

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
Instituto De Geociências  
Programa de Pós-Graduação Em Geologia

Samuel Amaral Moura Silva

**ESTRATIGRAFIA DE SEQUÊNCIAS DE ALTA RESOLUÇÃO E  
EVOLUÇÃO PALEOAMBIENTAL DOS CARBONATOS DE ÁGUA  
RASA DA FORMAÇÃO LAGOA DO JACARÉ (EDIACARANO-  
CAMBRIANO), GRUPO BAMBUÍ, BRASIL-MG**

**Nº 231**

**Belo Horizonte**

**Data: 25/11/2021**

**Samuel Amaral Moura Silva**

**ESTRATIGRAFIA DE SEQUÊNCIAS DE ALTA RESOLUÇÃO E  
EVOLUÇÃO PALEOAMBIENTAL DOS CARBONATOS DE ÁGUA  
RASA DA FORMAÇÃO LAGOA DO JACARÉ (EDIACARANO-  
CAMBRIANO), GRUPO BAMBUÍ, BRASIL-MG**

**VersãoFinal**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Uhlein  
Coorientador: Prof. Dr. Gabriel Jube Uhlein

Área de Concentração: Geologia Regional

Belo Horizonte

2021

S586e

2021

Silva, Samuel Amaral Moura.

Estratigrafia de sequências de alta resolução e evolução paleoambiental dos carbonatos de Água Rasa da Formação Lagoa do Jacaré (Ediacaranocambriano), Grupo Bambuí, Brasil-MG [manuscrito] / Samuel Amaral Moura Silva. – 2021.

91 f., enc. il. (principalmente color.)

Orientador: Alexandre Uhlein.

Coorientador: Gabriel Jubé Uhlein.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2021.

Área de concentração: Geologia Regional.

Bibliografia: f. 88-91.

1. Geologia estratigráfica – Teses. 2. Carbonatos – Teses. I. Uhlein, Alexandre. II. Uhlein, Gabriel Jubé. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 551.7(815.1)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**ESTRATIGRAFIA DE SEQUÊNCIAS DE ALTA RESOLUÇÃO E EVOLUÇÃO PALEOAMBIENTAL DOS CARBONATOS DE ÁGUA RASA DA FORMAÇÃO LAGOA DO JACARÉ (EDIACARANO-CAMBRIANO), GRUPO BAMBUÍ, BRASIL – MG**

**SAMUEL AMARAL MOURA SILVA**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOLOGIA, área de concentração GEOLOGIA REGIONAL, pelo Programa de Pós-graduação em Geologia da UFMG.

Aprovada em 15 de dezembro de 2021, pela banca constituída pelos membros:

Prof. Alexandre Uhlein - Orientador  
UFMG

Prof. Lucas Veríssimo Warren  
UNESP

Prof. André Danderfer Filho  
UFOP

Belo Horizonte, 15 de dezembro de 2021.

## **AGRADECIMENTOS**

Em especial, aos meus orientadores Alexandre Uhlein e Gabriel Jubé Uhlein pela orientação, paciência e pelas valiosas discussões geológicas e ensinamentos durante todas as etapas deste trabalho, além da forte amizade construída nesse caminho geológico.

Agradeço a Capes pela concessão da bolsa.

Agradeço também ao Centro de Pesquisas Professor Manoel Teixeira da Costa (CPMTC) e ao Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN).

Aos meus colegas do Programa de Pós-Graduação da UFMG pelos momentos alegres e descontraídos compartilhados na sala de estudos destinada aos alunos do Programa.

Agradeço, em especial, às minhas tão queridas amigas Carla Sofia de Sousa Marques, Danielle Cardoso de Souza, Maria José Campos de Oliveira e Ana Carolina Liberal Fonseca, pelo apoio. Afinal, sempre me incentivaram, me ajudaram e torceram por mim independentemente da distância.

À Secretária da Pós-Graduação em Geologia – PPGEOL/UFMG, pelo apoio, em especial, ao William Campos Viegas.

Ao Programa de Pós-Graduação do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, pela possibilidade da realização desta pesquisa.

Agradeço a todas as pessoas que direta e indiretamente contribuíram para execução deste projeto.

*Se nos temos almas*

*São feitas do amor que compartilhamos*

*Que não diminui com o tempo*

*Que não se perde com a morte*

(Jack Harper)

## RESUMO

Esta pesquisa apresenta um detalhado estudo estratigráfico de alta resolução e paleoambiental de carbonatos microbiais da Formação Lagoa do Jacaré (Grupo Bambuí) em duas áreas de estudo selecionadas: Ubaí (Norte de Minas Gerais) e Cordisburgo (região central do estado). O Grupo Bambuí registra o preenchimento de uma bacia *foreland*, em resposta à edificação diacrônica dos orógenos Brasília (a oeste) e Araçuaí (a leste), durante o Ediacarano-Cambriano. A partir de uma descrição detalhada (1:20) e do estudo das fácies sedimentares em Ubaí-MG, próximo do Alto de Januária, foram analisados 41 metros do registro de um sistema deposicional de planície de maré contendo 16 diferentes litofácies, agrupadas em três importantes e diagnósticas associações de fácies: 1) supramaré; 2) intermaré; 3) inframaré. Em Cordisburgo, localizado no alto de Sete Lagoas, foram analisados 27 metros do registro de um sistema deposicional laguna-ilha barreira, com reconhecimento de 11 litofácies. No sistema laguna-ilha barreira, também foram definidas três importantes associações: 1) *Back Shoal*; 2) *Shoal* 3) *Shoal Front*. A análise do registro estratigráfico a partir da estratigrafia de sequências de alta resolução permitiu a identificação de ciclos transgressivos e regressivos (T-R) de diferentes ordens. Esses ciclos permitiram inferir sobre as flutuações de curta e longa duração do nível do mar, possibilitando assim uma melhor compreensão sobre a evolução paleoambiental dos registros estudados. Em Ubaí, aliado a essa análise estratigráfica, foi usada a premissa de que a espessura do ciclo de maré é proporcional às flutuações do nível do mar permitindo assim, uma análise semiquantitativa. Nos dois sistemas deposicionais, a ação da maré foi um importante processo deposicional. Os ciclos de maré de espessura métrica, em Ubaí, sugerem a ação de fortes correntes de maré, assim como o registro de estratificações espinha de peixe (*herringbone*) em *grainstones* conglomeráticos de Cordisburgo. Entretanto, em análogos modernos nos grandes mares restritos, a ação das marés não se mostra como um importante processo deposicional e os registros desses ciclos chegam, no máximo, a medidas centimétricas. A partir disso, sugere-se que a deposição dessas duas sequências sedimentares ocorreu durante uma reabertura parcial do mar Bambuí, após um longo período de restrição, como apontam os dados isotópicos, e agora também por dados sedimentológicos e estratigráficos aqui apresentados.

**Palavras-chave:** Carbonatos microbiais; Cicloestratigrafia; Padrão de empilhamento; Planície de maré; Laguna-ilha barreira.

## ABSTRACT

The present study carried out a high-resolution stratigraphic and paleoenvironmental analysis of microbial carbonates from the Lagoa do Jacaré Formation (Bambuí Group). Two areas were selected: Ubaí (North of Minas Gerais) and Cordisburgo (central Minas Gerais state). The Bambu  Group was an Ediacaran-Cambrian foreland basin in which sedimentation was a diachronic response to Brasilia orogen (west) and Araçuaí orogen (east). The detailed stratigraphic survey (1:20) and the study of sedimentary facies in Uba -MG, on the Januária paleo-high, allow us to detail 41 meters of a tidal flat depositional system having 16 different lithofacies, grouped into three diagnostic facies associations: 1) supratidal; 2) intertidal; 3) subtidal. The Cordisburgo record, on the Sete Lagoas paleo-high, is 27 meters-thick and represent an island-barrier depositional system. There are 11 lithofacies in the island-barrier system grouped into three diagnostic lithofacies associations: 1) Back Shoal; 2) Shoal 3) Shoal Front. The high-resolution stratigraphic approach allowed us to identify transgressive and regressive cycles (T-R) of different orders and to infer short-term and long-term fluctuations of the sea level during the deposition. Therefore, it enables a better understanding of the paleoenvironmental evolution of the studied records. In Uba  area, the premise that the thickness of the tidal cycle is proportional to sea-level fluctuations allowed a semi-quantitative analysis. In both depositional systems, tidal action was a crucial depositional process. The metric tidal ranges in Uba , and the herringbone cross-stratification in pebble grainstones, in Cordisburgo, suggest strong tidal currents, different from modern giant enclosed sea analogs, where tidal ranges are less than a few decimeters. Thus, based on sedimentologic and stratigraphic data, we suggest that the shallow-water carbonates from the Lagoa do Jacaré Formation were deposited on a semi-enclosed epicontinental sea subjected to strong tidal forces. In light of this, a partial reopening of the Bambu  Basin after a period of restriction probably occurred during the Lagoa do Jacaré Formation deposition, as previously suggested by isotopic data and now by field data.

**Keywords:** Microbial Carbonates; Cyclostratigraphy; Stacking patterns; Peritidal; Barrier-island.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### CAPÍTULO 1

<b>Figura 1 - Contexto geológico e localização das duas áreas de pesquisa .....</b>	<b>15</b>
<b>Figura 2 - Localização dos pontos (estações) onde foram feitas as descrições sedimentares detalhadas, a norte da cidade de Ubaí-MG .....</b>	<b>16</b>
<b>Figura 3 - Pontos visitados e descritos na região de Cordisburgo-MG .....</b>	<b>17</b>
<b>Figura 4 - Coluna estratigráfica esquemática do Grupo Bambuí .....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 5 - Bloco diagrama esquemático evidenciando as diferentes configurações paleogeográficas nos principais altos estruturais da Bacia Bambuí no período de sua restrição .....</b>	<b>22</b>

### CAPÍTULO 2

<b>Figure 1 - Geological setting and location of the study area in the Ubaí area, north of Minas Gerais state .....</b>	<b>26</b>
<b>Figure 2 - The study area and the 27 outcrops location .....</b>	<b>29</b>
<b>Figure 3 - Lithofacies of the Lagoa do Jacaré Formation .....</b>	<b>30</b>
<b>Figure 4 - Lithofacies of the Lagoa do Jacaré Formation .....</b>	<b>33</b>
<b>Figure 5 - Carbonate microfacies of Lagoa do Jacaré Formation .....</b>	<b>34</b>
<b>Figure 6 - MLb facies .....</b>	<b>36</b>
<b>Figure 7 - Stratigraphic panel .....</b>	<b>37</b>
<b>Figure 8 - Facies determined in the field and their occurrence in the different settings of a peritidal environment .....</b>	<b>38</b>
<b>Figure 9 - Stratigraphic section of the Lagoa do Jacaré Formation in Ubaí area ...</b>	<b>40</b>
<b>Figure 10 - Idealized tidal cycles based on the lithofacies identified in the field and their distribution in the different sub-environments .....</b>	<b>42</b>
<b>Figure 11 - Grainstones that occur above the 620-meter height .....</b>	<b>44</b>
<b>Figure 12 - A schematic block diagram showing the paleoenvironmental evolution in a carbonate mud peritidal depositional system .....</b>	<b>45</b>

### CAPÍTULO 3

<b>Figura 1 - Contexto geológico e localização da área de estudo à sul de Cordisburgo, situada cerca de 100 km a Noroeste de Belo Horizonte-MG .....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 2 - Principais litofácies da Formação Lagoa do Jacaré em Cordisburgo-MG .....</b>	<b>62</b>
<b>Figura 3 - Microfábrica carbonática dos carbonatos da Formação Lagoa do Jacaré, em Cordisburgo, sob nicóis descruzados .....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 4 - Rosetas das paleocorrentes medidas na área de Cordisburgo as quase foram subdivididas segundo a associação de litofácies as quais elas pertencem ....</b>	<b>67</b>
<b>Figura 5 - Principais elementos morfológicos de sistema deposicional de laguna-ilha barreira carbonática .....</b>	<b>68</b>
<b>Figura 6 - Afloramento de aproximadamente 1,5m de altura em que foram identificadas as superfícies limítrofes .....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 7 - Registro de aproximadamente 2 metros de depósitos de <i>washover</i> .....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 8 - Seções colunares com as duas colunas levantadas entre as cotas de 803 a 830 metros sendo a distância entre elas de 500 metros .....</b>	<b>73</b>
<b>Figura 9 - Fácies determinadas em campo e sua ocorrência nos diferentes subambiente do sistema deposicional de laguna-ilha barreira, Formação Lagoa do Jacaré .....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 10 - Coluna estratigráfica da Fm Lagoa do Jacaré na região de Cordisburgo .....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 11 - Bloco diagrama esquemático dos ambientes deposicionais do registro analisado, com evidências às progradações que ocorrem no paleo ambiente de ilha-barreira .....</b>	<b>80</b>

## **LISTA DE TABELAS**

### **CAPÍTULO 1**

### **CAPÍTULO 2**

<b>Table 1 - Lithofacies: Macroscopic characterization and Interpretation .....</b>	<b>31</b>
---	-----------

### **CAPÍTULO 3**

<b>Tabela 1 – Litofácies: descrição e interpretação .....</b>	<b>63</b>
---	-----------

<b>Tabela 2 - Descrição dos elementos arquiteturais identificados .....</b>	<b>69</b>
---	-----------

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO .....	13
CAPÍTULO 1 .....	15
1. APRESENTAÇÃO .....	15
1.1. Localização .....	15
1.2. Objetivos .....	16
1.3. Materiais e métodos .....	16
1.3.1. <i>Análise estratigráfica</i> .....	17
1.4. Contexto Geológico da Formação Lagoa do Jacaré, Grupo Bambuí, Bacia do São Francisco .....	19
CAPÍTULO 2 .....	24
2. ARTIGO SUBMETIDO AO PERIÓDICO <i>BRAZILIAN JOURNAL GEOLOGY</i> .....	24
High-resolution stratigraphy of peritidal microbial carbonates from the Lagoa do Jacaré Formation, Bambuí Group, north of Minas Gerais state, Brazil .....	25
1. <i>Introduction</i> .....	25
2. <i>Geological setting</i> .....	27
3. <i>Materials and methods</i> .....	29
4. <i>Peritidal record of the Lagoa do Jacaré Formation in Ubaí area</i> .....	30
4.1. <i>Lithofacies and depositional processes</i> .....	30
4.2. <i>Lithofacies successions</i> .....	36
5. <i>Discussion</i> .....	39
5.1. <i>Analysis of stratigraphic cyclicity</i> .....	39
5.1.1. <i>Fifth order (asymmetrical tidal cycle)</i> .....	42
5.1.2. <i>Fourth order T-R cycles</i> .....	43
5.1.3. <i>Third and second order hemicycles</i> .....	44
5.2. <i>Paleoenvironmental evolution</i> .....	45
5.3. <i>Tidal records in a restricted sea: how to reconcile?</i> .....	46
6. <i>Conclusions</i> .....	48
7. <i>References</i> .....	48

<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>57</b>
<b>3. MANUSCRITO EM PREPARAÇÃO VISANDO PUBLICAÇÃO FUTURA ....</b>	<b>57</b>
<b>Estratigrafia de sequências de alta resolução em carbonatos de sistema deposicional laguna-ilha barreira, Formação Lagoa do Jacaré (Grupo Bambuí), Cordisburgo, Minas Gerais (Brasil) .....</b>	<b>58</b>
1. <i>Introdução .....</i>	<b>58</b>
2. <i>Contexto geológico .....</i>	<b>60</b>
3. <i>Materiais e métodos .....</i>	<b>61</b>
4. <i>Análise de fácies sedimentares e elementos arquiteturais da Formação Lagoa do Jacaré na região de Cordisburgo, MG .....</i>	<b>62</b>
4.1. <i>Litofácies e seus processos deposicionais .....</i>	<b>62</b>
4.2. <i>Os elementos arquiteturais e elementos morfológicos .....</i>	<b>67</b>
4.3. <i>Associações de litofácies .....</i>	<b>72</b>
5. <i>Discussão .....</i>	<b>76</b>
5.1. <i>Análise cicloestratigráfica .....</i>	<b>76</b>
5.1.1. <i>Hemiciclos de terceira ordem .....</i>	<b>76</b>
5.1.2. <i>Hemiciclo de quarta ordem .....</i>	<b>79</b>
5.1.3. <i>Ciclos de quinta ordem .....</i>	<b>79</b>
5.2. <i>Evolução paleoambiental .....</i>	<b>80</b>
6. <i>Conclusão .....</i>	<b>81</b>
7. <i>Referências bibliográficas .....</i>	<b>82</b>
<b>4. CONSIDERAÇÕES GERAIS .....</b>	<b>87</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>89</b>

## INTRODUÇÃO

Durante a transição de período Ediacarano-Cambriano, ocorreram diversas modificações físico-químicas fundamentais na atmosfera e hidrosfera terrestre, que favoreceram a ocorrência da explosão Cambriana, com grande diversificação animal. Esse fenômeno tem sido foco de diversas pesquisas que procuram, sobretudo, investigar anomalias nos ciclos geoquímicos que ocorreram durante o período Ediacarano.

Nesse contexto, apresentamos a Formação Lagoa do Jacaré – objeto de estudo deste trabalho –, pertence ao Grupo Bambuí, o qual registra o preenchimento de uma extensa bacia *foreland* em resposta à edificação diacrônica dos orógenos Brasília (a oeste) e Araçuaí (a leste), que ocorreu durante o período Ediacarano e início do Cambriano. A excursão positiva dos isótopos de carbono que ocorrem nessa formação tem atraído um grande volume de estudos do ponto de vista geoquímico. Entretanto não há um consenso científico sobre as causas desse evento e, ainda, há poucos estudos voltados a compreender a estratigrafia da Formação Lagoa do Jacaré, principalmente, os registros dos carbonatos de água rasa.

De tal forma, este trabalho visa ampliar o conhecimento estratigráfico da Formação Lagoa do Jacaré, a qual é uma unidade predominantemente carbonática. Esta dissertação de mestrado – constituída por dois artigos científicos – possui ênfase em uma análise voltada para sedimentologia, para estratigrafia de sequências de alta resolução e para a evolução paleoambiental do registro a ser estudado. A partir das descrições detalhadas, interpretações de processos sedimentares e caracterização tanto das fácies sedimentares de água rasa (planície de maré e sistema laguna-ilha barreira) quanto de suas associações faciológicas e seus sistemas deposicionais, pode-se compreender melhor a evolução da formação estudada. Também se podem inferir aspectos estratigráficos sobre a evolução da bacia Bambuí, os quais serão apresentados e discutidos ao longo deste volume.

O presente volume é composto por três capítulos e uma conclusão geral. O capítulo 1 reúne uma breve revisão bibliográfica sobre o contexto da Geologia regional da Formação Lagoa do Jacaré, além de relatar os materiais e métodos utilizados e os objetivos do projeto de pesquisa. O capítulo 2 – em formato de artigo, o qual foi submetido a revista *Brazilian Journal of Geology* – apresenta o estudo do sistema deposicional de uma planície de maré localizado ao norte de Minas Gerais. O capítulo 3 – também em formato de artigo, o qual está sendo preparado para publicação futura – apresenta o estudo do sistema deposicional de um sistema laguna-ilha barreira localizado na porção central do estado. A partir deste estudo

foram feitas interpretações acerca da evolução da Formação Lagoa do Jacaré que compõem as conclusões gerais desse volume.

Em síntese, sem querer nesta seção dar muitos detalhes, pode-se dizer que, em ambas as áreas estudadas, a ação da maré mostrou-se como um importante processo deposicional. Isso só seria possível se a bacia Bambuí estivesse parcialmente conectada ao oceano global, o que nos leva a interpretar que, durante a deposição dessas sequências, o Mar Bambuí seria epicontinental e semifechado. De tal forma, as seções estratigráficas levantadas neste trabalho sugerem que, durante a deposição da Formação Lagoa do Jacaré, ocorreu uma provável reabertura gradual e parcial da bacia Bambuí, mostrando assim uma conexão com o oceano Ediacarano-Cambriano global, havendo a necessidade de um maior levantamento de dados sedimentológicos e estratigráficos de alta resolução para que se possa compreender melhor os processos de quimioestratigrafia e estrutura geotectônica da bacia ao final do Ediacarano e o início do Cambriano.

## CAPÍTULO 1

### 1. APRESENTAÇÃO

Como dito na introdução deste trabalho, a grande diversificação animal que ocorreu durante a transição Ediacarano-Cambriano é um tema que atrai a atenção de diversos pesquisadores que começaram a investigar anomalias nos ciclos geoquímicos durante o período Ediacarano, uma vez que, nessa transição, ocorreram várias modificações físico-químicas na atmosfera e hidrosfera terrestre, fundamentais para favorecer a ocorrência da explosão Cambriana.

Nesse sentido, voltamos nossa atenção para o objeto de estudo deste trabalho: a Formação Lagoa do Jacaré, pertencente ao Grupo Bambuí, que registra o preenchimento de uma extensa bacia *foreland* em resposta à edificação diacrônica dos orógenos Brasília (a oeste) e Araçuaí (a leste), que ocorreu durante o período Ediacarano e início do Cambriano. Há vários estudos que pretendem investigar a excursão positiva dos isótopos de carbono que ocorrem nessa formação, no entanto, ainda não há um consenso científico sobre sua causa. Também há poucos estudos voltados para a compreensão estratigráfica da Formação Lagoa do Jacaré, em especial, os registros dos carbonatos de água rasa. De tal forma, este trabalho possui ênfase em uma análise voltada para sedimentologia, para estratigrafia de sequências de alta resolução e para a evolução paleoambiental da Formação Lagoa do Jacaré, a qual é uma unidade predominantemente carbonática.

#### 1.1. Localização

A pesquisa foi executada em duas áreas distantes, separadas por cerca de 350 km, dentro da Bacia do São Francisco, Grupo Bambuí, no estado de Minas Gerais. A área meridional de pesquisa se localiza a 7 km a sul da cidade de Cordisbugo, que fica cerca de 100 km a noroeste da cidade de Belo Horizonte, em uma fazenda, próxima à rodovia MG-231.

Por sua vez, a área de pesquisa setentrional está localizada a 8 km a norte da cidade de Ubaí, a cerca de 80 km a noroeste da cidade de Montes Claros, próximo às margens da drenagem Riacho Grande. Ambas são destacadas em um retângulo vermelho na figura 1.

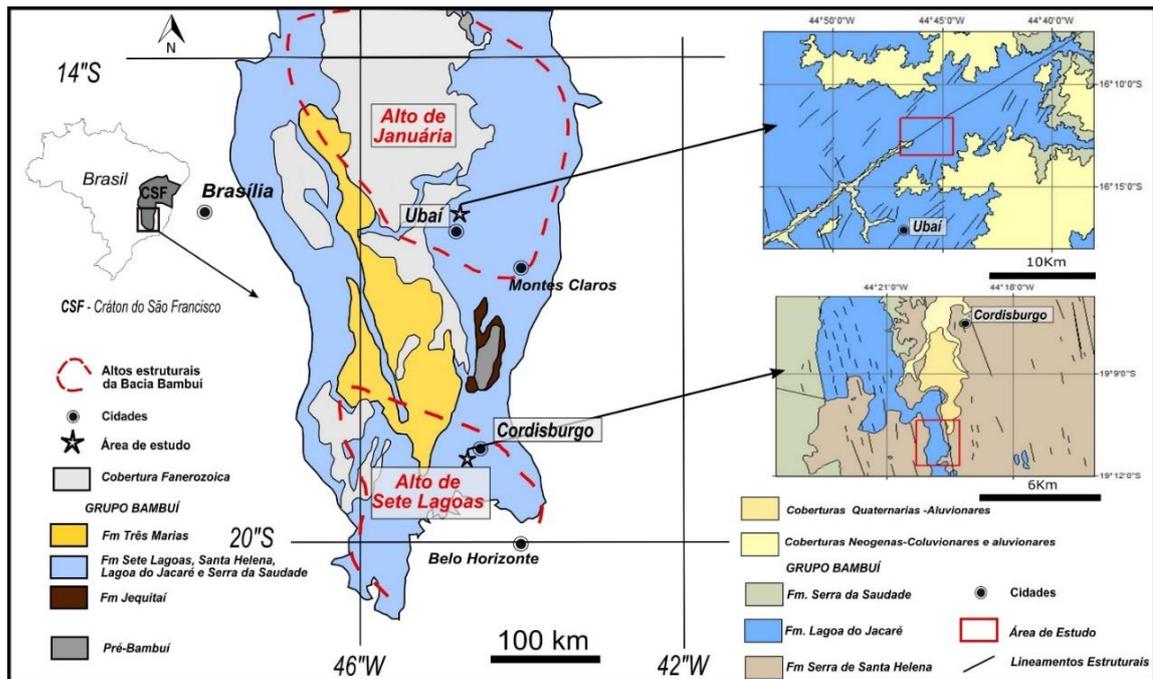


Figura 1 - Contexto geológico e localização das duas áreas de pesquisa. A área meridional está próxima de Cordisburgo, situada cerca de 100 Km a Noroeste de Belo Horizonte- MG. A área setentrional é localizada à nordeste de Ubaí, norte de Minas Gerais.

Fonte: Compilado a partir dos trabalhos de Misi (2001), Reis et al. (2017) e Uhlein et al. (2014) e Tuller et al. (2009).

## 1.2. Objetivos

O principal objetivo desse trabalho é contribuir para uma melhor compreensão da geologia sedimentar e evolução estratigráfica de uma plataforma carbonática na Bacia Bambuí, em especial, sobre as fácies sedimentares e sistemas deposicionais de água rasa da Formação Lagoa do Jacaré. Para atingir tal objetivo, são apresentados dados estratigráficos e sedimentológicos coletados em campo, em escala de detalhe. Em função disso é feita uma análise estratigráfica detalhada, integrando o estudo de fácies sedimentares, dos elementos arquiteturais (quando necessários), com a estratigrafia de sequência de alta resolução dos depósitos carbonáticos de água rasa da Formação Lagoa do Jacaré.

## 1.3. Materiais e métodos

Todos os métodos e materiais utilizados na análise estratigráfica estão discriminados individualmente nos capítulos 2 e 3 do volume final e serão explicados de forma geral na seção abaixo.

### 1.3.1. Análise estratigráfica

A análise estratigráfica foi realizada por meio do levantamento estratigráfico de campo, o qual foi feito em duas regiões distintas. Na área de Ubaí (setentrional), foi feita a descrição de 27 estações em uma área de 20 km<sup>2</sup>, localizada a 8 km a norte da cidade de Ubaí-MG, próximo à Montes Claros (figuras 1 e 2). A área possui a dimensão de 3 km na direção leste-oeste e 5 km na direção norte-sul e, nela, foram levantados perfis verticais métricos a decamétricos em cada uma das estações. A partir dessa análise macroscópica e apoiada no estudo microscópico de 16 lâminas petrográficas, foi possível a definição das litofácies. Na área de estudo meridional, localizada a sul de Cordisburgo (Minas Gerais), foram levantadas duas seções verticais de aproximadamente 25 metros de espessura cada uma, com uma distância entre elas de cerca de 500 metros (figuras 1 e 3). A partir dessa análise macroscópica apoiada no estudo microscópico de 8 lâminas petrográficas, definiram-se as litofácies.

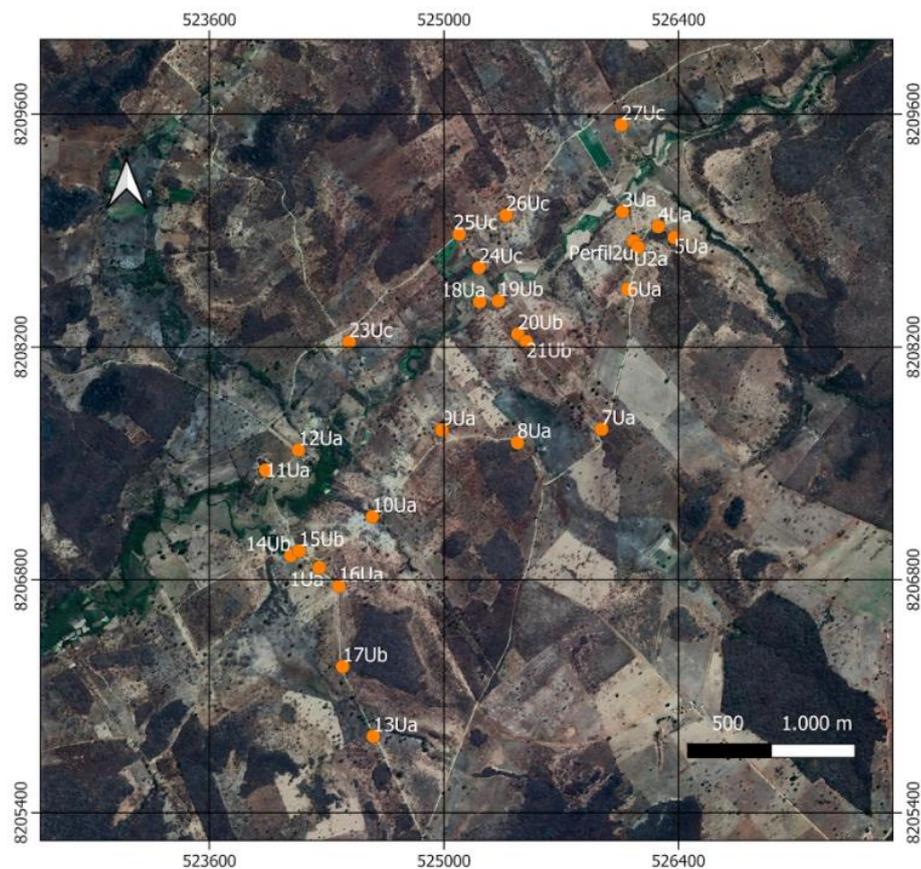


Figura 2 - Localização dos pontos (estações) onde foram feitas as descrições sedimentares detalhadas, a norte da cidade de Ubaí-MG

Fonte: Elaborada pelo autor.

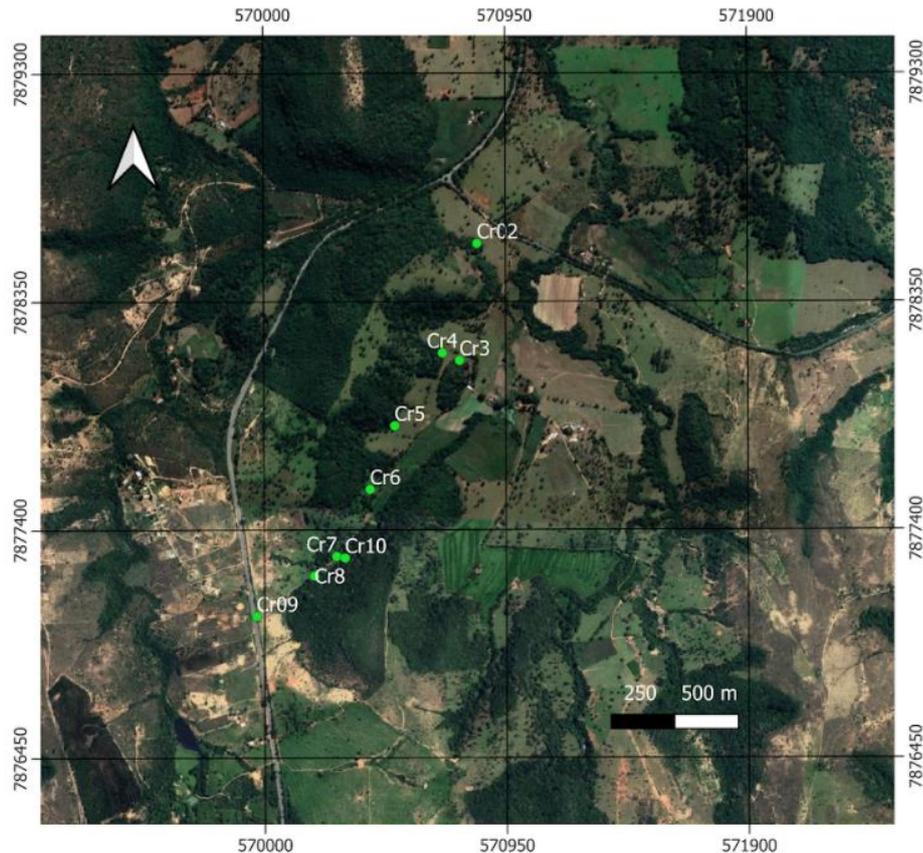


Figura 3 - Pontos visitados e descritos na região de Cordisburgo-MG

Foram selecionados os grandes afloramentos designados pelos pontos Cr2 e Cr3 para realização do levantamento estratigráfico de detalhe (área de pesquisa Sul).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os perfis verticais, levantados na escala 1:20, permitiram identificar diferentes litofácies que foram classificadas segundo protocolos propostos em trabalhos clássicos (Folk, 1962; Dunham, 1962; Embry and Klován, 1971; Demicco and Hardie, 1994; Riding, 2000). O nome dado às litofácies é similar ao código proposto por Miall (1977) para sistemas fluviais, em que a litologia dominante das fácies se apresenta em letras maiúsculas acrescidas de letra minúscula para designar a principal estrutura presente. O estudo dos elementos arquiteturais e suas classificações foram feitas com base nos estudos de Miall (1976; 1985) sobre ambientes fluviais e, também, o estudo de Gani e Bhattacharya (2007) sobre ambientes deltaicos. A interpretação da cicloestratigrafia (estratigrafia de sequências de alta resolução) foi baseada em conceitos mais gerais, descritos com propriedade por Catuneanu (2019), Embry (1993, 1995) e também considerando sempre o contexto estratigráfico regional do Grupo Bambuí (e.g., Uhlein et al., 2019; Freitas et al., 2021).

#### 1.4. Contexto Geológico da Formação Lagoa do Jacaré, Grupo Bambuí, Bacia do São Francisco

A Bacia do São Francisco (BSF) é constituída por importantes bacias sedimentares que cobrem o Cráton São Francisco situado na região centro-leste do Brasil, abrangendo principalmente os estados de Minas Gerais, Bahia, Goiás e Tocantins, apresentando cerca de 1400 km na direção norte-sul e de 600 km na direção este-oeste. Apresenta um embasamento arqueano-paleoproterozoico, o Supergrupo Espinhaço (Mesoproterozoico), o Grupo Bambuí (Neoproterozoico) e unidades fanerozoicas como o Grupo Santa Fé e os grupos Areado, Mata da Corda e Urucuia, todos do Cretáceo (Alkmim e Martins-Neto, 2001; Zalan e Romeiro-Silva, 2007).

O Grupo Bambuí, principal unidade da BSF, registra o preenchimento de uma extensa bacia *foreland* em resposta à edificação diacrônica dos orógenos Brasília (a oeste) e Araçuaí (a leste), que ocorreu durante o Período Ediacarano e início do Cambriano. Essa bacia *foreland* possui grande extensão na BSF, abrangendo os estados de Minas Gerais, Bahia, Goiás e Tocantins, ocupando uma área de aproximadamente de 350.000 km<sup>2</sup> (Alkmim & Martins-Neto, 2001; Martins-Neto, 2009; Uhlein, et al 2017). A sedimentação em uma bacia *foreland* varia segundo a distância do *fold-thrust belt* (Decelles & Giles, 1996; Decelles & Currie, 1996), por isso, o registro do Grupo Bambuí foi dividido em setores, compreendendo os setores oeste (próximo da faixa Brasília, com maior espessura), central e leste (mais próximo da faixa Araçuaí) (Uhlelin et al., 2017).

O Grupo Bambuí é caracterizado por uma sedimentação mista, pelo registro de sequências sedimentares pelítico-carbonáticas (Dardenne, 1978; Zalan & Romero, 2007; Martins e Lemos, 2007, Martins-Neto, 2009; Uhlein, 2017; Reis et al, 2017), principalmente na porção centro-leste de Minas Gerais. Nessa porção da bacia, o Grupo Bambuí é composto, da base para o topo, pelas Formações Jequitaí, (paraconglomerados glaciais), Sete Lagoas (calcários e dolomitos), Serra de Santa Helena, (siltitos e carbonatos), Lagoa de Jacaré (rochas carbonáticas retrabalhadas, predominantemente *grainstones* com algumas ocorrências de microbialitos), Serra da Saudade (siltitos, arenitos e carbonatos, em especial do Membro Jaíba) e Três Marias (predominantemente arenitos arcossianos e siltitos) (Dardenne, 1978; Alkmim e Martins-Neto, 2001; Martins e Lemos, 2007; Reis et al, 2017; Uhlein et al, 2019). Como ilustra a figura 4, é importante salientar que as estruturas do substrato, altos e baixos do embasamento da Bacia Bambuí, realizaram um importante controle durante a deposição, destacando-se o Alto de Januária, o Alto de Sete Lagoas e o Baixo de Pirapora, que foram

identificados com base em dados geofísicos, de campo e de poços (figura 1) (Magalhães, 1989; Alkmim & Martins-Neto, 2001; Zalán e Romeiro-Silva, 2007; Hercos et al, 2008; Reis et al. 2017).

Os dados geocronológicos pelo método U-Pb em zircão detrítico e dados quimioestratigráficos (principalmente os isotópicos) sugerem que a deposição do Grupo Bambuí ocorreu no Ediacarano (Pimentel et al. 2011; Caxito et al. 2012; Paula Santos et al. 2015). Além disso, a ocorrência de metazoários biomineralizados, provavelmente associados a *Cloudina sp.* no meio da Formação Sete Lagoas, sugere fortemente que a deposição dessa unidade ocorreu no final do período Ediacarano (Warren et al. 2014; Uhlein et al. 2019). Mais recentemente, grãos de zircão de uma camada de rocha vulcanoclástica na Formação Serra da Saudade (Moreira et al. 2020) e ocorrências do fóssil *Treptichnus pedum* na Formação Três Marias (Sanchez et al. 2021) estenderam a história deposicional do topo do Grupo Bambuí para o período Cambriano.

Essa unidade destaca-se por ser uma unidade estratigráfica que registra a transição Ediacarano-Cambriano no Cráton São Francisco, um período de extrema importância para a história da Terra, no qual diversas modificações físico-químicas da atmosfera e hidrosfera terrestre favoreceram a grande diversificação animal ocorrida principalmente no início do Cambriano (Canfield et al., 2007; Meert and Lieberman, 2008; Gaucher et al., 2009, Och & Shields-Zhou, 2012). Além disso, destaca-se por ser uma das unidades litoestratigráficas do Brasil com maior quantidade de registro de microbialitos (Fairchild e Sanchez, 2015). Entretanto, a distribuição destes microbialitos ao longo das unidades carbonáticas do Grupo Bambuí não é homogênea. A Formação Sete Lagoas se destaca pelo número e pelas diferentes morfologias de microbialitos encontradas. Na Formação Lagoa do Jacaré, há uma grande redução desse número e variedade. Já nas Formações Jaíba e Lagoa Formosa que ocupam o topo do Grupo Bambuí e fazem parte do registro Cambriano, há um aumento no número em relação à Formação Lagoa do Jacaré (Fairchild e Sanchez, 2015). Esse comportamento assemelha-se muito à variação do número de microbialitos. Awramik (1971) observou que, ao fim do Neoproterozoico, os estromatólitos sofrem um expressivo declínio em diversidade de formas, no final do Ediacarano, quando sua variedade caiu em 90%. Grotzinger (1990) também notou um declínio na diversidade, abundância e também na densidade de estruturas estromatólíticas nos estratos do final do Neoproterozoico. No Cambriano esse número e variedade voltam a aumentar até atingir um máximo relativo durante a transição Cambriano-Ordoviciano.

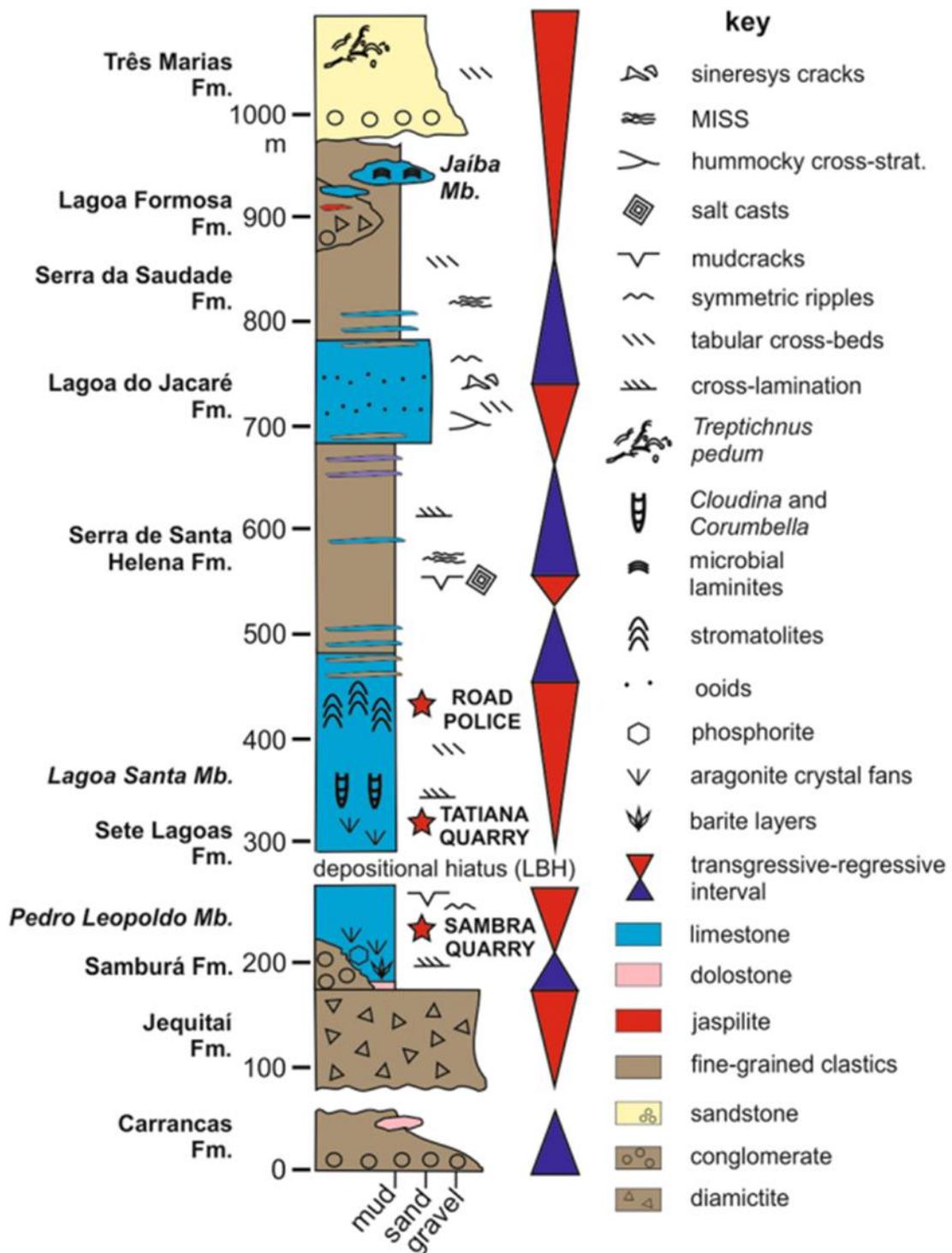


Figura 4 - Coluna estratigráfica esquemática do Grupo Bambuí

Fonte: (Caxito et al., 2021).

A Formação Lagoa do Jacaré é, de forma geral, descrita e caracterizada como uma unidade onde a alternância das litofácies calcárias oolíticas e pisolíticas intercaladas com siltitos e margas. Em função disso, essa unidade carbonática é associada à ocorrência de

plataformas carbonáticas mistas. De forma geral, as litofácies siliciclásticas são predominantemente distais e estão interdigitadas às fácies carbonáticas que ocorrem tanto em águas rasas como profundas (Reis et al. 2017, Uhlein et.al, 2019, Caetano-filho et al 2019). Os calcários são depositados por processos sedimentares distintos nos diferentes ambientes, pois uns depositam-se nas porções internas da plataforma e outros em transicionais deltaicas, dominadas por marés (Spalletti et al. 2000) e até em porções externas de plataformas sob domínio de tempestades (Rowe 2002). É importante ressaltar que as plataformas mistas não são exclusivas de clima quente, pois esse tipo de sequência deposicional pode ocorrer em diferentes condições de temperatura das águas, tendo sido descritas até em condições glaciais, compondo fácies de calcários bioclásticos intercalados a ruditos glaciogênicos (Eyles e Eyles 1992).

Segundo Caetano Filho et al. (2019), as diferentes configurações do embasamento nos altos estruturais da bacia fizeram com que ocorressem certas distinções em seu preenchimento nos Altos do embasamento de Januária e Sete Lagoas durante a deposição do Grupo Bambuí. Em função disso, a configuração das plataformas carbonáticas que se estabeleceram na bacia antes e depois de sua restrição são distintas nessas duas localidades como mostra a figura 5.

No Alto de Sete Lagoas, a sedimentação da Formação Lagoa do Jacaré sofre uma maior influência da tectônica de blocos (presença de *horst* e *grabens*), que possibilita a presença de rochas depositadas em ambientes mais profundos, interditado com rochas depositadas em águas mais rasas. Tal característica torna as correlações estratigráficas mais complexas devido à paleogeografia com fundos rebaixados que controlam a deposição das fácies de baixa energia e altos com águas de mais alta energia, mais quentes e limpas, inclusive possibilitando a ocorrência esporádica de exposição subaérea e de ambientes de água rasa protegidos como descrito por Reis et al. (2017) Santos et al. (2018) Caetano-Filho et al. (2019) Freitas et al. (2021). Já no Alto de Januária, devido à menor influência da tectônica de blocos, o registro possui maior continuidade lateral com as interdigitações dos ambientes mais profundos com os rasos menos frequentes e, por isso, as litofácies siliciclásticas geralmente ocupam a porção mais distal da bacia, Uhlein et al. (2019) e Caetano-Filho et al. (2019). Já a paleogeografia da porção dessa unidade no Alto de Sete Lagoas é extremamente irregular.

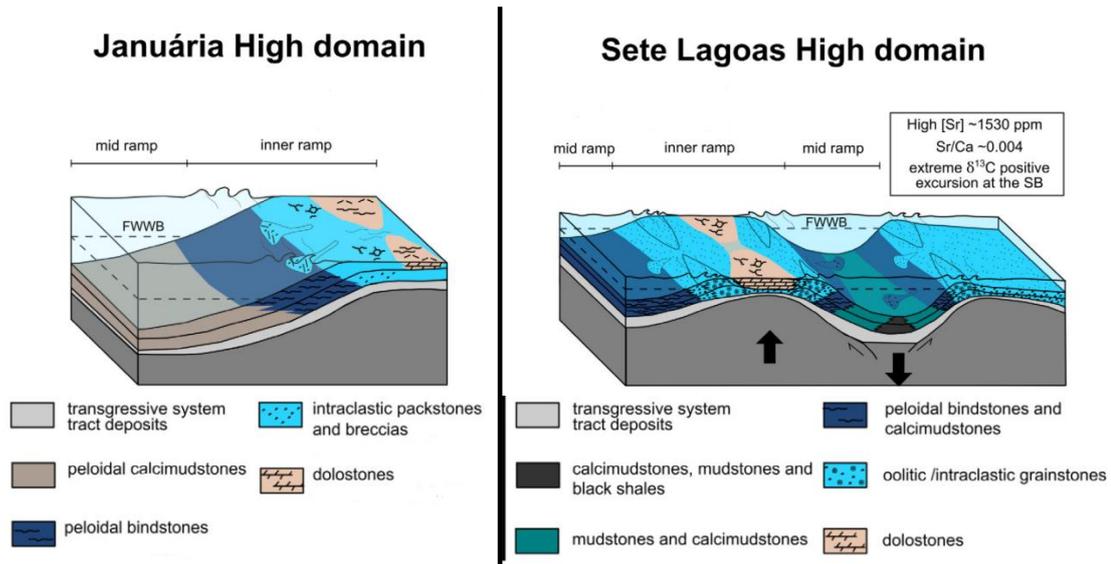


Figura 5 - Bloco diagrama esquemático evidenciando as diferentes configurações paleogeográficas nos principais altos estruturais da Bacia Bambuí no período de sua restrição

Fonte: (Caetano-Filho et al., 2019)

Nos últimos anos, houve um aumento no número de estudos envolvendo a Formação Lagoa do Jacaré (Uhlein et al. 2019; Cui et al. 2020; Caetano-Filho et al. 2020; Freitas et al. 2021), principalmente devido à atenção dada a carbonatos com valores de  $\delta^{13}\text{C}$  altamente positivos em sucessões Ediacaranas em todo o mundo (Kaufman et al. 2009; Moynihan et al. 2019). Esta unidade registra uma excursão  $\delta^{13}\text{C}$  com valores que variam entre + 8 ‰ a + 16 ‰ e estão associados com a excursão do isótopo positivo do Médio Bambuí (MIBE; Uhlein et al. 2019; Cui et al. 2020). O evento MIBE foi relacionado à restrição da bacia causada pelo avanço e soerguimento de orógenos marginais no final do Neoproterozoico e início do Paleozoico, como sugerido pelas idades U-Pb de zircões detríticos (Paula-Santos et al., 2015) e pela reconstrução paleogeográfica (Reis et al., 2017). Portanto, os estudos quimioestratigráficos e isotópicos permitem identificar o início da restrição da Bacia de Bambuí, que ocorreu na porção superior da Formação Sete Lagoas, fazendo com que esse mar se tornasse metanogênico e alcalino (Paula-Santos et al, 2017; Caetano-Filho et al., 2019; Paula-Santos et al., 2020; Caetano-Filho et al., 2020; Cui et al., 2020). Apesar dos intensos estudos no Grupo Bambuí, as origens do MIBE, a reabertura da bacia e a reconexão aos oceanos globais permanecem ainda uma questão em aberto.

## CAPÍTULO 2

### **2. ARTIGO SUBMETIDO AO PERIÓDICO *BRAZILIAN JOURNAL GEOLOGY***

Nesse capítulo será apresentado um artigo produzido a partir da pesquisa efetuada e do levantamento estratigráfico realizado em Ubaí (norte de Minas Gerais). O manuscrito foi submetido à revista *Brazilian Journal Geology* e encontra-se em processo de revisão final. Este artigo submetido trata da análise paleoambiental sob a ótica da estratigrafia de sequência do registro de uma planície de maré identificada na Formação Lagoa do Jacaré.

## **High-resolution stratigraphy of peritidal microbial carbonates from the Lagoa do Jacaré Formation, Bambuí Group, north of Minas Gerais state, Brazil**

Samuel Amaral Moura Silva<sup>1</sup>; Alexandre Uhlein<sup>2</sup>; Gabriel Jubé Uhlein<sup>2</sup>; Márcio Vinicius Santana Dantas<sup>1</sup>

1 – Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. (Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, 31270-901).

2 – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. (Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, 31270-901).

### **ABSTRACT**

The present study carried out a high-resolution stratigraphy of tidal microbial carbonates of the upper part of Lagoa do Jacaré Formation from the Ediacaran-Cambrian Bambuí Group in the Ubaí area. In a stratigraphic survey of 41 meters high, sixteen lithofacies and three facies' associations were interpreted as deposits belonging to the supratidal, intertidal, and subtidal settings. The tidal cycles are asymmetric and shallowing upward due to the non-depositional characteristic of the fast-flooding events. The thicknesses of the cycles can be proportional to the tidal ranges, therefore, the high-resolution stratigraphic approach allowed us to infer short-term and long-term fluctuations of the sea level during the deposition. These metric tidal ranges suggest a strong tidal current, different from modern giant enclosed sea analog where tidal ranges are less than a few decimeters. Thus, based on sedimentologic and stratigraphic data, we suggest this record was deposited on a semi-enclosed epicontinental sea subjected to strong tidal forces. So, a partial reopening of the Bambuí Basin after a period of restriction occurred in the upper half of the Lagoa do Jacaré Formation, as suggested by isotopic data and also by field data.

**Keywords:** *Tidal cycles; Cyclostratigraphy; Stacking patterns; Restricted basin; Ediacaran.*

### **1. Introduction**

Microbialites are carbonate rocks defined by Burne and Moore (1987) as organosedimentary deposits formed from the interaction between benthic microbial communities and detrital or chemical sediments (Dupraz et al. 2009). Microbialites (or microbial mats as their non-lithified equivalent) have high chemical gradients, an abundance of phototrophic microorganisms, and stratification of the microbial populations into distinct layers (e.g., Konhauser 2007; Van Gernerden 1993; Visscher and Stolz 2005). These carbonatic rocks are known since the Archean (e.g., Schopf et al. 2007) and are common deposits in continental and marine environments until today (Myshrallx et al. 2010; Yanez-Montalvo et al. 2020). They are commonly found in nearshore environments often subjected

to tidal currents, arranged broadly in zones parallel to the coastline. The zonation of microbial mats, stromatolites, and thrombolites has generally been related to frequency and intensity of inundation and desiccation within the littoral zone (e.g., Logan et al. 1974; Jahnert and Collins 2012).

The purpose of this paper is to analyze the stratigraphic record of tidal microbialites and associated carbonatic rocks of the Lagoa do Jacaré Formation in Ubaí area, north of Minas Gerais state, from a high-resolution systematic approach. The deposition of the Lagoa do Jacaré Formation (Bambuú Group, Brazil) was either in the last million years of the Ediacaran Period or in the first ages of the Cambrian Period. That was a time with unprecedented and definitive changes in every superficial layer of the Earth (Canfield et al. 2007; Meert and Lieberman 2008; Gaucher et al. 2009; Erwin et al. 2011; Och and Shields-Zhou 2012; Na and Kiessling 2015; Zhu et al. 2017). These changes were related to the decreased number of microbialites record during the Ediacaran-Cambrian transition (e.g. Awramik et al. 1971, Riding 2006). This particularity is noticed in different sedimentary basins (e.g. China (Li et al. 2021)). Also, it is also present, in the Bambuú Basin where there was a vast number of occurrences and of microbialites morphotypes at the base when compared to other younger carbonate formations of Bambuú Group (Fairchild and Sanchez, 2015).

In the last few years, there was a rise in the number of studies involving the Lagoa do Jacaré Formation (Uhlein et al. 2019; Cui et al. 2020; Caetano-Filho et al. 2020; Freitas et al. 2021), mainly due to the rise attention in highly positive  $\delta^{13}\text{C}$  carbonates in Ediacaran successions worldwide (Kaufman et al. 2009; Moynihan et al. 2019). This unit registers a high positive  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  excursion with values between +8‰ to +16‰ which is associated with the Middle Bambuú positive isotope Excursion (MIBE; Uhlein et al. 2019; Cui et al. 2020). The MIBE event was related to the restriction of the basin caused by the advance and uplifting of marginal Neoproterozoic-early Paleozoic orogens, as suggested by the U-Pb ages of detrital zircon (Paula-Santos et al., 2015) and paleotectonic reconstruction (Reis et al., 2017). Therefore, the geochemistry studies allow us to identify the beginning of Bambuú Basin restriction. Although there was intensive studies on the Bambuú Group, the origins of the MIBE and the reopening of the basin to global oceans remain an opening question.

The majority of earlier studies were made on a regional scale on the study area, therefore, the data presented in this paper is of a pioneer study on high-resolution stratigraphy and cyclicity definition of microbial carbonates, and associated lithofacies from the Lagoa do Jacaré Formation. Thus, we bring some new point of view of sequence stratigraphic aspects

and paleoenvironmental evolution of tidal microbialites and also the Lagoa do Jacaré Formation. As tidal effects are negligible in large lakes and even in ancient inland epeiric seas (e.g. Tucker and Wright 1990; Pratt 2010; Renaut and Gierlowski-Kordesch 2010), this study aims to suggest the timing of a probable partial reopening of the Bambuí basin to global oceans.

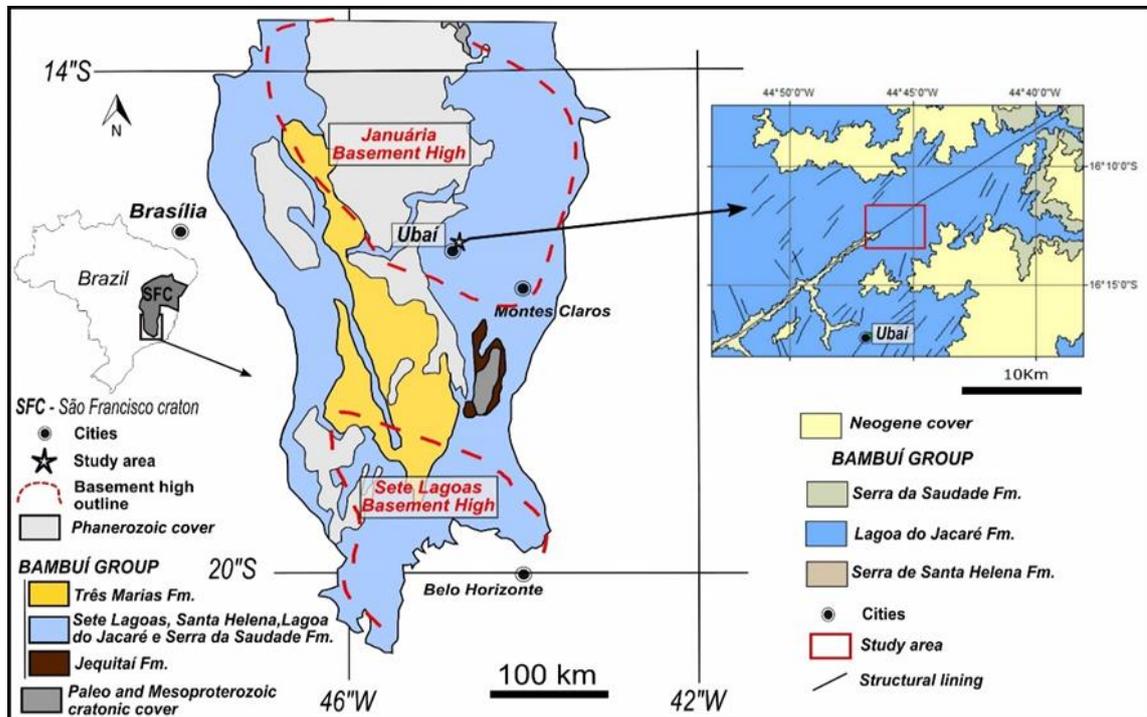


Figure 1 - Geological setting and location of the study area in the Ubaí area, north of Minas Gerais state  
Geologic maps based on Misi (2001), Reis et al. (2017), and Uhlein et al. (2014).

## 2. Geological setting

The Bambuí Group records an extensive foreland basin, initiated in response to the diachronic lithospheric overburden experienced by the São Francisco plate caused by the uplift of the Brasília (west) and Araçuai (east) fold belts, during the Ediacaran and Cambrian Periods. The basin covers hundreds of thousands of square kilometers in the states of Minas Gerais, Bahia, Goiás, and Tocantins in east-central Brazil (Alkmim and Martins-Neto 2001; Martins-Neto 2009; Uhlein 2017). The stratigraphic organization in a foreland basin is remarkably different according to the distance from the fold belts, so the Bambuí Group may be divided into roughly three sectors: west, central, and east sectors (Uhlein et al., 2017).

The study area is located on the Januária high-land basement in the east sector, which comprises a mixed carbonate-siliciclastic sedimentary succession deposited under conditions

of low subsidence rates and strong eustatic control (Castro and Dardenne 2000; Martins-Neto and Alkmim 2001; Martins and Lemos 2007; Uhlein et al. 2019). In this area, the Bambuí Group, from the bottom to the top, is composed of the Sete Lagoas Formation (limestone and dolomite), Serra de Santa Helena Formation, (siltstone and carbonate), Lagoa de Jacaré Formation, (reworked carbonate rocks and some microbialites), Serra da Saudade Formation (siltstone, sandstone, and carbonate of the Jaíba Member), and Três Marias Formation, (arkose and conglomerate) (Uhlen et al 2019). It is important to highlight that the basement structures of the Bambuí basin performed an important control during the deposition of the homonymous group. These are named Januária high-land basement, Sete Lagoas high-land basement, and Pirapora aulacogen, which were identified based on geophysical, field, and borehole data. (Magalhães 1989; Alkmim and Martins-Neto 2001; Zalán and Romeiro-Silva 2007; Hercos 2008; Reis et al. 2017; Fig. 1).

U-Pb detrital zircons and chemostratigraphic data suggest that the deposition of the Bambuí Group occurred in the Ediacaran (Pimentel et al. 2011; Caxito et al. 2012; Paula Santos et al. 2015). Moreover, the occurrence of biomineralized metazoans most likely associated with *Cloudina sp.* in the middle of the Sete Lagoas Formation, strongly suggests a deposition at the end of the Ediacaran Period (Warren et al. 2014; Uhlein et al. 2019). More recently, zircon grains from a tuff layer in the Serra da Saudade Formation (Moreira et al. 2020) and *Treptichnus pedum* occurrences in the Três Marias Formation (Sanchez et al. 2021) extended the depositional history of the upper Bambuí Group into the Cambrian Period.

The Lagoa do Jacaré Formation presumably formed near the transition interval between the Ediacaran and Cambrian periods. It is described as reworked black carbonate, from grainstone to mudstone and rare shale, often having well-preserved ooids, that were deposited on inner to outer shelf environment (e.g., Dardenne et al. 1978; Misi et al. 2007; Freitas et al. 2021). The Lagoa do Jacaré Formation is mainly famous for its carbonatic rocks with positive values of  $\delta^{13}\text{C}$ , as high as +16‰, independently of the studied section. This interval of highly positive carbon isotope values was named MIBE (Middle Bambuí Excursion) and extends for around 350 m along with the Bambuí Group (Uhlen et al. 2019). Recently, Cui et al. (2020) and Caetano-Filho et al. (2020) explored the MIBE using a varied set of geochemical tools and, among other hypotheses, they interpreted a methanogenic and highly restricted basin during the deposition of the Lagoa do Jacaré Formation. There are few microbialite occurrences in the Lagoa do Jacaré Formation (Iglesias and Uhlein 2009; Ribeiro et al. 2008; Signorelli 2009; Kuchenbecker and Pedrosa-Soares 2010; Fragozo et al. 2011; Atman 2011). The morphotypes suggest a relation with a small barrier reef and a wave-

protected peritidal environment (Santos et al. 2018) formed during the end of a regional regression trend (Uhlein et al. 2019). On the Januária high basement, the Bambuí Group may be subdivided into five transgressive-regressive 2<sup>nd</sup>-order sequences. One of the sequence boundaries may be positioned in the middle of the Lagoa do Jacaré Formation, where microbialites and other tidal-like lithofacies dominate, and below the initiation of a new transgression trend (Uhlein et al. 2019).

### **3. Materials and methods**

Sedimentologic and stratigraphic data are from 27 outcrops located in an area close to the Ubaí district, north of Minas Gerais state, Brazil (figure 1). The dimensions of the study area are 3 km in the east-west direction and 4,5 km in the north-south direction (Figure 2). The stratigraphic survey scale is 1:20. Because of the vertical continuity, only 25 vertical profiles were selected to compose the 41 thick-interval meters of studied interval of the Lagoa do Jacaré Formation. Lithofacies were classified according to classic works of Folk 1962; Dunham 1962; Embry and Klovan 1971; Demicco and Hardie 1994; and Riding 2000. The characteristics of the carbonate microfabric observed under the microscope were important in this classification. The facies codes are similar to the codes proposed by Miall (1977) for river systems, in which the texture of the lithofacies is presented in capital letters and small letters to designate the main structure present or an important feature.

According to Embry (1993, 1995) the definition of the transgressive and regressive (T-R) cycles could be identified. The regional Bambuí stratigraphic context (e.g., Uhlein et al. 2019) and classic works in high-resolution stratigraphy (e.g., Goldhammer et al 1990, Osleger 1991, Read and Goldhammer 1988) were also important in sequence stratigraphic studies. The interpretation order of the stratigraphic cycle was based on general concepts pointed out by Catuneanu (2019), but specific researches on sequence stratigraphy of Phanerozoic tidal plains (e.g., Spence and Tucker 2007) allowed a safer interpretation of the sequence's orders. Pratt (2010) points out that, in general, the thickness of the tide cycle is proportional to sea-level variations. This was crucial to understand the limits of the higher-order cycles and analyze short-term and long-term sea level changes.

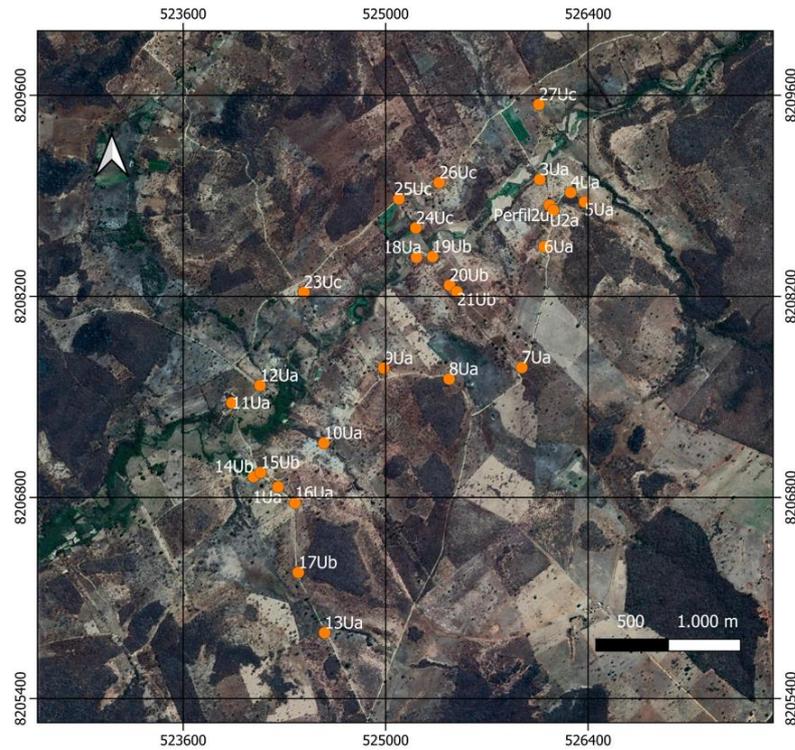


Figure 2 - The study area and the 27 outcrops location  
Prepared by the author.

## 4. Peritidal record of the Lagoa do Jacaré Formation in Ubaí area

### 4.1. Lithofacies and depositional processes

Proceeding the detailed description of the outcrops, sixteen lithofacies were identified (Table 1; Figure 3 and 4) and classified into five textural groups: organosedimentary carbonates, mud carbonates, heterolithic carbonates, sandy carbonates, and conglomeratic carbonates. These groups do not correspond to the lithofacies association and they exist just to simplify the description process.

Four lithofacies constitute the organosedimentary carbonate group: microbial laminite (ML; figure 3a), microbial laminite with boudin-like structure (MLb; figure 3b), mudstone interlayered with microbial laminite (MML), and thrombolite (TB; figure 3c). The genesis of this group of carbonates (microbialites) results mainly from the process of organomineralization (microbially induced and influenced mineralization) (Dupraz et al. 2009). It is related to the metabolic activity of the synergistic associations of a microbial mat, and the complex interactions between these biofilms and their surrounding environment can result in the production of microbialites lithofacies (Riding 2011; Bosak et al. 2013; Vasconcelos and Dittrich 2014).

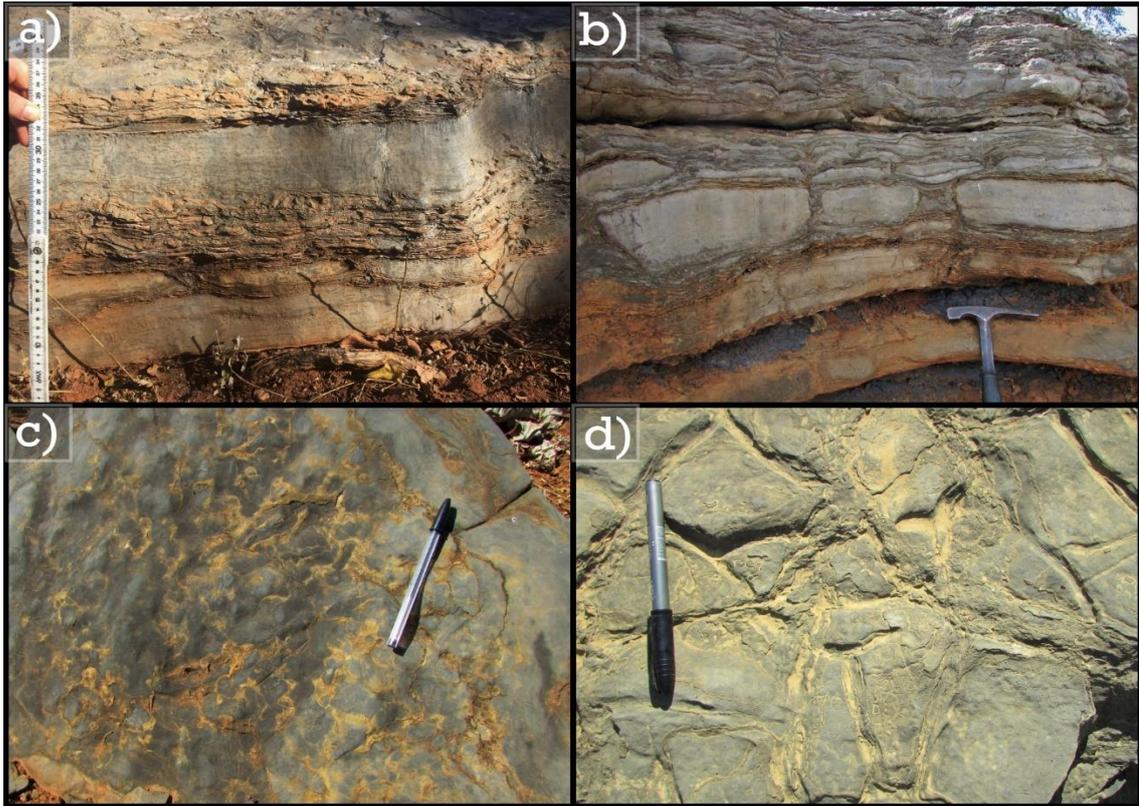


Figure 3 - Lithofacies of the Lagoa do Jacaré Formation

a) Microbial Laminite (ML); b) Microbial Laminite with boudin-like structure (MLb);  
c) Thrombolite (TB); d) Mudstone with desiccation crack (MUDdc).

Prepared by the author.

The ML and MLb facies are characterized by their intercalated light and dark layers. The lightest colored layers are mainly made up of mudstone and rarely wackestone and grainstone, with peloids as the main component. The dark layers have a relative bigger amount of clay minerals, micas, quartz, and carbonaceous matter. Framboidal pyrite and calcite-filled birds-eye structure (figure 5b) are common features of the ML and MLb facies, that are most likely the result of metabolic activities of microbial mats, responsible for organic matter remineralization, pyrite formation, and  $\text{CaCO}_3$  precipitation, among many other processes, (e.g., Visscher and Stolz 2005; Konhauser 2007).

The MLb lithofacies stands out due to the sedimentary boudinage structure, result of differential compaction of patchy deposits carbonate. These deposits form irregular, closely spaced structures caused by a disruption of layers by stretching and the flow. Therefore, we can observe microfractures, microfaults, domino-like features, and lateral discontinuities (figure 5a) on thin sections. It is important to highlight that they are often associated with tepee and presumable evaporite pseudomorphs (figure 6). So, these microfabric aspects could also be related with salts precipitation.

Table 1 - Lithofacies: Macroscopic characterization and Interpretation

<b>Facies Code</b>	<b>Lithofacies</b>	<b>Sedimentary structure</b>	<b>Petrographic Characterization</b>	<b>Depositional processes</b>
<b>ML</b>	Microbial Laminites	Laminated or thinly bedded	Mudstone and microbial mat intercalation	organomineralization, trapping and binding
<b>MLb</b>	Microbial Laminites with boudin-like structure	Laminated or thinly bedded with sedimentary boudinage	Mudstone and microbial mat intercalation with boudin-like structure some layers	organomineralization, trapping binding, desiccation, and differential compaction of patchy deposits
<b>MMl</b>	Mudstone interlayered with Microbial laminites	Laminated with little lateral continuity	Thick and discontinuous laminated microbial mat in mudstone	organomineralization, trapping and binding
<b>MUD</b>	Mudstone	–	Massive gray mudstone	organomineralization and carbonate mud precipitation
<b>TB</b>	Thrombolite	Clotted texture	Microbialite with clotted texture	organomineralization, trapping and binding
<b>MUDdc</b>	Mudstone with desiccation crack	Shrinkage crack	Mudstone with shrinkage cracks that is filled with carbonate sand or microbial mat	organomineralization, carbonate mud precipitation and desiccation
<b>MUDsc</b>	Mudstone with syneresis crack	Syneresis crack	Mudstone with incomplete polygonal pattern and with either bird's foot or spindle shape	Salinity changes and osmotic effects
<b>HClb</b>	Heterolithic carbonate with lenticular bedding	Lenticular bedding	Light gray mudstone with dark fine gray carbonate sand lenses	Fluctuations in sediment supply or intensity of current activity
<b>HCcl</b>	Heterolithic carbonate with cross-lamination	Low-angle cross-lamination	Heterolithic mudstone and dolomite preserving the cross-laminations	subaqueous currents in lower flow regime in waning flood deposits
<b>PCK</b>	Massive packstone	–	Dark gray carbonate composed of fine-grained sand	Pseudoplastic debris flow
<b>PCKcl</b>	Packstone with cross-lamination	Low angle Cross-lamination	Dark gray carbonate sand with interleaving between very fine and fine grains	subaqueous currents in lower flow regime
<b>PCKhl</b>	Packstone with horizontal lamination	Horizontal lamination	Dark gray carbonate with interleaving between fine- and medium-grained sand layers	subaqueous currents in lower flow regime
<b>PCKcr</b>	Packstone with current ripple	Linguoid current ripple	Dark gray carbonate sand composed of very fine and fine grains	subaqueous currents in lower flow regime
<b>PCKscs</b>	Packstone with swaley cross-stratification	Swaley cross-stratification	Dark gray carbonate sand composed of very fine and fine grains	Result of storm waves
<b>FLT</b>	Floatstone	Massive and lenticular geometry	Matrix supported, massive carbonate gravel. The matrix is composed of fine gravel and the coarse fraction is composed by rounded granules and pebbles. although some may be angular	Pseudoplastic debris flow (low strength, viscous)
<b>RUD</b>	Rudstone	Massive and lenticular geometry	Clast-supported carbonate gravel. The matrix is composed of fine gravel and the coarse fraction is composed mainly by rounded granules and pebbles.	Pseudoplastic debris flow (inertial bedload, turbulent flow)

The mud carbonates group consists of massive mudstone (MUD), mudstone with shrinkage cracks (MUDdc), and mudstone with syneresis cracks (MUDsc). The mud carbonates contain a small proportion of allochems, which can reach up to 5%, but their distribution is not restricted to preferential levels. Peloids have diameters ranging from 0.03 to 0.1 mm, and the frequent presence of framboidal pyrite and fenestrae filled with sparry calcite shows a plausible organosedimentary influence on the deposition of mudstones.

The group of Heterolithic carbonates consists of carbonates with lenticular bedding (Hlb; figure 4b), and with low angle cross-lamination (Hcl; figure 4d). The lenticular bedding structure is formed by the intercalation of peloidal (diameters from 0.03 to 0.1 mm) sand carbonate interspersed with mudstone. The low-angle cross-lamination structure of some Heterolithic carbonates is formed by the alternation between layers predominantly of calcitic mud and others with idiopic mosaic of euhedral dolomite rhombs. The dolomitized levels were fundamental for demark a primary sedimentary structure. However, it is not possible to identify the primary attributes of that level, so it is not known whether the dolomitized levels would be wackestone, packstone, or grainstone and which allochems compose these levels.

Five facies constitute the sandy carbonates group: massive packstone (PCK), packstone with horizontal lamination (PCKhl; figure 4a), packstone with low-angle cross-lamination (PCKcl; figure 4c), packstone with current ripple (PCKcr), and packstone with swaley cross-stratification (PCKscs; figure 4f). The sandy carbonates contain from 50 to 60% of allochems composed mainly by peloids with diameters ranging from 0.06 to 0.2 mm dispersed in a locally micritic matrix recrystallized. In bedded packstones there are often intercalations of packstone and wackestone layers (figure 5c). The wackestone layers are characterized by 15 to 25% of peloids with diameter ranging from 0.3 to 0.13 mm and dispersed in a micrite matrix.

The group of conglomeratic carbonates is composed of floatstone (FLT; figure 4e) and rudstone (RUD), all of them show a lenticular geometry. On the thin sections, these lithofacies are mostly composed of fine peloid grains. The coarse sand to pebble-sized grains and clasts are composed of poorly preserved ooids (figure 5f), intraclasts of mudstone, packstone (figure 5d), and microbial laminite (figure 5e). The intergranular part is filled mainly by micrite matrix and in some parts by sparry cement.

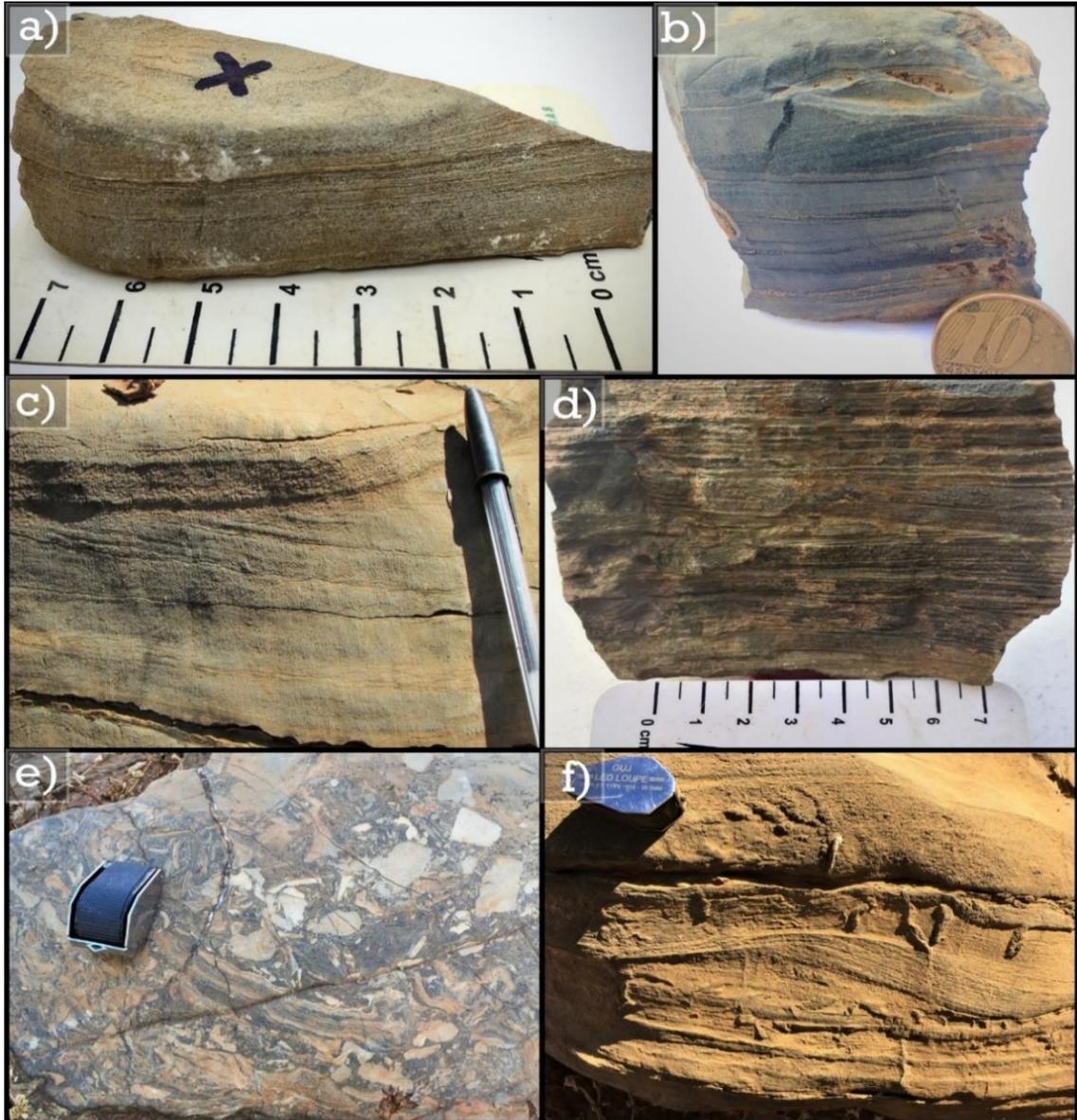


Figure 4 - Lithofacies of the Lagoa do Jacaré Formation

- a) Packstone with horizontal lamination (PCKhl); b) Heterolithic carbonate with lenticular bedding (Hlb);  
 c) Packstone with low angle cross-lamination (PCKcl); d) Heterolithic carbonate with very low angle cross-lamination (Hcl); e) Floatstone with angular granules and pebbles (FLT);  
 f) Packstone with swaley cross-stratification (PCKscs) below syneresis cracks.

Prepared by the author.

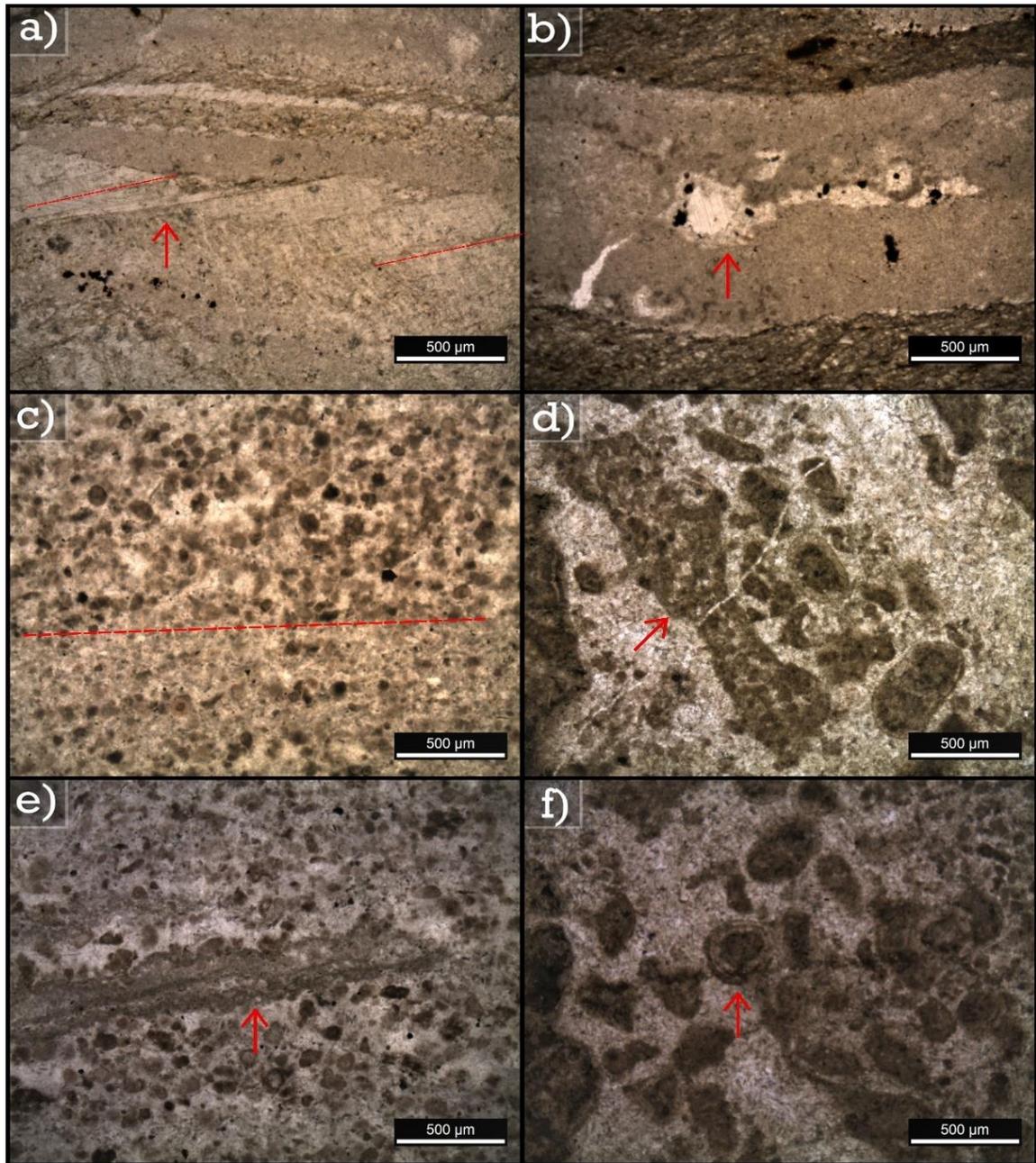


Figure 5 - Carbonate microfacies of Lagoa do Jacaré Formation

a) Domino microstructure probable associated with salt precipitation or result of differential compaction of patchy deposits of carbonate. (Lithofacies MLb); b) Fenestras or birds-eye filled by two generations of sparry calcite and framboidal pyrite in a mudstone interlayered by two organic-rich layers (Lithofacies LM and LMB); c) The sedimentary structure of packstone formed by the intercalation of wackestone (in the lower part) layer and packstone (in the upper part) layer ( PCKcs and PCKhl); d) The framework of FLT lithofacies is filled by sparry cement where a packstone intraclast and some peloids are seen e) Microbial laminite intraclast immersed in peloids. (PCK and FLT); f) Poorly preserved ooid (RUD and FLT).

Prepared by the author.

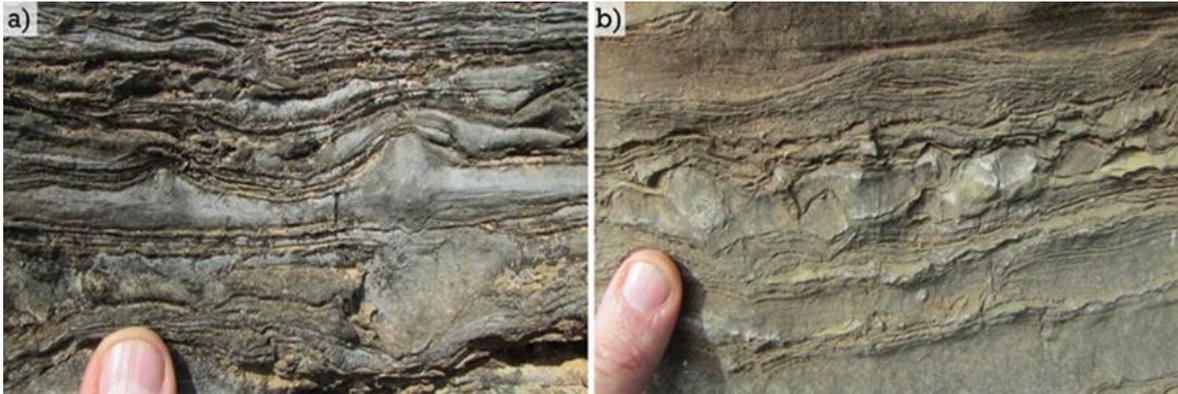


Figure 6 - MLb facies

- a) Occurrence of tepees in the microbial laminites; b) Large calcite crystals probable after evaporite minerals adjoined by microbial laminite below and above.

Prepared by the author.

#### 4.2. Lithofacies successions

The Lagoa do Jacaré Formation deposits in the Ubaí area, are composed of vertically-stacked microbial laminite, mud carbonate, packstone, heterotithic carbonate, and carbonatic conglomerate. All of these could occur in different proportions through the succession, and may show different facies relationships between them. As a result, an array of different possible facies stacking patterns can be observed, which have been analyzed thoroughly in the 25 detailed columnar sections measured in the best exposed stratigraphic interval of the study area (figure 7).

The peritidal carbonate environment of the Lagoa do Jacaré Formation in the Ubaí area was a mud flat with spread microbial mats. And the tidal channel and related deposits composed of packstone floatstone and rudstone occur across this environment. These related deposits are form when a stream breaks its natural or artificial levees and deposits sediment in this mud tidalplain. Therefore this record can be divided in subtidal, where the sedimentary processes are subaqueous; intertidal, where subaqueous and subaerial processes occur; and supratidal, where subaerial processes occur almost exclusively (Tucker and Wright 1990). Although this subdivision is definitive in terms of sediment-water interaction, a challenge to be surpassed is that the same facies can occur in different tidal zones (figure 8). After all, there are sedimentary processes that can occur in more than one of these sub-environments (Jimenez de Cisneros and Vera 1993; Haas 2007; Quijada et al. 2020). To aid this type of study, Pratt (2010) developed a table-guide to identify sedimentary features and their

distribution in the three zones of the aforementioned tidal environment. Based on this guide, it is possible to create a similar table, but using the lithofacies presented in the present research (figure 8).

There are some diagnostic facies associations that can be used to properly identify the tidal settings. The occurrence of MLb with MUDdc indicate the supratidal zone, because this structures form through desiccation on exposure (subaerial process). The co-occurrence of TB, Hlb, and MUDsc are indicative of subtidal zones. The MUDsc form through sediments dewatering, subaqueous, often resulting from salinity changes. The Hlb form through variations of sediment supply or intensity of currents in subaqueous environments. The natural duality presented in the intertidal zone (i.e., subaerial and subaqueous processes) makes this zone of arduous identification (Tucker 2003), thus the use of a proper stratigraphic panel from detailed stratigraphic descriptions is crucial.

The vertical and lateral relationships of the Lagoa do Jacaré lithofacies (figure 7) helped to define the intervals of each facies association and its repetition through the studied section. The repetitive vertical patterns are cyclicity expressions that respond to allo genetic mechanisms. On the other hand, the patchy lateral facies distribution suggests some variation that are most likely linked with autogenic mechanisms related to hydraulic factors. These variations occur according to the environmental subdivisions, and thus the facies arrangement produces a vertical succession of facies that can be subdivided into shallowing-upward, decimeter to meter-thick cycles (Pratt 2010; Yang and Lehrmann 2014; Zhang et al. 2015). Identifying the boundary of these shallowing upward was not an easy task. There were a lot of surfaces in the supratidal zone. These are related to subaerial exposure. Therefore, to evaluate the allo genetic meaning of these surfaces, we need to analyze their lateral continuity and the overlap by facies related to subaqueous processes.

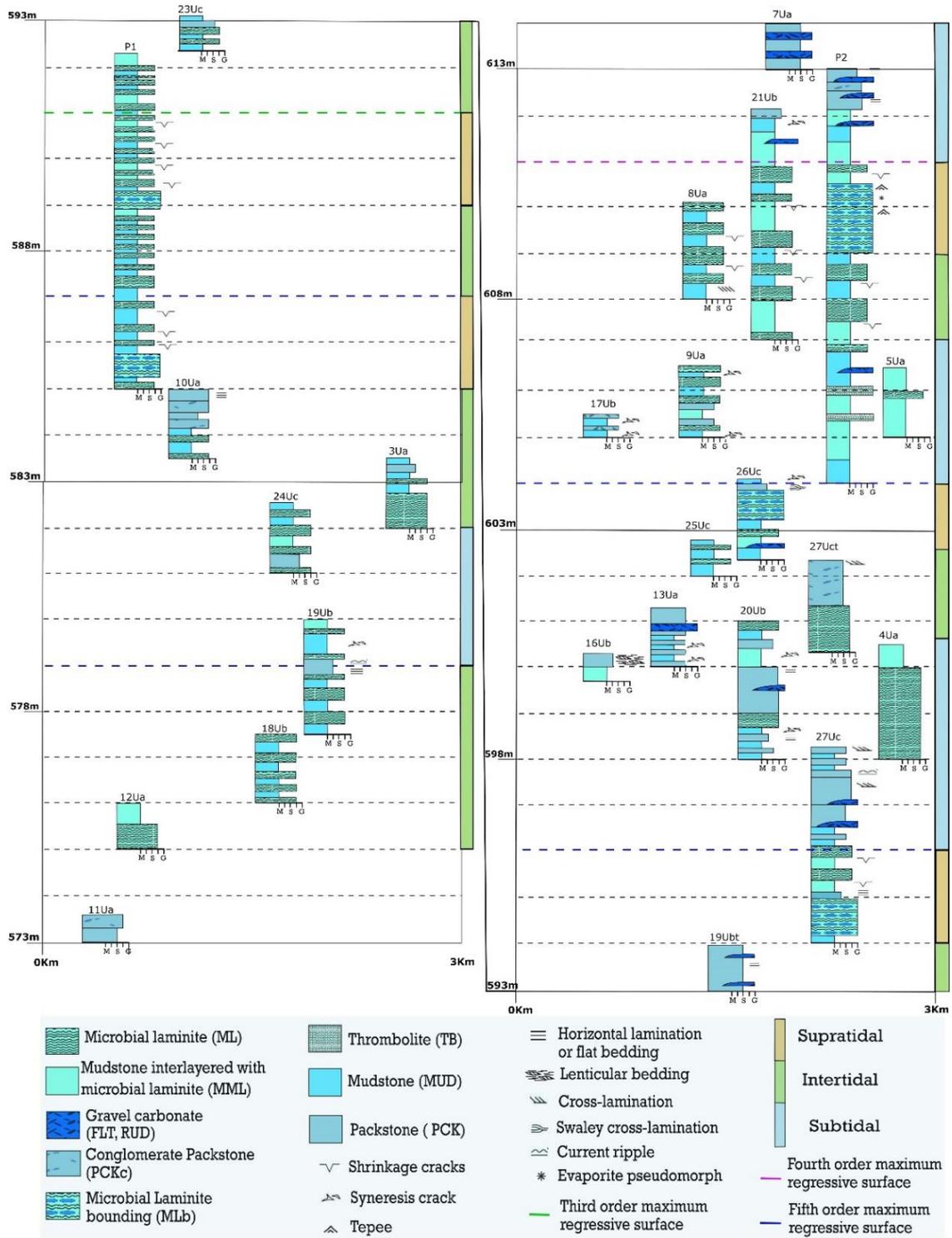


Figure 7 - Stratigraphic panel

The stratigraphic panel was made with data collected in the field. It shows the east-west distribution of the stratigraphic survey. On the left, the cross-sections are between 573 to 593 meters (the bottom record). On the right, they are between 593 to 614 meters (the top record). The colored vertical bar on the right of the panel shows the lithofacies successions' interpretation related to supratidal, intertidal, and subtidal zones.

Prepared by the author.

TIDAL FLAT FACIES	SUPRATIDAL	INTERTIDAL	SUBTIDAL
ML		████████████████████	████████████████████
MLb	████████████████████		
MML		████████████████████	████████████████████
TB			████████████████████
MUD		████████████████████	████████████████████
MUDdc	████████████████████		
MUDsc			████████████████████
Hlb			████████████████████
Hcl	████████████████████		
PCK		████████████████████	████████████████████
PCKcr		████████████████████	████████████████████
PCKhl		████████████████████	████████████████████
PCKcl		████████████████████	████████████████████
PCKscs	████████████████████	████████████████████	████████████████████
FLT		████████████████████	████████████████████
RUD		████████████████████	████████████████████

Figure 8 - Facies determined in the field and their occurrence in the different settings of a peritidal environment

Prepared by the author.

## 5. Discussion

### 5.1. Analysis of stratigraphic cyclicity

The stacking pattern of the Lagoa do Jacaré Formation in the Ubaí area indicates that the sediments accumulated during a marine transgression punctuate higher-order fluctuation in relative sea-level (figure. 9). The minor fluctuations produced m-scale cycles is interpreted as peritidal carbonatic cycles in shallow, low angle, carbonate ramp (James 1984; Jimenez de Cisneros and Vera 1993; Pratt 2010).

The peritidal cycles reflected allogenic mechanisms that lead to episodic creation of accommodation filled by regional progradation, retrogradation or aggradation (Pratt, 2010). Spencer and Toker (2007) show that Phanerozoic tidal cycles are of the fourth or fifth order. All over the geologic time, the overall characteristics of these cycles are similar as we can see in the Mesoproterozoic (Wright, and Burchette 1996); Ediacaran (Caird et al. 2017; Drummond et al. 2015); Late Cambrian (Osleger and Read 1991); Ordovician (Hersi and Dix 2000); Early Jurassic (Bosence et al. 2000); and Middle Triassic (Peterhansel and Egenhoff 2008). Catuneanu (2019) proposes a solution to determine cycle orders without fossil content or other evidence indicating a more precise depositional age. He related the thickness of the sedimentary package with the order of the cycle (Spencer and Tucker 2007). Therefore, it was

possible to identify one second order hemicycle, two third order hemicycles, three fourth order cycles, and seven fifth order or peritidal cycles in the Lagoa do Jacaré Formation (figure 7).

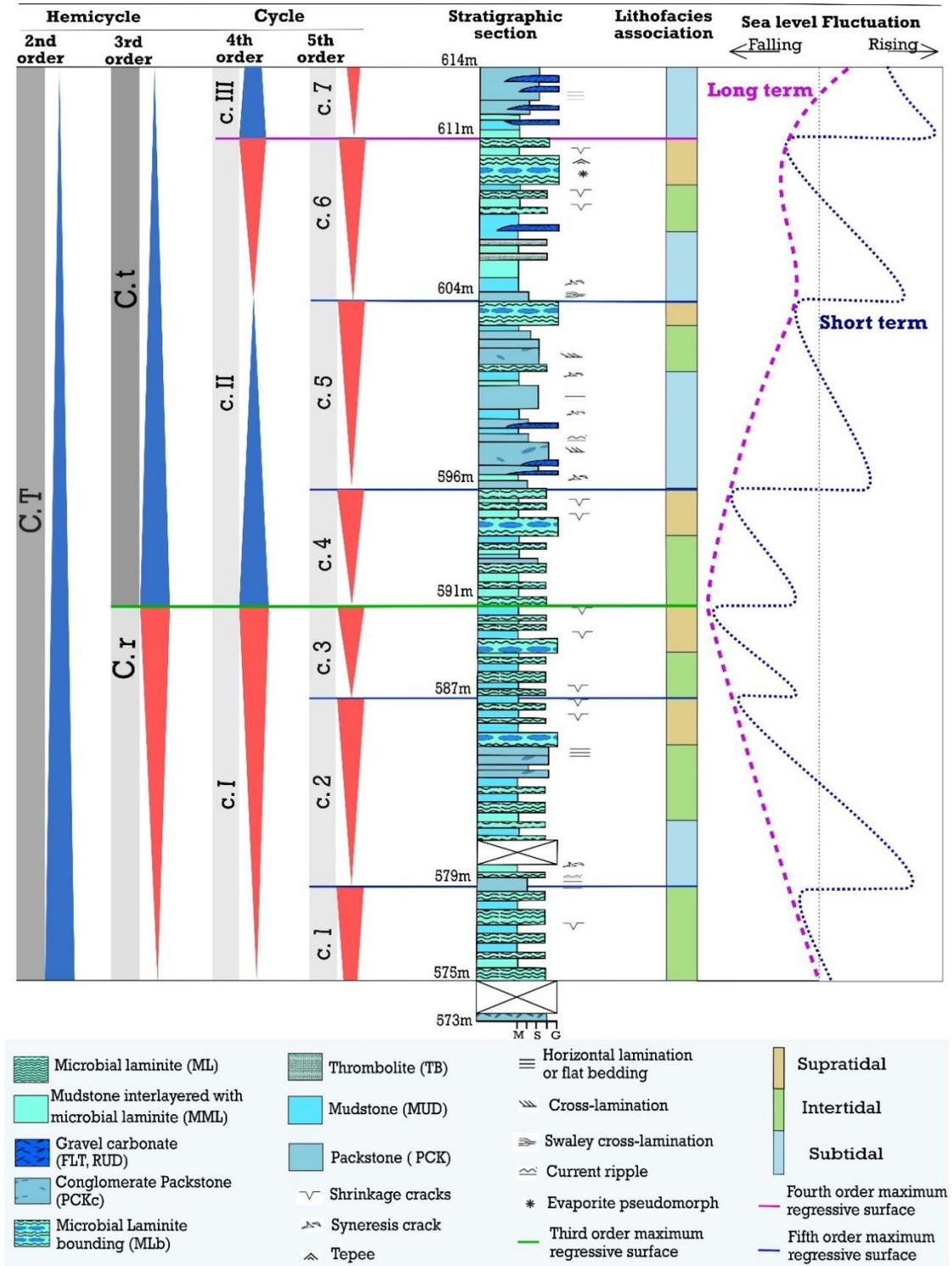


Figure 9 - Stratigraphic section of the Lagoa do Jacaré Formation in Ubaí area

Facies associations, stratigraphic cycles, and fluctuations in sea level during its deposition. Interpreted according to Pratt (2010) quote that tells us the thickness of the tide cycle is proportional to sea-level variations.

### 5.1.1. Fifth order (asymmetrical tidal cycle)

From a detailed facies analysis and defining tidal zones for each facies association, we identified seven shallowing-upward tidal cycles. A theoretical and ideal tidal cycle (figure 10) in higher sea level fluctuation (c.Xhf) begins with conglomeratic and sandy carbonates interspersed by MUD<sub>sc</sub>, Hib, ML, MML, and TB from the subtidal zone. Above, a shift is observed into more frequent beds of microbialites, mudstone and some subaerial exposure surfaces, while conglomeratic and sandy carbonates become less frequent. This shift is interpreted as a shallowing trend from sandy subtidal to muddy intertidal deposits. Finally, the theoretical tidal cycle culminates in a progressive and significant increase in the abundance of microbialite beds, mudstone and subaerial surfaces deposited in a supratidal zone (lithofacies MUD, MUD<sub>dc</sub>, MML, ML, ML<sub>b</sub> and some thin sandy bodies). The other idealized tidal cycle formed during lower sea level fluctuation (c.Xlf) is similar to c.Xhf with the exception of not recording the subtidal zone and its lithofacies associations, and the largest content of organosedimentary lithofacies could be related with the least rework of these lithofacies.

The fifth order cycles identified in this work show that the supratidal lithofacies association from a previous cycle often abruptly gives place to the subtidal zone of the following cycle (and no facies changes clearly demonstrate a progressive drowning) (figure 9). Therefore, the transgressive events were considered as non-recorded due to either fast reworking or non-deposition. Thus, we interpret the tidal cycles as asymmetric. The thicknesses of each fifth order cycle were used to estimate the sea-level fluctuations, that could theoretically yield an approximate measure of the tidal range when the eustatic level suffers only small changes (Masse et al. 2003; Pratt 2010). Thus, even without the transgressive record, the short-term sea-level fluctuations can be inferred (figure 9).

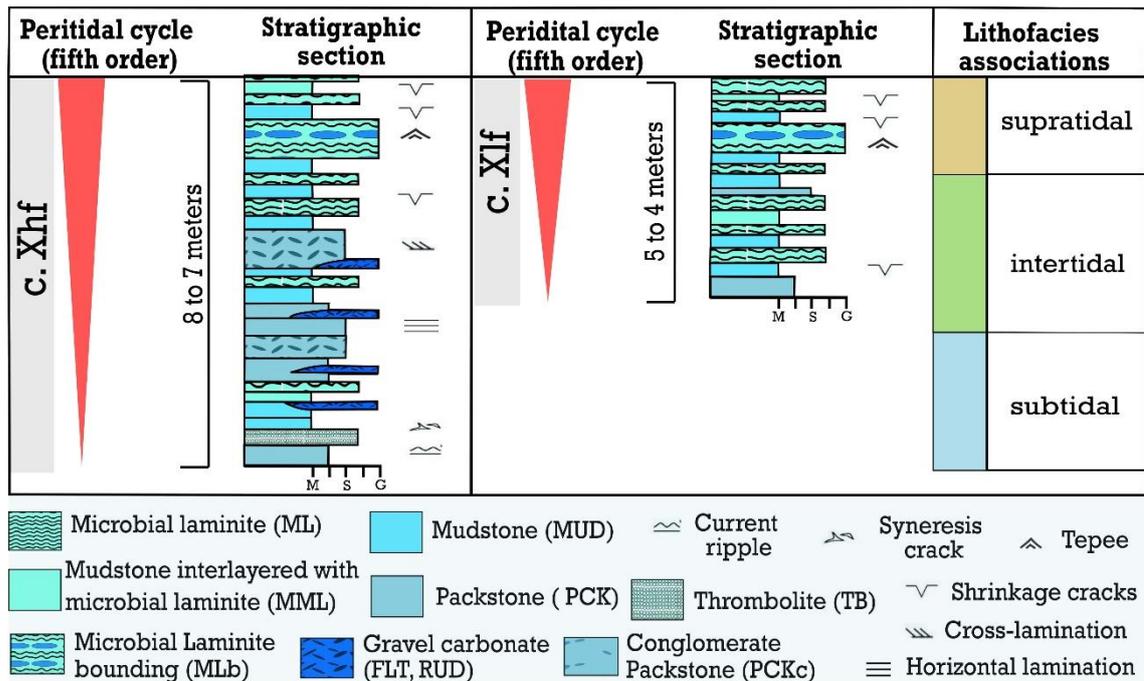


Figure 10 - Idealized tidal cycles based on the lithofacies identified in the field and their distribution in the different sub-environments

**c.X** symbolizes an idealized tidal cycle. **C.Xhf** means idealized cycle in higher sea level fluctuation and **c.Xlf** means idealized cycle in lower sea level fluctuation.

Prepared by the author.

Each fifth-order tidal cycle in figure 9 is named with a lowercase "c" added to a number from 1 to 7. The seven identified shallowing upward tidal cycles have thicknesses ranging from 8 to 4 meters and, as mentioned, due to the constant stacking of regressive intervals without intermediate transgressive trend, the tidal cycles are bounded between each other by amalgamated maximum regressive and maximum flooding surfaces. To simplify, we choose to designate these boundaries as regressive surfaces.

### 5.1.2. Fourth order T-R cycles

There are three fourth-order cycles. To name and identify each fourth-order T-R cycle, we use the lowercase "c" and a roman number from I to III (figure 9). The fourth-order cycles respond to longer-term fluctuations in sealevel and must be analyzed from a critical evaluation of the fifth-order tidal cycles. The thinning of the c1, c2, and c3 tidal cycles, the clear increase in the number of microbial laminites beds, and subaerial exposure surfaces toward the c2 and mainly the c3 cycles, are probably the result of a normal regression and

progradation, which reduce the accommodation and proportionally increase the occurrence of facies related to inter and supratidal zones. From the upper c3 to the upper c5, the tidal cycles are arranged in a thickening-upward profile corresponding to a fourth-order transgression. Noteworthy is the fact that c5 records the thickest tidal cycle and with a thick subtidal zone that was absent in c4 and c3. Also, the termination of the c5 is marked by the absence of once common mud cracks and the low number of microbialite beds, suggesting an end of the tidal cycle in a slightly deeper environment than the previous ones. The consequence is the coincidence of a fourth-order maximum flooding surface (end of c.II) with the culmination of the c5 tidal cycle. The tidal range (i.e., cycle thickness) from c5 to c6 decreases, and the upper c6 is marked by thick beds of MLb, other microbial laminites, high number of beds with mud cracks, and evaporite pseudomorphs. Thus, a fourth-order regressive cycle is coincident with the fifth-order tidal cycle of c6. The c7 is an incomplete cycle, but the thicker subtidal zone and the greater occurrence of conglomeratic carbonates and packstones suggest that a new transgression initiates after the last fourth-order regression. Therefore, c1, c2, and c3 cycles were deposited during a higher-order regression (c.I), while c4, c5, and c6 record a complete transgressive-regressive fourth-order sequence (c.II). The c.III cycle is probably the initiation of a new upward transgression trend (figure 9).

### **5.1.3. Third and second order hemicycles**

The Lagoa do Jacaré Formation in the Ubaí area have a clear general transgressive trend. Thick intervals of supra to intertidal zones at the base progressively shorten towards the top as the subtidal zones thicken. From the base to the top, microbial laminites and subaerial exposure surfaces are superseded by a higher amount of conglomeratic carbonates and packstone. This general transgressive trend is also supported by two outcrops above the studied interval and close to the 620 meters high that denote sedimentation in deeper water (upper shoreface; figure 11) than the peritidal carbonates. The higher-order transgression can be further subdivided into two lower order hemicycles, with a maximum regressive surface positioned, where microbial laminites become more frequent (top of the fifth-order c.3 and fourth-order c.I cycles). Thus, the general transgressive trend is interpreted as a second-order hemicycle subdivided into third-order regressive and transgressive hemicycles.



Figure 11 - Grainstones that occur above the 620-meter height

On the left, in red, the hummocky stratification is highlighted.

On the right, massive grainstones with weathering features.

Prepared by the author.

## 5.2. Paleoenvironmental evolution

From the analysis of the different cycle orders, it is conceived that the Lagoa do Jacaré Formation in the Ubaí area was a mud flat with spreaded microbial mats interbedded by tidal channel and sand carbonates related deposits. The record suggests a dynamic coastal environment in terms of shoreline shifts and sea level fluctuations. The predominance of delicate microbial laminites, mudstones, and the low number of beds reworked by currents or waves, suggest peritidal carbonates from a low-angle, protected by the oolitic shoals and domal stromatolites in a ramp setting. Thus, the lithofacies associations may be efficient paleobathymetric indicators (Masse et al. 2003). In general, as seen from the second-order hemicycle, the entire studied section was deposited during a sea level rise.

According Uhlein et al. (2019), there are a progradation and a retrogradation trend in Januária paleo high. Record on Lagoa do Jacaré Formation These are related with an end of second-order progradation carbonate succession (~70 m), and with the beginning of second-order retrogradation upper succession (~70 m). The stratigraphic data was collected in the Januária region, 100 km NE of Ubaí Therefore, the Ubaí record could be correlated to the beginning of the upper part of the Lagoa do Jacaré Formation in a basin scale.

Internally to its regional transgression, the third-order shifts of the shoreline were seaward and then landward. These are the response to the fourth-order change, which in turn is composed of elemental fifth-order tidal cycles variation (figure 12). A direct correlation is

made between the tidal cycle's thicknesses and shoreline shifts. The shortening or lengthening of the fifth-order cycles towards the top are related to a seaward or landward shoreline shift, respectively. Therefore, during the c.1 to c.3 cycles, the shoreline migrates seawards, and the tidal current lower in energy. Therefore, we observe a rise in organic and mud facies in the carbonate record. On the other hand, in c.4 and c.5 the shoreline migrates toward the continent, and the allochem-rich facies become frequent. Similar behavior happens in c.6 that migrates seaward, and with c.7 that migrates toward the land (figure 12).

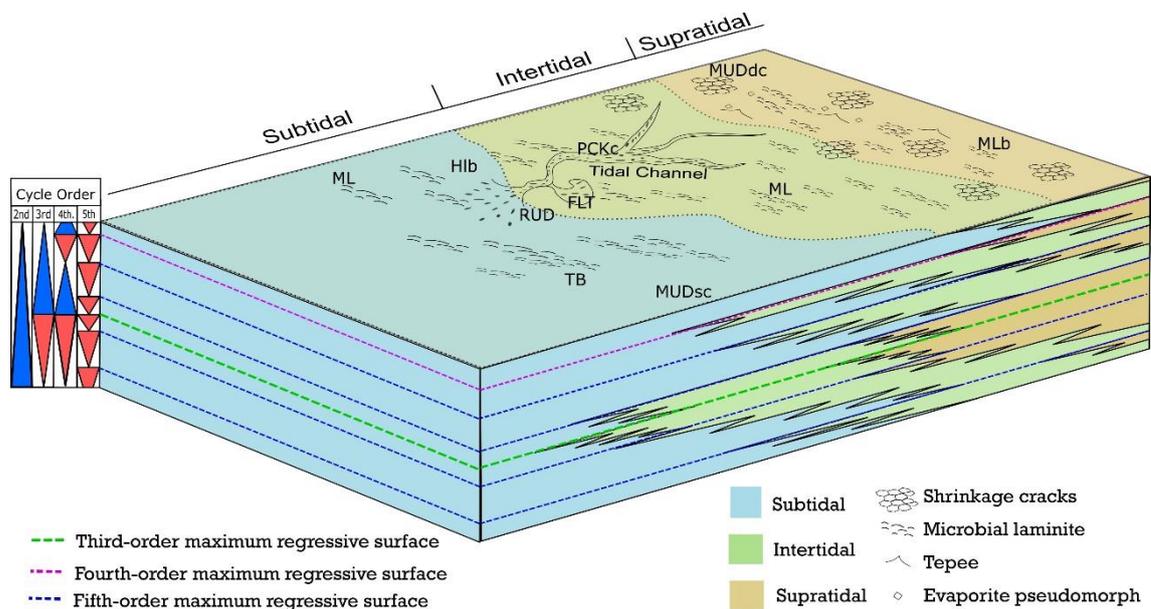


Figure 12 - A schematic block diagram showing the paleoenvironmental evolution in a carbonate mud peritidal depositional system

The progradations and retrogradations caused by the stratigraphic cycles identified in this study are represented and the distribution of the main lithofacies.

Prepared by the author.

### 5.3. Tidal records in a restricted sea: how to reconcile?

The tidal cycles described in the Lagoa do Jacaré Formation in the Ubaí area bring the opportunity to discuss former interpretations of a restricted basin setting during much of the Bambuí Group deposition (e.g., Martins and Lemos 2007; Martins-Neto 2009; Uhlein et al., 2019; Cui et al. 2020; Caetano-Filho et al. 2020). Modern analogs of 100's of thousands of square km enclosed seas, such as the Baltic, Caspian, and Black Sea, present striking small tide ranges of less than 23 cm high (Levyant et al. 1994; Kulikov and Medvedev 2013;

Medvedev et al. 2016). Although comprising huge areas on continents, these epicontinental seas have much smaller water masses than oceans and thus the effects of gravitational forces between Earth, Moon, and Sun are almost inexpressive. Stratigraphic analysis of ancient restricted basins suggests microtidal influence that in some cases are considered virtually non-tidal (Tucker and Wright 1990; Pratt 2010; James and Jones 2016). The thicknesses of each tide cycle here described are from 4 to 8 meters high (mean = 6.4 m, n = 5). Thus, the tidal range recorded in the Lagoa do Jacaré carbonates in the Ubaí area is dozens of times higher than moderns major enclosed seas. It is known that Precambrian oceans were probably subjected to stronger tidal forces due to a shorter distance between Earth and Moon (Williams 2000; Coughenour et al. 2009). Based on different possible Lunar recession rates, by the late Ediacaran, the Earth-Moon distance was the equivalent of 56 to 59 Earth radii (Williams 1994, 2000; Rodrigues et al. 2019). Once the current distance is approximately 60 Earth radii, the minimum and maximum ratios of the past to the present Earth-Moon distance ranges from 0.933 to 0.983 (6.7 to 1.7% difference) during the late Ediacaran, which gives increments of 1.04 to 1.16 times the modern gravitational force responsible for Earth tides. By these simple calculations it is clear that an increase in the tidal forces due to a greater proximity between Earth and Moon is insufficient to explain macrotides in late Ediacaran restricted basins.

Uhlein et al. (2019) showed a consistent trend of decreasing  $\delta^{13}\text{C}$  values towards the top, from +15 to +6‰, in 120 m-thick carbonates of the Lagoa do Jacaré Formation on the Januária high-land basement. Such a continuous isotopic shift is presumably linked to a progressive change in basin geographic and/or biochemical scenario towards more open ocean conditions (Cui et al. 2020). After a long period of basin restriction initiated at the upper Sete Lagoas Formation (Paula-Santos et al. 2017), our data suggest that the timing of a likely reopening of the Bambuí basin most likely occurred in the upper half of the Lagoa do Jacaré Formation. This hypothesis is based on isotopic data from the lower Serra da Saudade Formation yielding lower  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ,  $\delta^{34}\text{S}_{\text{pyrite}}$  and higher  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  signals compared with the lower half of the Lagoa do Jacaré Formation (Cui et al. 2020). Our novel sedimentologic and stratigraphic data reinforce it by suggesting a probably low-angle carbonate shelf developed on a semi-enclosed epicontinental sea, where due to funneling of the water flow, strong tidal currents and high tidal ranges act at the shore. The recovery from a restricted and highly methanogenic basin to a probably more open and oxidant sea water (see the youngest Bambuí carbonates in Uhlein et al. 2017, 2019, 2021) was probably slow and intermittent, with a duration of hundreds of thousands to a few million years.

## 6. Conclusions

Due to its particular geochemical dataset and recent interpretations of depositional settings and biogeochemical scenarios, the Lagoa do Jacaré Formation from the Bambuí Group is probably the most enigmatic stratigraphic unit of the basin. In this paper, we expanded the knowledge of the Lagoa do Jacaré formation by applying a high-resolution systematic approach on 41 meters of microbialites and associated carbonatic rocks in Ubaí area, north of Minas Gerais state. Sixteen lithofacies were grouped into subtidal, intertidal, and supratidal settings of a peritidal environment and had their stratigraphic arrangement of second-order to fifth-order cycles unveiled and interpreted in terms of short and long-term fluctuations in the sea level. Seven asymmetrical tidal cycles (fifth-order cycles) with an average thickness of 6.4 meters were deposited during a regional transgression (second-order cycle). A correlation between tidal cycle thicknesses and tidal ranges on an ancient basin shore is feasible. Thus, the upper Lagoa do Jacaré Formation in Ubaí area was likely deposited during a time of strong tidal currents acting on the shore, which is only possible if the Bambuí basin was at least partially connected to the global ocean. We interpret a semi-enclosed epicontinental sea for part of the upper Lagoa do Jacaré Formation and suggest that a partial reopening of the Bambuí basin may have started in the upper Lagoa do Jacaré Formation. Our data reinforce the necessity of high-resolution sedimentologic and stratigraphic field data in order to properly understand the unique nature of the middle Bambuí units and the geotectonic framework of the basin during late Ediacaran and early Cambrian.

## 7. References

- Alkmim, F.F. & Martins-Neto, M.A. 2001. A bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: C.P. Pinto & M.A. Martins-Neto (eds). *Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais*;
- Alkmim, F.F., Martins-Neto, M.A., 2012. Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco craton, eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology***33**, 127–139.G-MG
- Alvarenga, C.J.S., Santos, R.V., Vieira, L.C., Lima, B.A.F., Mancini, L.H., 2014. Meso-Neoproterozoic isotope stratigraphy on carbonates platforms in the Brasília Belt of Brazil. *Precamb. Res.* **251**, 164–180.

- Atman, D., 2011. Controle lito-estrutural e estratigráfico na hidrogeoquímica e nas concentrações de fluoreto no Sistema aquífero cárstico-fissural do Grupo Bambuí, norte de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, Tese de Mestrado, 131 p.
- Awramik, S. M., 1971. Precambrian columnar stromatolite diversity: reflection of metazoan appearance. *Science*, **174**(4011), 825-827.
- Bosak, T., Knoll, A.H., and Petroff, A.P., 2013, The meaning of stromatolites: Annual Review of *Earth and Planetary Sciences*, 41, 21–44.
- Bosence, D. W. J., Wood, J. L., Rose, E. P. F., & Qing, H., 2000. Low-and high-frequency sea-level changes control peritidal carbonate cycles, facies and dolomitization in the Rock of Gibraltar (Early Jurassic, Iberian Peninsula). *Journal of the Geological Society*, **157**, 61-74.
- Burne, R. V., & Moore, L. S., 1987. Microbialites; organosedimentary deposits of benthic microbial communities. *Palaios*, **2**(3), 241-254.
- Caetano-Filho, S., Sansjofre, P., Ader, M., Paula-Santos, G., Guacaneme, C., Babinski, M., Bedoya-Rueda, C., Kuchenbecker, M., Reis, H.L.S., Trindade, R.I.F., 2020. A large epeiric methanogenic Bambuí sea in the core of Gondwana supercontinent? *Geosci. Front.* **12**, 203-218
- Caird, R. A., Pufahl, P. K., Hiatt, E. E., Abram, M. B., Rocha, A. J. D., & Kyser, T. K., 2017. Ediacaran stromatolites and intertidal phosphorite of the Salitre Formation, Brazil: Phosphogenesis during the Neoproterozoic Oxygenation Event. *Sedimentary Geology*, **350**, 55-71.
- Canfield, D.E., Poulton, S.W., Narbonne, G.M., 2007. Late-Neoproterozoic deep-ocean oxygenation and the rise of animal life. *Science* **315**, 92–95.
- Carminatti, M., Wolff, B., & Gamboa, L., 2008. New exploratory frontiers in Brazil. Proceedings of the 19th World Petroleum Congress. Proceedings of the 19th World Petroleum Congress. Madrid.
- Castro P.T.A. & Dardenne M.A., 2000. The sedimentology, stratigraphy and tectonic context of the São Francisco Supergroup at the southern boundary of the São Francisco craton, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, **30**: 345-437
- Catuneanu, O., 2019. Model-independent sequence stratigraphy. *Earth-science reviews*, **188**, 312-388.
- Caxito, F.A., Halverson, G.P., Uhlein, A., Stevenson, R., Dias, T.G., Uhlein, G.J., 2012 Marinoan glaciation in east central Brazil. *Precambrian Res.* 200–203, 38–58.
- Chiavegatto J.R.S., Gomez N.S., Dardenne M.A., Delgado C.E.R. 2003. Estratigráfico Grupo Bambuí nas regiões do Norte de Minas Gerais: Uma nova unidade estratigráfica em um contexto de inversão de bacia. In: Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 12, Ouro Preto, SBG-MG, Anais, CD-ROM.

- Coughenour, C. L., Archer, A. W., & Lacovara, K. J., 2009. Tides, tidalites, and secular changes in the Earth–Moon system. *Earth-Science Reviews*, **97**(1-4), 59-79.
- CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. (2003). Mapa geológico do estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: CPRM, 2003. Escala 1:1.000.000
- Cruz S.C.P., Alkmim F.F. 2006. The tectonic interaction between the Paramirim Aulacogen and the Araçuaí belt, São Francisco craton region, Eastern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **78**(1): 151-173
- Cui, H., Warren, L. V., Uhlein, G. J., Okubo, J., Liu, X. M., Plummer, R. E., Baele, S., Goderis, P., Claeys, Li, F., 2020. Global or regional? Constraining the origins of the middle Bambuí carbon cycle anomaly in Brazil. *Precambrian Research*, **348**, 105861.
- Dardenne M.A., 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 30 (2): 597-610.
- Demico R. V., & Hardie, L. A., 1994. Sedimentary structures and early diagenetic features of shallow marine carbonate deposits (No. 1). SEPM Society for Sedimentary.
- 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 P-cycle. *Sedimentology* **62**, 1978–2008.
- Dunham R.J., 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Ham, W.E. (Ed.) Classification of carbonate rocks. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, Memoir 1. 108-122.
- Dupraz C., Reid, R. P., Braissant, O., Decho, A. W., Norman, R. S., Visscher, P. T., 2009. Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats. *Earth-Science Reviews*, **96**(3), 141-162.
- Embry A.F.; Klovan, J.E., 1971 A Late Devonian Reef Tract on Northeastern Banks Island, Northwest Territories. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, **19** (4). 730–781.
- Embry, A. F., 1993. Transgressive–regressive (T–R) sequence analysis of the Jurassic succession of the Sverdrup Basin, Canadian Arctic Archipelago. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **30**(2), 301-320.
- Embry, A. F., 1995. Sequence boundaries and sequence hierarchies: problems and proposals. In *Norwegian Petroleum Society Special Publications* **5**, 1-11. Elsevier.
- Erwin, D.H., Laflamme, M., Tweedt, S.M., Sperling, E.A., Pisani, D., Peterson, K.J., 2011. The Cambrian conundrum: early divergence and later ecological success in the early history of animals. *Science* **334**, 1091–1097.
- Fragoso D.G.C.; Uhlein, A.; Sanglard, J.C.D.; Suckau, G.L.; Guerzoni, H.T.G. & Faria, P.H., 2011. Geologia dos grupos Bambuí, Areado e Mata da Corda na folha Presidente

- Olegário (1: 100.000), MG: registro deposicional do Neoproterozóico ao Neocretáceo da Bacia do São Francisco. *Geonomos*, **19**:28–38.
- Freitas, A. R., Uhlein, A., Dantas, M. V. S., & Mendonça, T. K., 2021. Caracterização em multiescala de carbonatos neoproterozóicos da Pedreira GMD, Formação Lagoa do Jacaré, Grupo Bambuí, Paraopeba-MG. *Geologia USP. Série Científica*, **21**(1), 10-120.
- Gaucher C., Sial, A.N., Halverson, G.P., Frimmel, H.E., 2009. The Neoproterozoic and Cambrian: a time of upheavals, extremes and innovations. In: Gaucher, C., Sial, A.N., Halverson, G.P., Frimmel, H.E. (Eds.), Neoproterozoic-Cambrian Tectonics, Global Changes and Evolution: A Focus on Southwestern Gondwan *Developments in Precambrian Geology***16**, 3–11.
- Haas, J., Lobitzer, H., Monostori, M., 2007. Characteristics of the Lofer cyclicity in the type locality of the Dachstein Limestone (Dachstein Plateau, Austria). *Facies***53**, 113–126.
- Hercos C.M., Martins-Neto M.A., Danderfer F. A., 2008. Arcabouço estrutural da Bacia do São Francisco nos arredores da Serra da Água Fria (MG), a partir da integração de dados de superfície e sub-superfície. *Revista Brasileira de Geociências*, **38** (2-Suplemento), 197-212.
- Hersi, O. S., & Dix, G. R., 2000. Blackriveran (lower Mohawkian, Upper Ordovician) lithostratigraphy, rhythmicity, and paleogeography: Ottawa Embayment, eastern Ontario, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **36**(12), 2033-2050.
- Iglesias, M. & Uhlein, A., 2009. Estratigrafia do Grupo Bambuí e coberturas fanerozóicas no vale do rio São Francisco, norte de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, **39**, 256–266.
- Jahnert, R. J., and Collins, L. B., 2011. Significance of subtidal microbial deposits in Shark Bay, Australia. *Marine Geology***286**, 106–111
- James, N.P., 1984. Shallowing-upward sequences in carbonates. In: Walker, R.G. (Ed.), Facies Models. *Geoscience Canada*, 126–136.
- James, N.O. and Jones, B., 2016. Origin of Carbonate Sedimentary Rocks. John Wiley & Sons, Chichester.
- Jimenez de Cisneros, C., Vera, J.A., 1993. Milankovitch cyclicity in Purbeck peritidal limestones of the Prebetic (Berriasian, southern Spain). *Sedimentology***40**, 513–537.
- Kaufman, A.J., Sial, A.N., Frimmel, H.E., Misi, A., 2009. Neoproterozoic to Cambrian palaeoclimatic events in southwestern Gondwana. In: Gaucher, C., Sial, A.N., Halverson, G.P., Frimmel, H.E. (Eds.), Neoproterozoic-Cambrian Tectonics, Global Change and Evolution: a focus on southwestern Gondwana. *Developments in Precambrian Geology*. 369–388.

- Konhäuser K. O., Amskold, L., Lalonde, S. V., Posth, N. R., Kappler, A., & Anbar, A., 2007. Decoupling photochemical Fe (II) oxidation from shallow-water BIF deposition. *Earth and Planetary Science Letters*, **258**(1-2), 87-100.
- Kuchenbecker M. and Pedrosa-Soares, A.C., 2010. O Grupo Bambuí na folha Luz (SE-23-Y-D-V). *Geonomos*, 18:46–52.
- Kulikov, E.A., Medvedev, I.P., 2013. Variability of the Baltic Sea level and floods in the Gulf of Finland. *Oceanology* **53**, 145–151.
- Lehrmann, D. J., Wan, Y., Wei, J., Yu, Y., & Xiao, J., 2001. Lower Triassic peritidal cyclic limestone: an example of anachronistic carbonate facies from the Great Bank of Guizhou, Nanpanjiang Basin, Guizhou province, South China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **173**(3-4), 103-123.
- Lehrmann, D. J., Minzoni, M., Li, X., Yu, M., Payne, J. L., Kelley, B. M., Schaal, E.K., and Enos, P., 2012. Lower Triassic oolites of the Nanpanjiang Basin, south China: Facies architecture, giant ooids, and diagenesis—Implications for hydrocarbon reservoirs. *AAPG bulletin*, **96**(8), 1389-1414.
- Levyant, A.S., Rabinovich, B.I., Rabinovich, A.B. 1994. Computation of seiche oscillations in seas of arbitrary configuration (exemplified by the Caspian Sea). *Oceanology* **33**, 588–598.
- Li, C., Hardisty D.S., Luo, G., Huang, J., Algeo, T.J., Cheng, M., Shi, W., An, Z., Tong, J., Xie, S., Jiao, N., Lyons, T.W., 2016. Uncovering the spatial heterogeneity of Ediacaran carbon cycling. *Geobiology* **15**, 211–224.
- Li, F., Deng, J., Kershaw, S., Burne, R., Gong, Q., Tang, H., ... & Tan, X., 2021. Microbialite development through the Ediacaran–Cambrian transition in China: Distribution, characteristics, and paleoceanographic implications. *Global and Planetary Change*, **205**, 103586.
- Logan, B. W., Read, J. F., Hagan, G. M., Hoffman, P., Brown, R. W., Woods, P. J., and Gebelein, C., 1974. Evolution and diagenesis of Quaternary carbonate sequences, Shark Bay, Western Australia. *Memoirs – American Association of Petroleum Geologists* **22**, 140–194.
- Magalhães P.M. 1989. Análise estrutural qualitativa das rochas do Grupo Bambuí, na porção sudoeste da Bacia do São Francisco. Dissertação de Mestrado, DEGEO/Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 100 p.
- Martins M. & Lemos V.L., 2007. Análise estratigráfica das seqüências neoproterozoicas da Bacia do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, **37**:156–167.
- Martins-Neto M. A. & Alkmim, F. F., 2001. Estratigrafia e evolução tectônica das bacias neoproterozóicas do Paleocôntinente São Francisco e suas margens: Registro da quebra de Rodínia e colagem de Gondwana. In: Pinto, C. P. & Martins-Neto, M. A. (eds.) Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais. Belo Horizonte, SBG/MG, 31-54.

- Martins-Neto M.A., 2009. Sequence stratigraphic framework of Proterozoic successions in eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, **26**,163–176
- Masse, J.P., Fenerci, M., Pernarcic, E., 2003. Palaeobathymetric reconstruction of peritidal carbonates Late Barremian, Urgonian, sequences of Provence (SE France). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 3132, 1–17
- Meert J.G., Lieberman, B.S., 2008. The Neoproterozoic assembly of Gondwana and its relationship to the Ediacaran–Cambrian radiation. *Gondwana Research***14**, 5–21.
- Medvedev, I. P., Rabinovich, A. B., & Kulikov, E. A., 2016. Tides in three enclosed basins: The Baltic, Black, and Caspian seas. *Frontiers in Marine Science*, **3**, 46.
- Miall A.D., 1977 A Review of the Braided-River Depositional Environment. *Earth-Science Reviews*, **13**(1) 1-62.
- Misi A., 2001. Estratigrafia isotópica das seqüências do Supergrupo São Francisco, coberturas neoproterozóicas do Cráton do São Francisco. Idade e correlações. Bacia do São Francisco. Geologia e Recursos Naturais. SBG, Núcleo de Minas Gerais, 67–92.
- Misi, A., Kaufman, A. J. et al., 2007. Chemostratigraphic correlation of Neoproterozoic successions in South America. *Chemical Geology*, **237**, 161–185
- Moreira, D. S., Uhlein, A., Dussin, I. A., Uhlein, G. J., & Misuzaki, A. M. P., 2020. A Cambrian age for the upper Bambuí Group, Brazil, supported by the first U-Pb dating of volcanoclastic bed. *Journal of South American Earth Sciences*, **99**, 102503.
- Moynihan, D.P., Strauss, J.V., Nelson, L.L., Padget, C.D., 2019. Upper Windermere Supergroup and the transition from rifting to continent-margin sedimentation, Nadaleen River area, northern Canadian Cordillera. *Bulletin 131* (9–10), 1673–1701.
- Myshrall, K. L., Mobberley, J. M., Green, S. J., Visscher, P. T., Havemann, S. A., Reid, R. P., & Foster, J. S., 2010. Biogeochemical cycling and microbial diversity in the thrombolitic microbialites of Highborne Cay, Bahamas. *Geobiology*, **8**(4), 337-354.
- Na, L., Kiessling, W., 2015. Diversity partitioning during the Cambrian radiation. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 112, 4702–4706.
- Och, L.M., Shields-Zhou, G., 2012. The Neoproterozoic oxygenation event:environmental perturbations and biogeochemical cycling. *Earth-Science Reviews***110**, 26–57.
- Osleger, D., & Read, J. F., 1991. Relation of eustasy to stacking patterns of meter-scale carbonate cycles, Late Cambrian, USA. *Journal of Sedimentary Research*, **61**(7), 1225-1252.
- Paula-Santos G.M.; Babinski, M.; Kuchenbecker, M.; Caetano-Filho, S.; Trindade, R.I. & Pedrosa-Soares, A.C., 2015. New evidence of an Ediacaran age for the Bambuí Group in Southern São Francisco craton (eastern Brazil) from zircon U–Pb data and isotope chemostratigraphy. *Gondwana Research*, **28**, 702–720.

- Paula-Santos, G.M., Caetano-Filho, S., Babinski, M., Trindade, R.I.F., Guacaneme, C., 2017. Tracking connection and restriction of West Gondwana São Francisco basin through isotope chemostratigraphy. *Gondwana Res.* **42**, 280–305.
- Peterhänsel, A. R. N. D. T., & Egenhoff, S. O., 2008. Lateral variabilities of cycle stacking patterns in the Latemar, Triassic, Italian Dolomites. *SEPM Spec Publ*, **89**, 217-229.
- Pimentel M.M.; Rodrigues, J.B.; DellaGiustina, M.E.S.; Junges, S.; Matteini, M. & Armstrong, R., 2011. The tectonic Evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil, based on SHRIMP and LA-ICPMS U–Pb sedimentary provenance data: a review. *Journal of South American Earth Sciences*, **31**:345–357.
- Pratt B.R., 2010. Peritidal carbonates. In: James, N.P., Dalrymple, R.W. (Eds.), *Facies Models 4*. Geological Association of Canada, pp. 401–420.
- Quijada, I. E., Benito, M. I., Suarez-Gonzalez, P., Rodríguez-Martínez, M., & Campos-Soto, S., 2020. Challenges to carbonate-evaporite peritidal facies models and cycles: Insights from Lower Cretaceous stromatolite-bearing deposits (Oncala Group, N Spain). *Sedimentary Geology*, **408**, 105752.
- Reis H.L.S.; Alkmim, F.F.; Fonseca, R.C.S.; Suss, J.F.; Nascimento, T.C. & Prévatti, L.D., 2016. The São Francisco Basin. In: M. Heilbron; U.G. Cordani & F. Alkmim (eds.) *São Francisco Craton, Eastern Brazil: tectonic genealogy of a miniature continent*, Springer, p. 117–143.
- Reis, H.L.S., Suss, J.F., Fonseca, R.C.S., Alkmim, F.F., 2017. Ediacaran forebulge grabens of the southern São Francisco basin, SE Brazil: craton interior dynamics during West Gondwana assembly. *Precambrian Res.* **302**, 150–170.
- Ribeiro A.; Paciulo, F.V.P.; Senra, A.S.; Valeriano, C.M. & Trouw, R.A.J., 2008. Geologia da Folha de Piumhi SF.23-V-B-2. Rio de Janeiro, Programa Geologia do Brasil (CPRM-UFRJ).
- Riding R., 2000. Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial–algal mats and biofilms. *Sedimentology* **47**, 179–214.
- Riding, R., 2006. Cyanobacterial calcification, carbon dioxide concentrating mechanisms, and Proterozoic–Cambrian changes in atmospheric composition. *Geobiology*, **4**(4), 299-316.
- Riding R., 2011. Microbialites, stromatolites, and thrombolites. In: J.Reitner & V. Thiel (eds.) *Encyclopedia of geobiology*, Springer, p. 635–654.
- Rodrigues, P. D. O. C., Hinnov, L. A., & Franco, D. R., 2019. A new appraisal of depositional cyclicity in the Neoproterozoic Paleoproterozoic Dales Gorge Member (Brockman Iron Formation, Hamersley Basin, Australia). *Precambrian Research*, **328**, 27-47.
- Samankassou, E., Enos, P., 2019. Lateral facies variations in the Triassic Dachstein Platform: a challenge for cyclostratigraphy. *The Depositional Record* **5**, 469–485.

- Sanchez, E. A., Uhlein, A., & Fairchild, T. R., 2021. *Treptichnus pedum* in the Tres Marias Formation, south-central Brazil, and its implications for the Ediacaran-Cambrian transition in South America. *Journal of South American Earth Sciences*, **105**, 102983.
- Santos, D.M., Sanchez, E.A., & Santucci, R.M., 2018. Morphological and petrographic analysis of identified stromatolitic occurrences in Lagoa do Jacaré Formation, Bambuí Group, state of Minas Gerais, Brazil. *A Journal of the Brazilian Society of Paleontology* **21**(3), 195–207
- Schopf, J. W., Kudryavtsev, A. B., Czaja, A. D., & Tripathi, A. B., 2007. Evidence of Archean life: stromatolites and microfossils. *Precambrian Research*, **158**(3-4), 141-155.
- 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. 2009. The São Francisco Palaeocontinent. In: Gaucher, C., Sial, A.N., Halverson, G.P., Frimmel, H.E. (Eds): Neoproterozoic-Cambrian Tectonics, Global Change and Evolution: a focus on southwestern Gondwana. *Developments in Precambrian Geology*, **16**, 31-69.
- Signorelli N., 2009. Folha SE.23-Y-D-III Abaeté: Projeto Sete Lagoas - Abaeté. Belo Horizonte. Programa Geologia do Brasil
- Spence G. H., & Tucker, M. E., 2007. A proposed integrated multi-signature model for peritidal cycles in carbonates. *Journal of Sedimentary Research*, **77**(10), 797-808.
- Teixeira, J.B.G., Misi, A., da Silva, M. da G., 2007. Supercontinent evolution and the Proterozoic metallogeny of South America. *Gondwana Research* **11**, 346-361.
- Tucker M.E.; Wright, V.P., 1990 *Carbonate Sedimentology*. Oxford: Blackwell Science. p. 482.
- Tucker, M. E., 2003. *Sedimentary rocks in the field*. John Wiley & Sons.
- Uhlein A., Reis Junior W., Freitas A. R., Uhlein G.J, Ávila M. A. B., 2014. Projeto Norte de Minas Folha Ubaí SE-23-X-A-I Escala 1:100.000, CODEMIG
- Uhlein G. J., 2017. Análise de bacia sedimentar e quimioestratigrafia do Grupo Bambuí em Minas Gerais. Tese de Doutorado - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 125 p
- Uhlein G.J., Uhlein, A., Stevenson, R., Halverson, G.P., Caxito, F.A., Cox, G.M., 2017. Early to late Ediacaran conglomeratic wedges from a complete foreland basin cycle in the southwest São Francisco Craton, Bambuí Group, Brazil. *Precambrian Research*, **299**, 101–116.
- Uhlein G.J., Uhlein, A., Pereira, E., Caxito, F.A., Okubo, J., Warren, L., Sial, A.N., 2019. Ediacaran paleoenvironmental changes recorded in the mixed carbonate-siliciclastic Bambuí Basin, Brazil. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* **517**, 39–51.

- Uhlein, G. J., Caxito, F. A., Frei, R., Uhlein, A., Sial, A. N., & Dantas, E. L., 2021. Microbially induced chromium isotope fractionation and trace elements behavior in lower Cambrian microbialites from the Jaíba Member, Bambuí Basin, Brazil. *Geobiology*, **19** (2), 125-146.
- Vasconcelos C. & Bahniuk, A., 2015. Microbialitos recentes da região dos Lagos, Estado do Rio de Janeiro. In: T.R. Fairchild; R. Rohn & D. Dias-Brito (eds.) *Microbialitos do Brasil: do Pré-Cambriano ao Recente*, IGCE/UNESP, p. 60–75.
- Visscher, P. T., & Stolz, J. F., 2005. Microbial mats as bioreactors: populations, processes, and products. In *Geobiology: Objectives, Concepts, Perspectives* (pp. 87-100). Elsevier.
- Warren L.V.; Quaglio, F.; Riccomini, C.; Simões, M.G.; Poiré, D.G.; Strikis, N.M.; Anelli, L.E. & Strikis, P.C., 2014. The puzzle assembled: Ediacaran guide fossil *Cloudina* reveals an old proto-Gondwana seaway. *Geology*, **42**:391–394.
- Williams, G. E., 1994. History of Earth's rotation and the Moon's orbit: a key datum from Precambrian strata in Australia. *Australian Journal of Astronomy*, **5**(4), 135-147.
- Williams, G. E., 2000. Geological constraints on the Precambrian history of Earth's rotation and the Moon's orbit. *Reviews of Geophysics*, **38**(1), 37-59.
- Wright, V.P., Burchette, T.P., 1996. Shallow-water carbonate environments. In: Reading, H.G. (Ed.), *Sedimentary Environments, Facies and Stratigraphy*. Blackwell Science, Oxford (UK), pp. 325–394.
- Yang, W., Lehrmann, D.J., 2014. Peritidal carbonate cycles induced by carbonate productivity variations: a conceptual model for an isolated Early Triassic greenhouse platform in South China. *Journal of Palaeogeography*, **3**, 115–126.
- Yanez-Montalvo, A., Gómez-Acata, S., Águila, B., Hernández-Arana, H., & Falcón, L. I., 2020. The microbiome of modern microbialites in Bacalar Lagoon, Mexico. *PloS one*, **15**(3), e0230071.
- Zalán P.V. & Romeiro-Silva, P.C., 2007. Bacia do São Francisco. *Boletim de Geociências da Petrobras*, **15**,561–570.
- Zhang, Y., Chen, D., Zhou, X., Guo, Z., Wei, W., Mutti, M., 2015. Depositional facies and stratal cyclicity of dolomites in the Lower Qiulitag Group (Upper Cambrian) in northwestern Tarim Basin, NW China. *Facies*, **61**, 417.
- Zhu, M.Y., Zhuravlev, A.Y., Wood, R.A., Zhao, F.C., Sukhov, S.S., 2017. A deep root for the Cambrian explosion: Implications of new bio- and chemostratigraphy from the Siberian Platform. *Geology*, **45**, 459–462.

## **CAPÍTULO 3**

### **3. MANUSCRITO EM PREPARAÇÃO VISANDO PUBLICAÇÃO FUTURA**

Neste capítulo será apresentado um manuscrito produzido a partir da pesquisa efetuada e do levantamento estratigráfico realizado em Cordisburgo (região central de Minas Gerais, porção sul da BSF). O manuscrito ainda não foi submetido em periódico, mas encontra-se em processo final de elaboração. Este manuscrito trata da análise faciológica e paleoambiental, sob a ótica da estratigrafia de sequências, descrevendo o registro de um sistema deposicional de Laguna-ilha barreira, identificado na Formação Lagoa do Jacaré, Grupo Bambuí.

**Estratigrafia de seqüências de alta resolução em carbonatos de sistema deposicional laguna-ilha barreira, Formação Lagoa do Jacaré (Grupo Bambuí), Cordisburgo, Minas Gerais (Brasil)**

*High-resolution sequence stratigraphic of depositional system barrier-island carbonates, Lagoa do Jacaré Formation (Bambuí Group), Cordisburgo, Minas Gerais- Brazil*

Samuel Amaral Moura Silva<sup>1</sup>; Alexandre Uhlein<sup>2</sup>; Gabriel Jubé Uhlein<sup>2</sup>Márcio Vinicius Santana Dantas<sup>1</sup>

1 –Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. (Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, 31270-901).

2 – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. (Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, 31270-901).

### **Resumo**

Esse estudo apresenta uma detalhada análise cicloestratigráfica de alta resolução em carbonatos da Formação Lagoa do Jacaré, Grupo Bambuí, depositados proximoa transição Ediacarana-Cambriana, em área a sul de Cordisburgo, Minas Gerais. O registro estratigráfico de 27 metros de espessura evidenciou diferentes litofácies pertences a um sistema deposicional de laguna-ilha barreira. Este sistema é caracterizado por ser um cordão de areia carbonática conglomerática, composta por oóides e intraclastos, cortada por canais de maré, e com crescimento abundante de esteiras microbiais, sendo amplamente retrabalhado por fortes correntes de maré e por ondas de tempestade. Nele foram identificadas 11 litofácies divididas em três grupos texturais: 1) organosedimentares; 2) facies de carbonatos arenosos e 3) facies de carbonatos conglomeráticos. Foram identificados também 9 elementos arquiteturais, os quais juntamente com as litofácies, permitiram interpretar a presença de quatro elementos morfológicos sendo eles: canal de maré principal; *Washover*; *Ebb tidal delta*; *Flood tidal delta*. A partir disso, foi feito o estudo de associação de litofácies e foram identificadas 3 associações sendo elas o *back shoal*, *shoal* e o *shoal front*, as quais se repetiram ao longo do registro estratigráfico estudado. A interpretação desse estudo sob a ótica da estratigrafia de sequencias de alta resolução permitiu a identificação de um hemiclo transgressivo de terceira ordem, dois hemiciclos de quarta ordem, sendo o da base regressivo e o do topo transgressivo, compostos por ciclos de quarta ordem. Esses ciclos permitiram inferir sobre as flutuações de curta e longa duração do nível do mar, possibilitando assim uma compreensão sobre a evolução paleoambiental desse registroestratigráfico.

**Palavras-chave:** *Cicloestratigrafia; Evolução paleoambiental; Padrão de empilhamento; back shoal, shoal e o shoal front*

### **1. Introdução**

O sistema deposicional Laguna-ilha barreira carbonática oolítica tem relação com os principais reservatórios de óleo e gás do registro geológico (Harris e Weber, 2006; Lehrmann

et al., 2012). A geometria e a arquitetura interna do registro desse sistema deposicional e sua heterogeneidade foram bem documentados em importantes reservatórios, como o do Triássico Inferior na plataforma isolada pertencente à Bacia Nanpanjiang (Lehrmann et al., 2001, 2012). Outros exemplos são: a Formação Mississippian nos Estados Unidos (Handford, 1988; Qi et al., 2007); as Formações Khuff e Kangan, do Triássico (Esrafil-Dizaji et al., 2013; Faqira et al., 2013); a Formação Arab – Jurássico, do golfo Pérsico (Lindsay et al., 2006; Ehrenberg et al., 2007); e a Formação Feixianguan, também do Triássico, da China. Um importante análogo moderno são os barras oolíticas influenciados por marés, localizados nas Bahamas, os quais nos fornecem importantes informações sobre a distribuição espacial e a geometria desses cordões carbonáticos arenosos (Harris, 2010; Harris et al., 2012; Sparks and Rankey, 2013).

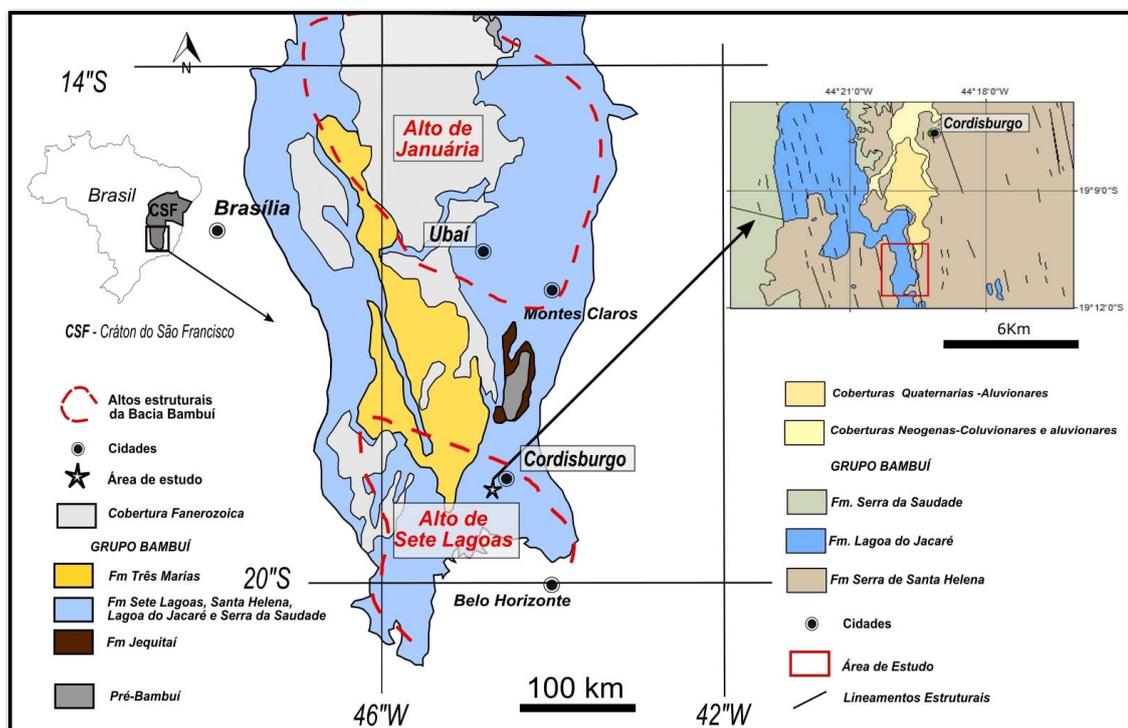


Figura 1- Contexto geológico e localização da área de estudo à sul de Cordisburgo, situada cerca de 100 km a Noroeste de Belo Horizonte-MG

Fonte: Compilado a partir dos trabalhos de Misi (2001), Reis et al. (2017) e Tuller et al. (2009)

O Grupo Bambuí representa uma cobertura cratônica ediacarana-cambriana que ocorre na Bacia do São Francisco (Alkmim & Martins Neto, 2001; Zalán P.V. & Romeiro-Silva, 2007), sendo constituído por sequências sedimentares mistas Terrígeno-carbonáticas. A Formação Lagoa do Jacaré é uma das cinco formações do Grupo Bambuí e consiste em

carbonatos com cerca de 100-130 m de espessura, caracterizada por possuir depósitos oolíticos (Costa e Branco, 1961; Dardenne, 1978; Martins e Lemos, 2007; Uhlein et al, 2017). Entretanto, ainda não foram feitos estudos para identificar e entender a geometria e a arquitetura de depósitos de ilha-barreira na Formação Lagoa do Jacaré. Por isso, a proposta desse trabalho é realizar uma análise estratigráfica detalhada, integrando o estudo de fácies sedimentares, dos elementos arquiteturais, com a estratigrafia de sequência de alta resolução dos depósitos da Formação Lagoa do Jacaré. A área de estudo localiza-se a Sul da cidade de Cordisburgo, município situado na região central de Minas Gerais (figura 1) Para isso foi realizado o levantamento estratigráfico detalhado de 27 metros de carbonatos microbiais e oolíticos da Formação Lagoa do Jacaré, considerado aqui como um possível registro de um sistema deposicional de Ilha-barreira.

## 2. Contexto geológico

O Grupo Bambuí constitui o preenchimento de uma extensa bacia *foreland* em resposta à edificação diacrônica dos orógenos Brasília (a oeste) e Araçuaí (a leste), que ocorreu durante o Período Ediacarano e início do Cambriano. Essa bacia abrange os estados de Minas Gerais, Bahia, Goiás e Tocantins, ocupando uma área de aproximadamente de 350.000 km<sup>2</sup> (Alkmim e Martins-Neto, 2001; Martins-Neto, 2009; Uhlein, 2017). A sedimentação de uma bacia *foreland* varia segundo a distância do *fold-thrust belt* (Decelles e Giles, 1996; Decelles e Currie, 1996), por isso o registro do Grupo Bambuí foi dividido em setores, compreendendo os setores oeste, central e leste (Uhlein *et al.*, 2017).

A área de estudo localiza-se no Alto de Sete Lagoas e no setor centro-leste, o qual é caracterizado por apresentar sequências sedimentares terrígeno-carbonáticas depositadas sob condições de baixas taxas de subsidência e um forte controle eustático (Castro e Dardenne, 2000 Martins-Neto e Alkmim, 2001; Martins & Lemos, 2007; Reis et al, 2017). Nessa porção, o Grupo Bambuí é composto, da base para o topo, pelas Formações Jequitaí, (paraconglomerados glaciais), Sete Lagoas (calcários e dolomitos), Serra de Santa Helena, (siltitos e carbonatos), Lagoa de Jacaré, (carbonatos oolíticos, microbialitos e pelitos), Serra da Saudade (siltitos,) e Três Marias, (arenitos arcossianos e siltitos) (Dardenne, 1978; Uhlein et al, 2017). É importante salientar que as estruturas do substrato, na forma de Altos e Baixos do embasamento da Bacia Bambuí, realizaram um importante controle estratigráfico durante a deposição, destacando-se o Alto de Januária, o Alto de Sete Lagoas e o Baixo de Pirapora, que foram identificados com base em dados geofísicos, de campo e de poços (Magalhães,

1989; Alkmim e Martins-Neto, 2001; Zalán & Romeiro-Silva, 2007; Hercos et al, 2008; Reis et al., 2017; Fig. 1). O Alto de Sete Lagoas é caracterizado por possuir estruturas de *horts e grabens*, por isso, é caracterizado por uma menor continuidade lateral das plataformas marinhas (Reis et al., 2017, Caetano-filho et al., 2019). A Formação Lagoa do Jacaré, objeto deste trabalho de pesquisa, é constituída por carbonatos oolíticos e pisolíticos cinza-escuros a pretos, localmente com estratificação cruzada, intercalados com folhelhos e marga, e algumas ocorrências de microbialitos.

Zircões detríticos analisados pelo método U-Pb e dados quimioestratigráficos sugerem que a deposição do Grupo Bambuí ocorreu durante o Ediacarano (Pimentel et al., 2011; Caxito et al., 2012; Paula Santos et al., 2015). Além disso, a ocorrência de metazoários biomineralizados provavelmente associados à ocorrência *Cloudina sp.* na porção basal a mediana da Formação Sete Lagoas, sugere fortemente que a deposição tenha ocorrido no final do período Ediacarano (Warren et al., 2014; Uhlein et al., 2019). Mais recentemente, grãos de zircão de uma camada de rocha vulcanoclástica na Formação Serra da Saudade (Moreira et al., 2020) e prováveis ocorrências de *Treptichnus pedum* na Formação Três Marias (Sanchez et al., 2021) estenderam a história deposicional da parte superior do Grupo Bambuí até o período Cambriano.

### 3. Materiais e métodos

Na área de estudo, localizada a sul da cidade de Cordisburgo (Minas Gerais) foram levantadas duas seções colunares de aproximadamente 25 metros de espessura cada uma, com uma distância entre elas de cerca de 500 metros. Os perfis verticais foram levantados na escala 1:20 e permitiram realizar a análise de 27 metros do registro de um sistema deposicional laguna-ilha barreira, na Formação Lagoa do Jacaré. As litofácies identificadas foram classificadas segundo propostas em trabalhos clássicos (Folk, 1962; Dunham, 1962; Embry and Klovan, 1971; Demicco and Hardie, 1994; Riding, 2000). O código dado as litofácies é similar ao código proposto por Miall (1977) para sistemas fluviais, em que a textura dominante da fácies se apresenta em letras maiúsculas, acrescidas de letra minúscula para designar a principal estrutura presente ou um atributo importante. O estudo dos elementos arquiteturais e suas classificações foram feitas com base nos estudos de Miall (1976; 1985) em ambientes fluviais e o estudo de Gani e Bhattacharya (2007) em um ambiente deltaico. A interpretação da cicloestratigrafia (estratigrafia de sequências de alta resolução) foi baseada em conceitos mais gerais descritos com propriedade por Catuneanu (2019) e no

contexto estratigráfico regional de Bambuí, como os trabalhos de Uhlein et al., (2019); Freitas et al., (2021).

#### **4. Análise de fácies sedimentares e elementos arquiteturais da Formação Lagoa do Jacaré na região de Cordisburgo, MG**

##### **4.1. Litofácies e seus processos deposicionais**

Através do levantamento estratigráfico detalhado, foram identificadas onze litofácies (tabela 1; figura 2), as quais foram classificadas em três grupos texturais: 1) Organosedimentar; 2) Carbonático arenoso; 3) Carbonático conglomerático.

Dois litofácies compõem o grupo dos carbonatos organosedimentares: laminitos microbiais (ML; figura 2f) e os laminitos microbiais domicos (MLd; figura 2e). A gênese desse grupo de carbonatos (microbiais) resulta principalmente do processo de organomineralização (mineralização induzida e influenciada por micro-organismos) (Dupraz et al., 2009). Ela está relacionada à atividade metabólica de um tapete microbiano, e às complexas interações entre esses biofilmes e seu ambiente circundante podem resultar na produção de microbialitos e litofácies associadas (Ridding, 2011; Bosak et al., 2013; Vasconcelos e Dittrich, 2014).

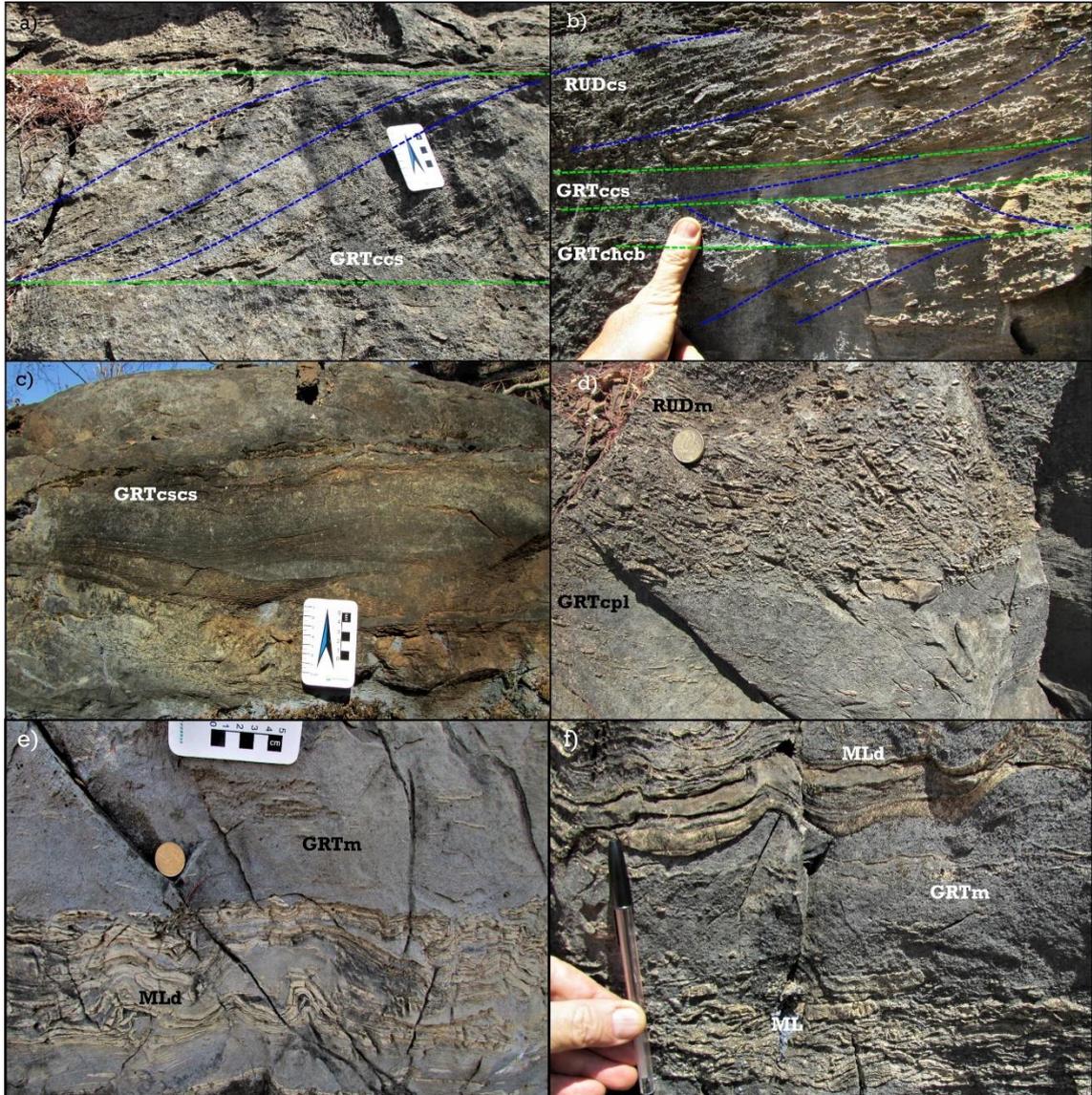


Figura 2 - Principais litofácies da Formação Lagoa do Jacaré em Cordisburgo-MG

(Em linha pontilhada azul se destacam as estratificações cruzadas e em verdes os sets das estratificações); a) *Grainstone* conglomerático com estratificação cruzada (GRTccs) de médio porte; b) *Grainstone* conglomeráticos com estratificação espinha de peixe (GRTchcb) e estratificação cruzada de pequeno porte (GRTccs) sotoposto por um *Floatstone* com estratificação cruzada (FLTcs); c) *Grainstone* conglomerático com estratificação swaley (GRTcscs); d) *Grainstone* conglomerático com laminação plano paralela (GRTcpl) sotoposto por rudstone maciço (RUDm); e) Laminito microbial com pequenos domos centimétricos (MLd) intercalado entre camadas e lóbulos de *grainstone* conglomerático maciço (GRTm) em que a parte rudacéa é composta principalmente por intraclastos de laminito microbial; f) Intercalação entre laminito microbial tabular (ML) e laminito microbial com pequenos domos (MLd) e lentes de *grainstone* conglomerático maciço contendo principalmente intraclastos de laminito microbial.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 1 – Litofácies: descrição e interpretação

Facies Code	Lithofacies	Sedimentary structure	Macroscopic Characterization	Depositional processes
<b>ML</b>	Microbial Laminite	Crinkly laminated or thinly-bedded	Microbial mat with thin, plate-like growth form between mudstone or oolitic grainstone layers	Organomineralization, trapping and binding in a low currents energy enviroment
<b>MLd</b>	Domal Microbial Laminite	Crinkly laminated with smal size isolated domes	Microbial mat with encrusting growth form between oolitic grainstone layers	Organomineralization, trapping and binding in a high currents energy enviroment
<b>GRTm</b>	Massive Grainstone to Packstone	–	Gray carbonate sand is composed of coarse to medium grains and it could be conglomeratic	Pseudoplastic debris flow
<b>GRTt</b>	Grainstone with Tepee	Small Tepee	Gray carbonate sand is composed of coarse to medium grains	Subaerial expose related to slat and marine diagenese
<b>GRTccs</b>	Conglomeratic Grainstone with cross-stratification	Cross-stratification	Gray carbonate sand is composed of coarse to medium grains. There is a coarse fraction composed of granules and pebbles. These presenting low sphericities and rounded to subangular, and marks the sedimentary structure.	Subaqueous currents in lower flow regime
<b>GRTchcb</b>	Conglomeratic Grainstone with herring-bone cross-bedding	Herring-bone cross-bedding	Gray carbonate sand is composed of coarse to medium grains. There is a coarse fraction composed of granules and pebbles. These presenting low sphericities and rounded to subangular, and marks the sedimentary structure.	Subaqueous currents in lower flow regime
<b>GRTcpl</b>	Conglomeratic Grainstone with parallel lamination	Parallel lamination	Gray carbonate sand is composed of coarse to medium grains. There is a coarse fraction composed of granules and pebbles. These presenting low sphericity subrounded, and marks the sedimentary structure	Subaqueous currents in high flow regime
<b>GRTcscs</b>	Conglomeratic Grainstone with swaley cross-stratification	Swaley cross-stratification	Gray carbonate sand is composed of coarse to medium grains. There is a coarse fraction composed of granules and pebbles. These presenting low sphericities and rounded to subangular, and marks the sedimentary structure.	Storm-current
<b>FLTm</b>	Massive Floatstone	–	Gravel made of clast-supported carbonate.The matrix composed of coarse to medium grains, and the coarse fraction composed of granules and pebbles presenting low sphericity and subrounded to angular	Pseudoplastic debris flow
<b>FLTcs</b>	Floatstone with cross-stratification	Cross-stratification	Gravel made of clast-supported carbonate.The matrix composed of coarse to medium grains, and the coarse fraction composed of granules and pebbles presenting low sphericity and subrounded to subangular	Subaqueous currents in lower flow regime
<b>RUDm</b>	Massive Rudstone	–	Gravel made of clast-supported carbonate.The matrix composed of coarse to medium grains, and the coarse fraction composed of granules and pebbles presenting low sphericity and rounded to subangular	Subaqueous currents in lower flow regime

Fonte: Elaborada pelo autor.

As litofácies ML e MLd são caracterizadas macroscopicamente pela intercalação entre lâmina decimétricas a centimétricas mais claras e mais escuras. As lâminas de coloração claras são de origem microbiana e as mais escuras são grainstones oolíticos, algumas vezes contendo intraclastos de fácies microbiais (figuras 2e e 2f). Essas duas fácies são distintas pela forma de crescimento dessas estruturas microbiais. Os ML possuem forma de crescimento tabular (James, 1983) o que indica baixas taxas de sedimentação em um ambiente de correntes moderadas. Já os MLd possuem forma de crescimento incrustante, o que contribui para a gênese dos pequenos domos centimétricos e isolados e uma maior recorrência de processos de trapeamento e colagem, como evidencia a figura 3d. Em ambas, foi possível identificar a presença de pirita framboidal, que se constitui, provavelmente, do resultado de atividades metabólicas de tapetes microbianos, responsáveis, entre muitos outros processos, pela remineralização de matéria orgânica, formação de pirita e precipitação de  $\text{CaCO}_3$  (e.g., Visscher e Stolz, 2005; Konhauser 2007).

O grupo das litofácies dos carbonatos arenosos são compostos por cinco litofácies, sendo elas: *Grainstonea packstone* maciço (GRTm; figuras 2e e 2f); *Grainstone* com *tepee* (GRTt); *Grainstone* conglomerático com estratificação cruzada de pequeno e médio porte (GRTccs; figuras 2a e 2b). Essas litofácies indicam mudanças na velocidade da corrente, em um regime de fluxo inferior. São descritos ainda *Grainstone* conglomerático, com estratificação espinha de peixe – *herringbone* (GRTchcb; figura 2b); *Grainstone* conglomerático com laminação plano paralela (GRTcpl; figura 2d); *Grainstone* conglomerático com estratificação cruzada *swaley* (GRTcscs; figura 2c), os quais representam a ação de correntes de tempestades que retrabalham o substrato por ação de ondas de tempestades em contexto litorâneo.

A microfábrica desses carbonatos arenosos contem de 60 a 80% de grãos aloquímicos, principalmente oólitos e intraclastos de *packstone*, *grainstone* e laminito microbial (figuras 3a e 3b). Entretanto, nos *grainstone* de granulometria areia média, observa-se uma predominância de grãos aloquímicos peloidais em detrimento a intraclastos e oólitos como mostra a figura 3c. Os oólitos possuem diâmetros de 0,21 a 1,40 mm, e os intraclatos são grânulos a seixos de formatos tabulares e irregulares. O espaço intergranular é preenchido principalmente por cimento espático calcítico e possui algumas porções preenchidas por matriz micrítica dolomítica. No *grainstone* com estrutura de fluxo, observa-se uma intercalação de lâminas de *grainstone* e *packstone*. As lâminas de *packstone* são caracterizadas por conter de 50 a 70% de grãos aloquímicos, sendo eles compostos por

moldes de oólitos substituídos por calcita espática e oólitos preservados com diâmetro que vão de 0,2 a 0,9 mm, em uma matriz micrítica dolomítica. Em direção ao topo da sucessão, observa-se a predominância dos intraclastos em detrimento dos oólitos.

O grupo dos carbonatos conglomeráticos são compostos por *floatstone* maciço (FLTm), *rudstone* maciço (RUDm) e *floatstone* com estratificação cruzada (FLTcs), possuindo geometria lenticular. A microfábrica da matriz dessas litofácies é composta por oóides e intraclastos. A porção intergranular é preenchida principalmente por cimento espático e possui algumas porções preenchidas por matriz micrítica dolomítica. Os tamanhos dos componentes aloquímicos variam de 0,20 a mais de 1,5 mm na matriz. O arcabouço é composto principalmente por intraclastos de tamanho que variam de grânulo a seixo e os intraclastos são compostos por *mudstone*, *packstone*, *grainstone* e laminito microbial.

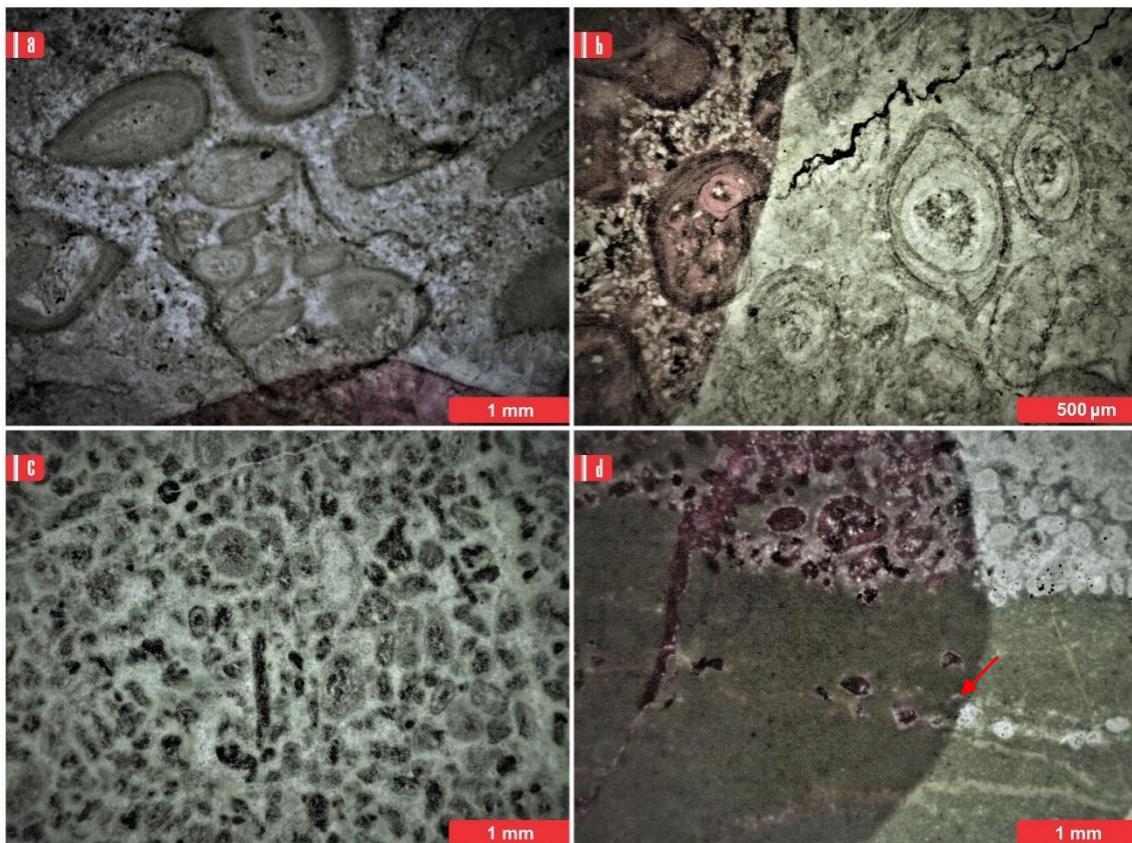


Figura 3 - Microfábrica carbonática dos carbonatos da Formação Lagoa do Jacaré, em Cordisburgo, sob nicóis descruzados

a) Componentes aloquímicos dos *grainstones* conglomeráticos ao centro temos um grânulo de intraclasto de *grainstone* oolítico (*grapstone*) na porção inferior a presença da lizarina-s mostra que a composição cimento é predominantemente calcítica; b) destaque para os grãos oolíticos a lizarina s ajuda a evidenciar a presença de um cimento predominantemente dolomítico; c) *Grainstone* de granulometria areia média predominantemente peloidal

contendo uma menor quantidade de intraclastos e alguns prováveis oólitos preenchido por um cimento espático; d) na litofácies MLD é possível observar evidências de processos de trapeamento e colagem dos grãos aloquímicos (indicado pela seta vermelha que foram substituídos por calcita espática.

Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.2. Os elementos arquiteturais e elementos morfológicos

O conceito de elementos arquiteturais foi definido na década de 80 por Allen (1983) e Miall (1985) para ambientes fluviais e esses conceitos podem ser aplicados a qualquer sistema deposicional, porém, eles se fazem mais importantes para ambientes que possuem fluxos em canais. Isso ocorre, pois esse tipo de registro possui uma geometria mais complexa (Dalrymple et al., 2010). Há um número muito maior de trabalhos envolvendo elementos arquiteturais para ambientes marinhos profundos (e.g., Bouma e Stone 2000; Mutti et al. 2003) do que para ambientes marinhos rasos e deltaicos (Gani e Bhattacharya, 2007). Os elementos arquiteturais tentam combinar informações em, pelo menos, duas escalas: das litofácies individuais e da geometria de elementos geomorfológicos de mesoescala, como canais e barras litorâneas.

A partir da descrição e interpretação dessas 11 litofácies, da análise de paleocorrentes e da geometria complexa do registro sedimentar estudado, pode-se concluir que esse depósito pertence a um sistema deposicional carbonático de laguna-ilha barreira. São diagnósticos a abundância de litofácies de GRTchcb (*grainstones* com estratificação cruzada espinha de peixe) e recorrência de depósitos gerados por fluxos gravitacionais. Os depósitos descritos estão associados ao registro de canais de maré e de seu desconfinamento em cordões arenosos que funcionam como barreiras ao mar aberto. As paleocorrentes coletadas em campo mostram três sentidos principais de corrente, duas possuem mesma direção e sentidos opostos, portanto são associados à ação de correntes de maré. Entretanto, segundo Boyd et al. (1992) e Boyd et al. (2010), as direções de paleocorrentes geradas pela ação das marés não nos permitem realizar nenhuma inferência sobre a paleodireção do corpo arenoso, pois elas podem assumir direções distintas em relação ao cordão arenoso.

Já as correntes do canal de maré possuem um sentido preferencial de corrente: o sentido perpendicular ao do continente, durante os períodos de transgressão aquelas que mais se preservam estão no sentido do mar aberto, sendo o oposto durante os períodos de progradações. Como os canais de maré possuem uma direção aproximadamente perpendicular ao cordão arenoso, como mostra a figura 4, podemos inferir que esse outro sentido de corrente

(corrente litorânea) pode indicar uma paleodireção aproximada NE-SW do cordão arenoso estudado, uma vez que a direção do paleocanal de maré foi interpretada sendo como NW-SE.

O sistema deposicional de ilha-barreira é, em geral, dividido em três zonas bem distintas. Essas zonas correspondem a subambientes que são: 1) a barreira arenosa que é cortada por canais de maré; 2) a laguna, corpo de água protegido, próximo do continente; 3) oceano aberto. Eles são compostos pelos seguintes elementos morfológicos: no ambiente ligado ao oceano aberto, temos a praia e o *ebb tidal delta*; nos cordões arenosos, temos os canais de mares e as dunas; no subambiente protegido, temos a laguna, *washover* e o *flood tidal delta*, como ilustrado na figura 4.

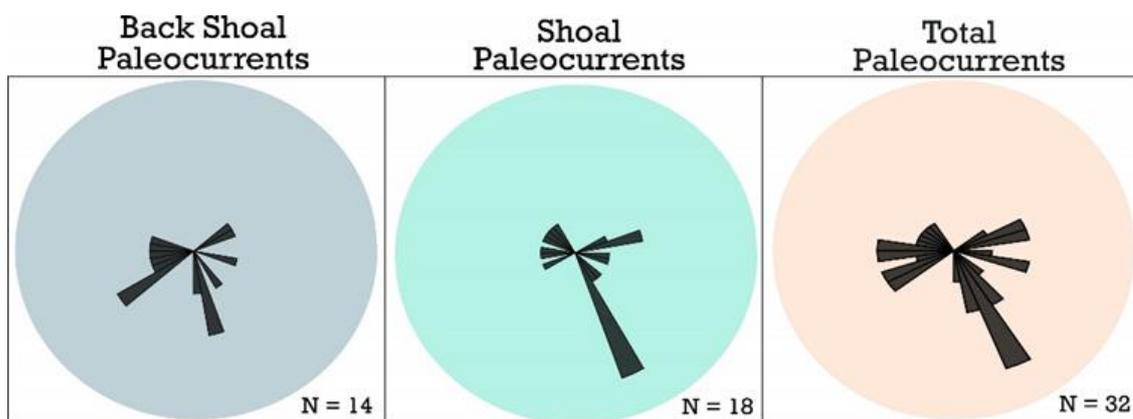


Figura 4 - Rosetas das paleocorrentes medidas na área de Cordisburgo as quase foram subdivididas segundo a associação de litofácies as quais elas pertencem

- a) Paleocorrentes do *back shoal*; b) Paleocorrentes do *Shoal*;  
c) paleocorrentes totais que ocorrem nas diferentes associações de litofácies

Fonte: Elaborada pelo autor

Para analisarmos melhor a geometria do depósito e inferir a presença de alguns elementos morfológicos, foi realizado o estudo dos elementos arquiteturais. Foram definidos 9 elementos arquiteturais: canal (CH); barras e formas de leito cascalhosa (GB); formas de leito e lençóis arenosos (SB); depósitos de acréscimo lateral (LA); macroformas de *foreset* (FM); depósitos modulados por marés (TM); sedimentos de fluxos gravitacionais (SG); esteiras microbiais (MM); lençóis de tempestade (SS). A descrição desses elementos arquiteturais está na tabela 2.

Para a definição dos elementos arquiteturais associados aos canais de maré, foi necessário identificar superfícies limítrofes (Jackson, 1976; Allen, 1983). As superfícies de primeira ordem estão contidas nos *sets* de estratificação cruzada. As de segunda ordem são aquelas que limitam litofácies, superfícies de truncamento, indicando mudança na direção de fluxo, como evidências de pequenas erosões internas. As de terceira ordem são aquelas

definidas quando a reconstrução arquitetônica indica a presença de macroformas, incluindo depósitos de acréscimo lateral e macroformas de *foreset*. Essas superfícies são ilustradas na figura 5.

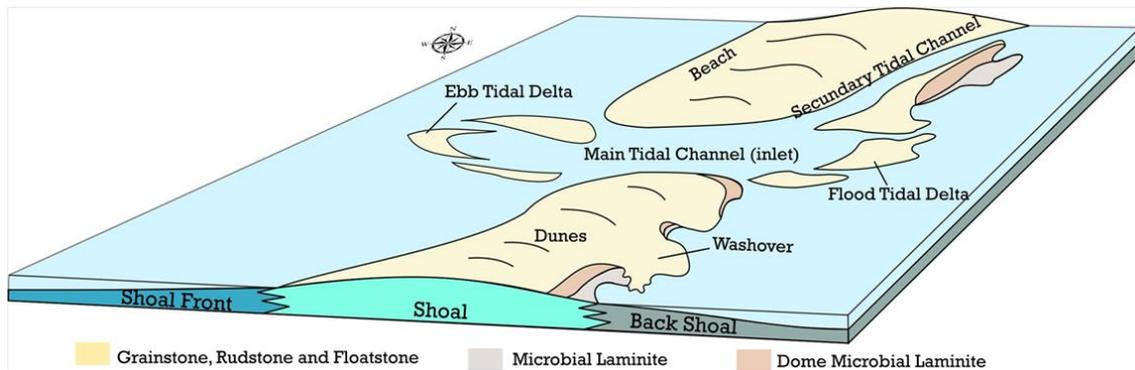


Figura 5 - Principais elementos morfológicos de sistema deposicional de laguna-ilha barreira carbonática

Fonte: Elaborada pelo autor.

A análise dos elementos arquiteturais juntamente com a identificação e caracterização das litofácies, permitiu interpretar a presença de quatro elementos morfológicos do ambiente de ilha-barreira, sendo eles descritos: Canal de maré principal; *Washover*; *Ebb tidal delta*; *Flood tidal delta* (figura 4).

Alguns dos elementos arquiteturais são diagnósticos desses elementos fisiográficos. A ocorrência de depósitos modulados por marés (TM) (figura 6) é diagnóstico de depósitos do canal de maré principal. A abundância de um arcabouço rudáceo na litofácies de *grainstone* conglomerático com estratificação espinha de peixe (GRTchcb) indica, segundo Gani e Bhattacharya (2007), a ação de fortes correntes de marés. Já a ocorrência de sedimentos de fluxos gravitacionais (SG) em geometria de lóbos ou lençóis, intercalados com esteiras microbiais (MM) (figura 7), caracteriza depósitos de *washover*. Os elementos arquiteturais *ebb tidal delta* e *flood tidal delta* são similares, pois estão associados ao desconfinamento do canal principal de maré. Isso implica que, nesses elementos fisiográficos, apesar do registro de correntes bidirecionais, haverá uma pequena predominância de um sentido da corrente, além de depósitos de fluxos densos desconfinantes. A diferença entre esses dois elementos fisiográficos deltaicos é marcada pela ocorrência de interdigitação com depósitos de *washover* que só ocorre no *flood tidal delta*. Ou seja, para diferenciá-los é necessária uma análise criteriosa do registro estratigráfico.

Tabela 2 - Descrição dos elementos arquiteturais identificados

<b>Code</b>	<b>Architectoral Elements</b>	<b>Principal facies assaemblage</b>	<b>Geometry</b>
<b>CH</b>	Channel	<b>RUDm, FLTm, FLTec, GRTccs, GRTchcb</b>	Lens resting on concave up erosion base surface
<b>GB</b>	Grave bars	<b>RUDm, FLTm, FLTec,</b>	Lens, wedge
<b>SB</b>	Sand bars and bedforms	<b>GRTccs, GRTchcb, GRTclp</b>	Lens, sheet, wedge
<b>LA</b>	Lateral accretion	<b>RUDm, FLTm, FLTec, GRTccs, GRTchcb</b>	Wedge, lobe, with third order surface oriented downstream
<b>FM</b>	<i>Foreset</i> Macroform	<b>RUDm, FLTm, FLTec, GRTccs, GRTchcb</b>	lens resting on convex up third order internal erosion surface
<b>TM</b>	Tidally modulated	<b>GRTchcb, less commonly FLTec, GRTccs</b>	Lens resting on concave up erosion base surface
<b>SG</b>	Sediment gravity flow	<b>GRTm, GRTlp, GRTt</b>	lobes, sheet
<b>MM</b>	Microbial Mat	<b>ML, MLd</b>	lens, sheet
<b>SS</b>	Storm sheet	<b>GRTccs</b>	sheet

Fonte: Elaborada pelo autor.

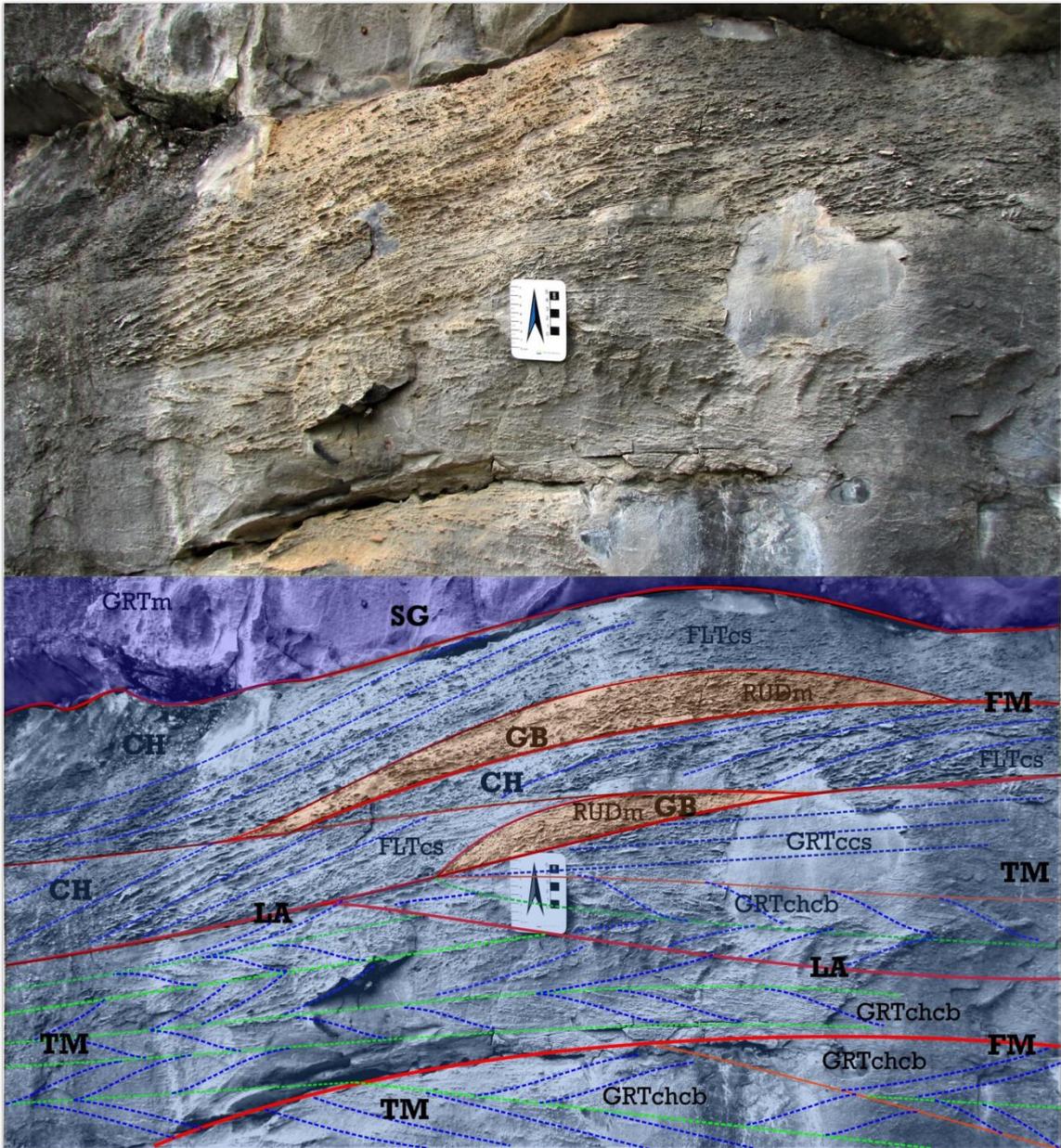


Figura 6 - Afloramento de aproximadamente 1,5m de altura em que foram identificadas as superfícies limítrofes

Em azul, temos as superfícies de primeira ordem; em laranja e verde claro, temos as de segunda ordem; e, em vermelho, temos a de terceira ordem. As Superfícies de terceira ordem foram fundamentais para a identificação das macroformas de acréscimo lateral (LA), com concavidade para cima, e as de *foreset* (FM), com concavidade para baixo. Também foi possível identificar os seguintes elementos arquiteturais: depósitos modulados por marés (TM; Compostas pelas litofácies de *grainstone* conglomerático com estratificação cruzada espinha de peixe (GRTchcb), predominantemente e *grainstone* conglomerático com estratificação cruzada (GRTcsc)), sotopostos por depósitos de canal (CH; composta pela litofacie floatstone com estratificação cruzada (FLTcs)), barras cascalhosas (GB; Composta pela litofacie rudstone maciço (RUDm)) e, no topo, observa-se sedimentos de fluxo gravitacional (SG; Composto pela litofacie *grainstone* maciço (GRTm)). Esse padrão de empilhamento dos elementos arquiteturais permite inferir que está ocorrendo uma migração de depósitos associado ao elemento morfológico canal de maré para o elemento fisiográfico de *flood tidal delta*.

Fonte: Elaborada pelo autor.

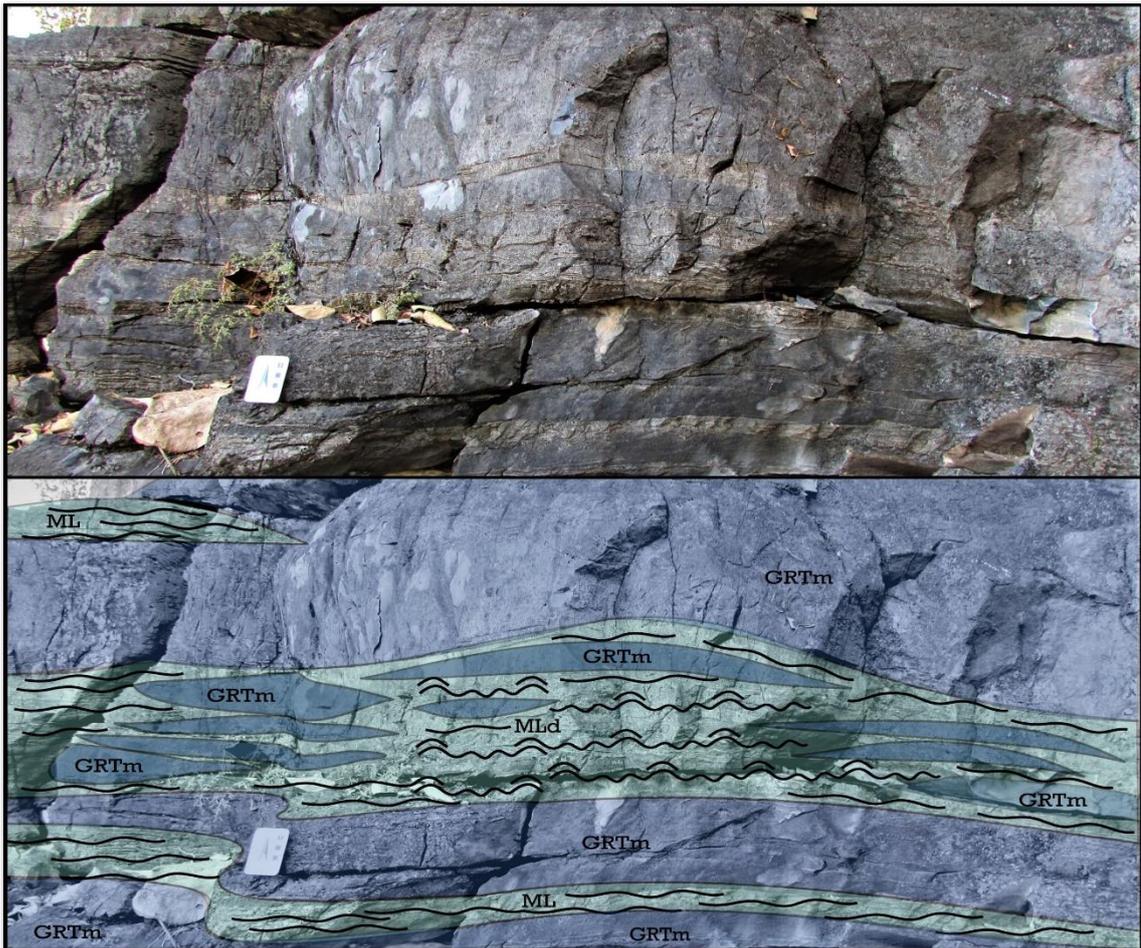


Figura 7 - Registro de aproximadamente 2 metros de depósitos de *washover*

É possível observar o elemento arquitetural de sedimentos de fluxo gravitacional (SG) compostos por *grainstones* maciços (GRTm) em geometria de lóbulos e lençóis intercalados com o elemento arquitetural de esteiras microbiais (MM) compostas pelas litofácies de laminito microbial (ML) e laminito microbial dômico (MLd).

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 4.3. Associações de litofácies

O registro da Formação Lagoa do Jacaré na área de estudo, localizada a sul do município de Cordisburgo, é composto por carbonatos microbiais, carbonatos arenosos e carbonatos conglomeráticos, os quais ocorrem em diferentes porções ao longo do registro. As litofácies evidenciam, assim, diferentes padrões de empilhamento que puderam ser observados nas duas seções verticais levantadas (figura 8).

O sistema deposicional de ilha-barreira da Formação Lagoa do Jacaré é caracterizado por ser um cordão de areia carbonática conglomerática, composta por oóides e intraclastos,

cortada por canais de maré, e com crescimento abundante de esteiras microbiais, sendo amplamente retrabalhado por marés e por ondas de tempestade. Os processos físicos que ocorrem nesse sistema deposicional são similares aos que ocorrem nas barreiras recifais, por isso, os subambientes serão denominados de forma similar à subdivisão dos recifes e são eles:

- 1) *Back shoal*, ambiente protegido pelo cordão arenoso, composto por depósitos lagunares e por lóbos arenosos gerados pelo desconfinamento do canal;
- 2) *Shoal* que é a barreira central arenosa, cortada por canais de maré;
- 3) *Shoal Front*, porção externa, ambiente oceânico, sob a influência de ondas e que possui depósitos gerados pelo desconfinamento do canal de maré (figura 9) (James et al., 2010; Boyd et al., 2010).

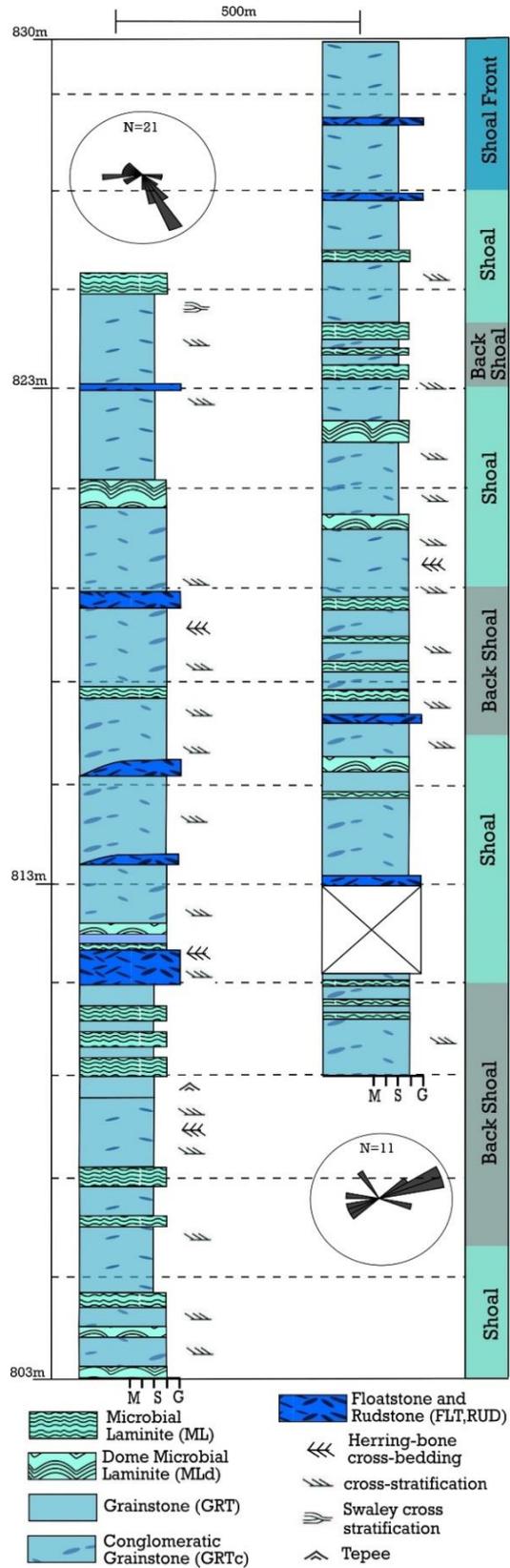


Figura 8 - Seções colunares com as duas colunas levantadas entre as cotas de 803 a 830 metros sendo a distância entre elas de 500 metros

As barras verticais coloridas evidenciam a interpretação das três associações de litofácies que se repetem no registro estratigráfico.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para melhor compreensão as associações de litofácies nos diferentes subambientes do sistema deposicional ilha-barreira, foi organizado um esquema de distribuição das onze litofácies identificadas e suas ocorrências nos três subambientes, *Back Shoal*, *Shoal* e *Shoal Front* (figura 9). Este diagrama, inspirado no trabalho Dalrymple et al. (1992) em estuários, permite compreender melhor os processos sedimentares que ocorrem em cada um dos elementos morfológicos identificados (figura 5 e figura 9). Os depósitos de *Washover* (ocorrem entre *back shoal e shoal*) estão relacionados a eventos de tempestades, que provocam a ocorrência de fluxos densos na barreira em direção a laguna, gerando lóbos e lençóis de carbonatos maciços e com laminação paralela (GRTm, GRTclp, FLTm, RUDm e GRTccs) recobrimdo depósitos de esteiras microbianas (ML e MLd). Como os eventos são episódicos, pode ocorrer registro de exposição subárea (GRTt).

Já os depósitos de Canal de Maré são influenciados principalmente pela ação das marés, por isso temos uma grande abundância de registros de correntes bidirecionais em carbonatos arenosos (GRTchcb) e depósitos de barras arenosas e cascalhosas (GRTccs, FLTcs, RUDm). Nos deltas do canal de maré (*Ebb tidal delta e flood tidal delta*), o principal processo sedimentar está ligado ao desconfinamento de canais que podem gerar fluxos densos e com um sentido de fluxo preferencial (GRTm, FLTm, RUDm, GRTccs e FLTcs). A partir desse esquema (figura 9) e da análise de elementos arquiteturais, pode-se classificar o registro em três associações de litofácies que se repetiram e alternaram ao longo do registro estratigráfico em associação de *back shoal*, *shoal* e *shoal front* como mostra a figura 8.

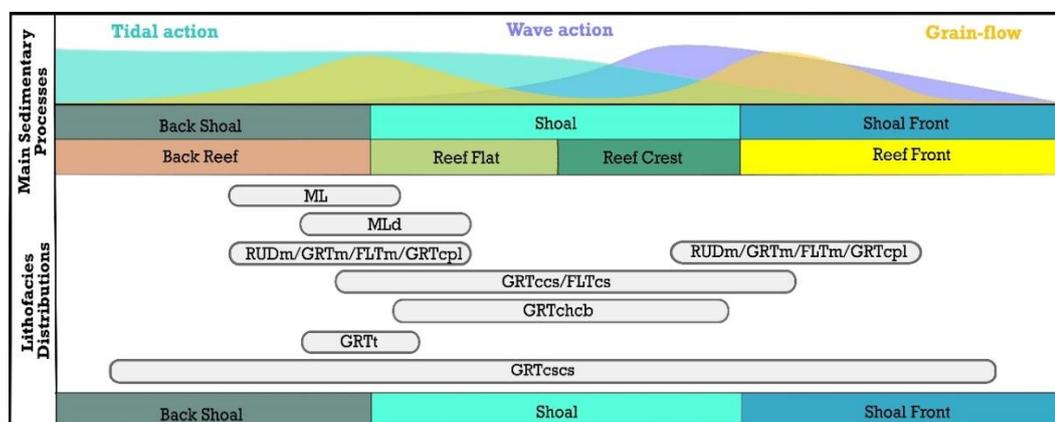


Figura 9 - Fácies determinadas em campo e sua ocorrência nos diferentes subambientes do sistema deposicional de laguna-ilha barreira, Formação Lagoa do Jacaré

Fonte: Elaborada pelo autor.

## 5. Discussão

### 5.1. Análise cicloestratigráfica

O padrão de empilhamento da Formação Lagoa do Jacaré na área de estudo de Cordisburgo indica que os sedimentos carbonáticos acumularam-se durante uma transgressão marinha pontuada por flutuações no nível relativo do mar de maior ordem (figura 10). As flutuações de menor ordem foram pontuadas pelos hem Ciclos de quarta e quinta ordem. É importante destacar que os ciclos transgressivos–regressivos de diferentes ordens foram interpretados segundo a definição de Embry (1993; 1995).

Entretanto, devido à ausência de conteúdo fossilífero ou outra evidência que indique uma idade deposicional mais precisa, identificar a ordem dos ciclos torna-se uma tarefa complexa. Segundo Catuneanu (2019), a magnitude das sequências deposicionais está, de certa forma, relacionada à espessura do pacote sedimentar. A partir desse critério e da análise do registro estratigráfico sobre a ótica da estratigrafia de sequência de alta resolução, identificou-se um hem ciclo de terceira ordem, dois hem Ciclos de quarta ordem e quatro ciclos de quinta ordem.

#### 5.1.1. Hem Ciclos de terceira ordem

Ao observar a coluna estratigráfica composta (figura 10), feita a partir do levantamento dos dois perfis verticais em campo, em escala de detalhe (figura 8), fica evidente que a porção superior do registro é caracterizada pela ausência de depósitos organosedimentares e pela presença de depósitos de fluxos densos associados ao elemento fisiográfico de *ebb tidal delta*. Da mesma forma, observa-se, na base, um predomínio de litofácies organosedimentares e o registro dos elementos fisiográficos de canais de maré, *washover* e *flood tidal delta*.

Tal fato indica que, em toda a sequência analisada, há uma tendência transgressiva em direção ao topo. Isso também é retificado pelo estudo das associações de litofácies, uma vez que, da base para o topo, temos uma ocorrência cada vez menor da associação de *back shoal* (mais próximas à linha de costa) e um gradativo aumento na associação de litofácies *shoal* até o aparecimento da associação *shoal front* (a mais afastada da linha de costa). Esse hem ciclo transgressivo foi interpretado como sendo de terceira ordem e é denominado (C.T).

Outro ponto que reforça essa interpretação pode ser observado quando realizamos uma análise das paleocorrentes que ocorrem em cada uma das associações de litofácies (figura 3). Foram levantadas 28 medidas de paleocorrentes em *grainstone* conglomerático com estratificação cruzada tabular (GRTccs) e 4 medidas em *grainstone* com estratificação cruzada espinha de peixe (GRTchcb). Todas as paleocorrentes identificadas pertencem às associações de *shoal* (18 medidas) e *back shoal* (14). As medidas pertencentes *back shoal* possuem uma distribuição polimodal, ou seja, sem a ocorrência de um ou mais sentidos principais de corrente. Tal comportamento é indicativo de uma possível ramificação dos canais de maré, no *flood tidal delta*, os canais de maré se ramificam. O significado desse comportamento das paleocorrentes em barreiras arenosas siliciclasticas que compõem ambientes estuarinos (FitzGerald et al. 2000; Elias e Spek 2010) indica que há um movimento no sentido da linha de costa desse cordão arenoso que contribuem para a migração da laguna-ilha barreira em direção ao continente. Ou seja, o padrão randômico das paleocorrentes no *back shoal* provavelmente também é uma resposta ao padrão retrogradante de deposição dessa sucessão carbonática na área de Cordisburgo.

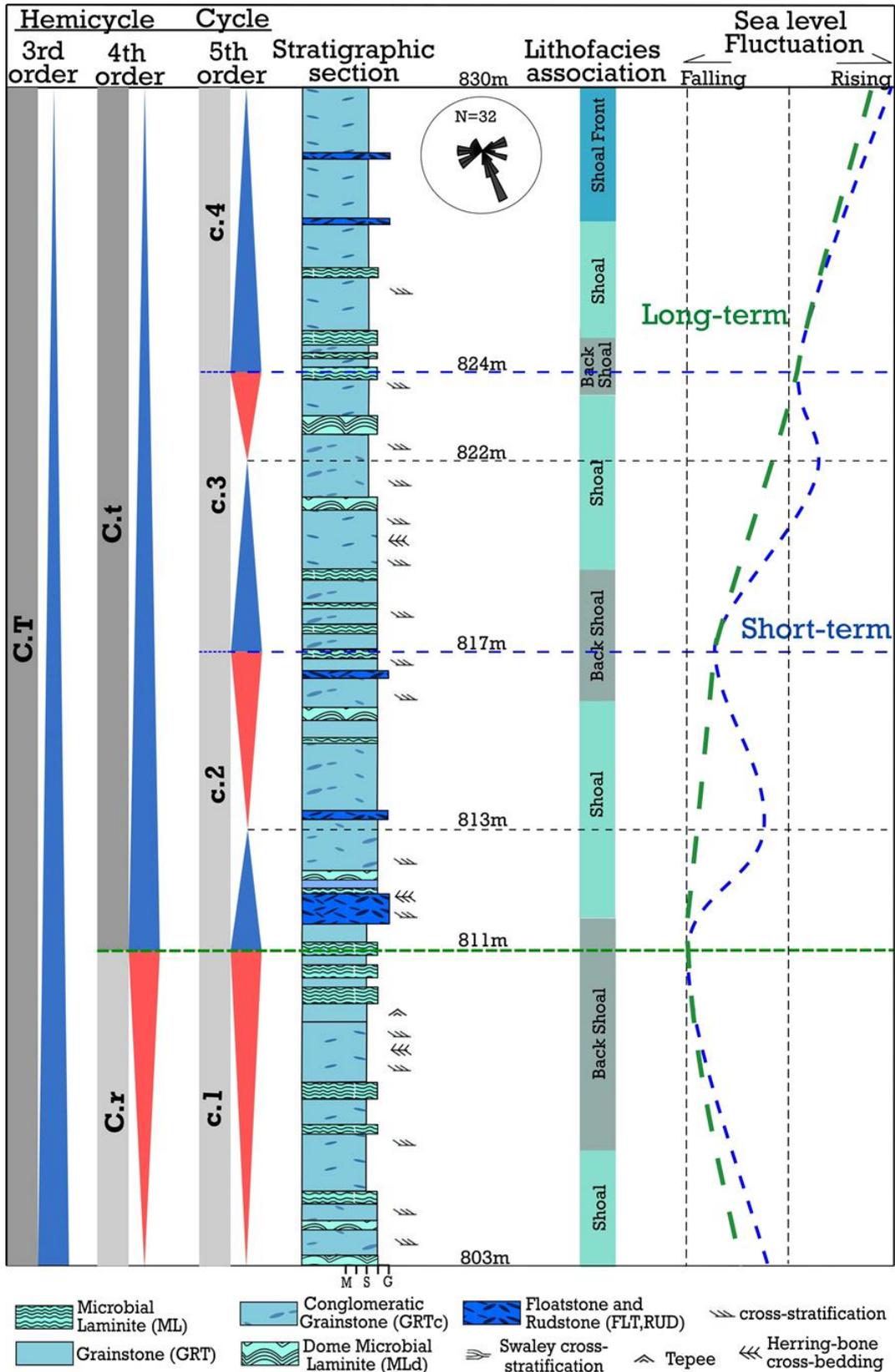


Figura 10 - Coluna estratigráfica da Fm Lagoa do Jacaré na região de Cordisburgo

Associação de fácies, ciclos T-R alta e baixa frequências e as flutuações de curta e longa duração do nível do mar.

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 5.1.2. Hemiciclo de quarta ordem

Todo o registro foi interpretado como uma transgressão de terceira ordem, entretanto, esse movimento transgressivo não ocorreu de forma contínua, pois, na porção entre as cotas de 809 e 811, há uma quantidade maior de depósitos de *washover*. Nesse intervalo estratigráfico, os depósitos desse elemento fisiográfico possuem algumas características que os tornam um pouco distintos. Os lóbos e lençóis de *grainstones* possuem poucos ou nenhum clasto e uma maior abundância de microbialitos com forma de crescimento tabular. Segundo James (1983), essa morfologia nos permite inferir um ambiente sedimentar de menor energia, ou seja, mais protegido, portanto mais próximo da linha de costa. Além disso, a presença de *grainstones* com *tepee* indica períodos de não deposição associados à exposição subárea. Devido a isso, a ocorrência de uma superfície de regressão máxima (SRM) foi interpretada como um superfície de quarta ordem que divide o registro em um hemiciclo regressivo de quarta na base (C.r) e outro transgressivo no topo (C.t) como ilustrado na figura 10.

### 5.1.3. Ciclos de quinta ordem

Os ciclos de quinta ordem foram nomeados com um “c” minúsculo seguido de um algarismo, os quais tem o objetivo de ordená-los da base para o topo, por isso temos c.1 na base e c.4 no topo. Os hemiciclos de quinta ordem foram identificados a partir de progradações e retrogradações reconhecidas através da interpretação dos elementos fisiográficos. Isso ressalta a importância da análise dos elementos arquiteturais que nos permite identificar os elementos morfológicos do sistema deposicional estudado, para a análise de estratigrafia de sequência de alta resolução no ambiente de ilha-barreira.

O hemiciclo c.1 é composto por apenas um hemiciclo regressivo, em que foi possível identificar depósitos do elemento morfológico *washover* de maior energia (composto predominantemente pela litofácies de laminito microbial dômico (MLd), intercalada pelo elemento arquitetural de sedimentos gravitacionais (SG) na base. Sotoposto pelos elementos arquiteturais de *flood tidal delta* e *washover* de menor energia (predominância de laminito microbial (ML), tornando assim evidente um padrão progradante do registro nesse intervalo.

Os ciclos c.2 e c.3 são ciclos completos. Em c.2, o hemiciclo transgressivo é marcado pela migração de depósitos de *washover* para depósitos de canal de maré e o hemiciclo regressivo pela migração inversa dos elementos fisiográficos. No ciclo c.3, o padrão regressivo é identificado pelas mudanças no padrão de empilhamento de *washover*, sendo ele

de menor energia na base migrando para um de maior energia, marcando o hemicíclo transgressivo. O hemicíclo regressivo, por sua vez, é marcado pela migração do depósito de *washover* de maior energia para o de menor.

Já o ciclo c4 é composto apenas por um hemicíclo transgressivo marcado pela migração de depósitos de *washover* de menor energia, que migram para depósitos de *washover* de maior energia interditados por canal de maré. Esses depósitos migram para o registro do elemento fisiográfico de *ebb tidal delta*, o qual é composto por litofácies que compõem a associação litofácies *shoal front*.

## 5.2. Evolução paleoambiental

A partir da análise das diferentes ordens dos ciclos estratigráficos, concebe-se que a Formação Lagoa do Jacaré na área de Cordisburgo foi depositada em um ambiente de água rasa dinâmico, sob a ação de fortes correntes de maré. O deslocamento do cordão arenoso que compõe a ilha-barreira pode ser associado aos deslocamentos da linha de costa, o que nos permite inferir sobre as flutuações de curta e longa duração do nível do mar. De maneira geral todo o registro foi depositado durante um período de elevação do nível do mar.

Essa transgressão, provavelmente de escala regional, é composta internamente por mudanças de quarta ordem que foram responsáveis pela migração do cordão arenoso em direção ao mar aberto, na base, e em direção à linha de costa, no topo. Esse padrão de empilhamento de quarta ordem marca as mudanças de longa duração do nível do mar, que, na base, tornou-se menor e que, em direção ao topo, aumentou (figura 11). Além disso, as mudanças de menor frequência compostas pelos ciclos de quinta ordem foram responsáveis por permitir a interpretação das variações de curta duração do nível do mar (figura 10).

Em função disso, a interpretação dos elementos arquitetônicos e das técnicas de análise estratigráfica de sequências de alta resolução permitem reconstruções paleoambientais. Essas são técnicas que se baseiam na identificação de superfícies que se aproximam das linhas temporais e seguem, de certa forma, a topografia da superfície deposicional original (Dalrymple et al., 2010). Assim, foi possível inferir sobre as variações nas condições deposicionais expressas pelo padrão de empilhamento, além de inferir sobre a geometria do registro estudado (figura 11).

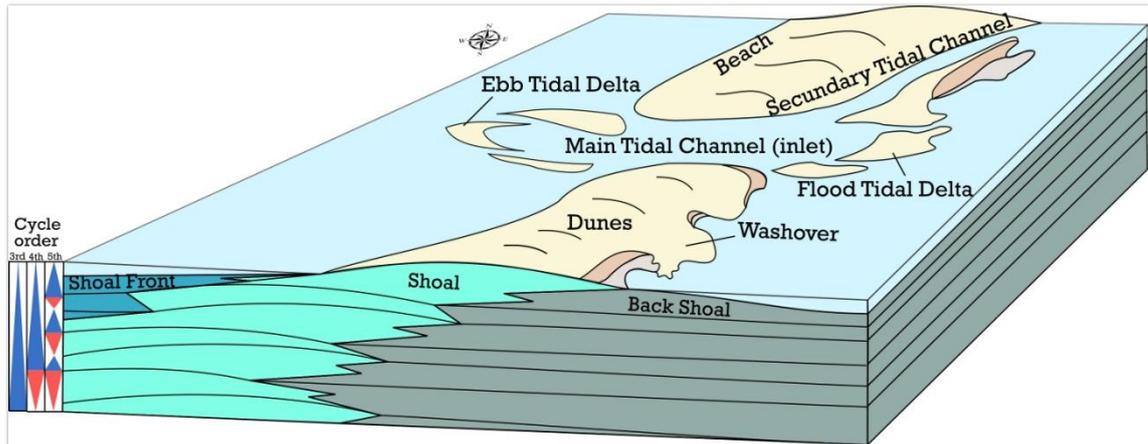


Figura 11 - Bloco diagrama esquemático dos ambientes deposicionais do registro analisado, com evidências às progradações que ocorrem no paleo ambiente de ilha-barreira

O bloco é relacionado aos ciclos de terceira, quarta e quinta ordem que foram responsáveis por auxiliar na interpretação da geometria do registro estudado e a identificação de superfícies temporais importantes.

Fonte: Elaborada pelo autor.

## 6. Conclusão

A análise estratigráfica de alta resolução feita no intervalo de 27 metros de carbonatos da Formação Lagoa do Jacaré (Grupo Bambuí), a sul da cidade de Cordisburgo, permitiu identificar onze litofácies pertencentes a um sistema deposicional de Laguna-ilha barreira. As litofácies foram divididas em três grupos: 1) organosedimentares; 2) carbonatos arenosos; 3) carbonatos conglomeráticos. Como a geometria do depósito é complexa, foi feito também um estudo dos elementos arquiteturais e, assim, foram definidos 9 elementos arquiteturais: Canal (CH); Barras e formas de leito cascalhosa (GB); Formas de leito e lençóis arenosos (SB); Depósitos de acréscimo lateral (LA); Macroformas de *Foreset* (FM); Depósitos modulados por marés (TM); Sedimentos de fluxos gravitacionais (SG); Esteiras microbiais (MM); Lençóis de tempestade (SS). A análise dos elementos arquiteturais, juntamente com a identificação e caracterização das litofácies, permitiu interpretar a presença de quatro elementos morfológicos do ambiente de ilha-barreira, sendo eles: Canal de maré principal; *Washover*; *Ebb tidal delta*; *Flood tidal delta*.

A partir dessas análises estratigráficas foi possível realizar o estudo de associação de litofácies e foram identificadas 3 associações, sendo elas o *back shoal*, *shoal* e o *shoal front*, as quais se repetiram ao longo do registro estratigráfico estudado. A interpretação desse estudo, sob a ótica da estratigrafia de sequências de alta resolução, permitiu a identificação de um hemicyclo transgressivo de terceira ordem, dois hemicyclos de quarta ordem, sendo o da

base regressivo e o do topo transgressivo. Também foram identificados quatro ciclos de quinta ordem, interpretados através da identificação dos elementos fisiográficos que permitiram identificar os hem Ciclos progradantes e retrogradantes. A identificação dos ciclos permitiu inferir sobre as flutuações de curta e longa duração do nível do mar, possibilitando assim uma compreensão sobre a evolução paleoambiental desse registro.

## 7. Referências bibliográficas

- Alkmim, F.F. & Martins-Neto, M.A. 2001., A bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: C.P. Pinto & M.A. Martins-Neto (eds). Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais;
- Allen, J. R. L., 1983. Studies in fluvial sedimentation: bars, bar-complexes and sandstone sheets (low-sinuosity braided streams) in the Brownstones (L. Devonian), Welsh Borders. *Sedimentary Geology*, **33**(4), 237-293.
- Bouma, A. H., & Stone, C. G., 2000. Fine-grained, mud-rich turbidite systems: model and comparison with coarse-grained, sand-rich systems. Special Publication-SEPM, **68**, 9-20.
- Bosak, T., Knoll, A.H., and Petroff, A.P., 2013, The meaning of stromatolites: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **41**, 21–44.
- Boyd, R., Dalrymple, R., Zaitlin, B. A. (1992). Classification of clastic coastal depositional environments. *Sedimentary Geology*, **80**(3-4), 139-150.
- Boyd, R., James, N. P., and Dalrymple, R. W., 2010). Transgressive wave-dominated coasts. Facies models, 4, 265-294.
- Caetano-Filho, S., Paula-Santos, G.M., Guacaneme, C., Babinski, M., Bedoya-Rueda, C., Peloso, M., Amorim, K., Afonso, J., Kuchenbecker, M., Reis, H.L.S., Trindade, R.I.F., 2019. Sequence stratigraphy and chemostratigraphy of an Ediacaran-Cambrian foreland-related carbonate ramp (Bambuí Group, Brazil). *Precambrian Res.* 331, 105365.
- Castro P.T.A. & Dardenne M.A., 2000. The sedimentology, stratigraphy and tectonic context of the São Francisco Supergroup at the southern boundary of the São Francisco craton, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 30: 345-437
- Catuneanu, O., 2019. Model-independent sequence stratigraphy. *Earth-Science Reviews*, 188, 312-388.
- Caxito, F.A., Halverson, G.P., Uhlein, A., Stevenson, R., Dias, T.G., Uhlein, G.J., 2012 Marinoan glaciation in east central Brazil. *Precambrian Res.* 200–203, 38–58

- Dalrymple, R. W., Zaitlin, B. A., & Boyd, R., 1992. Estuarine facies models; conceptual basis and stratigraphic implications. *Journal of Sedimentary Research*, **62**(6), 1130-1146.
- Dalrymple, R. W., Mackay, D. A., Ichaso, A. A., & Choi, K. S., 2012. Processes, morphodynamics, and facies of tide-dominated estuaries. In *Principles of tidal sedimentology* (pp. 79-107). Springer, Dordrecht.
- Dardenne M.A., 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 30 (2): 597-610.
- DeCelles P. G., & Currie, B. S., 1996. Long-term sediment accumulation in the Middle Jurassic–early Eocene Cordilleran retroarc foreland-basin system. *Geology*, **24**(7), 591-594.
- DeCelles P. G., & Giles, K. A., 1996. Foreland basin systems. *Basin research*, **8**(2), 105-123.
- Demicco R. V., & Hardie, L. A., 1994. Sedimentary structures and early diagenetic features of shallow marine carbonate deposits (No. 1). SEPM Society for Sedimentary.
- Dunham R.J., 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Ham, W.E. (Ed.) *Classification of carbonate rocks*. Tulsa: *American Association of Petroleum Geologists*, Memoir 1. 108-122.
- Dupraz C., Reid, R. P., Braissant, O., Decho, A. W., Norman, R. S., Visscher, P. T., 2009. Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats. *Earth-Science Reviews*, **96**(3), 141-162.
- Ehrenberg, S. N., Nadeau, P. H., & Aqrabi, A. A. M., 2007. A comparison of Khuff and Arab reservoir potential throughout the Middle East. *AAPG bulletin*, **91**(3), 275-286.
- Embry A.F.; Klovan, J.E., 1971 A Late Devonian Reef Tract on Northeastern Banks Island, Northwest Territories. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, **19** (4). 730–781.
- Embry, A. F., 1993. Transgressive–regressive (T–R) sequence analysis of the Jurassic succession of the Sverdrup Basin, Canadian Arctic Archipelago. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **30**(2), 301-320.
- Embry, A. F., 1995. Sequence boundaries and sequence hierarchies: problems and proposals. In *Norwegian Petroleum Society Special Publications* (Vol. 5, pp. 1-11). Elsevier.
- FitzGerald, D. M., Buynevich, I. V., Fenster, M. S., & McKinlay, P. A., 2000. Sand dynamics at the mouth of a rock-bound, tide-dominated estuary. *Sedimentary Geology*, **131**(1-2), 25-49.
- Fragoso, D. G. C., Gabaglia, G. P. R., Magalhães, A. J. C., & Scherer, C. M. D. S., 2021. Cyclicity and hierarchy in sequence stratigraphy: an integrated approach. *Brazilian Journal of Geology*, 51.
- Freitas, A. R., Uhlein, A., Dantas, M. V. S., & Mendonça, T. K., 2021. Caracterização em multiescala de carbonatos neoproterozóicos da Pedreira GMD, Formação Lagoa do

- Jacaré, Grupo Bambuí, Paraopeba-MG. *Geologia USP. Série Científica*, **21**(1), 10-120.
- Gani, M. R., and Bhattacharya, J. P., 2007. Basic building blocks and process variability of a Cretaceous delta: internal facies architecture reveals a more dynamic interaction of river, wave, and tidal processes than is indicated by external shape. *Journal of Sedimentary Research*, **77**(4), 284-302.
- Handford, C. R., 1988. Review of carbonate sand-belt deposition of ooid grainstones and application to Mississippian reservoir, Damme Field, southwestern Kansas. *AAPG bulletin*, **72**(10), 1184-1199.
- Harris, P. M., & Weber, L. J., 2006. Giant Hydrocarbon Reservoirs of The World: From Rocks to Reservoir Characterization and Modeling, AAPG Memoir 88 (No. 88). AAPG.
- Harris, P. M., 2010. Delineating and quantifying depositional facies patterns in carbonate reservoirs: Insight from modern analogs. *AAPG bulletin*, **94**(1), 61-86.
- Harris, P. M., Purkis, S. J., & Ellis, J., 2011. Analyzing spatial patterns in modern carbonate sand bodies from Great Bahama Bank. *Journal of Sedimentary Research*, **81**(3), 185-206.
- Hercos C.M., Martins-Neto M.A., Danderfer F. A., 2008. Arcabouço estrutural da Bacia do São Francisco nos arredores da Serra da Água Fria (MG), a partir da integração de dados de superfície e sub-superfície. *Revista Brasileira de Geociências*, **38** (2-Suplemento), 197-212.
- Jackson, R. G., 1976. Depositional model of point bars in the lower Wabash River. *Journal of Sedimentary Research*, **46**(3), 579-594.
- James, N.P., 1983. Reef environment. In: Scholle, P.A., Bebout, D.G., Moore, C.H. (Eds.), *Am. Assoc. Pet. Geol. Mem.*, vol.33, pp. 346-440
- James, N.P., 1984. Shallowing-upward sequences in carbonates. In: Walker, R.G. (Ed.), *Facies Models. Geoscience Canada*, 126-136.
- James, N. E., Wood, R. A., Dalrymple, R. W., & James, N. P., 2010. Reefs and reef mounds. *Facies Models 4*, Geological Association of Canada., pp. 421-447
- James, N.O. and Jones, B., 2016. *Origin of Carbonate Sedimentary Rocks*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Lindsay, R. F., Cantrell, D. L., Hughes, G. W., Keith, T. H., Mueller III, H. W., & Russell, S. D. (2006). Ghawar Arab-D reservoir: widespread porosity in shoaling-upward carbonate cycles, Saudi Arabia. In: P.M. Harris and L.J. Weber (Eds.), *Giant hydrocarbon reservoirs of the world: From rocks to reservoir characterization and modeling*. AAPG Memoir 88/SEPM Special Publication, pp. 97-137

- Konhauser K. O., Amskold, L., Lalonde, S. V., Posth, N. R., Kappler, A., & Anbar, A., 2007. Decoupling photochemical Fe (II) oxidation from shallow-water BIF deposition. *Earth and Planetary Science Letters*, **258**(1-2), 87-100.
- Magalhães P.M. 1989. Análise estrutural qualitativa das rochas do Grupo Bambuí, na porção sudoeste da Bacia do São Francisco. Dissertação de Mestrado, DEGEO/Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 100 p.
- Martins-Neto M. A. and Alkmim, F. F., 2001. Estratigrafia e evolução tectônica das bacias neoproterozóicas do Paleocôntinente São Francisco e suas margens: Registro da quebra de Rodínia e colagem de Gondwana. In: Pinto, C. P. & Martins-Neto, M. A. (eds.) *Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais*. Belo Horizonte, SBG/MG, 31-54.
- Martins M. and Lemos V.L., 2007. Análise estratigráfica das seqüências neoproterozoicas da Bacia do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, **37**:156–167.
- Martins-Neto M.A., 2009. Sequence stratigraphic framework of Proterozoic successions in eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, **26**,163–176
- Miall, A. D., 1976. Palaeocurrent and palaeohydrologic analysis of some vertical profiles through a Cretaceous braided stream deposit, Banks Island, Arctic Canada. *Sedimentology*, **23**(4), 459-483.
- Miall A.D., 1977 A Review of the Braided-River Depositional Environment. *Earth-Science Reviews*, **13**(1) 1-62.
- Miall, A. D., 1985. Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits. *Earth-Science Reviews*, **22**(4), 261-308.
- Moreira, D. S., Uhlein, A., Dussin, I. A., Uhlein, G. J., & Misuzaki, A. M. P., 2020. A Cambrian age for the upper Bambuí Group, Brazil, supported by the first U-Pb dating of volcanoclastic bed. *Journal of South American Earth Sciences*, **99**, 102503.
- Mutti, E., Tinterri, R., Benevelli, G., di Biase, D., & Cavanna, G., 2003. Deltaic, mixed and turbidite sedimentation of ancient foreland basins. *Marine and Petroleum Geology*, **20**(6-8), 733-755.
- Paula-Santos G.M.; Babinski, M.; Kuchenbecker, M.; Caetano-Filho, S.; Trindade, R.I. & Pedrosa-Soares, A.C., 2015. New evidence of an Ediacaran age for the Bambuí Group in Southern São Francisco craton (eastern Brazil) from zircon U–Pb data and isotope chemostratigraphy. *Gondwana Research*, **28**, 702–720.
- Pimentel M.M.; Rodrigues, J.B.; DellaGiustina, M.E.S.; Junges, S.; Matteini, M. & Armstrong, R., 2011. The tectonic Evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil, based on SHRIMP and LA-ICPMS U–Pb sedimentary provenance data: a review. *Journal of South American Earth Sciences*, **31**:345–357
- Qi, L., Carr, T. R., & Goldstein, R. H., 2007. Geostatistical three-dimensional modeling of oolite shoals, St. Louis Limestone, southwest Kansas. *AAPG bulletin*, **91**(1), 69-96.

- Reis, H.L.S., Suss, J.F., Fonseca, R.C.S., Alkmim, F.F., 2017. Ediacaran forebulge grabens of the southern São Francisco basin, SE Brazil: craton interior dynamics during West Gondwana assembly. *Precambrian Res.* **302**, 150–170
- Riding R., 2000. Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial–algal mats and biofilms. *Sedimentology***47**,179– 214.
- Riding, R.,2006. Microbial carbonate abundance compared with fluctuations in metazoan diversity over geological time. *Sedimentary Geology*, **185**(3-4), 229-238.
- Riding R., 2011. Microbialites, stromatolites, and thrombolites. In: J.Reitner& V. Thiel (eds.) *Encyclopedia of geobiology*, Springer,p. 635–654.
- Sanchez, E. A., Uhlein, A., & Fairchild, T. R., 2021. *Treptichnus pedum* in the Tres Marias Formation, south-central Brazil, and its implications for the Ediacaran-Cambrian transition in South America. *Journal of South American Earth Sciences*,**105**, 102983.
- Sparks, A. G., & Rankey, E. C., 2013. Relations between geomorphic form and sedimentologic-stratigraphic variability: Holocene ooid sand shoal, Lily Bank, Bahamas. *AAPG bulletin*, **97**(1), 61-85.
- Uhlein G.J., Uhlein, A., Stevenson, R., Halverson, G.P., Caxito, F.A., Cox, G.M., 2017. Early to late Ediacaran conglomeratic wedges from a complete foreland basin cycle in the southwest São Francisco Craton, Bambuí Group, Brazil. *Precambrian Research*,**299**, 101–116.
- Uhlein G.J., Uhlein, A., Pereira, E., Caxito, F.A., Okubo, J., Warren, L., Sial, A.N., 2019. Ediacaran paleoenvironmental changes recorded in the mixed carbonate-siliciclastic Bambuí Basin, Brazil. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* **517**, 39–51
- Vasconcelos C. & Bahniuk, A., 2015. Microbialitos recentes da região dos Lagos, Estado do Rio de Janeiro. In: T.R. Fairchild; R. Rohn & D. Dias-Brito (eds.) *Microbialitos do Brasil: do Pré-Cambriano ao Recente*, IGCE/UNESP, p. 60–75.
- Visscher, P. T., & Stolz, J. F., 2005. Microbial mats as bioreactors: populations, processes, and products. In *Geobiology: Objectives, Concepts, Perspectives* (pp. 87-100). Elsevier.
- Warren L.V.; Quaglio, F.; Riccomini, C.; Simões, M.G.; Poiré, D.G.; Strikis, N.M.; Anelli, L.E. & Strikis, P.C., 2014. The puzzle assembled: Ediacaran guide fossil *Cloudina* reveals an old proto-Gondwana seaway.*Geology*, **42**:391–394.
- Zalán P.V. & Romeiro-Silva, P.C., 2007. Bacia do São Francisco. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15,561–570.

#### 4. CONCLUSÕES GERAIS

O trabalho de dissertação de mestrado aqui apresentado nos permitiu expandir o conhecimento sobre a estratigrafia de alta resolução da Formação Lagoa do Jacaré por meio de uma sistemática abordagem sob a ótica da análise de fácies sedimentares, reconhecimento de sistemas deposicionais, tratos e, por fim, sequências deposicionais. Foram analisadas duas ocorrências da Formação Lagoa do Jacaré em diferentes sítios deposicionais, um mais ao norte (região de Ubaí-MG), próximo do alto de Januária, e o segundo sítio próximo de Cordisburgo-MG, na área de influência do Alto de Sete Lagoas, mais ao sul da bacia Bambuí.

Na região de Ubaí, foram estudados 41 metros do registro de um sistema deposicional de planície de maré contendo 16 diferentes litofácies, agrupadas em três importantes e diagnósticas associações de fácies: 1) supramaré; 2) intermaré; 3) inframaré. Ao analisarmos o arranjo estratigráfico, foi possível identificar ciclos transgressivo e regressivos (T-R) de segunda a quinta ordem, os quais, juntamente com a espessura dos ciclos de maré, foram fundamentais para inferir sobre as flutuações de menor e maior duração do nível do mar Bambuí. Os sete ciclos de maré identificados foram classificados como assimétricos e com padrão de empilhamento progradacional para o topo. A assimetria do ciclo de maré é explicada por Pratt (2010) devido a ação de eventos transgressivos que ocorrem de forma rápida e são registrados apenas como uma pequena camada de retrabalhamento ou um evento não deposicional, que é inferido pelo padrão de empilhamento da sequência estudada. A espessura média desses ciclos de maré foi de 6,4 metros. Eles foram depositados durante uma transgressão regional (ciclo de segunda ordem). Assim, pode-se inferir que a porção superior da Formação Lagoa do Jacaré, depositada na área de Ubaí, ocorreu provavelmente numa época de fortes correntes de maré atuando na costa.

Na região de Cordisburgo, foram estudados 27 metros do registro de um sistema deposicional laguna-ilha barreira, com reconhecimento de 11 litofácies. No sistema laguna-ilha barreira, também foram definidas três importantes associações: 1) *Back Shoal*; 2) *Shoal*; 3) *Shoal Front*. Como a geometria do depósito é complexa, foi feito também um estudo dos elementos arquiteturais e assim foram definidos 9 elementos arquiteturais: Canal (CH); Barras e formas de leito cascalhosa (GB); Formas de leito e lençóis arenosos (SB); Depósitos de acréscimo lateral (LA); Macroformas de *Foreset* (FM); Depósitos modulados por marés (TM); Sedimentos de fluxos gravitacionais (SG); Esteiras microbiais (MM);

Lençóis de tempestade (SS). A análise dos elementos arquiteturais, juntamente com a identificação e caracterização das litofácies, permitiram interpretar a presença de quatro elementos morfológicos do ambiente de ilha-barreira, sendo eles: Canal de maré principal; *Washover*; *Ebb tidal delta*; *Flood tidal delta*. A partir dessas análises do arranjo estratigráfico foi possível identificar ciclos transgressivo e regressivos (T-R) de terceira a quinta ordem. Toda essa análise foi fundamental para inferir sobre as flutuações de curta e longa duração do nível do mar. Além disso, é importante destacar que o registro de estratificações cruzadas do tipo espinha de peixe (*herringbone*) em *grainstones* conglomeráticos indica a ação de fortes correntes de maré (Gani e Bhattacharya, 2007).

Nas duas seções estudadas, a ação da maré se mostrou como um importante processo deposicional, o que só seria possível se a bacia Bambuí estivesse pelo menos parcialmente conectada ao oceano global. Por isso, interpretamos que, durante a deposição dessas sequências, o Mar Bambuí seria epicontinental e semifechado. Ou seja, as seções estratigráficas levantadas neste trabalho sugerem que, durante a deposição da Formação Lagoa do Jacaré, ocorreu uma provável reabertura gradual e parcial da bacia Bambuí, que mostrava conexão com o oceano Ediacarano-Cambriano global. Além disso, este estudo reforça a necessidade de um maior levantamento de dados sedimentológicos e estratigráficos de alta resolução para que se possa entender adequadamente a quimioestratigrafia e a estrutura geotectônica da bacia durante o final do Ediacarano e o início do Cambriano.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkmim, F.F. & Martins-Neto, M.A. 2001. A bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: C.P. Pinto & M.A. Martins-Neto (eds). Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais;
- Caetano-Filho, S., Sansjofre, P., Ader, M., Paula-Santos, G., Guacaneme, C., Babinski, M., Bedoya-Rueda, C., Kuchenbecker, M., Reis, H.L.S., Trindade, R.I.F., 2020. A large epeiric methanogenic Bambuí sea in the core of Gondwana supercontinent? *Geosci. Front.* **12**, 203-218
- Caetano-Filho, S., Paula-Santos, G. M., Guacaneme, C., Babinski, M., Bedoya-Rueda, C., Peloso, M., Amorim, K., Kuchenbecker, M., Reis, H.L.S. and Trindade, R. I. (2019). Sequence stratigraphy and chemostratigraphy of an Ediacaran-Cambrian foreland-related carbonate ramp (Bambuí Group, Brazil). *Precambrian Research*, 331, 105365.
- Catuneanu, O., 2019. Model-independent sequence stratigraphy. *Earth-science reviews*, **188**, 312-388.
- Caxito, F.A., Halverson, G.P., Uhlein, A., Stevenson, R., Dias, T.G., Uhlein, G.J., 2012 Marinoan glaciation in east central Brazil. *Precambrian Res.* 200–203, 38–58.
- Caxito F.A., Lana, C., Frei R., Uhlein G.J., Sial A.N., Dantas E.L., Pinto A.G., Campos F.C., Galvão P., Warren L.V., Okubo J., Ganade C.E. 2021. Goldilocks at the dawn of complex life: mountains might have damaged Ediacaran–Cambrian ecosystems and prompted an early Cambrian greenhouse world. *Scientific Reports*, **11**, 20010
- Cui, H., Warren, L. V., Uhlein, G. J., Okubo, J., Liu, X. M., Plummer, R. E., Baele, S. Goderis, P. Claey, Li, F., 2020. Global or regional? Constraining the origins of the middle Bambuí carbon cycle anomaly in Brazil. *Precambrian Research*, **348**, 105861.
- Dardenne M.A., 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 30 (2): 597-610.
- DeCelles P. G., & Currie, B. S., 1996. Long-term sediment accumulation in the Middle Jurassic–early Eocene Cordilleran retroarc foreland-basin system. *Geology*, **24**(7), 591-594.
- DeCelles P. G., & Giles, K. A., 1996. Foreland basin systems. *Basin research*, **8**(2), 105-123.
- Demicco R. V., & Hardie, L. A., 1994. Sedimentary structures and early diagenetic features of shallow marine carbonate deposits (No. 1). SEPM Society for Sedimentary
- Dunham R.J., 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Ham, W.E. (Ed.) Classification of carbonate rocks. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, Memoir 1. 108-122.
- Embry A.F.; Klovan, J.E., 1971 A Late Devonian Reef Tract on Northeastern Banks Island, Northwest Territories. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, **19** (4). 730–781.

- Embry, A. F., 1993. Transgressive–regressive (T–R) sequence analysis of the Jurassic succession of the Sverdrup Basin, Canadian Arctic Archipelago. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **30**(2), 301-320.
- Embry, A. F., 1995. Sequence boundaries and sequence hierarchies: problems and proposals. In *Norwegian Petroleum Society Special Publications* **5**, 1-11. Elsevier.
- Eyles N. & Eyles C.H., 1992. Glacial depositional systems. In: *Facies Models, response to sea level change*. Walker R.G. & James N.P. (Ed.). Geological Association of Canada. pp. 73-100.
- Fairchild, T. R., & Sanchez, E. A. M., 2015. Microbialitos no Brasil: panorâmica de ocorrências e guia de caracterização morfológica. Fairchild, TR; Rohn, R. & Dias-Brito, D. *Microbialitos do Brasil do Pré-Cambriano ao Recente: um atlas*. 1ª ed. Rio de Janeiro. UNESPetro, 1, 10-20.
- Freitas, A. R., Uhlein, A., Dantas, M. V. S., & Mendonça, T. K., 2021. Caracterização em multiescala de carbonatos neoproterozóicos da Pedreira GMD, Formação Lagoa do Jacaré, Grupo Bambuí, Paraopeba-MG. *Geologia USP. Série Científica*, **21**(1), 10-120.
- Hercos C.M., Martins-Neto M.A., Danderfer F. A., 2008. Arcabouço estrutural da Bacia do São Francisco nos arredores da Serra da Água Fria (MG), a partir da integração de dados de superfície e sub-superfície. *Revista Brasileira de Geociências*, **38** (2-Suplemento), 197-212.
- Kaufman, A.J., Sial, A.N., Frimmel, H.E., Misi, A., 2009. Neoproterozoic to Cambrian palaeoclimatic events in southwestern Gondwana. In: Gaucher, C., Sial, A.N., Halverson, G.P., Frimmel, H.E. (Eds.), *Neoproterozoic-Cambrian Tectonics, Global Change and Evolution: a focus on southwestern Gondwana*. *Developments in Precambrian Geology*, 369–388
- Magalhães P.M. 1989. Análise estrutural qualitativa das rochas do Grupo Bambuí, na porção sudoeste da Bacia do São Francisco. Dissertação de Mestrado, DEGEO/Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 100 p.
- Martins M. & Lemos V.L., 2007. Análise estratigráfica das sequências neoproterozoicas da Bacia do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, **37**:156–167.
- Martins-Neto M.A., 2009. Sequence stratigraphic framework of Proterozoic successions in eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, **26**, 163–176
- Miall, A. D., 1976. Palaeocurrent and palaeohydrologic analysis of some vertical profiles through a Cretaceous braided stream deposit, Banks Island, Arctic Canada. *Sedimentology*, **23**(4), 459-483.
- Miall A.D., 1977 A Review of the Braided-River Depositional Environment. *Earth-Science Reviews*, **13**(1) 1-62.

- Miall, A. D., 1985. Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits. *Earth-Science Reviews*, **22**(4), 261-308.
- Moreira, D. S., Uhlein, A., Dussin, I. A., Uhlein, G. J., & Misuzaki, A. M. P., 2020. A Cambrian age for the upper Bambuí Group, Brazil, supported by the first U-Pb dating of volcanoclastic bed. *Journal of South American Earth Sciences*, **99**, 102503.
- Moynihan, D.P., Strauss, J.V., Nelson, L.L., Padget, C.D., 2019. Upper Windermere Supergroup and the transition from rifting to continent-margin sedimentation, Nadaleen River area, northern Canadian Cordillera. *Bulletin 131* (9–10), 1673–1701.
- Paula-Santos G.M.; Babinski, M.; Kuchenbecker, M.; Caetano-Filho, S.; Trindade, R.I. & Pedrosa-Soares, A.C., 2015. New evidence of an Ediacaran age for the Bambuí Group in Southern São Francisco craton (eastern Brazil) from zircon U–Pb data and isotope chemostratigraphy. *Gondwana Research*, **28**, 702–720.
- Paula-Santos, G.M., Caetano-Filho, S., Babinski, M., Trindade, R.I.F., Guacaneme, C., 2017. Tracking connection and restriction of West Gondwana São Francisco basin through isotope chemostratigraphy. *Gondwana Res.* **42**, 280–305.
- Paula-Santos, G. M., Caetano-Filho, S., Enzweiler, J., Navarro, M. S., Babinski, M., Guacaneme, C., ... & Trindade, R. I., 2020. Rare earth elements in the terminal Ediacaran Bambuí Group carbonate rocks (Brazil): evidence for high seawater alkalinity during rise of early animals. *Precambrian Research*, 336, 105506.
- Pimentel M.M.; Rodrigues, J.B.; DellaGiustina, M.E.S.; Junges, S.; Matteini, M. & Armstrong, R., 2011. The tectonic Evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil, based on SHRIMP and LA-ICPMS U–Pb sedimentary provenance data: a review. *Journal of South American Earth Sciences*, **31**:345–357.
- Reis, H.L.S., Suss, J.F., Fonseca, R.C.S., Alkmim, F.F., 2017. Ediacaran forebulge grabens of the southern São Francisco basin, SE Brazil: craton interior dynamics during WestGondwana assembly. *Precambrian Res.* **302**, 150–170.
- Riding R., 2000. Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial–algal mats and biofilms. *Sedimentology* **47**, 179–214.
- Riding, R., 2006. Cyanobacterial calcification, carbon dioxide concentrating mechanisms, and Proterozoic–Cambrian changes in atmospheric composition. *Geobiology*, **4**(4), 299–316.
- Rowe C.E. 2002. The Cunningham Formation: a mixed carbonate/siliciclastic ramp in the terminal Proterozoic of Western Canadá. The Geological Society of America. Denver Annual Meeting (October, 2002). Paper 222-1.
- Sanchez, E. A., Uhlein, A., & Fairchild, T. R., 2021. Treptichnus pedom in the Tres Marias Formation, south-central Brazil, and its implications for the Ediacaran-Cambrian transition in South America. *Journal of South American Earth Sciences*, **105**, 102983.

- Santos, D.M., Sanchez, E.A., & Santucci, R.M., 2018. Morphological and petrographic analysis of identified stromatolitic occurrences in Lagoa do Jacaré Formation, Bambuí Group, state of Minas Gerais, Brazil. *A Journal of the Brazilian Society of Paleontology* **21**(3),195–207.
- Spalletti L.A., Franzese J.R., Matheos S.D., Schuarz E. 2000. Sequence stratigraphy of a tidally dominated carbonate-siliciclastic ramp; the Tithonian-Early Berriasian of the Southern Neuquén Basin, Argentina. *Journal of the Geological Society*, 157,433-446.
- Uhlein G.J., Uhlein, A., Stevenson, R., Halverson, G.P., Caxito, F.A., Cox, G.M., 2017. Early to late Ediacaran conglomeratic wedges from a complete foreland basin cycle in the southwest São Francisco Craton, Bambuí Group, Brazil. *Precambrian Research*, **299**, 101–116.
- Uhlein G.J., Uhlein, A., Pereira, E., Caxito, F.A., Okubo, J., Warren, L., Sial, A.N., 2019. Ediacaran paleoenvironmental changes recorded in the mixed carbonate-siliciclastic Bambuí Basin, Brazil. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* **517**, 39–51.
- Warren L.V.; Quaglio, F.; Riccomini, C.; Simões, M.G.; Poiré, D.G.; Strikis, N.M.; Anelli, L.E. & Strikis, P.C., 2014. The puzzle assembled: Ediacaran guide fossil *Cloudina* reveals an old proto-Gondwana seaway. *Geology*, **42**:391–394.
- Zalán P.V. & Romeiro-Silva, P.C., 2007. Bacia do São Francisco. *Boletim de Geociências da Petrobras*, **15**,561–570.