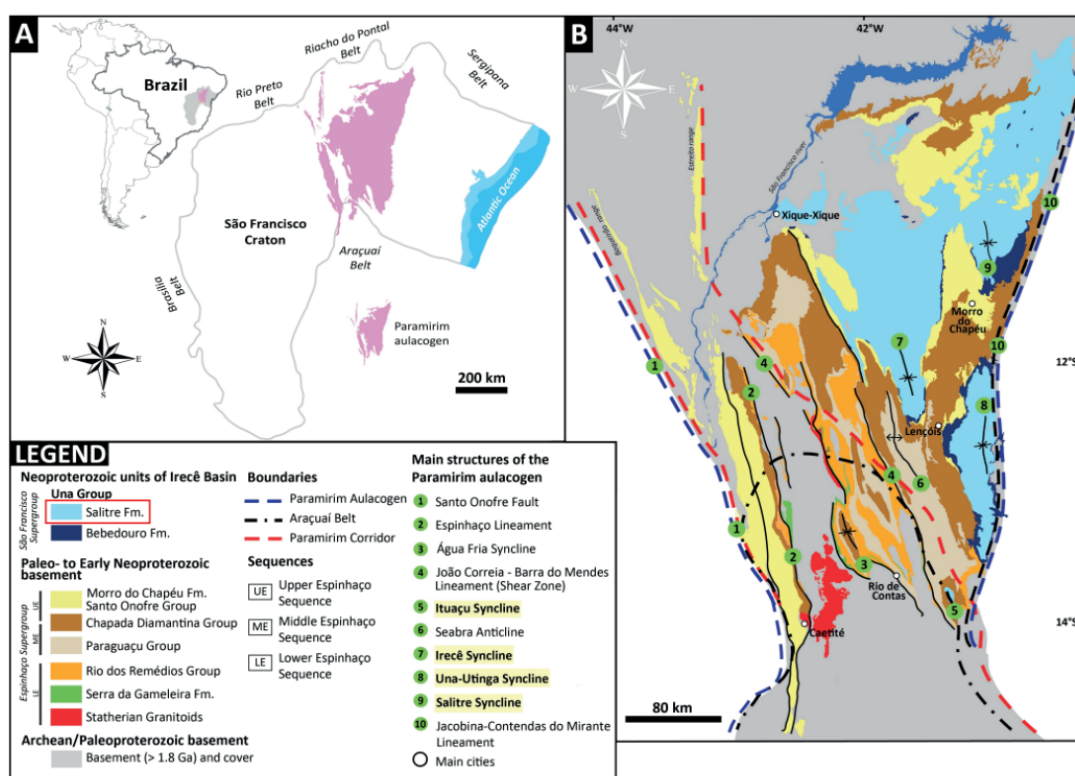


Figura 1 - Contexto geológico simplificado do Aulacógeno do Paramirim. A área em azul claro são as porções de exposição da Formação Salitre. (Modificado de Santana *et. al.*, 2016)

4.2 A FORMAÇÃO BEBEDOURO

A Formação Bebedouro está sobreposta a rochas metassedimentares mesoproterozoicas do Grupo Chapada Diamantina ou a rochas Paleoproterozóica/

Arqueanas de alto grau metamórfico (Guimarães e Misi, 2011). Ela é composta por diamictitos, pelitos e arenitos e é interpretada como glácio-marinha progradante, representando a megassequência glaciogênica do Grupo Una. A passagem da Formação Bebedouro para a Formação Salitre é marcada por uma ampla discordância erosiva (Guimarães, 1996 e Sail, 2010) (Fig 2). A idade máxima de deposição da formação é de 874 Ma (Figueiredo, 2009).

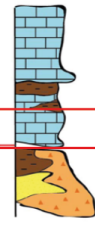
Tempo (Ga)	Cronoestratigrafia <i>(Cohen et al., 2013)</i>			Carta Estratigráfica Simplificada - Supergrupo São Francisco - Bacia de Irecê, BA				
	ÉON	ERA	PERÍODO	Supergrupo/ Grupo	Formação	Dados Geocronológicos	Seção Estratigráfica Simplificada	Sistemas Deposicionais
0.6	PROTEROZOICO	NEOPROTEROZOICO	Ediacarano					
0.7			Criogeniano	SÃO FRANCISCO / UNA	Salitre			Carbonático Marinho
0.8				0,85				ca. 669 Ma (U/Pb)
0.9			Toniano		Bebedouro	ca. 874 Ma (U/Pb) **		Glacial- marinho
1.0		1,0						

Figura 2- Coluna estratigráfica simplificada do Supergrupo São Francisco. O retângulo em vermelho indica o intervalo da Formação Salitre estudada. (Modificado de Santana *et al.*, 2016)

4.3 A FORMAÇÃO SALITRE

A Formação Salitre representa uma sucessão carbonática depositada em uma plataforma do tipo rampa dominada por frequente ação de ondas e maré, com idade máxima de deposição de 669 Ma (+/- 14 Ma) (Leão e Dominguez, 1992; Souza et al, 1993; Santana, 2016).

Vários autores (Misi e Souto, 1975; Misi, 1979; Bomfim, 1985; Souza *et al.*, 1993; Misi e Kyle, 1994; Misi e Silva, 1996) subdividiram as rochas da Formação Salitre em diferentes classificações, abaixo são apresentadas as unidades informais descritas a partir de Misi (1979), Misi e Kyle (1994) e Misi e Veizer (1998) (Fig 3):

- Unidade C: formada por dolomitos argilosos, avermelhados, que recobrem a Formação Bebedouro.
- Unidade B: constituída por calcários e dolomitos laminados cinzas. É caracterizada por sucessões centimétricas de ritmitos.
- Unidade B1: caracterizada por dolomitos cinza, apresenta estruturas sedimentares de maré rasa, como “mudcracks”, laminações estromatolíticas e nódulos de calcita/quartzo.
- Unidade A: calcários argilosos cinza intercalados com siltitos depositados em um ambiente de água profunda.
- Unidade A1: calcários maciços ricos em matéria orgânica com oólitos e pisolítos. A presença de estratificação cruzada sugere um ambiente com alto nível de energia durante a deposição.

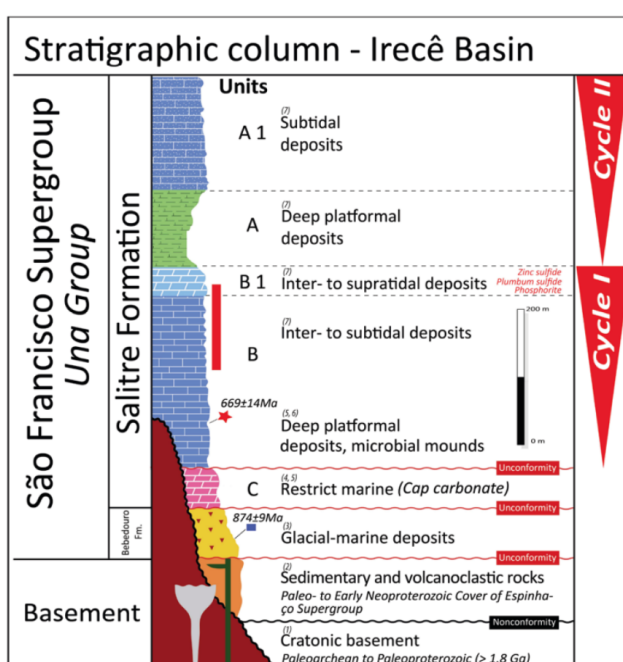


Figura 3- Coluna estratigráfica detalhada do Supergrupo São Francisco na Bacia do Irecê. (Retirado de Santana *et. al.*, 2016)

4.4 O SNOWBALL EARTH E AS ROCHAS CARBONÁDICAS

Sequências glaciogênicas neoproterozoicas depositadas em baixas latitudes são encontradas na maioria das áreas cratônicas e, por não terem nenhum análogo moderno, tem sido tema de inúmeros questionamentos ao longo da história. Para

tentar explicar essas ocorrências foi proposta a teoria do Snowball Earth, a qual propõe que o planeta foi coberto por uma camada de gelo com espessura variável, restando apenas algumas áreas, na região do equador, com água líquida (Hoffman, 1998; Hyde, 2000; Hoffman e Schrag, 2002; Kirschvink, 2002).

Um dos fatores que pode ter desencadeado esse evento é a posição dos continentes durante o Neoproterozoico, que estavam concentrados em grandes massas continentais em baixas e médias latitudes, gerando mudanças climáticas globais. Isso aconteceria porque essas massas continentais refletem mais energia do que absorvem e estariam ocupando o espaço dos oceanos tropicais, que são responsáveis pela maior parte da absorção de energia solar, já que os oceanos polares normalmente possuem nuvens ou neblina sobre eles (Kirschvink, 2002). Além disso, o transporte de calor por células Hadley seria prejudicado pela presença de massas de ar mais secas, reduzindo, da mesma forma, o transporte de calor dos oceanos (Hoffman e Schrag, 2002).

A passagem de “*ice house*” para “*greenhouse*” ocorreu rapidamente, visto que o intemperismo de silicatos e a fotossíntese, que são os maiores consumidores de CO₂, estavam inibidos pelo gelo (Hoffman, 1998; Kirschvink, 2002). Durante o degelo, a troca de gases entre a superfície oceânica e a atmosfera com alta concentração de CO₂, desencadearia primeiro a dissolução do carbonato e depois a precipitação, devido à mistura de águas profundas com altas concentrações de cálcio e carbono inorgânico dissolvido com águas quentes vindas dos trópicos. Assim, o espaço que foi criado pela subsidência termal durante o “*snowball earth*” foi rapidamente preenchido pela deposição de capas carbonáticas (Hoffman, 1998)

Capas carbonáticas são camadas carbonáticas depositadas logo após sequências glaciais, restritas, em escala e distribuição, ao final das glaciações do Criogeniano (Keneddy, 1996; Hoffman, 1998; Hoffman, 2010). As duas principais glaciações do Criogeniano são a Sturtian, que ocorreu entre 760 e 700 Ma, e a Marinoran, entre 620 e 580 Ma, e geraram capas carbonáticas com características distintas (Hyde, 2000; Corsetti e Lorentz, 2006).

As capas apresentam feições sedimentológicas associadas a ação de ondas, como peloides com gradação normal e inversa, laminação cruzada de baixo ângulo, e marcas de ondas gigantes, estruturas em tubo e estromatólitos do tipo

gutter e também leques de cristais macroscópicos. Os pacotes sedimentares apresentam pouca espessura e as análises de $\delta^{13}\text{C}$ mostram valores de excursão negativos. (Allen e Hoffman, 2004, Kennedy, 1996; Kaufman e Knoll 1995; Hoffman, 2010)

O primeiro registro de uma capa carbonática na Plataforma Sul Americana é de Nogueira (2003), que a identificou associada a uma plataforma carbonática do Grupo Araras, no Cráton Amazônico. A Unidade C da Formação Salitre é uma capa carbonática que recobre a Formação Bebedouro, associada à glaciação Sturtian, apresenta padrão $\delta^{13}\text{C}$ negativo e representa um estágio inicial de deglaciação (Misi e Souto, 1975; Misi, 1979; Misi e Kyle, 1994; Misi e Silva, 1996 e Santana, 2016).

Os diamictitos da Formação Bebedouro são recobertos pela capa carbonática da Unidade C, da Formação Salitre, evoluindo de uma sedimentação intracratônica (tipo golfo) para uma sedimentação de margem passiva (mar aberto) com a deposição da Unidade B.

4.5 RAMPAS CARBONÁTICAS E RESERVATÓRIOS DE HIDROCARBONETOS

Depósitos do tipo rampa formam a base de inúmeras plataformas carbonáticas, e guardam importantes depósitos petrolíferos e minerais. O termo rampa foi adotado para descrever uma superfície deposicional com leve inclinação (geralmente $<1^\circ$) que passa de forma gradual de depósitos rasos, para depósitos dominados por ondas até ambientes de baixa energia, com depósitos de água profunda (Burchette & Wright, 1992).

Os modelos de plataformas carbonáticas são importantes para entender a evolução das fácies carbonáticas nos diferentes tipos de plataformas, indicando diferentes estágios de evolução, do nível do mar, da influência tectônica e da evolução biológica. Foram definidos então, dois tipos de rampas carbonáticas (Read, 1992).

Rampas homoclinais: apresentam declividades relativamente uniformes (1 ou poucos metros/km) em direção à bacia e geralmente não apresentam significativos depósitos de fluxos gravitacionais nas fácies de água profunda (Fig 4).

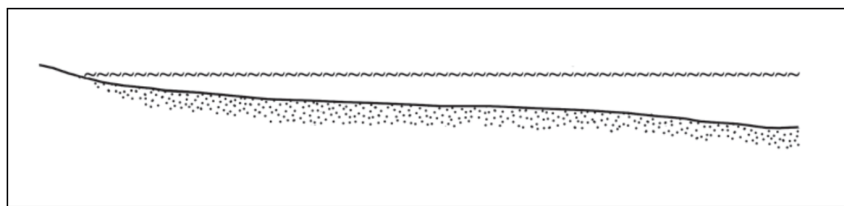


Figura 4- Desenho esquemático de uma rampa carbonática homoclinal (Retirado de Flugel, 2010)

Rampas distalmente escarpadas: esse tipo apresenta tanto características de rampas quanto de plataformas. Porém, ela se difere das plataformas pela quebra do talude acontecer a muitos quilômetros da zona de transição de ação de ondas (Fig 5).

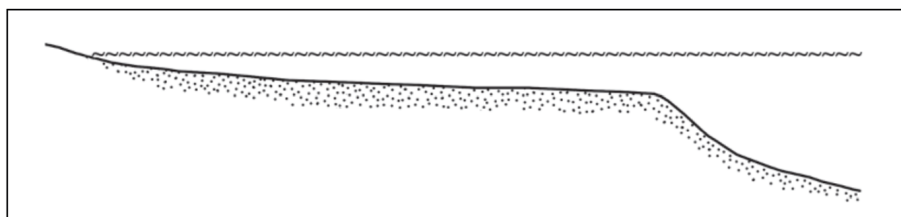


Figura 5- Desenho esquemático de uma rampa carbonática distalmente escarpada (Retirado de Flugel, 2010)

Para melhorar o entendimento das rampas carbonáticas Burchette & Wright (1992) propuseram três subdivisões internas para elas (Fig 6), sendo:

- Rampa interna: é a zona acima do nível do mar de tempo bom, dominada por bancos de areia ou barreiras orgânicas em depósitos de shoreface.
- Rampa intermediária: zona entre o nível do mar de tempo bom e a base de ondas de tempestade, na qual o fundo oceânico é afetado por ondas de tempestade, mas não é afetado por ondas de tempo bom. Os sedimentos apresentam evidência de frequente retrabalhamento por onda e estratificações cruzadas do tipo hummocky são comuns.

- Rampa externa: zona que se estende do limite de profundidade em que as ondas de tempestade influenciam no fundo marinho até a bacia. Os sedimentos têm poucos indícios de retrabalhamento por onda.

	COAST	INNER RAMP		MID-RAMP	OUTER RAMP	BASIN
	Peritidal zone, sabkha	Lagoon	Sand shoal			Mean sea level
	Algal mats, evaporites	Fine-grained sediment	Accumulation of bioclasts or ooids	Mud mound	Mud mound	Fair-weather wave base
			Resedimentation	Coarse-grained, graded storm layers intercalated in fine-grained sediments	Fine-grained, resedimented, graded storm layers, intercalated in fine-grained sediments	Storm wave base
						Pycno-/Thermocline
						Fine-grained sediments
Depositional water energy	Low and high	Low	High	Low	Low and high	Low
Sedimentary structures	Lamination	Irregular bedding, bioturbation	Cross-bedding	Hummocky cross-stratification	Bioturbation, lamination	Lamination
Prevailing carbonate texture in limestones	Mudstones, bindstones, grainstones	Wacke-stones, mudstones	Grain-stones	Wacke-stones, packstones	Wackestones and resedimented grain/packstones, mudstones	Mudstones, bindstones, grainstones

Figura 6- Quadro esquemático com as subdivisões para plataformas carbonáticas do tipo rampa (Retirado de Flugel, 2010)

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem como objetivo especificar os métodos empregados durante a execução do presente trabalho. Desta forma, foram estabelecidas três etapas: pré-campo, campo e laboratório (pós-campo). A primeira etapa consistiu na ampla revisão bibliográfica de trabalhos previamente publicados da área de estudo e preparação para a etapa seguinte de campo. No trabalho de campo foi executado o levantamento de seções colunares, além da realização de análise faciológica das litologias encontradas e a coleta de amostras para posterior descrição petrográfica. Na etapa de laboratório, foram integrados os dados adquiridos em campo, com a digitalização das seções colunares e a confecção e descrição de lâminas delgadas.

5.1 PRÉ-CAMPO

5.1.1 Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica aconteceu durante toda a execução do trabalho, auxiliando na compreensão do mapeamento geológico local e estudo de métodos apropriados para os objetivos do projeto. Para a melhor organização da bibliografia, os trabalhos utilizados foram inseridos na plataforma Mendeley®, que funciona como um catálogo digital, que, posteriormente, foi vinculada à plataforma Office®, para auxiliar no referenciamento bibliográfico do trabalho.

5.2 CAMPO

A etapa de trabalho de campo está inserida no Projeto de Pesquisa “Arquitetura de fácies e estratigrafia de sequências de sistemas híbridos carbonáticos-siliciclásticos, Formação Caboclo, Mesoproterozóico, Chapada Diamantina-BA”, desenvolvido junto ao Instituto de Geociências da UFRGS e coordenado pelo Prof. Dr. Claiton Marlon dos Santos Scherer.

O campo foi realizado durante os dias 23 de maio de 2022 e 06 de junho de 2022, nas proximidades dos municípios de Iraquara e Morro do Chapéu, na Bahia. Nele foram levantados perfis colunares, identificadas as fácies e coletadas as amostras para laminação.

Ao total, foram levantadas quatro perfis colunares, que foram identificadas pela sigla “PS”, que indica o projeto, seguida do número específico de cada ponto (por exemplo, “PS-01”). Também foram adicionadas a identificação do nome de cada gruta/caverna em que o perfil foi levantado, para facilitar a identificação. As amostras coletadas em cada afloramento seguem a mesma nomenclatura, sendo seguidas pela letra adicional para contabilizá-las, como o exemplo “PS-01-A” (Fig 7).

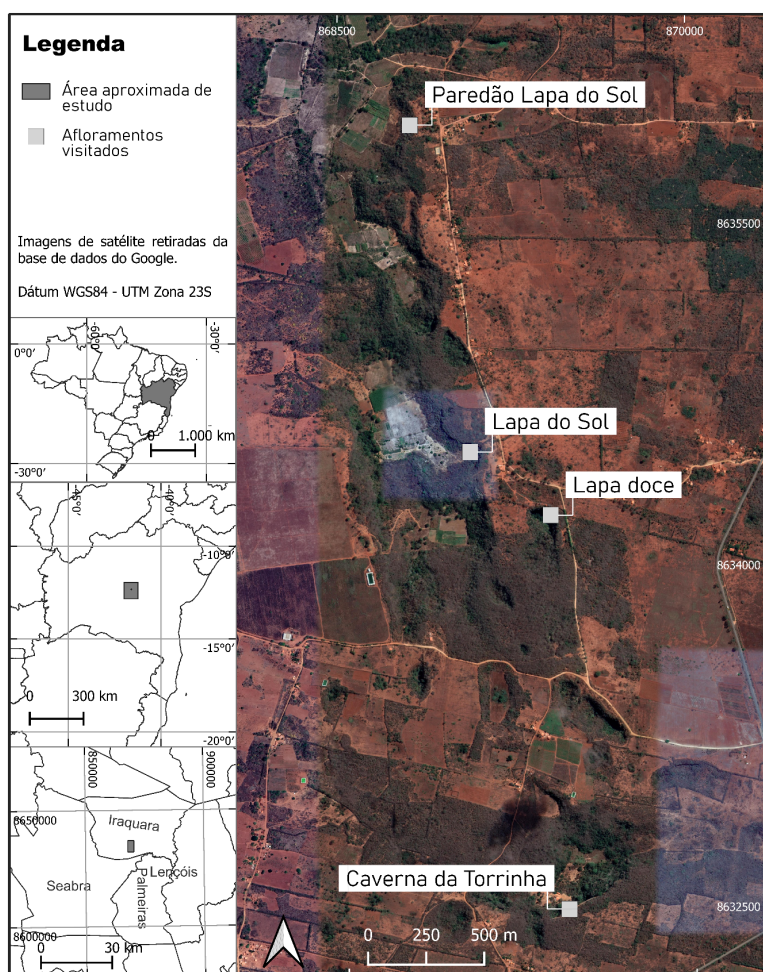


Figura 7- Mapa de localização da área de estudo, com a localização das quatro grutas em que foram levantados os perfis colunares.

5.2.1 Seções colunares

O levantamento de perfis colunares é a maneira de representar graficamente uma sucessão vertical de fácies, conseguindo compilar um grande volume de dados, analisando o padrão de acumulação do sistema deposicional e podendo identificar suas variações ou repetições, além de possibilitar correlação de seções de diferentes porções.

Um perfil colunar é composto por dois eixos: um vertical, no qual é representada a espessura das camadas, e um horizontal, no qual é expressa a granulometria do sedimento (Fig 8). Para a representação do eixo vertical, é necessária a escolha de escala de representação das camadas, que, neste trabalho, foi de 1:50. Na folha de levantamento de perfil colunar, também são expressas

outras informações importantes, como dados de localização, código das fácies, medidas de estruturas sedimentares (S0 e paleocorrente), amostras, fotos, além das descrições de cada fácies.

COLUNA ESTRATIGRÁFICA		SEÇÃO/UNIDADE:		NOMES:		
ALGUMAS ESTRUTURAS GERADAS POR PROCESSOS HIDRODINÂMICOS OU DEFORMACIONAIS M Maciço Lam. Plano Paralela Lam. Cruz. de ripples Ripples assimétricas Ripples simétricas E. Cruz. Baixo Ângulo		ALGUMAS ESTRUTURAS GERADAS POR PROCESSOS EÓLICOS Estratificação horizontal Estratificação cruzada de baixo ângulo Estratificação cruzada planar Estratificação cruzada tangencial Estratificação cruzada acanalada Estruturas de adesão		ALGUMAS ESTRUTURAS GERADAS POR PROCESSOS DEFORMACIONAIS E. Cruzada Planar E. Cruz. Tangencial E. Cruz. Acanalada Lam. Ondulada Truncada Estrutura em Chama Fluidização Lam. Convoluta Escorregamento		Ponto: Coord. UTM E: N: Data: Escala:
Área BI Sx Gr Mg G M F M ⁺ S Ag		Cód. Fácies	Paleocorrente Estruturas	Fotos Amostras	Assoc. de Fácies	
Área BI Sx Gr Mg G M F M ⁺ S Ag						
DESCRIÇÃO LITOLÓGICA						
Área BI Sx Gr Mg G M F M ⁺ S Ag						

Fig 8- Modelo de folha para as seções colunares

5.2.2 Análise Faciológica

A análise faciológica é uma etapa fundamental e constitui a principal ferramenta para a interpretação dos sistemas deposicionais de forma correta. Segundo Walker (2006), uma fácies pode ser definida como um corpo rochoso com características específicas, podendo ser uma única camada ou um conjunto delas. Também pode ser definida como um corpo de rocha que se formou sobre condições de sedimentação que refletem um processo específico, um conjunto de condições ou um ambiente, segundo Reading (1996). Os atributos que definem uma fácies são: cor, composição, textura, estruturas sedimentares e conteúdo fossilífero.

Para a descrição das fácies carbonáticas, utilizou-se a compilação feita por Terra *et al.* (2010), das principais feições e nomenclaturas para rochas carbonáticas, segundo as classificações de Dunham (1962), Folk (1962) Embry e Klovan (1971) e Riding (2000). Para as fácies que apresentaram bioconstruções, utilizou-se o termo microbialito, referindo-se a depósitos biossedimentares formados através da interação entre comunidades microbianas bentônicas e sedimentos. Estes também foram divididos conforme sua morfologia, baseando-se na classificação de Logan *et al.* (1964) (Fig 9).

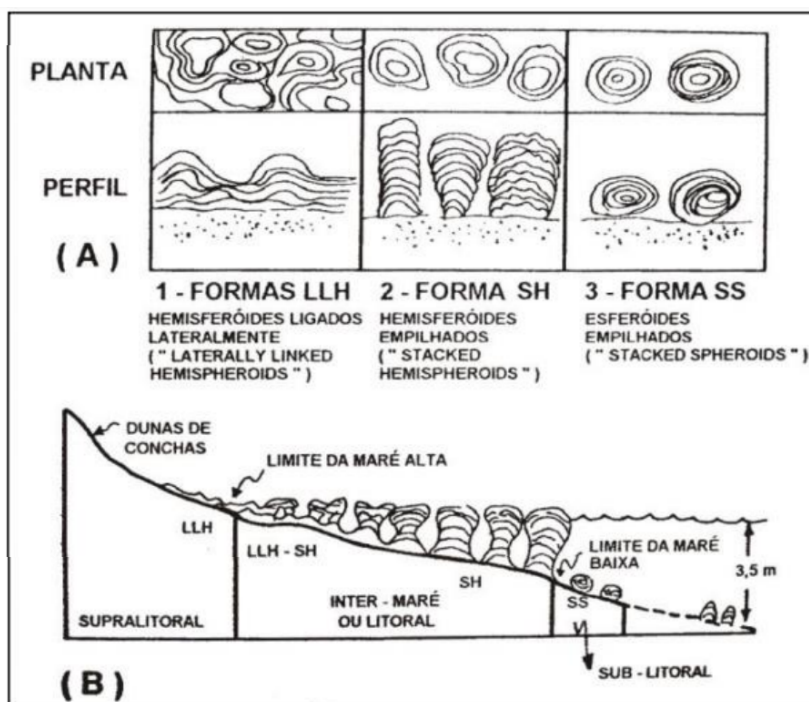


Fig 9- Representação esquemática das diferentes morfologias de estromatólitos vistas em planta e perfil (A) e da distribuição delas ao longo de um perfil desde a zona supralitoral ate a zona sub-litoral (B). Adaptado de Logan et al. (1964).

A partir da análise faciológica, agrupou-se as diferentes fácies em associações de fácies e pode-se inferir um sistema deposicional, seguindo o método proposto por Walker & James (1992) (Fig 10).

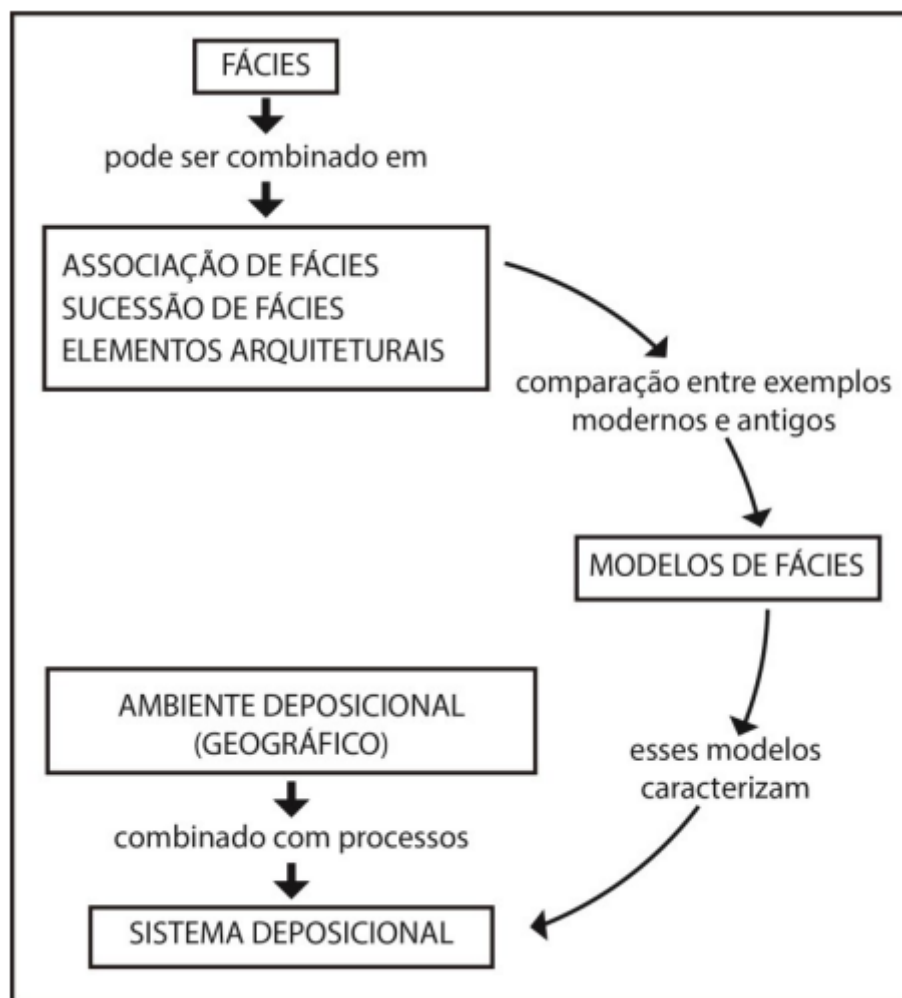


Fig 10- Esquema proposto por Walker & James (1992) para a interpretação de sistemas deposicionais.

5.3 LABORATÓRIO (PÓS-CAMPO)

5.3.1 Descrição Petrográfica

A descrição petrográfica teve como principal objetivo auxiliar na descrição detalhada das fácies carbonáticas, complementando as descrições de campo com informações de difícil identificação em amostra de mão, como constituintes diagenéticos e aloquímicos.

Para este trabalho, foram confeccionadas 9 lâminas delgadas, das principais fácies identificadas em campo, na empresa PetrografiaBr. Posteriormente, as lâminas foram descritas seguindo um roteiro previamente definido, utilizando o microscópio óptico Zeiss AXIO Imager 2, e, nele também, foram obtidas as

fotomicrografias das principais feições de cada lâmina. Seguindo o modelo de descrição (Fig 11), foram descritos constituintes, relações de contato entre os grãos, matriz, diagênese, porosidade, além de outros aspectos que estão exemplificados no modelo. Para auxiliar na descrição foi utilizado o livro *A Color Guide to the Petrography of Carbonate Rocks: Grains, Textures, Porosity, Diagenesis*, de Scholle & Ulmer-Scholle (2003), que possibilitou a comparação entre as feições observadas com os exemplos da literatura.

Local/Perfil	Lâmina
Constituintes	
Relações entre grãos (texturas/contatos)	
Matriz	
Diagênese	
Estruturas diagenéticas	
Porosidade	
Classificação	
Ambiente	
Observações	

Fig 11- Modelo de descrição de lâminas delga

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 FÁCIES

A partir das seções colunares levantadas e com o auxílio das lâminas delgadas descritas foram identificadas seis fácies sedimentares, individualizadas com base em suas estruturas e texturas.

6.1.1 Mudstone Maciço

Descrição: Mudstone, cinza escuro, maciço (Fig 11). Apresenta estratos tabulares com extensão lateral com espessura centimétrica de, no máximo, 60 cm. Essa fácies é identificada localmente na base das seções. Em lâmina, é possível identificar a presença de textura microgrumosa, com intensa recristalização e estilólitos.

Interpretação: Esta fácies pode ser interpretada como sendo produto da deposição de sedimentos finos em condições de baixa energia, possibilitando que a lama carbonática se acomodasse em águas calmas (Flugel, 2010). Entretanto, associar mudstones apenas a ambientes de baixa energia pode ser um erro, uma vez que eles podem ser gerados também por bactérias que fixam/aglutinam lama em ambientes de mais alta energia (Flugel, 2010). Segundo Tucker (2001), um dos processos que podem gerar lama carbonática é a precipitação bioquímica a partir da fotossíntese e decomposição microbial. Assim, pode-se entender que essa fácies foi depositada em um momento em que a atividade microbial foi reduzida e que a energia do ambiente também não estava alta.

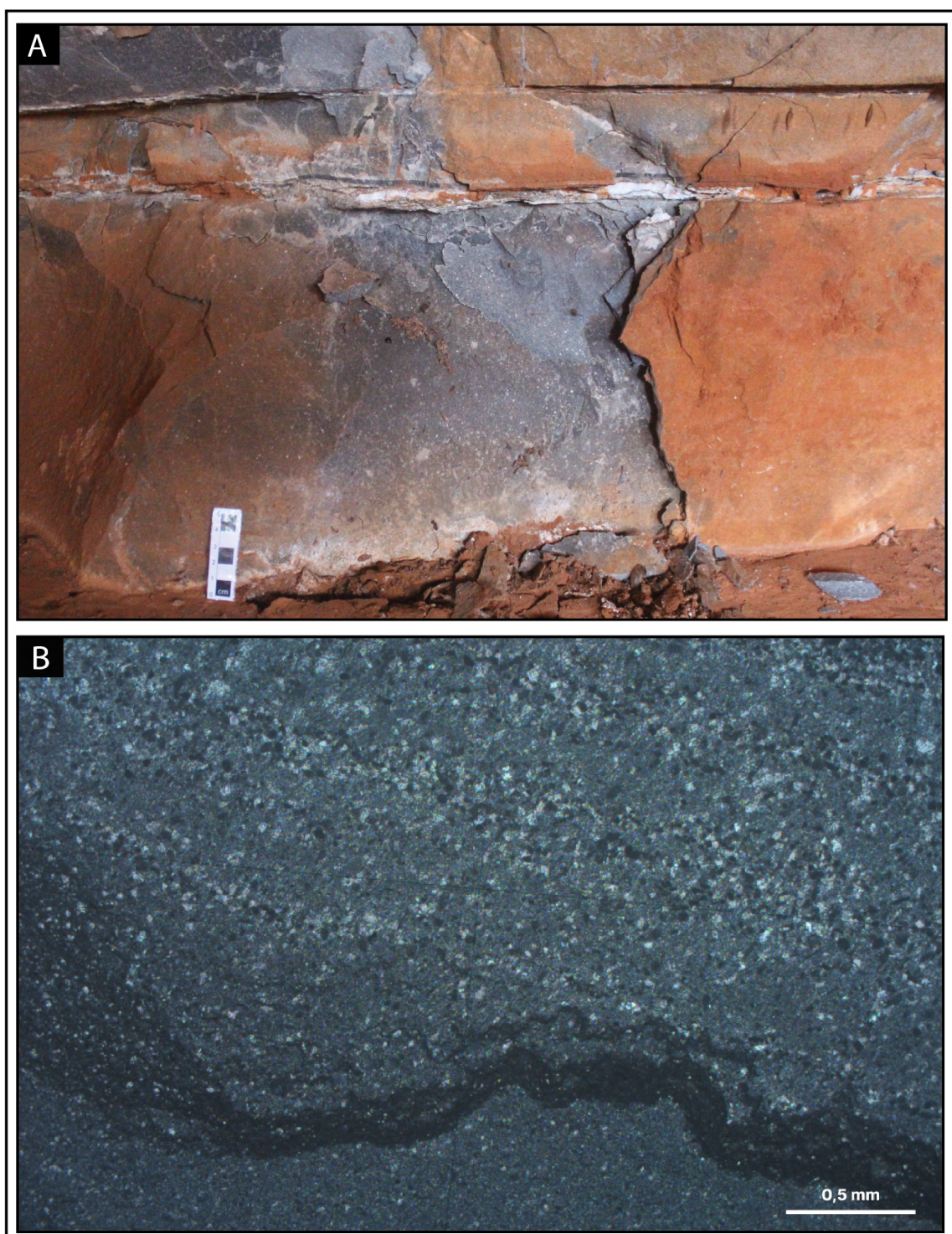


Fig 12 - (A) Aspecto de campo da fácies mudstone maciço e (B) Aspecto microscópico da fácies mudstone maciço, podendo ser observada a presença de estilólitos na porção inferior da foto.

6.1.2 Intercalação de tapetes microbiais e mudstones

Descrição: rocha carbonática, de coloração cinza claro, com granulação fina formada pela intercalação de níveis com laminação plano-paralela, com superfícies lisas ou crenuladas, e níveis de mudstones, maciços ou com laminação plano-paralela incipiente (Fig 12). As espessuras dessas laminações variam entre milimétricas a centimétricas, no máximo 15cm, com porções mais adensadas geralmente para o topo das camadas. São identificadas feições de dissolução e estilólitos em diferentes porções das seções. Esta é a fácies que predomina em todos os perfis levantados, composta por pacotes tabulares com grande extensão e espessuras variando entre centimétrica a métrica, chegando a pacotes com 9m.

Interpretação: Esta fácies pode ser interpretada como microbialitos, que são rochas laminadas formadas por cianobactérias mucilaginosas e filamentosas, a partir de processos de precipitação de sedimentos (Tucker, 2001). As porções laminadas correspondem a *microbial mats*, que são tapetes, nesse caso planares, formados por comunidades de bactérias, que geram as laminações milimétricas, sendo que as diferentes espessuras indicam diferentes níveis de crescimento microbial (Tucker, 2001). No registro, as intercalações observadas nos microbialitos são entre as porções orgânicas e porções de micrita, por vezes dolomitizada (Tucker, 2001), correspondendo ao que é observado na fácies. Esses tapetes microbiais podem ser formados em diferentes latitudes e em diferentes profundidades, estando mais concentrados em ambientes intermaré e inframaré, sendo os fatores ambientais, como profundidade da lâmina d'água, variações na maré, energia das ondas, frequência de exposição e taxa de sedimentação, os controladores das variações morfológicas (Tucker, 2001).

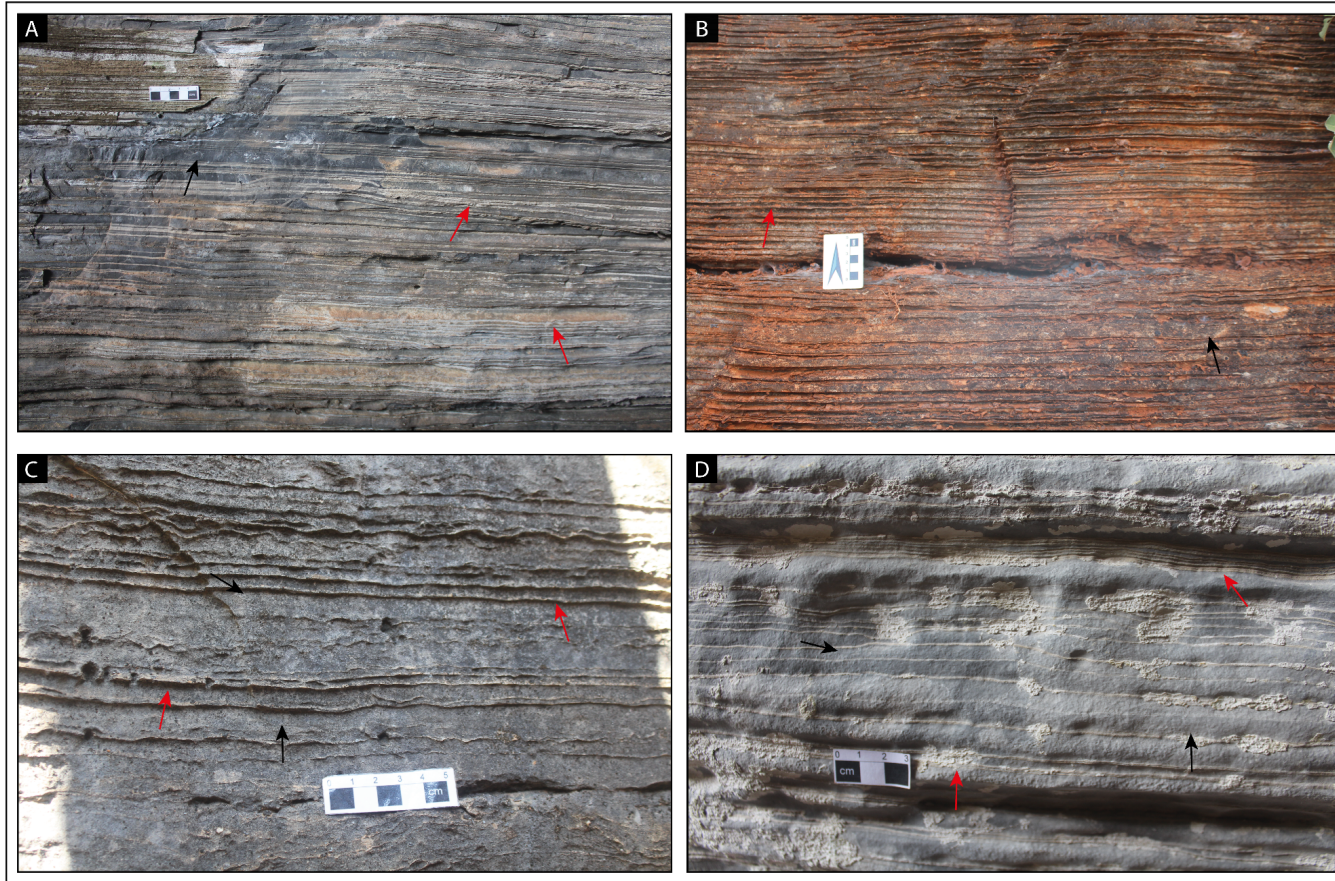


Fig 13 - (A) (B) (C) (D) Aspecto de campo da fácies Intercalação de tapetes microbiais e mudstones. As setas vermelhas nas fotos indicam as laminações dos tapetes microbiais e as setas pretas indicam as porções de mudstone, podendo ser observadas as diferentes variações de espessuras.

6.1.3 Estromatólito

Descrição: rocha carbonática, com coloração variando entre cinza claro, nas porções menos intemperizadas, e ocre, nas porções mais intemperizadas, com laminação finamente espaçada (Fig 13). Essas lâminas apresentam base mais regular e topo convexo. As morfologias encontradas correspondem a formas levemente convexas (LLH) e dômicas (LLH-SH), segundo a classificação proposta por Logan *et al.* (1964). Os domos possuem comprimentos entre 15-20 cm e alturas 1-5 cm. Há também porções localizadas com domos maiores, chegando a comprimentos de 70 cm e alturas de 15 cm. A fácies é identificada em pacotes tabulares, com espessuras centimétricas, variando entre 10 e 40 cm, e com grande extensão lateral.

Interpretação: Segundo Riding (1999), estromatólitos são depósitos microbiais bentônicos laminados. Eles são geralmente formados por processos de *trapping* e *binding* de sedimentos ou por precipitação, sendo classificados como estromatólitos aglutinantes (Tucker, 2001; Flugel 2010). Os estromatólitos identificados na fácies podem ser classificados também como estromatólitos fino laminado, com laminações bem marcadas pela intercalação de sedimentação fina e desenvolvimento microbial (Tucker, 2001; Flugel 2010). A partir da classificação de Logan *et al.* (1964), os estromatólitos identificados podem ser classificados entre as categorias LLH e LLH-SH, onde as porções mais laminadas correspondem a um ambiente mais proximal, intermaré, e as porções mais dômicas correspondem a um ambiente inframaré, com maior profundidade de lâmina d'água (Flugel 2010).

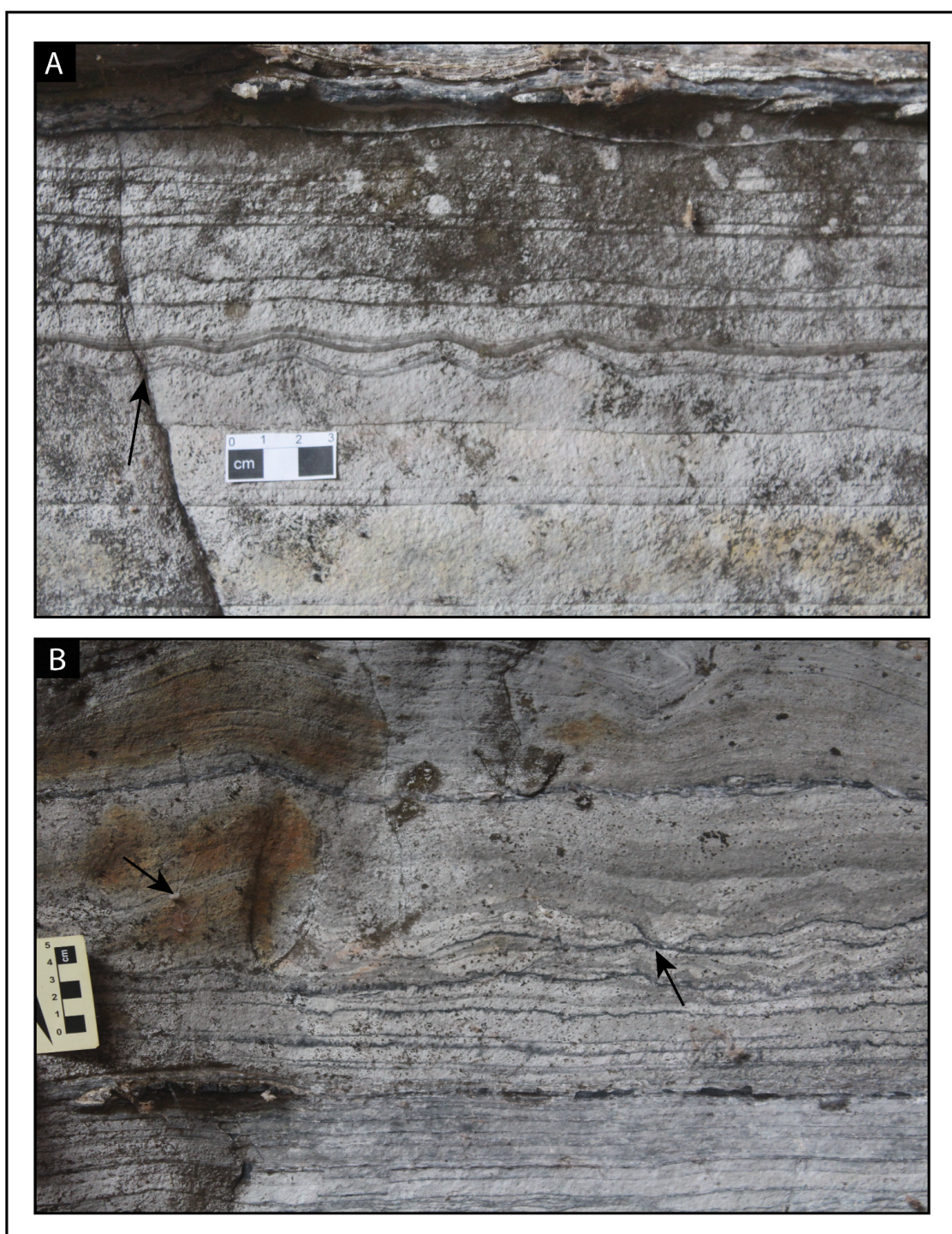


Fig 14 - (A) (B) Aspecto de campo da fácies Estromatólito. Em (A) é possível observar a formação de domos menores, indicados pela seta, com uma laminação pouco perturbada, já em (B) são observados domos maiores, indicado pela seta, com laminação crenulada.

6.1.4 Grainstone

Descrição: Grainstone cinza claro, com laminação ondulada de baixo ângulo e/ou laminação ondulada truncada, localmente, com presença de ripples no topo das camadas (Fig 14). Em algumas porções é possível identificar a presença de intraclastos de mudstones, geralmente apresentando orientação caótica, mas em algumas porções marcando a laminação. Essa fácies forma pacotes lenticulares, com pouca extensão lateral, e espessuras variadas, com no máximo 80cm. Em lâmina, foi possível confirmar a classificação da rocha, além de avaliar a porosidade, que foi totalmente obliterada pela cimentação e compactação.

Interpretação: Grainstones são litologias comumente associadas a plataformas e rampas carbonáticas, podendo ser associadas a ambientes com moderada a alta energia, como em porções intermaré (Flugel, 2010). Neste ambiente, são geradas as estruturas observadas na fácies, como as laminações de baixo ângulo e as laminações onduladas truncadas. As laminações podem ser interpretadas como *hummocky cross stratification*, geradas a partir da passagem de ondas de tempestade (Tucker, 2001). A presença de intraclastos de mudstones é comum nesse tipo de litologia, sendo transportados por ondas de tempestade (Tucker, 2001). Além disso, a presença de ripples no topo de algumas camadas indica a diminuição da energia após a passagem das tempestades (Flugel, 2010).

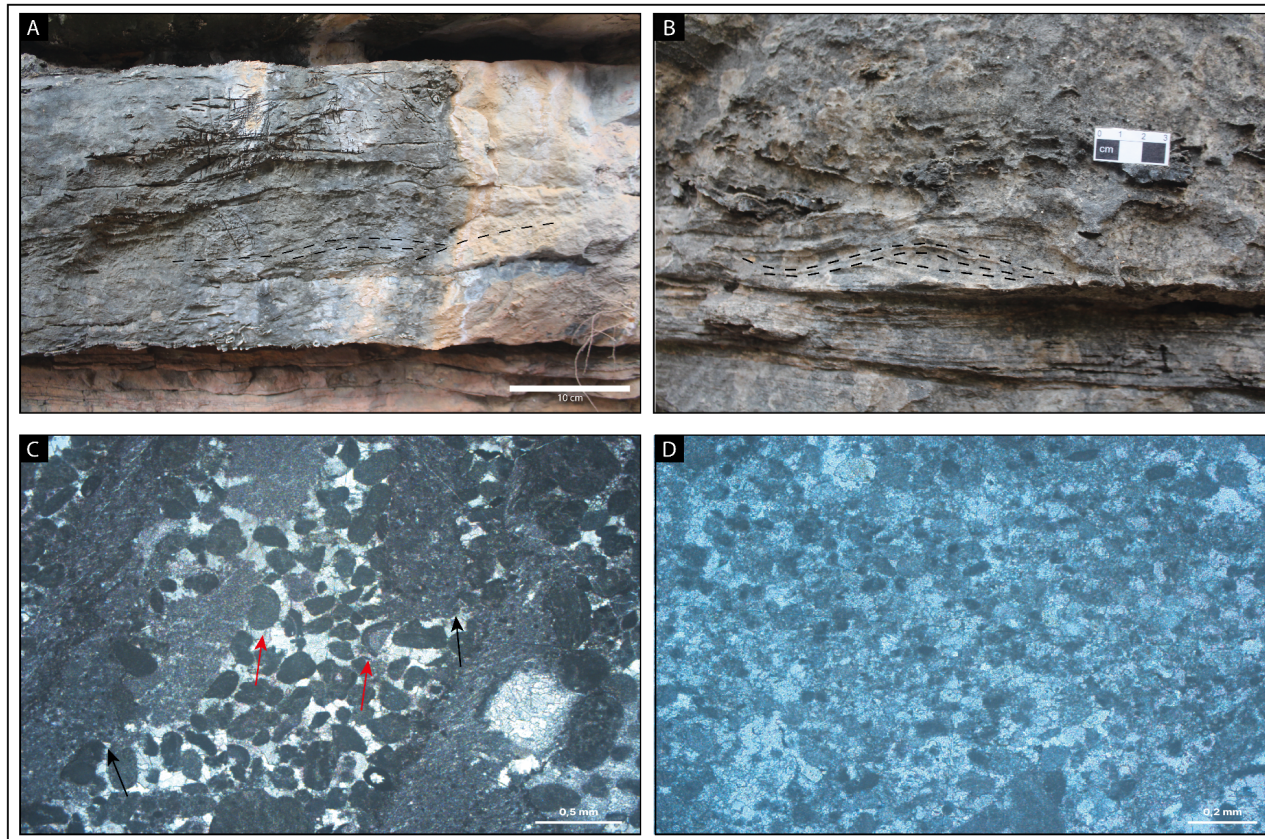


Fig 15 - (A) (B) Aspecto de campo da fácies Grainstone. Em (A) é possível observar a laminação de baixo ângulo e em (B) o detalhe das ripples no topo das camadas. (C) (D) Mostram o aspecto microscópico da fácies, com detalhe em (C) para os intraclastos de mudstone (seta preta) e matriz peloidal com alguns oncoólito (setas vermelhas) e em (D) para a matriz mais fina e intensa cimentação.

6.1.5 Rudstone

Descrição: Rudstone cinza claro suportado pelos grãos com mais de 10% dos grãos maiores que 2 mm (Fig 15). Os clastos são de mudstones e estromatólitos, com forma tabular, podendo variar entre sub-arredondados e sub-angulosos, com tamanhos entre milimétricos a centimétricos, com no máximo 12 cm. As camadas apresentam estrutura maciça, por vezes com porções com laminação ondulada truncada incipiente, marcada pela orientação dos intraclastos. Na camadas maciças, os intraclastos estão dispostos de forma caótica e nas camadas em que estão concentrados na base, geralmente estão imbricados. Formam pacotes com espessuras centimétricas a métricas, no máximo 1,8 m, podendo ser tabulares ou lenticulares. Nos pacotes lenticulares é possível observar uma variação lateral na quantidade de intraclastos, com porções com mais intraclastos e porções com menos. Em lâmina, foi possível confirmar a composição dos intraclastos (mudstones) e avaliar a porosidade das amostras, sendo que esta está completamente obliterada por compactação e cimentação.

Interpretação: Rudstones são rochas clasto suportadas, formadas por processos de erosão e transporte, sendo associados geralmente à passagem de tempestades (Flugel, 2010). Esse tipo de depósito é comum em rampas carbonáticas, na qual as ondas de tempestades transportam sedimentos distais pouco consolidados e os redepositam em porções mais proximais (Flugel, 2010). Esse tipo de rudstone pode ser chamado também de tempestito (Ager, 1974). Os tempestitos distais formam camadas pouco espessas, mais raras no registro, bem preservadas, com composições de intraclastos associados a sedimentos de ambientes deposicionais mais profundos, como mudstones, e a base das camadas tende a ser plana. (Flugel, 2010). Essas características são muito similares às observadas em campo, com camadas locais, com base plana e intraclastos de mudstones. Também são comuns a presença de laminações onduladas (Flugel, 2010), como as observadas em campo, e estão relacionadas a porções mais distais das rampas carbonáticas (Flugel, 2010).

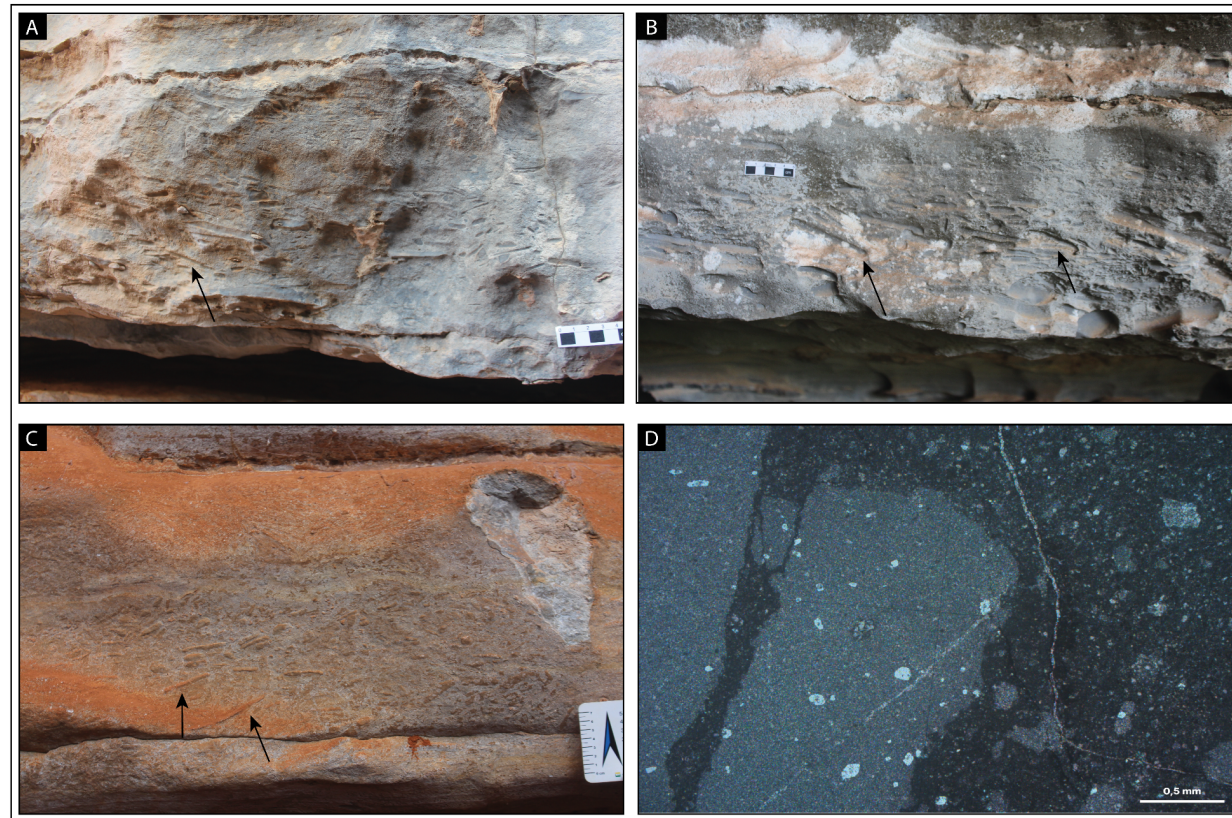


Fig 16 - (A) (B) (C) Aspecto de campo da fácies Rudstone. Em (A) é possível observar a presença de intraclastos mais organizados na base (indicado pela seta) e mais caóticos no top, em (B) a presença de intraclastos imbricados (indicado pela seta) e em (C) a presença de intraclastos dispostos de forma caótica (indicado pela seta). (D) Mostra o aspecto microscópico da fácies, com detalhe para os intraclastos de mudstone

6.2 ASSOCIAÇÃO DE FÁCIES

Com base nas fácies descritas e observando as suas relações em campo, foram estabelecidas três associações de fácies distintas.

6.2.1 Associação de fácies de rampa interna - intermaré proximal (AF1)

Descrição: Esta associação de fácies é composta pelas fácies de intercalação de microbial mats e mudstones e de estromatólitos (Fig 16). Forma espessos pacotes tabulares, contínuos e rastreáveis por todos os afloramentos, sendo a principal associação identificada, presente em todos os perfis. As camadas da fácies intercalação de tapetes microbiais e mudstones são mais espessas, variando de 50cm a 3m, e se intercalam com níveis de estromatólitos, menos espessos, variando entre 10cm e 70cm. Os contatos entre elas é plano, muitas vezes parecendo que gradam de uma para a outra. A associação está presente em todos os níveis dos perfis, desde a base até o topo.

Interpretação: Esta associação de fácies é identificada como uma associação de rampa interna, na porção intermaré proximal. A presença de espessos pacotes de intercalação de microbial mats e mudstones indica que a deposição ocorreu em ambientes de inframaré ou intermaré (Tucker, 2001). Como não há nenhuma feição que indique exposição subaérea por longos períodos, o ambiente de intermaré condiz com a associação. Ele é definido como o ambiente perto da zona de costa, entre os níveis de maré alta e baixa, variando entre períodos de afogamento e exposição ao longo de um dia (Flugel, 2010). Utilizando a classificação de Logan *et. al.* (1964), as morfologias definidas para as estromatólitos condiz com os tipo LLH e LLH-SH, que também estão associados com porções mais proximais, na porção interna de rampas carbonáticas, que variam entre o shoreface superior e o nível de ondas de tempo bom, em ambientes mais ou menos agitado, mas com ação de ondas contínuas (Flugel, 2010).

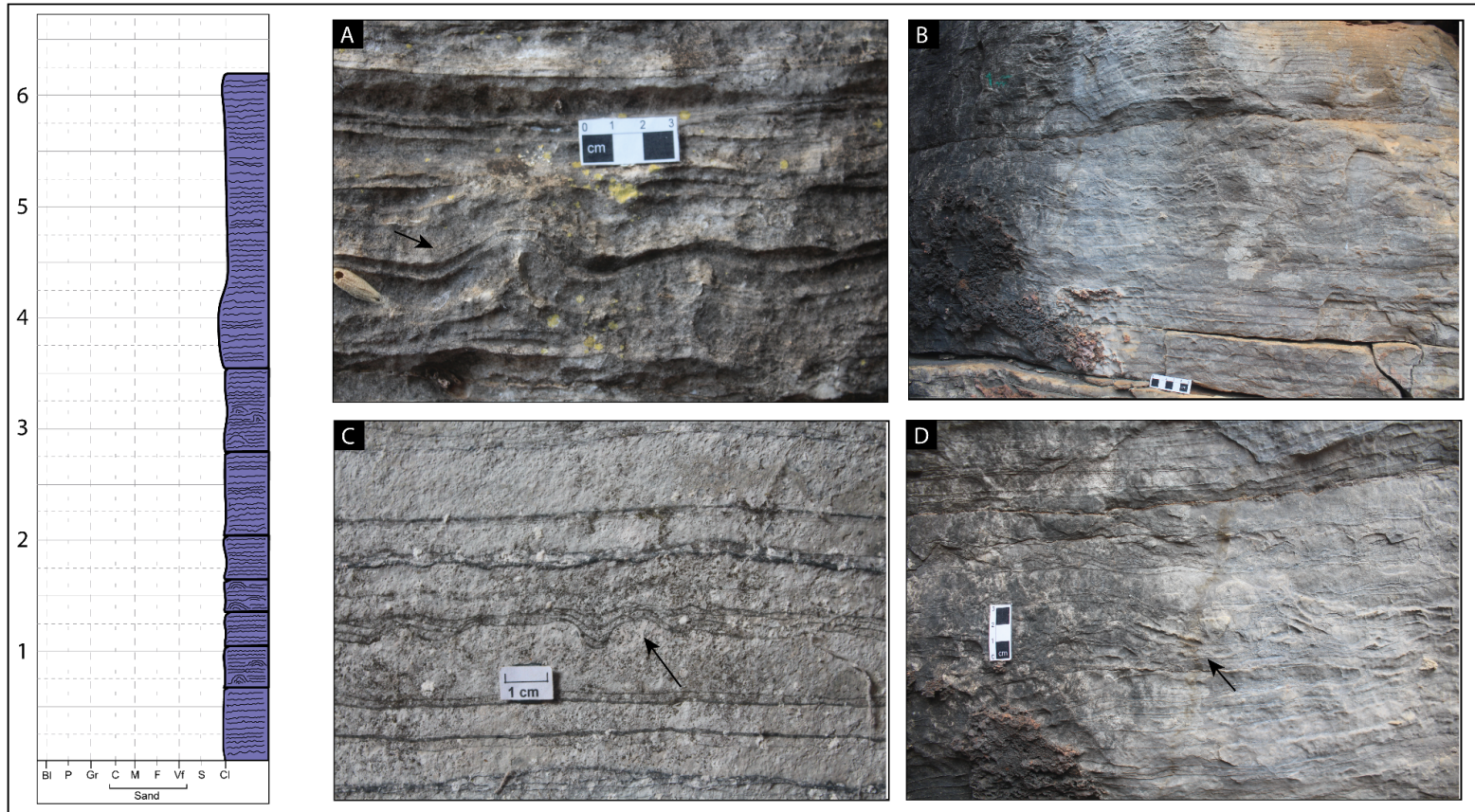


Fig 17 - Associação de Fácies de rampa interna - intermaré proximal. (A) (B) (C) e (D) mostraram características de campo das fácies intercalação de tapetes microbiais e mudstones e de estromatólitos. As setas pretas indicam níveis de estromatólitos intercalados.

6.2.2 Associação de fácies de rampa interna - inframaré distal (AF2)

Descrição: Esta associação de fácies é composta pelas fácies de intercalação de tapetes microbiais e mudstones, de estromatólitos e de mudstones (Fig 17). Ela é identificada em apenas um dos perfis levantados, com uma espessura de 3,2 m, localizada na base do perfil. Forma um pacote tabular, com grande extensão lateral e fácil rastreabilidade. A camada de mudstone tem 60 cm e está na base do pacote, é seguida por um pacote de 1,4m de intercalação de tapetes microbiais e mudstones e depois por um pacote de 30cm de estromatólitos. Essas duas últimas fácies voltam a se intercalar até o final do pacote. Os contatos entre estas fácies são planos.

Interpretação: Esta associação de fácies é identificada como sendo de rampa interna, na porção inframaré distal. A alternância entre as fácies de intercalação de tapetes microbiais e mudstones e de estromatólitos, indica um ambiente mais proximal na rampa, a partir das morfologias de estromatólitos observadas (LLH e LLH-SH) segundo a classificação de Logan *et. al.* (1964). A presença da camada de mudstone indica um ambiente de mais baixa energia, mas não necessariamente um ambiente distal da rampa (Flugel, 2010), podendo ter sido gerado a partir da precipitação bioquímica e decomposição microbial (Tucker, 2001), em um momento onde as condições físico-químicas do ambiente não permitiram o desenvolvimento dos tapetes microbiais, restando apenas os sedimentos fixados pelos processos de *binding e trapping*. Essas mudanças podem ser resultantes de um processo de aumento do nível da lâmina d'água, que permitiu a deposição em um ambiente de inframaré distal, que ainda era dominado pela ação das ondas, mas com menos energia que a porção proximal.

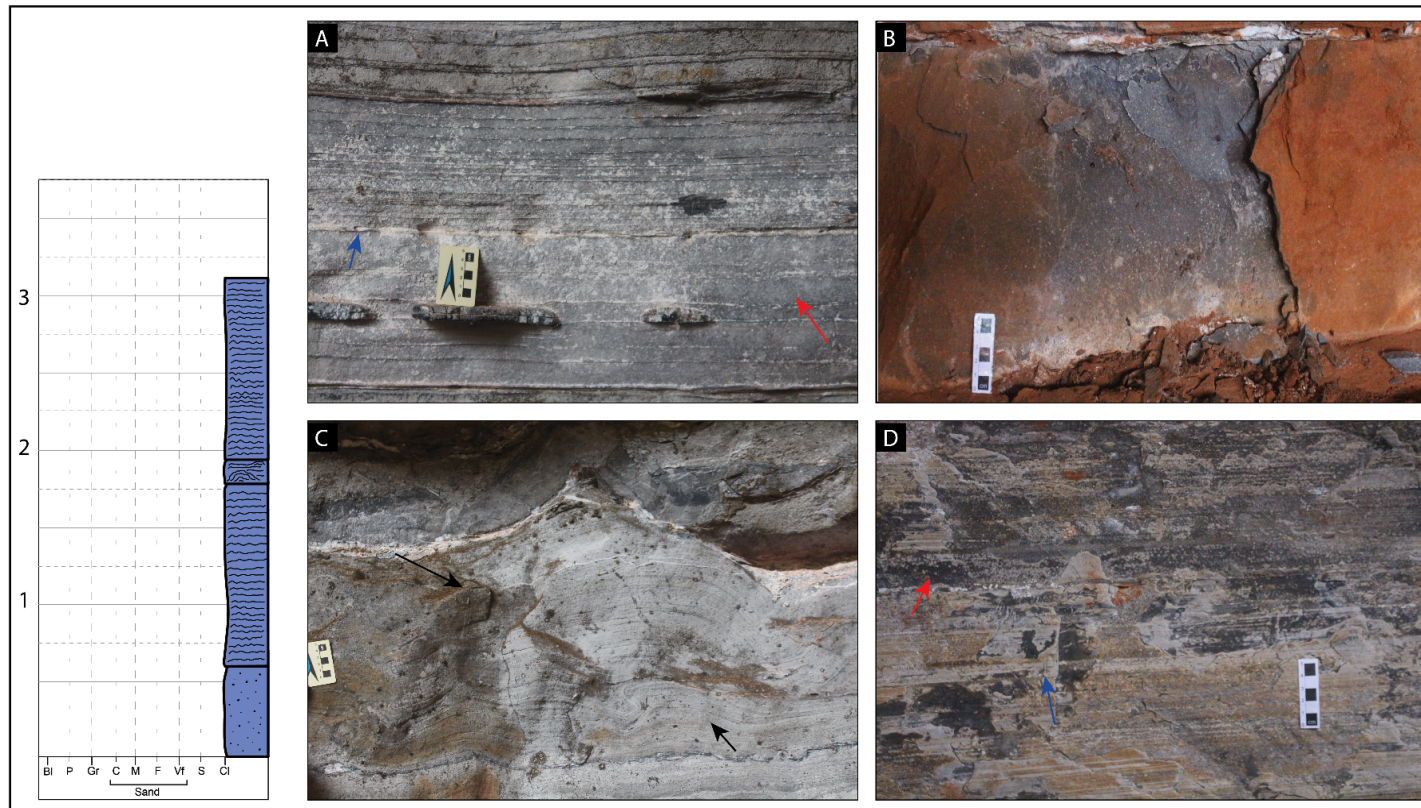


Fig 18 - Associação de fácies de rampa interna - inframaré distal. (A) e (D) mostram as feições de campo da fácies de Intercalação de tapetes microbiais e mudstones, as setas vermelhas indicam as porções de mudstones e as setas azuis as porções da laminação dos tapetes microbiais. (B) mostra a feição de campo da fácies mudstone maciço e (C) mostra a feição de campo da fácies Estromatólito, com as setas pretas indicando as porções mais perturbadas da laminação

6.2.3 Associação de fácies de rampa intermediária dominada por ondas de tempestade (AF3)

Descrição: Esta associação de fácies é composta pelas fácies de grainstones e rudstones (Fig 18). Ela é identificada em todos os perfis levantados, formando pacotes por vezes tabulares, por vezes lenticulares, com boa rastreabilidade pelo afloramento no primeiro caso e com menor rastreabilidade no segundo. Esses pacotes variam entre 2,1 m e 4 m e estão localizados nas porções centrais dos perfis. Os contatos entre as fácies é plano e o contato dessa associação com as outras fácies também é plano. Geralmente a base dessa associação é composta por rudstones, com clastos imbricados ou por vezes caóticos, seguido por camadas de grainstones com laminações onduladas de baixo ângulo e/ou laminações onduladas truncadas, às vezes com ripples no topo da camada.

Interpretação: Esta associação de fácies é identificada como sendo de rampa intermediária dominada por ondas de tempestade. Grainstones estão associados a ambientes de moderada a alta energia e rudstones estão associados a processos de erosão e transporte (Flugel, 2010). Essa associação pode ser explicada pela deposição de rudstones a partir da redeposição de sedimentos distais transportados para a costa por ondas de tempestades (Flugel, 2010), seguida pela deposição de grainstones com estratificação cruzada hummocky gerados pela passagem dessas ondas de tempestades, que, conforme vão perdendo energia, geram ripples no topo das camadas (Tucker, 2001, Flugel, 2010). Os depósitos gerados por ondas de tempestades podem ser confundidos com depósitos turbidíticos, mas algumas feições ajudam a distingui-los. Depósitos turbidíticos não possuem estratificação cruzada do tipo hummocky, não apresentam wave ripples, apresentam gradação inversa, geralmente formam camadas com extensa continuidade lateral e pacotes espessos (Flugel, 2010). Essas características não condizem com as observadas em campo, além disso, quando observadas as feições de tempestitos (presença de estratificação cruzada do tipo hummocky, wave ripples, camadas sem grandes extensões laterais, pouco espessas e geralmente associadas à fácies de águas rasas) (Flugel, 2010), percebe-se que os dados encaixam muito melhor nesse contexto. Esses depósitos são posicionados na porção intermediária

de rampas carbonáticas por esse intervalo ser caracterizado entre os níveis de base de ondas de tempo bom e ondas de tempestades, com os sedimentos sendo frequentemente retrabalhados pela ação de ondas de tempestade e swells (Flugel, 2010).

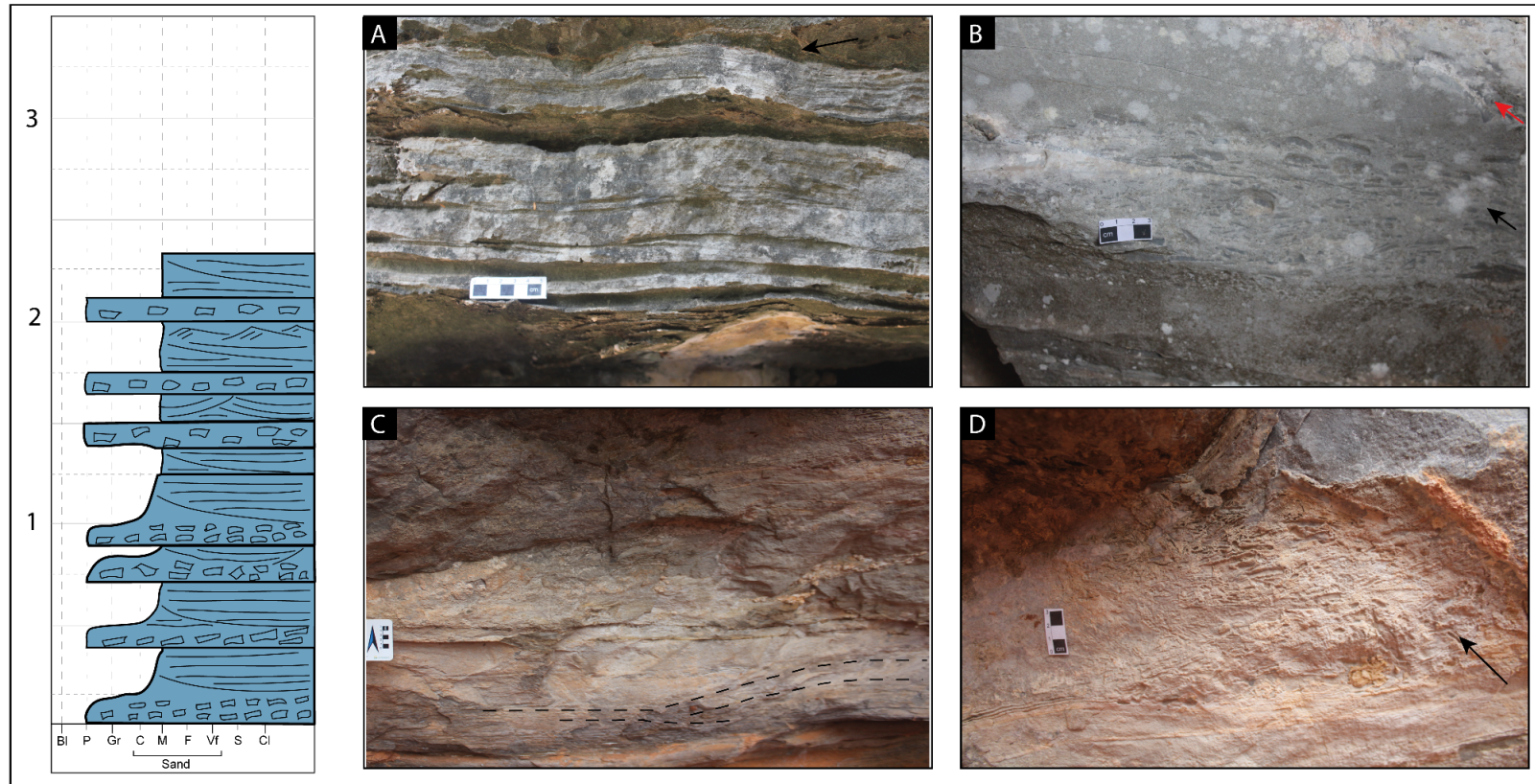


Fig 19 - Associação de fácies de rampa intermediária dominada por ondas de tempestade. (A) mostra a presença de ripples (indicada pela seta) no topo da camada; (B) mostra a feição de campo da passagem da fácies de rudstone para grainstone (setas preta e vermelha respectivamente); (C) mostra a feição de campo da fácies grainstone com laminação ondulada de baixo ângulo e (D) mostra a feição de campo da fácies rudstone.

6.3 SISTEMA DEPOSICIONAL

A partir das análises de fácies e com a construção das associações de fácies é possível estabelecer que a porção estudada da Formação Salitre foi depositada em um ambiente marinho raso, com o modelo deposicional de uma rampa carbonática homoclinal, proposto por Read (1982), sendo o mais adequado para o intervalo.

Rampas carbonáticas homoclinais são caracterizadas por apresentarem mergulhos suaves (menores que 1°) e relativamente uniformes, sem a presença de depósitos de fluxo de gravidade em porções mais distais (Read, 1982). Podem ser divididas em três ambientes deposicionais (rampa interna, rampa intermediária e rampa externa), com os níveis de base de ondas de tempo bom e de ondas de tempestades sendo os principais critérios para essa sub-divisão (Burchette & Wright, 1992).

As associações de fácies identificadas foram posicionadas nas porções de rampa interna - intermaré proximal, rampa interna - intermaré distal e rampa intermediária dominada por ondas de tempestades. Essas associações seguem um padrão de empilhamento transgressivo, no qual as fácies mais proximais estão na base das seções e são sucedidas pelas fácies distais.

Esse padrão de empilhamento cria condições favoráveis para o aumento na produção biogênica (Flugel, 2010), podendo ser um dos fatores que possibilitou a presença de estromatólitos e tapetes microbiais em larga escala. Além disso, a inexistência de predadores e competição por habitats durante o Pré-Cambriano pode ser outro fator que auxiliou na sua expansão (Riding, 2000).

A associação de fácies de rampa intermediária dominada por ondas de tempestade possibilita o entendimento da dinâmica de tempestades que atuavam na costa. Pode-se interpretar que as tempestades eram eventos episódicos, de grande escala, com energia para retrabalhar e redepositar os sedimentos, mas gerando pacotes pouco espessos. Essa associação de fácies, quando comparada com as outras, tende a ser mais rara no registro, indicando que esses eventos ocorriam espaçadamente.

Com base nas informações adquiridas a partir da análise dos dados, foi criado um modelo deposicional simplificado (Fig 19) para a área estudada.

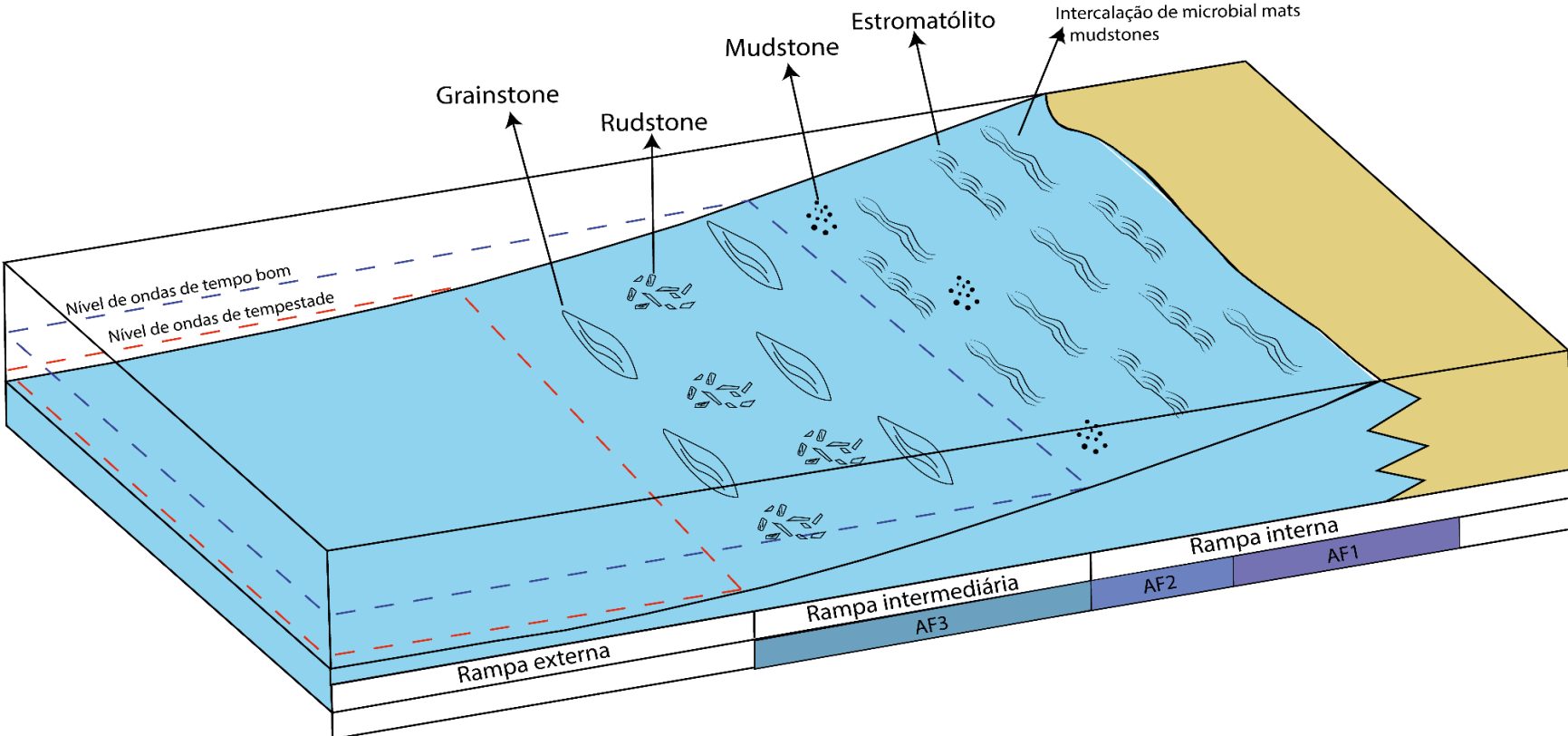


Fig 20 - Modelo deposicional conceitual para a área de estudo.

6.4 RAMPAS CARBONÁTICAS COMO ANÁLOGOS A RESERVATÓRIOS DE HIDROCARBONETOS

Rampas carbonáticas formam importantes e espessos reservatórios de hidrocarbonetos, sendo os reservatórios Pré-Cambrianos quase todos relacionados a depósitos microbiais, depositados tanto em ambientes de baixa quanto de alta energia (Burchette & Wright, 1992; Li, 2022). Nos últimos anos, uma série de reservatórios relacionados a depósitos microbiais foram identificados, citando como exemplo os das bacias de Sichuan e Tarim, na China e a bacia de Salt, no Oman, todas com idades do final do Pré-Cambriano (Li, 2022), condizentes com as idades da Formação Salitre.

No estudo de reservatórios microbiais, entender as diferentes morfologias dos estromatólitos é um fator essencial para avaliar os seus processos diagenéticos e a porosidade. Os depósitos relacionados a ambientes de mais alta energia formam reservatórios de mais alta qualidade, sendo as morfologias de estromatólitos relacionados a esses ambientes, como os trombolitos, ideais. (Li, 2022). Depósitos relacionados a ondas de tempestade também podem formar bons reservatórios, gerando grainstones e packstones com alta porosidade primária (Tucker, 2001).

Com os dados obtidos a partir do levantamento de perfis de campo e das análises petrográficas, pode-se interpretar que a Formação Salitre não funciona como um bom reservatório de hidrocarbonetos.

As fácies dominadas por microbiais formam espessos pacotes, sendo as morfologias identificadas dos tipos LLH e LLH-SH (Logan et al, 1964), não ideais para a formação de bons reservatórios. Além disso, elas sofreram um intenso processo de compactação, com formação de estilólitos, e toda a porosidade foi preenchida por cimentação de calcita. Segundo Li (2022), os processos de compactação e cimentação são os principais fatores que diminuem a porosidade dos reservatórios microbiais.

A associação de fácies de rampa intermediária, formada por ondas de tempestade, também poderia ser avaliada como um possível reservatório, porém ela apresenta características similares às das fácies microbiais, com sua porosidade totalmente obliterada por compactação e cimentação. Essa associação de fácies, além disso, não gera camadas espessas, inviabilizando sua utilização para reservatórios.

Assim, a Formação Salitre pode ser utilizada apenas como um análogo ao estudo de reservatórios carbonáticos, auxiliando no entendimento dos processos que levam a deposição de suas fácies e aos processos diagenéticos que impactam reservatórios microbiais.

7 CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado e a partir dos dados obtidos foi possível chegar às seguintes conclusões

- 1) Foram descritas e interpretadas cinco fácies, sendo elas: Mudstone Maciço, Intercalação de tapetes microbiais e mudstones, Estromatólitos, Grainstone e Rudstone.
- 2) Com base nas fácies descritas, foram individualizadas três associações de fácies: Associação de fácies de rampa interna - intermaré proximal, Associação de fácies de rampa interna - inframaré distal e Associação de fácies de rampa intermediária dominada por ondas de tempestade.
- 3) A partir das associações de fácies foi proposto um modelo deposicional para a área estudada, que funcionaria como uma rampa carbonática do tipo homoclinal, sendo condizente com exemplos encontrados na literatura, como o de Leão e Dominguez (1992).
- 4) A porção estudada da Formação Salitre não apresenta características adequadas para ser um reservatório de hidrocarbonetos, porém pode ser utilizada como um análogo, servindo de material de estudo para novas pesquisas na área.
- 5) Com as novas descobertas de reservatórios de hidrocarbonetos associados a rochas microbiais, a Formação Salitre se torna um alvo de estudo interessante e promissor para aumentar o entendimento deste tipo de depósito e sua evolução.

REFERÊNCIAS

- Allem, P. A.; Hoffman, P. F. **Extreme winds and waves in the aftermath of a Neoproterozoic glaciation**. 2004. *Nature*, vol 433, p. 123-127
- Almeida, F.F.M.. **O Cráton do São Francisco**. 1977. *Revista Brasileira de Geociências* 7, 349–364
- Alkmim, F. F., Martins-Neto, M. A.. **Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco craton, eastern Brazil**. 2012. *Mar. Petrol. Geol.* 33, 127–139
- Bonfim, L. F. C., Rocha, A. J. D., Pedreira, A. J., Morais, J. C. P., Guimares, J. T., & Tesch, N. A. **Projeto Bacia de Irecê**. 1985. Salvador, CPRM, (Relatório Final)
- Burchette, T. P & Wright, V. P. **Carbonate ramp depositional systems**. 1992. *Sedimentary Geology*, 79, 3-57.
- Corsetti, F. A.; Lorentz, N. J. **On Neoproterozoic Cap Carbonates as Chronostratigraphic Markers**. 2006. *Neoproterozoic Geobiology and Paleobiology*, 273-294.
- Figueiredo, F. T., De Almeida, R. P., Tohver, E., Babinski, M., Liu, D., & Fanning, C. M. **Neoproterozoic glacial dynamics revealed by provenance of diamictites of the Bebedouro Formation, São Francisco Craton, Central Eastern Brazil**. 2009. *Terra Nova*, 21(5), 375-385
- Flügel, E., & Munnecke, A. **Microfacies of carbonate rocks: analysis, interpretation and application**. 2010. Springer-Verlag
- Guimarães, J.T.. **A Formação Bebedouro no Estado da Bahia: Faciologia, Estratigrafia e Ambientes de Sedimentação**. 1996. Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, p. 146p
- Guimarães, J.T.; Alkmim, F.F.; Cruz, S.C.P. **Geologia da Bahia, Pesquisa e Atualização**. 2012. Salvador: CBPM, Série Publicações especiais, v. 13, p. 33- 85.

- Guimarães, J. T.; Missi, A.; Pedreira, A. J.; Dominguez, J. M.L. **The Bebedouro Formation, Una Group, Bahia (Brazil)**. 2011. The Geological Record of Neoproterozoic Glaciations. Cap 47, p. 504-508
- Hoffman, P. F.. **A Neoproterozoic Snowball Earth**. 1998. Science 281, 1342–1346.
- Hoffman, P. F. **Pan-glacial- a third state in the climate system**. 2010. Geology Today. Vol 25
- Hoffman, P.F., Schrag, D.P.. **The snowball Earth hypothesis: testing the limits of global change**. 2002. Terra Nov. 14, 129–155.
- Hyde, W. T.; Crowley, T. J.; Baum, S. K.; Peltier, W. R. **Neoproterozoic “Snowball Earth” simulations with a coupled climate/ice-sheet model**. 2000. Nature, 405: 425-429.
- Kaufman, A.J., Knoll, A.H.. **Neoproterozoic variations in the C-isotopic composition of seawater: stratigraphic and biogeochemical implications**. 1995. Precambrian Res. 73, 27–49.
- Kennedy, M.J.. **Stratigraphy, sedimentology, and isotopic geochemistry of Australian Neoproterozoic Postglacial cap-dolostones: Deglaciation, S13C excursions, and carbonate precipitation**. 1996. J. Sediment. Res. 66, 1050–1064
- Leão, Z. M. A. N. & Dominguez, J. M. L. **O Caráter da Sedimentação Carbonática no Proterozóico Superior: o exemplo da Bacia de Irecê**. 1992. Revista Brasileira de Geociências
- Li, C.; Liu, K.; Liu, J.. **A petroliferous Ediacaran microbial-dominated carbonate reservoir play in the central Sichuan Basin, China: Characteristics and diagenetic evolution**. 2022. Precambrian Research.
- Logan, B. W., Rezak, R., & Ginsburg, R. N.. **Classification and environmental significance of algal stromatolites**. 1964. Journal of Geology, 72(1): 68–83.

Misi, A.. **O Grupo Bambuí no estado da Bahia.** 1979. Geologia e recursos minerais do estado da Bahia: Textos básicos. Salvador, CPM, 1, 119-154.

Misi, A., & Kyle, J. R. (1994). **Upper Proterozoic carbonate stratigraphy, diagenesis, and stromatolitic phosphorite formation, Irecê Basin, Bahia, Brazil.** 1994. Journal of Sedimentary Research, 64(2)

Misi, A., & Silva, M. G. **Chapada Diamantina Oriental, Bahia.**1996. Geologia e Depósitos. Salvador, CPRM, (Série de Roteiros Geológicos). 194p

Misi, A., & Souto, P. **Controle estratigráfico das mineralizações de chumbo, zinco, fluor e bário no Grupo Bambuí, parte leste da Chapada de Irecê (Bahia).** 1975. Revista Brasileira de Geociências, 5(1): 30–45

Misi, A., Veizer, J., 1998. **Neoproterozoic carbonate sequences of the Una Group, Irecê Basin, Brazil: chemostratigraphy, age and correlations.** 1998. Precambrian Res. 89, 87–100.

Nogueira, A. C. R.; Riccomini, C.; Sial, A. N.; Farchild, T. R. **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.** 2003. Geology, Vol. 31, p. 613-616.

Read, J.F. **Carbonate platforms of passive (extensional) continental margin types, characteristics and evolution.** 1982. Tectonophysics, 81, 195

Reading, H. G.. **Sedimentary Environments: Process, Facies and Stratigraphy.** 1996. Blackwell Science, 688p

Riding, R. **Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms.** 2000. Sedimentology, p. 179-214

Santana, A. V. A.,. **Análise estratigráfica em alta resolução em Rampa carbonática dominada por microbialitos, Formação salitre, Bacia de Irecê, Bahia.** 2016. Tese de doutorado.

Santana, A., Chemale, F., Scherer, C., Guadagnin, F., Pereira, C., Santos, J. O. S. **Paleogeographic constraints on source area and depositional systems in the**

Neoproterozoic Irecê Basin, São Francisco Craton. 2016. Journal of South American Earth Sciences

Scholle, P. A.; Ulmer-Scholle, D. **A Color Guide to the Petrography of Carbonate Rocks: Grains, Textures, Porosity, Diagenesis.** AAPG Memoir, 2003, 486p.

Sial, A.N., Dardenne, M.A., Misi, A., Pedreira, A.J., Gaucher, C., Ferreira, V.P., Silva Filho, M.A., Uhlein, A., Pedrosa-Soares, A.C., Santos, R.V., Egydio-Silva, M., Babinski, M., Alvarenga, C.J.S., Fairchild, T.R., Pimentel, M.M. **The São Francisco Palaeocontinent.** 2009. Developments in Precambrian Geology, v16, Elsevier, pp. 31-69

Souza, S. L., Brito, R. W. S., & Silva, P. C. R. . **Estratigrafia, Sedimentologia e Recursos Minerais da Formação Salitre na Bacia de Irecê, Bahia.** 1993. Salvador, Companhia Baiana de Pesquisa Mineral (CBPM), (Série Arquivos Abertos 2), 36 p

Terra, G. J. S., Spadini, A. R., França, A. B., Sombra, C. L., Zambonato, E. E., Juschaks, L. C. S., ... Winter, W. R.. **Classificação de rochas carbonáticas aplicável às bacias sedimentares brasileiras.** 2010. Boletim de Geociências Petrobras, 18(1): 9–29.

Tucker, M. E., & Wright, V. P.. **Carbonate Sedimentology.** 1990. Wiley-Blackwell, p. 496.

Tucker, Maurice E. **Sedimentary petrology : an introduction to the origin of sedimentary rocks - 3rd ed..** 2001. Blackwell Science, p. 262

Walker, R. G.. **Facies Models Revisited.** 2006. Tulsa, SEMP Special Publication, v. 84, p. 19- 84.

Walker, R. G., & James, N. P.. **Facies Models: Response to sea level change.** 1992. Toronto, Association of Canada, 409p