

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação e Geologia

Alexandre Souza Fortes Almeida

**PLATAFORMAS DOMINADAS POR ONDAS COM AÇÃO DE TEMPESTADES –
ESTUDO DE CASO: a Formação Três Marias, Grupo Bambuí, Bacia do São
Francisco, Minas Gerais, Brasil**

Belo Horizonte
2024

Alexandre Souza Fortes Almeida

**PLATAFORMAS DOMINADAS POR ONDAS COM AÇÃO DE TEMPESTADES –
ESTUDO DE CASO: a Formação Três Marias, Grupo Bambuí, Bacia do São
Francisco, Minas Gerais, Brasil**

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

Orientador: Prof. Dr. Gabriel Jubé Uhlein

Belo Horizonte
2024

A447p
2024

Almeida, Alexandre Souza Fortes.

Plataformas dominadas por ondas com ação de tempestades – estudo de caso [manuscrito] : a formação Três Marias, Grupo Bambuí, Bacia do São Francisco, Minas Gerais, Brasil / Alexandre Souza Fortes Almeida. – 2024.

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

Orientador: Gabriel Jubé Uhlein.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2024.

Bibliografia: f. 37-44.

1. Geologia estratigráfica – Minas Gerais – Teses. 2. Rochas sedimentares – Teses. 3. Facies (Geologia) – Teses. 4. Paleogeografia – Teses. 5. São Francisco, Rio, Bacia – Teses. I. Uhlein, Gabriel Jubé. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 551.732(815.1):551.3.051



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA DO IGC/UFMG



FOLHA DE APROVAÇÃO

**PLATAFORMAS DOMINADAS POR ONDAS COM AÇÃO DE TEMPESTADES –
ESTUDO DE CASO: A FORMAÇÃO TRÊS MARIAS, GRUPO BAMBUÍ, BACIA DO
SÃO FRANCISCO, MINAS GERAIS, BRASIL**

ALEXANDRE SOUZA FORTES ALMEIDA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA, do Instituto de Geociências (IGC), da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), como **REQUISITO PARCIAL** para obtenção do grau de Mestre em GEOLOGIA, área de concentração GEOLOGIA REGIONAL, pelo Programa de Pós-graduação em Geologia do IGC/UFMG.

Aprovada em 11 de setembro de 2024, pela banca constituída pelos membros:

Prof(a). Dr(a). Gabriel Jubé Uhlein – Orientador(a)
UFMG

Prof(a). Dr(a). Alexandre Uhlein
UFMG

Prof(a). Dr(a). Márcio Vinicius Santana Dantas
UFS

Belo Horizonte, 11 de setembro de 2024.

A Deus e aos meus pais, pelo amor incondicional. Aos que me deram toda sorte de apoio, essa é uma vitória coletiva.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à Universidade Federal de Minas Gerais, à Pró-reitoria de pós-graduação, ao Departamento de Geologia IGC/UFMG, ao Centro de Pesquisa Manoel Teixeira da Costa (CPMTC) e ao Programa de Pós-Graduação em Geologia por sua infraestrutura. Este estudo foi financiado pelo CNPq (432556/2018-4) e pela Fapemig (APQ-02240-21). O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Agradeço ao Professor Jonathas Bittencourt e à Professora Rosaline Silva, ambos do Departamento de Geologia IGC/UFMG, pelo apoio durante as pesquisas. Agradeço ao Professor Alexandre Uhlein (Departamento de Geologia IGC/UFMG), pelos conhecimentos adquiridos sobre Estratigrafia e Sedimentologia durante a caminhada acadêmica. Agradeço aos colegas de pós-graduação, pelos auxílios e conselhos. Por fim, agradeço ao Professor Gabriel J. Uhlein (Departamento de Geologia IGC/UFMG), que me transmitiu, de maneira amistosa e lateral, conhecimento e confiança para eu pudesse desenvolver essa pesquisa.

“Il mare è un antico idioma che non riesco a decifrare.” Jorge L. Borges (1925)

RESUMO

Em alguns oceanos, a linha costeira tem parâmetros hidráulicos associados a ondas de tempestade, gerando fluxos que produzem fácies sedimentares características chamadas tempestitos. A Formação Três Marias, Grupo Bambuí, é a unidade mais jovem de uma bacia foreland Ediacarano-Cambriana, na qual fácies transicionais/costeiras foram descritas anteriormente, mas os estudos publicados sobre seu registro sedimentológico e estratigráfico têm baixo nível de detalhe. O objetivo deste estudo foi entender melhor a evolução paleoambiental da bacia em seu estágio final por meio de levantamentos estratigráficos detalhados. As dez fácies definidas foram organizadas em cinco associações de fácies, nomeadas de acordo com o subambiente em uma plataforma costeira. A estratigrafia da Formação Três Marias em sua área tipo é representada principalmente por arenitos depositados da praia até a superfície inferior da costa em uma plataforma rasa, influenciada por ondas de tempestade. Os ciclos de alta a média frequência são representados por sucessões de fácies marinhas a transicionais que marcam regressões e transgressões máximas. O intervalo estratigráfico superior da área estudada sugere forte regressão ao mostrar depósitos de planície deltaica sobre depósitos heterolíticos. Essa Dissertação contribui para a discussão sobre a evolução da bacia Bambuí no Cambriano, um tópico que merece atenção, considerando as várias transições ecológicas, tectônicas e climáticas vivenciadas pela Terra durante esse período.

Palavras-chave: estratigrafia; Formação Três Marias, hummocky, tempestitos, paleoambiente.

ABSTRACT

In some oceans, the coastline has hydraulic parameters associated with storm waves, generating flows that produce characteristic sedimentary facies called tempestites. The Três Marias Formation, Bambuí Group, is the youngest unit of an Ediacaran-Cambrian foreland basin, in which transitional/costal facies have been previously described, but the published studies on its sedimentological and stratigraphic record have a low level of detail. The aim of this study was to better understand the paleoenvironmental evolution of the basin at its final stage through detailed stratigraphic surveys. The ten facies defined were arranged into five facies' associations, named according to the subenvironment on a coastal platform. The stratigraphy of the Três Marias Formation in its type area is represented mainly by sandstones deposited from the beach to the lower shoreface on a shallow platform, influenced by storm waves. High- to medium-frequency cycles are represented by rocks marking maximum regressions and transgressions. The upper interval of the survey suggests strong regression by showing deltaic plain deposits. This study contributes to the discussion on the evolution of the Bambuí basin at the Cambrian, a topic that deserves attention, considering the various ecological, tectonic and climatic transitions experienced by the Earth during this time.

Keywords: stratigraphy; Três Marias Formation; hummocky; tempestites; paleoenvironment.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
2.1 Depósitos tempestíficos	10
2.2 Estratigrafia de Sequências	13
3 METODOLOGIA	15
4 ESTUDO BIBLIOGRÁFICO SOBRE O GRUPO BAMBUÍ	15
4.1 Formação Três Marias	16
5 THE TRÊS MARIAS FORMATION OF THE BAMBUÍ GROUP IN ITS TYPE AREA: COASTAL ENVIRONMENT REWORKED BY STORM WAVES DURING THE CAMBRIAN	17
5.1 Introduction	17
5.2 Geological setting	19
5.2.1 Três Marias Formation	22
5.3 Materials and methods	23
5.4 Results	24
5.5 Discussions	28
5.5.1 Facies associations	28
5.5.1.1 Deltaic plain deposits – FA1 (Fc, St, Sar)	28
5.5.1.2 Beach deposits – FA2 (Sl, Sp, Sm)	29
5.5.1.3 Upper shoreface deposits – FA3 (Sar, Sr, Sp, Sl)	29
5.5.1.4 Middle shoreface deposits – FA4 (Ssr, Sp, Sr, Sh)	30
5.5.1.5 Lower shoreface deposits – FA5 (Sr, He)	30
5.5.2 Paleoenvironmental evolution of the Três Marias Formation in its type area	31
5.6 Conclusions	35
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
7 REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

As linhas de costa e plataformas continentais em grande parte do planeta apresentam como atributos hidráulicos dominantes os processos associados as ondas de tempo bom e de tempestade, gerando registros abundantes de ação de ondas nos sedimentos desses ambientes. Contudo, as mesmas características que promovem a sedimentação também são responsáveis por apagar facilmente tais evidências, pois mudanças no nível do mar podem expor as estruturas (estratificação cruzada hummocky e swaley, laminação truncada por ondas, estratificação planar) à erosão.

Uma plataforma dominada por ondas possui essa definição quando processos sedimentares relacionados as ondas estão mais presentes do que processos de maré, mas não em quantidade apenas, também na qualidade de preservação das estruturas (Davis e Hayes, 1984). Os principais estudos de sedimentação associada a ondas de tempestades são realizados em bacias fanerozoicas mais recentes, com registro abundante de fósseis e bioturbação, ou seja, relativamente jovens e com estruturas mais bem preservadas, se comparadas a bacia Bambuí, objeto de estudo desse trabalho. Ainda assim, o estudo das estruturas sedimentares presentes na Formação Três Marias traz elucidações sobre as condições do ambiente de deposição em um período da história da Terra que registra inovações biológicas e nova configuração geotectônica dos continentes.

Depositada no topo do Grupo Bambuí, a Formação Três Marias é reconhecida como uma deposição sin-orogênica do estágio de antepaís da bacia Bambuí em sua fase de assoreamento. Na porção centro-sul da bacia, essa formação se caracteriza por ser um sistema plataformar siliciclástico que possui sequências tempestíficas de diferentes ordens hierárquicas como unidades básicas (Chiavegatto, 1992).

Este trabalho apresenta um estudo de caso de um ambiente tempestítico registrado nas rochas da Formação Três Marias, identificado pela reconstrução paleoambiental. Através de um levantamento estratigráfico de detalhe (escala centimétrica a métrica), esse estudo atesta a influência das ondas de tempestade numa plataforma costeira originada e preenchida no Cambriano, um período importante na história do planeta devido à expansão da vida complexa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Depósitos tempestílicos

O registro sedimentar durante eventos de tempestade sempre gerou discussão quanto a gênese de suas estruturas diagnósticas, a estratificação cruzada tipo *hummocky* e a estratificação cruzada tipo *swaley*. Os tempestitos, como são chamados os depósitos formados durante as tempestades, datam do pré-cambriano ao recente, ocorrendo principalmente em ambientes plataformais marinho raso (Walker, 1984). Apresentam diversas outras estruturas (maciça, estratificação planar-paralela, estratificação cruzada de ângulo baixo, estratificações cruzadas, marcas onduladas e laminação cruzada por onda, entre outras), que podem aparecer intercaladas com camadas contendo as estruturas *hummocky* ou *swaley*.

Estas são estruturas sedimentares que ocorrem predominantemente em ambientes marinhos e lacustres, associadas a condições de sedimentação em ambientes de águas rasas e influenciadas por eventos de tempestade (Dott e Bourgeois, 1982). São caracterizadas por camadas inclinadas que formam padrões ondulados, em forma de *hummock* e *swale* (colinas e vales arredondados, respectivamente). A estratificação cruzada tipo *hummocky* aparece nas rochas com uma aparência lenticular, com camadas concavas e convexas em truncamento. A estratificação cruzada tipo *swaley*, por sua vez, se forma em um processo parecido, porém mais próximo à linha de costa, o que proporciona que as porções concavas das ondulações sejam obliteradas mais facilmente, restando apenas a porção convexa, sendo por vezes confundida com a estratificação cruzada acanalada (Dumas et al., 2005). As camadas cruzadas geralmente têm uma inclinação que pode variar entre 5 a 30 graus, e a direção das inclinações pode indicar a direção das correntes de tempestade. O sedimento apresenta granulometria variável entre silte grosso e areia fina e a presença de partículas maiores ou de lâminas argilosas pode ser indicativa de variações na energia do ambiente (Plint, 2010).

Quanto a formação desses depósitos, sabe-se que ondas de tempestades e correntes (retorno, geostrófica, maré e turbidez), combinadas ou não, são responsáveis para o transporte e deposição de sedimentos que os compõem. Existe uma discussão entre duas hipóteses, uma baseada em observações oceanográficas atuais (hipótese oceanográfica), e a outra baseada no registro geológico (hipótese

geológica). Na hipótese oceanográfica, defendida por Swift et al., (1983), Duke, (1985) e Swift & Nummedal (1987), o transporte de areias em mares rasos seria realizado por correntes de retorno e geostróficas que, combinadas com ondas, seriam responsáveis pela deposição dos tempestitos. Correntes de retorno são induzidas por uma sobrelevação costeira, gerada por ventos soprados em direção a costa durante eventos de tempestades, que produzem uma diferença de pressão hidrostática entre a costa e a região de *offshore*. Esta corrente, fluindo em direção a *offshore*, sofre efeito da força de Coriolis e é defletida, passando a fluir paralelamente às isóbatas; a partir de então passa a ser chamada de corrente geostrófica (Fig. 1). Os autores defensores da hipótese geológica (Walker, 1984; Hamblim & Walker, 1979) dizem que o transporte de areias em antigas plataformas poderia dar-se por correntes de turbidez formadas a partir de correntes de retorno ortogonais à costa em períodos de tempestade (*storm-surge ebb currents*). Se depositadas acima do nível de base de ação de ondas de tempestade, apresentariam características de um tempestito e, se depositadas abaixo, apresentariam características de um turbidito. Esses registros seriam resultado de eventos cíclicos com periodicidade de milhares de anos e não poderiam ser observados nas plataformas atuais.

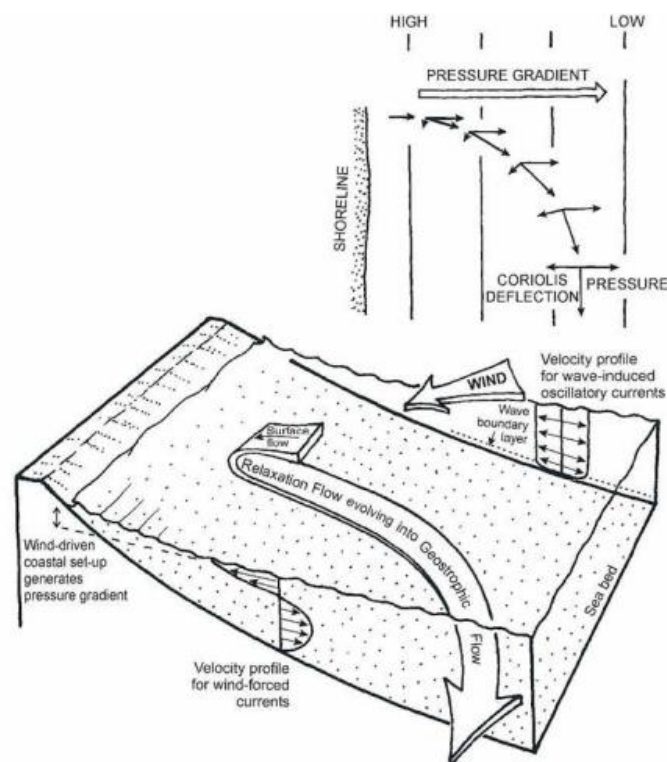


Figura 1 – Formação das correntes geostróficas em uma plataforma costeira e a composição do fluxo combinado, de acordo com a hipótese oceanográfica (Plint, 2010).

Outro ponto de discussão está relacionado à natureza das tempestades, alguns defendem que estas são tempestades de inverno cíclicas somadas durante o tempo geológico (Swift et al. 1983) e outros sustentam que a formação de um leito tempestítico está associada à ocorrência de eventos catastróficos como furacões (Duke et al. 1991). As tempestades propiciam condições para a geração de formas de leito e estruturas sedimentares exclusivas nos ambientes influenciados por elas (Dott e Bourgeois, 1982; Cheel e Leckie, 1993). Estas, em geral, são geradas abaixo da linha base de onda de tempo bom, considerando que acima deste limite ocorre retrabalhamento do sedimento em condições normais.

Duke et al. (1991) sintetizam os principais processos que originam leitos com estruturas do tipo *hummocky*, em que inicialmente ondas de tempestade interagem com a porção mais oblíqua da região costeira, retrabalhando o substrato lamoso. Em seguida, as areias transportadas por ação de fluxo combinado movem-se por suspensão ou carga de fundo e são levadas para porções mais profundas (próximo à zona de transição para *offshore*). Estas areias se acumulam rapidamente e com o arrefecimento da tempestade é originada uma laminação planar. Posteriormente, ondulações métricas começam a se formar sobre o substrato e a lenta migração a partir de estratos planares começa a gerar estratificação cruzada do tipo *hummocky* sob condições de fluxo combinado com componente oscilatório predominante (Fig. 2). Inicialmente são formadas estruturas *hummocky* anisotrópicas, devido ação do fluxo unidirecional, que migram para estruturas *hummocky* isotrópicas e, com o arrefecimento da tempestade e do fluxo oscilatório, passa a formar marcas onduladas. Após a tempestade ocorre novamente a deposição de tempo bom, o que encerra um ciclo tempestítico (Cheel, 1991, Cheel e Leckie, 1993).

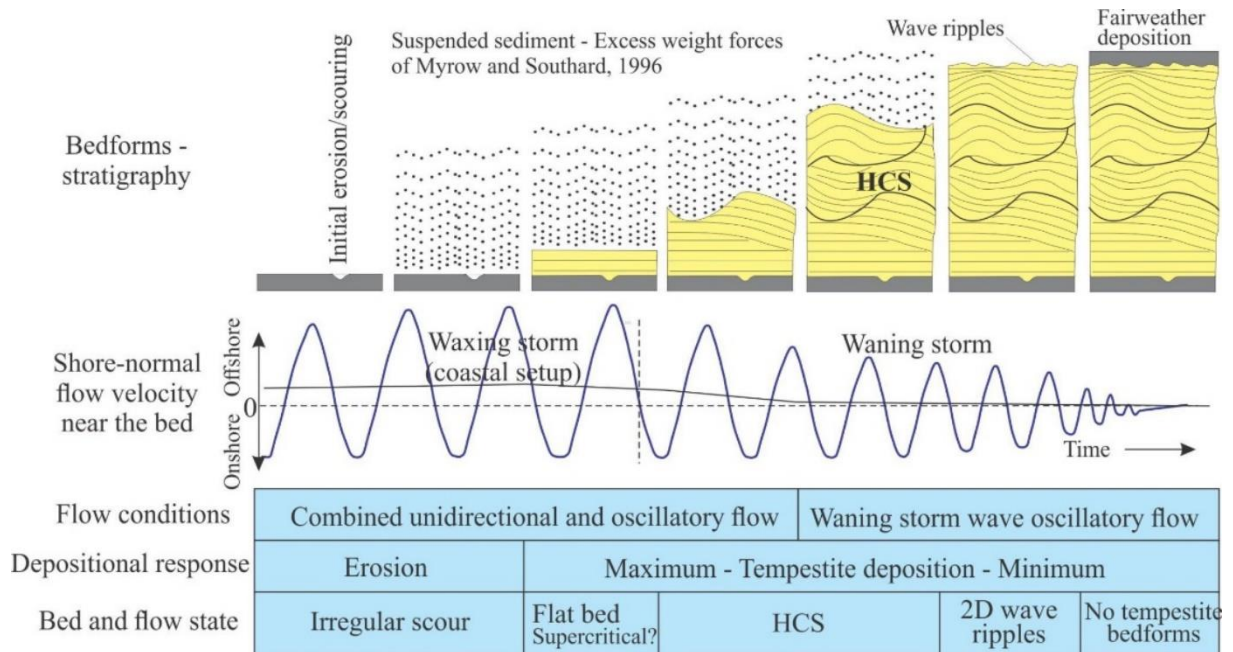


Figura 2 – Formação de estruturas sedimentares como resultado de fluxo combinado gerado por tempestades. (modificado de Cheel, 1991; Cheel and Leckie, 1993.)

2.2 Estratigrafia de Sequências

A Estratigrafia de Sequências é um tipo de modelagem estratigráfica associada a aplicação da Sismoestratigrafia em bacias siliciclásticas de todo o mundo. A leitura e interpretação dos dados sísmicos proporciona a definição de ciclos de variações relativas do nível do mar, baseado nos conceitos fundamentais dessa metodologia de sequências deposicionais de Sloss (1949), que permitem caracterizar e correlacionar sequências de diferentes ordens hierárquicas. Os principais conceitos foram introduzidos por Vail et al. (1987), e posteriormente aprofundados por Van Wagoner et al. (1988;1990). Essa metodologia é amplamente aplicada em diferentes setores, com destaque para sua grande aplicação no setor de óleo e gás, sendo utilizado na análise de fácies e de sistemas deposicionais. Tal fato ocorre, pois a aplicação da estratigrafia de sequências em sistemas litorâneos e plataformais é muito utilizada visto que as assinaturas de variação relativa do nível do mar, principal marcador para essa metodologia, são muito expressivas nessa região, ao contrário dos sistemas puramente continentais ou oceânicos, onde essas flutuações são pouco perceptíveis (Mitchum et al., 1977). Os princípios básicos da Estratigrafia de Sequências permitem reconhecer e relacionar diferentes depósitos sedimentares em horizontes cronoestratigráficos, separados em uma unidade estratal básica denominada como sequência deposicional.

As sequências deposicionais são uma sucessão de estratos, ou um conjunto de estratos geneticamente relacionados, limitada por superfícies discordantes ou suas concordâncias correlativas (Mitchum et al., 1977), podendo formar eventualmente parassequências e conjuntos de parassequências. Juntos eles caracterizam um trato de sistemas, limitado novamente por discordâncias ou concordâncias correlativas, vindo a compor um conjunto de sistemas cronocorrelatos (Brown e Fisher, 1977). Os tratos de sistema e sua relação com as variações eustáticas são muito discutidas e atualmente tendem a ser padronizados quanto à suas características principais (Catuneanu, 2009).

O empilhamento estratigráfico apresenta camadas ou conjunto de camadas que ocorrem com diferentes frequências no registro sedimentar, tal fato promove estudos que buscaram padronizar a delimitação dos ciclos utilizando estruturas ou superfícies que pudessem ser utilizadas como marcadores da passagem entre ciclos de variação eustática (Catuneanu, 2009). As superfícies das sequências estratigráficas definem a passagem entre os ciclos e a noção de hierarquia, mensuradas de acordo com a frequência dos ciclos que, por sua vez, apresentam diferentes escalas de visualização e dimensões diferentes dentro de uma bacia sedimentar, como é mostrado na Figura 3 abaixo.

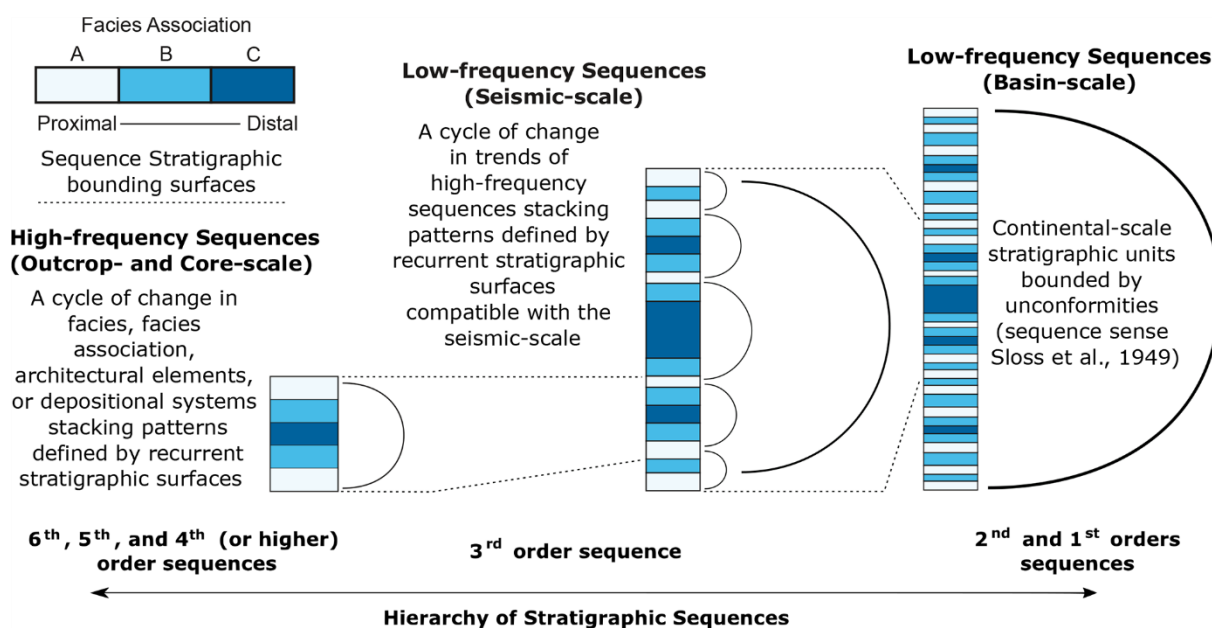


Figura 3 – Definição esquemática da hierarquia das sequências estratigráficas e as diferentes escalas de interpretação. (Retirado de Fragoso et al., 2022)

3 METODOLOGIA

Os ciclos foram delimitados de acordo com a existência e abundância de cada fácies sedimentar proposta durante o estudo, levando em consideração também a presença das superfícies marcadoras de sequências estratigráficas. Ao analisar trabalhos que se dedicaram a padronizar o aparecimento de diferentes fácies sedimentares nas diferentes porções de uma plataforma marinha costeira (e.g. Davis e Fox., 1972a, Davis, 1985, Walker, 1984, Swift and Nummedal, 1987, Plint, 2010), foi possível confeccionar uma tabela que delimita a provável posição de sedimentação para formar um tipo específico de estrutura. Dessa forma, a ocorrência de uma fácies ou conjunto de fácies sedimentar indica indiretamente a posição do nível do mar e a variação eustática. Neste trabalho essa metodologia permitiu delimitar possíveis ciclos de 5ª ordem dentro da bacia Bambuí, eventualmente marcados por superfícies como Superfícies de Regressão Máxima (SRM), que já foram anteriormente discutidas por Chiavegatto (1992), que delimitou dois conjuntos de parassequências na região de Três Marias.

4 ESTUDO BIBLIOGRÁFICO SOBRE O GRUPO BAMBUÍ

Foi realizado um estudo bibliográfico que levantou os principais estudos sobre o Grupo Bambuí, utilizados na construção do raciocínio principal deste trabalho. Os principais conceitos foram obtidos em artigos que se dedicaram a descrição e caracterização das fácies sedimentares encontradas através de mapeamento, nos primórdios da pesquisa sobre esse contexto geológico (e.g. Branco, 1967; Dardenne 1978, 1981; Castro, 1997). Além disso, trabalhos que utilizaram de conceitos da estratigrafia de sequências, métodos geofísicos, químico e cronoestratigrafia foram fundamentais para avanços nos conhecimentos sobre o Grupo Bambuí e sua estratigrafia (e.g. Babinski et al., 2007; Alkmim & Martins-Neto, 2001, 2012; Alvarenga et al., 2014; Uhlein et al., 2016, 2019; Cui et al., 2020; Caxito et al., 2021, Moura et al., 2022). Os conceitos sobre sistemas deposicionais e a relação com os aspectos geotectônicos foram baseados em estudos que descreveram as formações em diferentes porções da bacia (Nobre-Lopes, 1995; Chiavegatto e Darnenne, 1997; Guimarães, 1997; Uhlein, 2004; Uhlein et al., 2017) e outros que buscam compreender a evolução dos orógenos brasileiros (Chang, 1988; Alkmim, 2001; Reis et al., 2017).

4.1 Formação Três Marias

Seguindo o mesmo método, foram levantados durante a pesquisa artigos, teses e dissertações que são focados no estudo da Formação Três Marias, e os conceitos obtidos foram utilizados para compor a pesquisa sobre: a descrição das feições e litotipos encontrados nas diferentes regiões onde aflora essa unidade (Costa e Branco, 1961; Dardenne 1978, 1981; Uhlein, 1991; Chiavegatto, 1992, 1997; Iglesias e Uhlein, 2009); a configuração do contato basal com a Formação Serra da Saudade e a variação do ambiente de sedimentação em diferentes regiões onde aflora a Formação Três Marias (Chiavegatto, 1997; Lima, 2007; Rossi, 2017; Tavares et. al, 2020; Uhlein, 2021); a presença de fácies tempestíticas no registro sedimentar da Formação Três Marias foi embasado principalmente em Chiavegatto (1992), que realizou um estudo de fácies nos arredores do município de Três Marias e descreveu estruturas típicas de deposição em tempestade (e.g. hummocky, swaley); os dados geocronológicos de idade máxima de sedimentação obtidos através de datação U-Pb em zircões na Formação Três Marias e Serra da Saudade (Tavares et al. 2020; Rossi et al 2020; Moreira, 2020) e o conteúdo fossilífero presente na unidade que também contribui na datação (Sanchez, 2021)

5 THE TRÊS MARIAS FORMATION OF THE BAMBUÍ GROUP IN ITS TYPE AREA: COASTAL ENVIRONMENT REWORKED BY STORM WAVES DURING THE CAMBRIAN

5.1 Introduction

Since the new geochronological and paleontological data, which point to young ages for the Bambuí Group, efforts have been made trying to better understand the physical and chemical settings of the basin, the geological information that can be extracted and its real role as a repository of the Earth's geological history during the late Neoproterozoic and early Cambrian. The Serra da Saudade and Três Marias formations are the youngest units of the Bambuí Group, and a Cambrian age for both has recently been established through U-Pb zircon and paleontological data, definitively placing part of the Bambuí Group within the Paleozoic. Despite the notorious fact of great animal diversification in the global oceans during the Cambrian (e.g. Peng et al., 2012), to date, fossil records of the upper units of the Bambuí Group are extremely scarce (Sanchez et al., 2021). Much has been speculated about this contradiction and one of the hypotheses is based on a probable biogeochemical scenario unsuitable for life (Hippertt et al. 2019; Cui et al., 2020). Furthermore, during the Cambrian, the São Francisco Craton region was positioned in the center of western Gondwana, causing great continentalization and probable aridity towards the end of the basin's development (e.g., Uhlein et al., 2019).

At a glance, the rocks of the Três Marias Formation appear to be monotonous stacked sandstones. However, these deposits have already been described as tempestitic by Chiavegatto (1992), suggesting important marine platform sedimentation at the top of the Bambuí Group. Coastal clastic sedimentation environments dominated by wave action are widely distributed throughout the world (e.g. Nyberg and Howell, 2016). The foreshore and shoreface zones are the most variable and dynamic part of these systems. There are many classic facies models applied to the geological record for wave-dominated coastlines (Galloway and Hobday, 1996; Collinson and Reading, 1996; Howell and Flint, 2003; Plint, 2010). According to these facies models, coastal progradation will result in essentially tabular bodies in which the basic stratigraphic organization is a sandier upward succession that registers a progressive increase in the influence of waves and currents as the coastline progrades. The maximum limit of regression can culminate in deltaic plain deposits

with subaerial exposures and even alluvial sediments if these remain preserved after transgressive erosion. This paper presents solid evidence of wave-dominated coastal sedimentation in the Três Marias Formation in its type area (Fig. 4) and discusses the implications of this validation from the perspective of basin analysis, the biogeochemical panorama and the global Cambrian context.

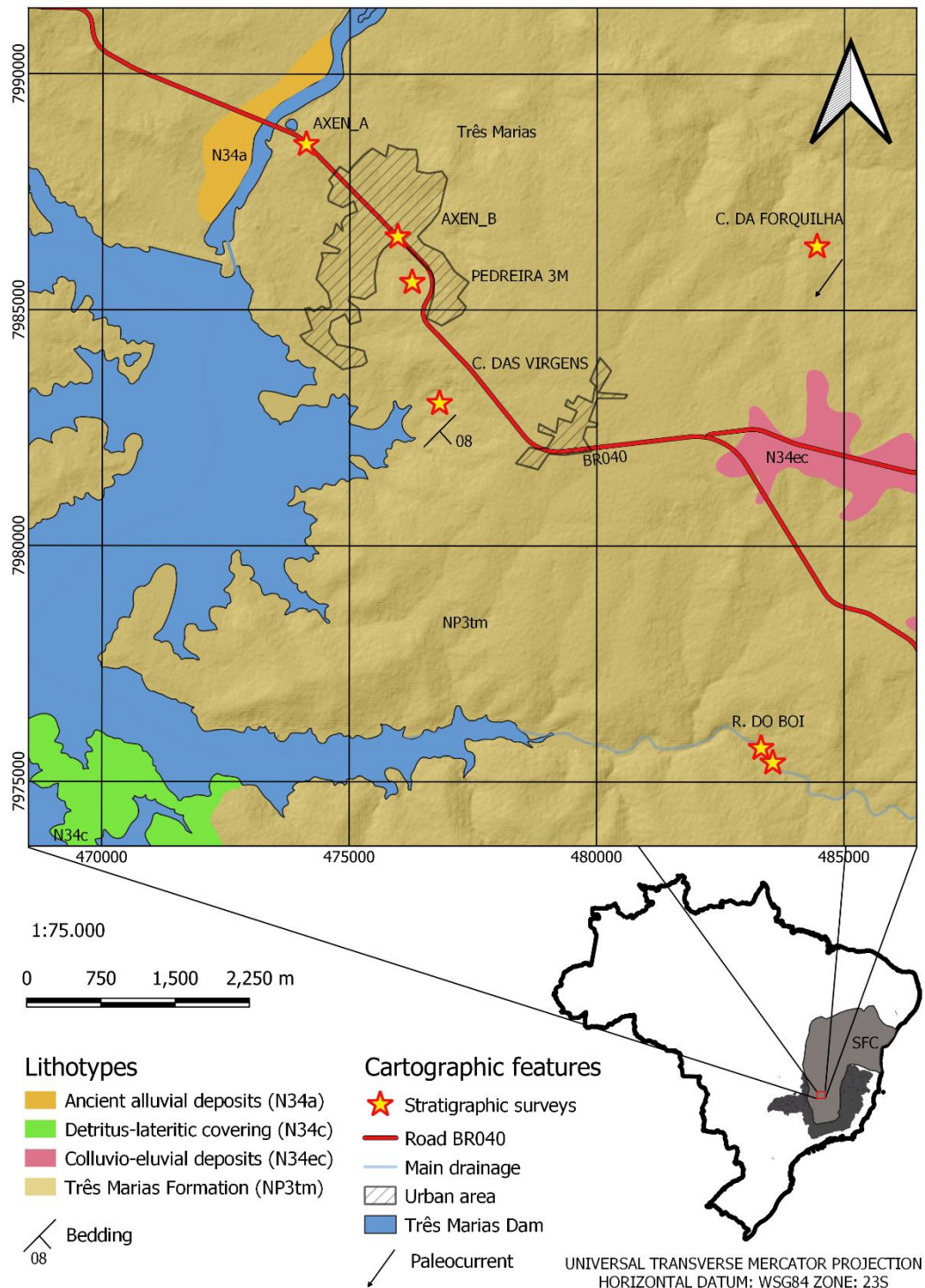


Figure 4 – Geological map of the region of the city of Três Marias and surroundings. SFC means São Francisco craton. Modified from Costa et al (2011).

5.2 Geological setting

The Bambuí Group is characterized by alternating carbonate and siliciclastic sediments laid directly on the São Francisco craton basement (> 1.8 Ga), and may occur in contact, generally of a tectonic nature, with older Precambrian units on the edges of the basin. The Bambuí Group units have been extensively researched through geological mapping and facies characterization/interpretation in the last decades (e.g. Branco, 1957; Dardenne, 1978, 1981; Castro, 1997). In the last 20 years, studies were dedicated to applying more sophisticated techniques, using tools such as sequence stratigraphy, geophysical methods, chemostratigraphy and geochronology, as well as synthesizing geological knowledge about this group (e.g. Babinski et al., 2007; Alkmim & Martins-Neto, 2001, 2012; Alvarenga et al., 2014; Vieira et al., 2015; Paula-Santos et al., 2015, 2017, 2018; Reis & Suss, 2016; Reis et al., 2017; Uhlein et al., 2016, 2017, 2019; Cui et al., 2020; Tavares et al., 2020; Sanchez et al. 2021; Caxito et al., 2021, Moura et al., 2022).

Studies carried out in different regions of the basin (e.g., Nobre-Lopes, 1995, 2002; Seer et al., 1989; Chiavegatto et al., 1997, 2003; Chiavegatto & Dardenne, 1997; Guimarães, 1997; Castro, 1997) show that the Bambuí Group units have different characteristics in terms of stratigraphy and sedimentation depending on the geographical location of the study area. According to Uhlein et al. (2004), these regional characteristics derive from numerous tectonic, eustatic and climatic variables, which have acted with varying intensity and in different ways in the basin. These variables are reflected in the different types of depositional environments, their respective sedimentary facies and stratigraphic stacking patterns. The western portion of the basin stands out for its significant tectonic control, characterized by the Samburá and Lagoa Formosa conglomeratic deposits, found limited to this portion of the basin (Uhleim et al. 2017). The large facies variations observed between conglomerates, sandstones and siltstones, as well as the low regional expression of carbonate sedimentation, also contribute to this argument. The eastern portion, on the other hand, is characterized by less expressive subsidence rates with important eustatic control, providing marine platforms of great extension and low gradient, with expressive carbonate sedimentation (e.g. Uhlein et al., 2019, Moura et al., 2022, Dantas et al., 2022). In this portion, the stratigraphic units are more easily identified, showing great

lateral continuity of facies and layers with low inclination, attesting to the lesser influence of syn-sedimentary tectonism (Uhlein et al., 2004).

The lithostratigraphic division considered for this work is that proposed by Dardenne (1978) in which the Bambuí Group is subdivided from the base to the top into the following formations: i) Jequitai (diamictites, rare sandstones and rhythmites) ii) Sete Lagoas (limestones and dolomites, with pelitic intercalations); iii) Serra de Santa Helena (pelites with limestone lenses); iv) Lagoa do Jacaré (possibly oolitic limestones with siltstones and marls); v) Serra da Saudade (siltstones with sandstone and greenish claystone intercalations) and vi) Três Marias (Arcosean sandstones, siltstones). Other units restricted to the western portion of the basin are the Samburá (conglomerate and sandstone, Castro & Dardenne, 2000, Uhlein et al. 2017) and Lagoa Formosa (conglomerate, siltstone, limestone and jaspilite, Uhlein et al., 2011b) formations. The stratigraphic units of the Bambuí Group are interpreted as a record of a marine transgression in a foreland basin that occurred within the São Francisco paleocontinent (Martins-Neto & Alkmim, 2001, Reis et al., 2017, Uhlein et al., 2017) and its summarized in Figure 5, according to Caxito et al. (2021).

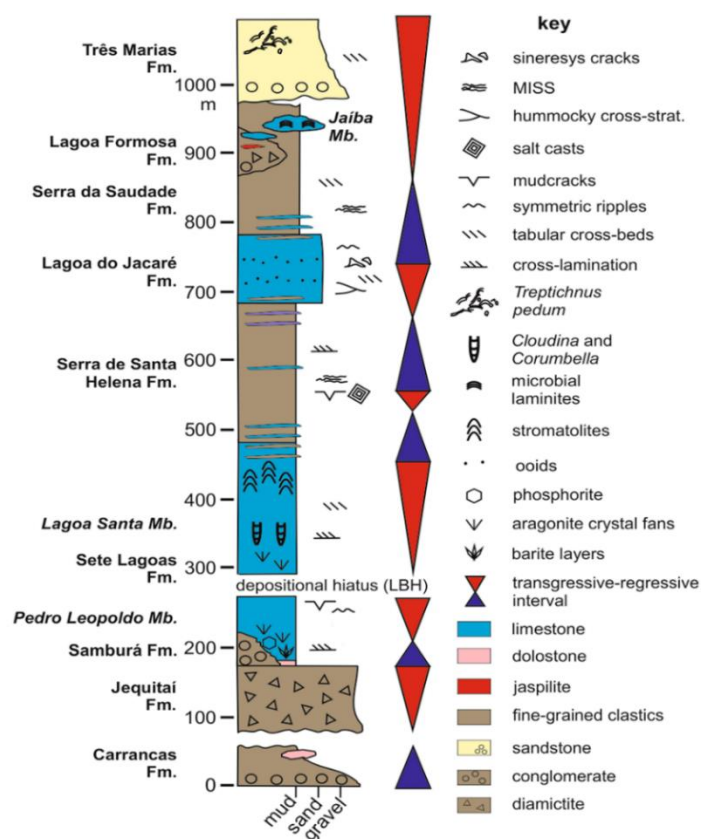


Figure 5 – Subdivision of the Bambuí Group in a stratigraphic column with T-R cycles, fossil content and sedimentary features. Modified from Caxito et al. (2021).

The tectonic aspects of the Bambuí Group are directly linked to the development and structuring of the Brasília (Southern and Northern) and Araçuaí orogenic belts, which were uplifted during the amalgamation of the Western Gondwana paleocontinent at the end of the Neoproterozoic. In general, the Bambuí Group is deformed on its eastern and western margins, close to the contact with the orogenic belts. In its interior portion, there is no significant deformation and the rocks are arranged horizontally (Alkmim et al., 2001; Martins-Neto & Alkmim, 2001; Reis et al., 2017).

From the flexural subsidence generated by the Southern Brasília Belt, there is a marine transgression over the craton and, upon receiving the carbonate and siliciclastic sediments, the Bambuí sequence begins, characterizing itself as a foreland basin in the western domain (Chang et al., 1988; Alkmim & Martins-Neto, 2001, 2012; Reis et al., 2017). After the Araçuaí mountain range was formed, it also began to contribute with sediments to the Bambuí Group deposits (Paula-Santos et al., 2015; Kuchenbecker et al., 2015), helping to maintain the basin's foreland stage, forming the eastern domain. Following the formation of the Northern Brasília Belt and the Rio Preto Belt, the basin was configured as a depression completely surrounded by mountain ranges, and this phase of development was marked by the supply of centripetal bacinal sediment, observed in the upper lithotypes of the Três Marias Formation (Alkmim & Martins-Neto, 2001).

Sedimentary provenance studies for the Bambuí Group carried out in its western portion indicate that the rocks of the Brasília Belt acted as the main sources of sediments. Castro & Dardenne (2000) and Uhlein et al. (2017), correlating the spatial distribution of the conglomerates of the Samburá and Lagoa Formosa formations, respectively, suggest that the origin of the sediments of these rocks is from the Brasília Belt. In regions of the central portion of the basin, Chiavegatto (1992) presented paleocurrent data that indicated sedimentary input from the northwest to the southeast, also possibly related to source areas within the Brasília Belt. In some areas along the eastern basin, it is suggested a provenance from east to west (Gomes, 1988; Chiavegatto et al., 1997, 2003; Kuchenbecker et al., 2016; Rossi et al., 2020).

Today, the depositional ages of the main units of the Bambuí Group are based on maximum sedimentation ages through detrital zircon U-Pb ages, direct dating of calcite via U-Pb method, one depositional age from volcanoclastic bed, and few indirect dates through fossiliferous occurrences (e.g., Warren et al., 2014; Paula-Santos et al.,

2015; Moreira et al., 2020; Rossi et al. 2020, Caxito et al., 2021; Sanchez et al., 2021). The available data suggest a basin divided between a portion deposited at the end of the Cryogenian and beginning of the Ediacaran (Jequitaí Formation and the base of the Sete Lagoas Formation; e.g., Uhlein, 2011a, Uhlein et al., 2017; Caxito et al., 2018) separated from the above deposited at the end of the Ediacaran and beginning of the Cambrian (middle of the Sete Lagoas Formation toward the Três Marias Formation; e.g., Warren et al., 2014; Paula-Santos et al., 2015; Uhlein et al., 2017; Tavares et al., 2020; Sanchez et al., 2021).

5.2.1 Três Marias Formation

The Três Marias Formation is the top unit of the Bambuí Group, outcropping mainly in areas in the central-western part of the basin. It also occurs in isolated form in relatively small areas to the east, in the Buenópolis region, and in the Jaíba and Gorutuba ridges, north of Minas Gerais. This unit is essentially composed of fine sandstones, arkose or lithic. The main sedimentary structures are characterized by planar and cross laminations and stratifications, hummocky-type stratifications, wave ripples and convoluted folds, with subordinate lenticular intercalations of siltstones and argillites, locally with mudcracks, and conglomerates associated with coarse sandstones (Costa & Branco, 1961; Dardenne, 1978, 1981; Uhlein, 1991; Chiavegatto, 1992; Chiavegatto et al., 1997; Iglesias & Uhlein, 2009). Chiavegatto (1992) recognizes, in the central portion of the basin, two main sets of sedimentary facies, the first being a heterolithic domain, dominated by siltstones and with subordinate sandstones, considered to be a record of a low-energy environment with a high settling rate. The second domain is essentially made up of sandstones, considered to be high-energy tempestitic successions. It has a gradual basal contact with the Serra da Saudade Formation, in the central portion of the Bambuí Group. In contrast, in the occurrences in the eastern portion, the transition to the Serra da Saudade Formation occurs by abrupt and erosive contact (Chiavegatto et al., 1997; Tavares et al. 2020; Uhlein et al., 2021).

In its type area, in the central-western portion of the Bambuí Group, the Três Marias Formation is interpreted as a record of a shallow marine siliciclastic platform environment, dominated by cyclical storms, associated with deltaic environments (Chiavegatto, 1992; Lima, 2007). To the east, Tavares et al. (2020) suggest sedimentation in braided rivers and marine settings for the deposits located in the

Buenópolis region. In the Serra de Gorutuba region (NE of the basin), Rossi et al. (2017) described the occurrence of arkose and hybrid conglomerates from molasse-type deposits, also referring to continental sedimentation.

Regarding the age of the Três Marias Formation, Tavares et al. (2020) and Rossi et al. (2020) defined a maximum depositional age of 527 ± 4 Ma and 555 ± 17 Ma, respectively, from U-Pb zircon dating. Moreira et al (2020), from zircon grains extracted from a volcanoclastic bed, defined a 520.2 ± 5.3 Ma for the upper portion of the Serra da Saudade Formation. Sanchez et al. (2021), after paleontological surveys around the Três Marias city, recognized one bed with the ichnogenera *Treptichnus pedum*, characteristic of being found since the Lower Cambrian (e.g., Buatois, 2018). All these data confirm that the sedimentation of the Três Marias Formation took place in the lower Cambrian period, and in an epoch of life expansion, geotectonic complexity in West Gondwana and during the last sighs of the Bambuí Basin.

5.3 Materials and methods

The work consisted of surveying 07 (seven) centimetric to decimetric scale stratigraphic sections (Fig. 6) in different areas of the Três Marias Formation in its type-area, in the vicinity of the Três Marias city, Minas Gerais state. We recorded the sedimentary attributes of the rock (e.g. sedimentary structures, granulometry, bed geometry, texture, mineralogical maturity, etc.), according to Tucker (2003). The outcrops were found mainly on the banks of rivers and waterfalls, as well as in road cuts near the city. The sections surveyed were named: “AXEN_A”, “Cascata das Virgens”, “Ribeirão do Boi”, “AXEN_B”, “Pedreira 3M” and “Cachoeira da Forquilha”, according to local toponyms. After field work the following steps were done: 1) identification of sedimentary facies; 2) grouping of correlated sedimentary facies into facies associations; 3) characterization and definition of depositional systems using previous studies and creating a table of facies distribution for a coastal environment; 4) correlation of columns and paleoenvironmental reconstruction using the concepts of Sequence Stratigraphy. These steps considered these main references: Davis and Fox. (1972a), Davis (1985), Swift and Nummedal (1987), Chiavegatto (1992); Embry and Johannessen (1992); Catuneanu et al. (2009); Plint (2010); Zecchin and Catuneanu (2013). In order to evaluate some sedimentary attributes, thin sections were analyzed through petrographic microscopes in the CPMTC/IGC laboratories.

5.4 Results

Among the ten (10) sedimentary facies identified (Table 1), arkose sandstones are the most common and some of the most frequent structures found in the sedimentary record studied are: wave-truncated lamination, low-angle cross-lamination, planar-parallel lamination, and hummocky cross-stratification (Fig. 7). The others proved to be more restricted, associated with these main ones, grading laterally or vertically. Mud-silt-sand heteroliths are also frequent and together with arkoses are the main lithotypes.

Table 1 – Lithofacies: macroscopic characterization.

Facies	Description
He	Intercalation of silt/clay with sand in different proportions, forming lenticular, wavy and flaser heterolithic structures. Decimetric to metric layers of tabular geometry. Sometimes show possible fossil traces in positive hyporelevation.
Sh	Very fine to fine sand, amalgamated decimetric to metric layers with thinning towards the sides, with a convex upper arrangement (better preserved) and concave lower arrangement, in some cases showing straight, little erosion, characterizing hummocky stratification.
Sr	Very fine to fine sand, centimetric to decimetric layers, with tabular external geometry and internal geometry showing truncated wave lamination with centimetric wavelength.
Ssr	Fine to medium sand, occurring in tabular geometry layers, eventually graduating to Sp and Sr facies. The undulating marks with a symmetrical profile have a longer wavelength than the Sr facies (decimetric).
Sp	Fine to medium sand, layers of tabular geometry and centimetric to decimetric thickness, with interdigitated siltstones, stacking to form planar-parallel stratification. It can gradate laterally to the Sl, Sar, Ssr facies and be associated with lenticular layers of conglomeratic sandstone with clay clasts and marked by heavy (opaque) minerals (Fig. 8).
Sl	Fine to medium sand, centimetric to decimetric layers, tabular to lobed external geometry, internally showing low-angle cross-stratification. Eventually graded to Sp facies.
Sm	Medium to coarse sand, massive centimetric to decimetric tabular layers. Occurs between the Sl and Sp facies.
Sar	Very fine to fine sand showing asymmetrical wavy marks, occurs in abrupt contact with the Fc facies, with centimeter thickness and lenticular geometry. Gradual contact with the Sp and Sl facies, reaching decimetric thicknesses and tabular geometry.
St	Thin lenticular-shaped layers of fine sand, with trough cross-stratification, intergrown with the Fc facies.
Fc	Coarse clayey silt, may show shrinkage cracks and interdigit with thin layers of the St and Sar facies. Arkosean composition. Presence of clay intraclasts, eventually folded.

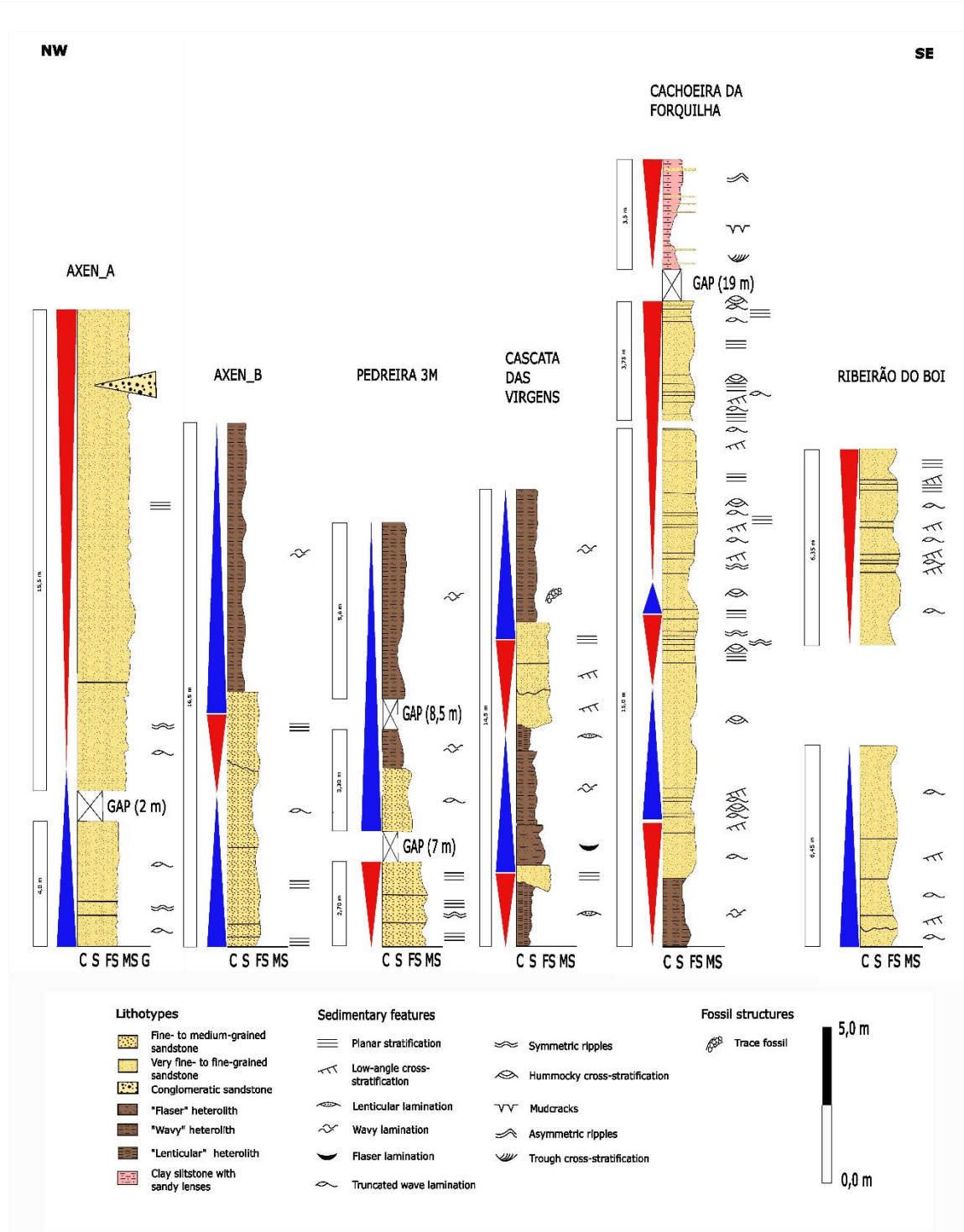


Figure 6 – Stratigraphic columns from the Três Marias Formation in its type-area.

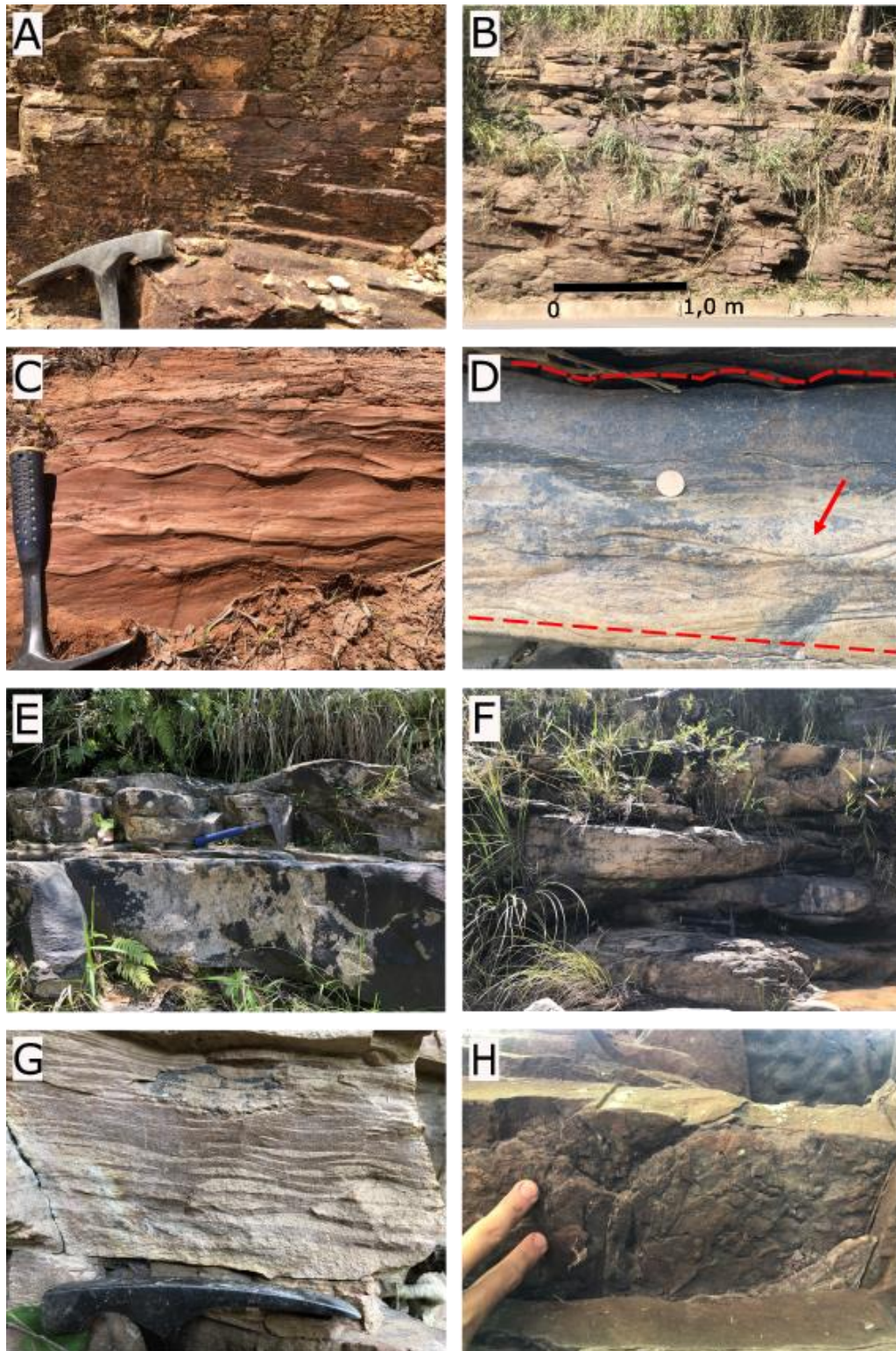


Figure 7 – Characteristic sedimentary features seen in outcrop. A) Sandstone with low-angle cross-stratification. B) Centimetric layers showing tabular geometry, with planar-parallel stratification in the upper portion. C) Sandstone with symmetrical wavy ripples and slight wave truncation. D) Sandstone layer with wave-truncated laminations (red arrow), with a straight base and an undulating top with a symmetrical profile (red lines). E) Sandstone with asymmetrical profile undulation. F) Lenticular layers of sandstone suggesting amalgamated hummocky cross-stratification. G) Heteroliths with flaser, wavy and lenticular lamination from bottom to top. H) Possible trace fossils found beneath heterolithic layers in positive hyporelief.

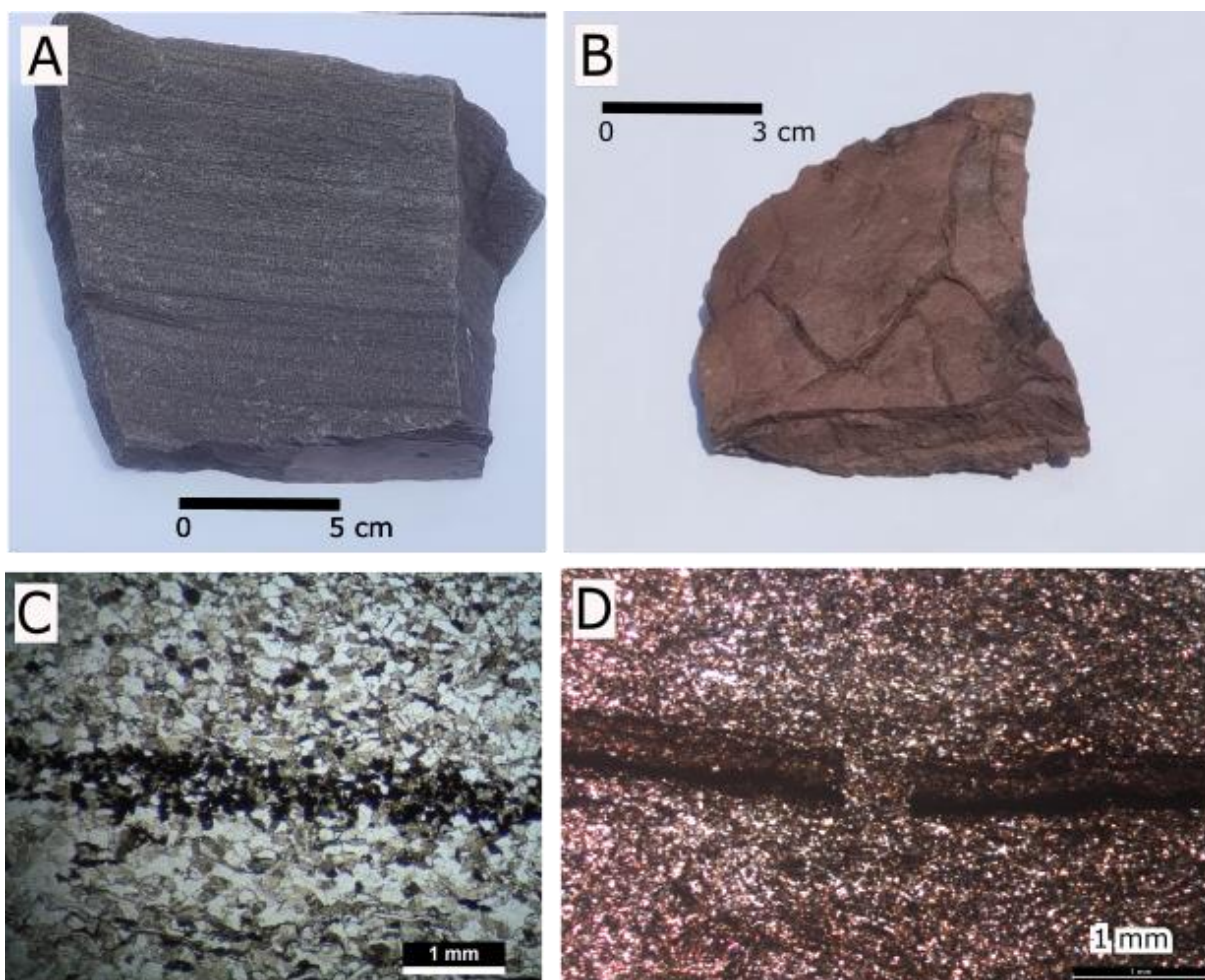


Figure 8 – A) Sandstone with planar-parallel lamination and low-angle cross stratification with laminations rich in opaque minerals (sample AF05). B) Violaceous clay siltstone with mudcracks (sample FCB). C) Lamination marked by opaque minerals seen under the microscope, parallel nichols. D) Mudcrack in a clayey laminae, crossed nichols.

5.5 Discussions

5.5.1 Facies associations

The ten sedimentary facies were grouped into five facies associations (FA1 to FA5). This study considered the method of reconstructing paleoenvironments using the definition of sedimentary facies and grouping them into facies associations (FAs), a tool used in several previous studies. It is worth noting that sedimentary structures can occur in different spatial positions according to grain size, sediment availability, platform slope, acting hydraulic parameters and the likelihood of them remaining in the sedimentary record (Fig. 9, Peters and Loss, 2012). The FAs are then described according to the sedimentary processes involved in the region's sedimentary record.

SEDIMENTARY ENVIRONMENTS SEDIMENTARY FEATURES (FACIES)	DELTAIC PLAIN	BEACH	UPPER SHOREFACE	MIDDLE SHOREFACE	LOWER SHOREFACE	OFFSHORE
MUDCRACKS (Fc)	██████████					
TROUGH CROSS-STRATIFICATION (St)	██████████	-----	██████████			
LOW-ANGLE CROSS-STRATIFICATION (Si)		██████████				
ASYMMETRIC RIPPLES (Sar)	████████████████████					
SYMMETRIC RIPPLES (Ssr)			████████████████			
PLANAR STRATIFICATION (Sp)		██████████	-----	████████████████		
TRUNCATED WAVES LAMINATION (Sr)			████████████████████			
HUMMOCKY CROSS-STRATIFICATION (Sh)					████████████████████	
HETEROLITHIC LAMINATION (He)						████████████████

Figure 9 – Distribution table of sedimentary facies according to subenvironments on a coastal shelf, according to Davis and Fox. (1972a), Davis (1985), Swift and Nummedal (1987), Plint (2010).

5.5.1.1 Deltaic plain deposits – FA1 (Fc, St, Sar)

Clayey siltstones such as facies Fc suggest deposition in a calm environment, where there is little traction, allowing ample settling of suspended silty-clay material. These facies have mudcracks in the clayier levels, which imply subaerial exposure. Thin sheets of sandstones were found with trough cross-stratification (St), formed by small 3D dunes, and asymmetrical ripples (Sar), the result of unidirectional traction,

suggesting a cyclicity between the deposition of fine material and traction in lower flow regime. A deltaic plain environment is suggested, with the Fc facies related to the river flood region and the St and Sar facies related to the river channel and lateral accretion bar (Bhattacharya, 2006).

5.5.1.2 Beach deposits – FA2 (Sl, Sp, Sm)

The presence of these facies suggests sedimentation due to the ebb and flow of waves, in a high-energy, oscillatory, turbulent flow regime in which the sandy sediment is deposited parallel to the coast, forming planar stratification. This deposits may present some inclination towards the sea, generating low-angle cross-stratification (Davis and Fox, 1972a), and it is a function of the granulometry of the sediments deposited (Plint, 2010). Associated with these facies are lenses of conglomeratic sandstone with clay clasts, which are possibly the result of the removal of fragments of clay material from FA1 by wave action, after a transgression. According to Roy (1999), during the formation of sandbars in the coastal region, there is a tendency for heavy minerals to accumulate, probably due to the action of storm waves which overturn the seabed in deeper regions and carry them to the beach area. The concentration of heavy minerals marking the lamination is a common feature of facies Sl and Sp and is a characteristic feature of the beach region (Davis, 1985, Plint, 2010).

5.5.1.3 Upper shoreface deposits – FA3 (Sar, Sr, Sp, Sl)

In this region, the processes are mainly controlled by marine currents, associated with fair-weather waves (Davis, 1985). The facies suggest deposition under a high-energy, oscillatory upper flow regime, but of lower intensity than the FA2 deposits. The facies that marks this environment are sandstones with asymmetrical ripple marks (Sar). When the oscillatory flow generated by the waves gets close enough to the seabed, it generates an elliptical pattern of strongly asymmetrical movement. This is formed by a small, strong component at the crest of the wave in the direction of the beach, and another large but weak component near the seabed in the direction of the sea. The latter acts as a current and is responsible for forming the asymmetrical wave marks (Niedoroda & Swift, 1981; Clifton, 2006). Truncated wave lamination can be generated when the oscillatory flow of the waves combines with unidirectional return currents of low intensity at the low tide line, the base of the upper shoreface (Plint, 2010). Truncated wave laminations are the product of combined flows

and may be the product of distal storm waves forming small scale hummocky-like structures (e.g.: Tinterri, 2011)

5.5.1.4 Middle shoreface deposits – FA4 (Ssr, Sp, Sr, Sh)

These facies are initially associated with a medium-energy, oscillatory upper flow regime. The symmetric ripples mark the sedimentation above the fair-weather wave level, in a region where the oscillatory flow causes the sediment to move back and forth on the seabed, forming a symmetrical pattern (Dalrymple & Choi, 2007). Because the symmetrical ripples of Ssr have rounded crests, they suggest a high-energy flow (Nichols, 2009), possibly associated with storms in this case.

Below the level of fair-weather waves, truncated wave laminations are the result of the interaction of flows (oscillatory and unidirectional), but associated with storms, producing structures of greater size and expression due to the greater magnitude of the oscillatory flows (Davis, 1985). In addition, sandstones with planar-parallel stratification can be generated by combined flows, with the unidirectional component being a small fraction of the oscillatory component (Arnott and Southard, 1990), but when both are strong as possible, suggesting deposition near the peak of the storm (Cheel, 1991). This occurs in the region above the erosional level of the storm waves, the transition from the middle to the lower shoreface, according to Plint (2010). Down on the shelf, close to the lower foreshore, combined high-energy flows with a dominant oscillatory component, generate hummocky cross-stratification during storm events (Dott and Bourgeois, 1982; Swift et al., 1983, 1987; Duke, 1985, Duke et al., 1991; Cheel and Leckie, 1993). This appears as concave layers forming a domed appearance truncating each other (Dumas et al., 2005).

5.5.1.5 Lower shoreface deposits – FA5 (Sr, He)

Truncated wave lamination can also be recognized in the transition to the lower shoreface, formed by storm events, in very fine to fine-grained sediments (Plint, 2010). The presence of heteroliths, with flaser, wavy and lenticular laminations (more sandy, intermediate and more clayey, respectively), possibly indicates deposition in the lower region of the lower shoreface, in the transition to offshore, with an alternation between settling, directly associated with calm periods after storms (background sedimentation), and the incursion of sandy sediments with wave reworking, associated with storm activity. This facies may present ichnofossils in positive hyporelief. Although

they have not yet been identified, they could be the same as those observed by Sanchez et al. (2021) and identified as *Treptichnus pedum*, which occur from tide-dominated coastal areas to the lower-shoreface/offshore transition (Buatois, 2018). However, a correct ichnotaxonomic classification is still necessary before any further interpretation.

5.5.2 Paleoenvironmental evolution of the Três Marias Formation in its type area

The blue and red triangles right next to the column in Fig. 10 represent the transgressive-regressive (T-R) cycles (Embry and Johannessen 1992), which were separated by relating a set of structures to a specific sub-environment, delimited by maximum regressive surfaces (MRS). For example, where the FA1, FA2 and FA3 facies associations were interpreted (massive sandstone, sandstone with planar-parallel stratification, sandstone with low-angle cross-stratification, etc.), characteristic of shallower portions, the reasoning of more proximal facies was induced, being the FA1 the most continental facies and the FA3 further in the sea. On the other hand, where the FA4 and FA5 facies associations were delimited, they were interpreted as being sedimentation in more distal portions, in this case, the FA4 are the shallower of them, and FA5 represents the deepest part of the proximal coast environment.

The survey carried out covers approximately one hundred meters of the Três Marias Formation, suggesting the paleoenvironmental evolution of the basin during the Cambrian. The first cycle (Fig. 10) is interpreted as a general moment of regression, part of a greater and incomplete T-R cycle. It shows sandstone facies with truncated wave lamination and symmetric ripples, which may be products of distal storms, overlain by more coastal facies influenced by fair-weather waves and traction currents. The second cycle is a complete T-R cycle and begins with a transgression to heterolithic facies and a regression back to beach facies passing through storm facies. This second cycle has a shallowing-coarsening upward pattern, since there is a progressive regression from the heteroliths and a granulometric increase in the facies. The third T-R cycle also shows the shallowing-coarsening upward pattern, similar to the second, but with less thick heteroliths (FA5, lower foreshore) and thicker storm and beach deposits (FA4, FA3, FA2). Finally, the fourth T-R cycle shows a new transgression to heteroliths and strong regression for transitional deltaic plain deposits (FA1), without having recorded storm or beach deposits.

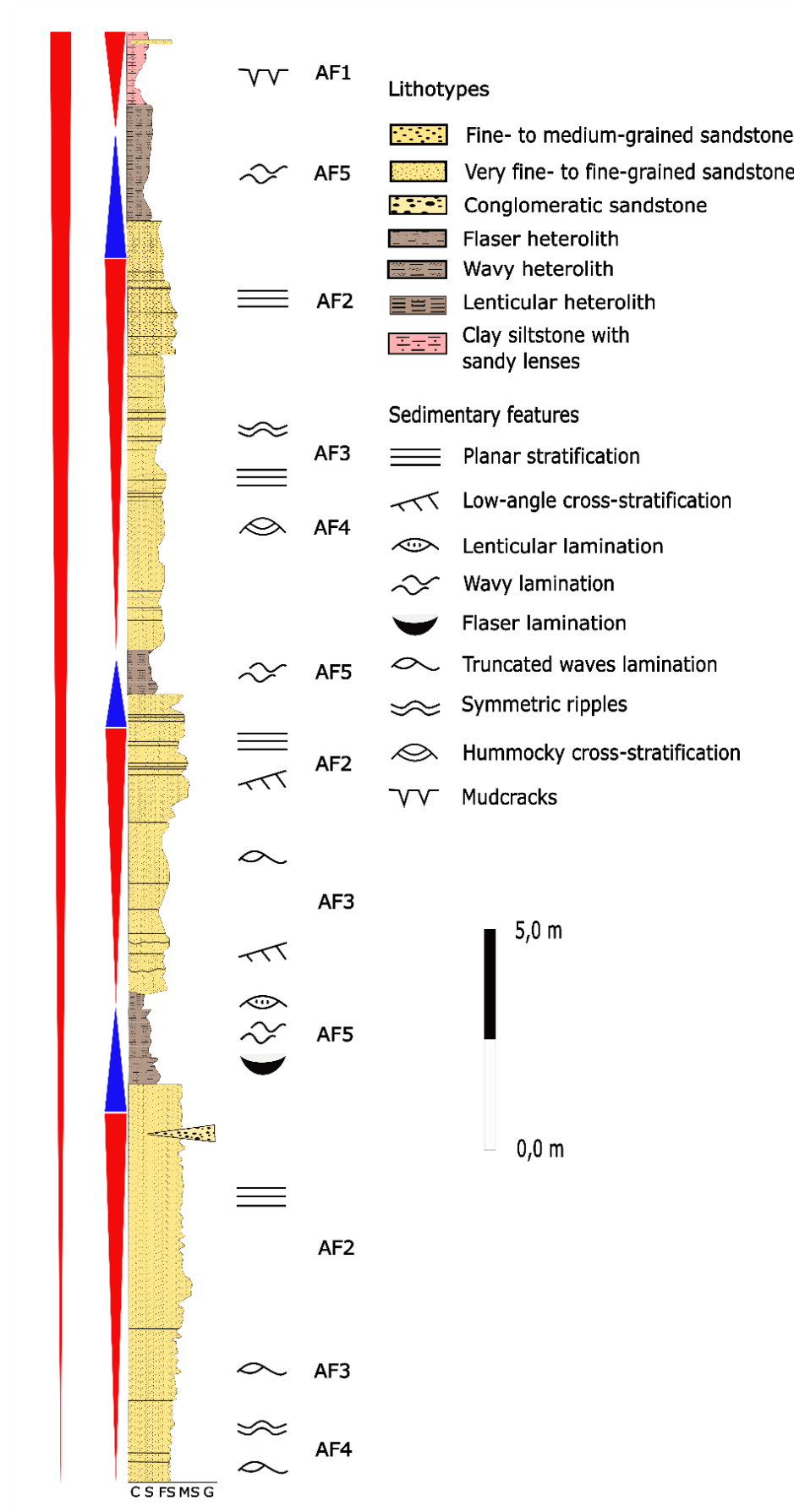


Figure 10 – Idealized stratigraphic column for the Três Marias Formation in its type-area.

The absence of FA4, FA3 and FA2 in the last cycle may be due to exposure of the platform and erosion of these intervals before the deposition of FA1. This hypothesis suggests a moment of base level fall, forced regression, erosion of newly deposited sediments, formation of erosive surfaces and filling in of these surfaces during a new rise in base level and normal regression, and is marked by the presence of mudcracks in a clayey siltstone, result of a subaerial exposure and recognized as maximum regressive surface (MRS), a record of the sea level change and its processes. This last cycle, combined with the other three below, clearly denote the generalized regressive trend of the Três Marias Formation in its type area. Evaluating this information, it is possible to infer that the Bambuí basin, at its end, experienced high-frequency eustatic variations, initially alternating between the lower foreshore and the beach with moments of greater or lesser influence of storm waves. From the second T-R interval and on, the cycles begin with distal heteroliths, evolve into erosion-based storm deposits with eventual lenticular geometry characterizing near-shore storm-surge sandbars (Tanner, 1995), and culminate in coastal facies dominated by fair-weather waves. This is characteristic of the Três Marias Formation in its type-area and make up a fundamental regressive stacking-pattern for the unit, represented by the big red triangle. Finally, there is a strong regressive trend with sea level fall, probably erosion of the platform and deposition of transitional facies at the top.

The paleocurrent data obtained by Chiavegatto (1992) from sandstones of the Três Marias Formation, which show a flow of sediments from NW to SE coming from the Southern Brasília Belt, and the ages that Pimentel *et al.* (2011) establish for the Southern Brasília Belt are important data for building stratigraphic reasoning in the region. During the formation of this orogenic belt, through a process of isostatic compensation, flexural subsidence occurs, generating the foreland basin. The formation of the basin is closely linked to the generation of accommodation space, which develops while the processes linked to orogeny are prevailing over erosion, and the crust is still seeking equilibrium. After reaching this condition, the space for sediments in the basin tends to decrease, with the progressive denudation of the orogen and consequent discharge of eroded material into the basin, a regressive pattern is promoted, with marine facies giving way to transitional facies and, eventually, continental facies.

The same regressive stratigraphic pattern is seen in the Três Marias Formation in its type area, as shown here. However, Tavares et al. (2020) showed that the Três Marias Formation at the eastern boundary of the basin (and thus far from the Southern Brasília Belt) has a reverse stratigraphic organization, with fluvial deposits overlain by marine sandstones. This contrasting stratigraphy from west to east in the upper units of the Bambuí Basin has already been documented more broadly by Uhlein et al. (2017), but is now described and attested for the first time for the western and eastern Três Marias Formation. A possible explanation for it is the reciprocal flexural behavior of foreland basins during orogenic loading and unloading (Catuneanu et al., 1988; Uhlein et al., 2017). The Cambrian age of the Três Marias Formation and the orogenic ages of the Southern Brasília Belt and Araçuaí Belt suggest a time window of orogenic unloading, foredeep regression (Três Marias type-area; this paper) and forebulge transgression (eastern Três Marias Formation; Tavares et al., 2020).

The data collected allowed to infer that the Três Marias Formation in its type area represents an ancient epicontinental sea, which had considerable extensions given its scope in the region. The Cambrian is an important period in Earth's history in which complex life expanded, initially in marine environments. Despite this, in the rocks studied, the record of complex life is scarce to absent, suggesting the questioning of biochemical conditions in the “Três Marias Sea”. The paleogeographic position of the basin, surrounded by orogenic belts, the epicontinental configuration of the basin, limiting the availability of oxygen and nutrients, among other arguments, may help to explain why the conditions in this basin were unsuitable for life. Other research tools are needed to better understand this topic, and its development in other works is fundamental to understanding the origin and evolution of life.

The sedimentary facies found around the town of Três Marias suggest transport and sedimentation linked to a shallow, gently sloping platform, dominated by storm waves, with the presence of deltaic plain to lower shoreface processes.

5.6 Conclusions

The stratigraphic survey, facies definition and the interpretation of facies association suggest a shallow platform environment, formed by cyclic tempestitic sequences. The storm events caused sedimentation in different orders of magnitude, with decimetric to metric cycles of high eustatic frequency.

Ten lithofacies and five facies associations were identified, which characterize different environments in the platform system. The deltaic plain (FA1) is mainly represented by reddish clayey siltstone, with occasional intervals containing mudcracks and interdigitation with thin layers containing small-scale cross stratification and current ripple. The beach to shoreface facies (FA2 to FA5) denote genesis under the action of moderate to high energy flows, with evidence of storm activity. The packages studied show great variability in the internal structure and thickness of the lithofacies. Relative sea level variations controlled the development of the cycles and their assemblages, and these variations were largely influenced by episodic climatic events of varying intensity, with hummocky cross-stratification as the main evidence. According to the data, the configuration of the platform was probably an epicontinental sea with a delta whose river had little influence on the control of sedimentation, associated with a shallow and sandy platform dominated by storm waves. Overall, the Três Marias Formation close to the Três Marias city shows a clearly regressive pattern, with marine environments dominated by fair-weather and storm waves below transitional deltaic plain environment.

The work contributed to the discussion on the paleoenvironment of the Bambuí basin at the beginning of the Cambrian, an important period in the history of the Earth, notable for the expansion of complex life. The type area of the Três Marias Formation records sedimentary systems that are in some degree different from those found in other sites where the unit outcrops, probably because of the contrasting influences that the surrounding orogenic belts exerted in the final stages of the basin.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O levantamento estratigráfico possibilita a reconstrução paleoambiental em uma bacia, levando em consideração a disposição das feições sedimentares. Ainda que haja discussão sobre os mecanismos específicos de formação das estruturas que compõem os depósitos tempestíticos, a ocorrência dessas em sobreposição e com gradação lateral, como observado no estudo de caso, permite inferir que na plataforma continental durante os últimos milhões de anos da bacia Bambuí havia a dominância dos processos de retrabalhamento costeiro por ondas, com ação de tempestades cíclicas. Foi possível inferir também que se tratava de uma plataforma rasa e arenosa, cuja área fonte dos sedimentos se encontrava à NW e de composição predominantemente de rochas ricas em quartzo e feldspato, como granitoides ou gnaisses, trazendo a ideia da denudação do orógeno Brasília como fator de preenchimento da bacia na região estudada.

O empilhamento estratigráfico realizado demonstrou claramente um padrão regressivo para a Formação Três Marias, com ciclos T-R que se superpõem e domínio gradual de fácies de lâmina d'água cada vez mais rasas. No topo, foram identificadas feições que são associadas a deposição fluvio-deltaica, indicando um momento de forte regressão na bacia naquela região. Esse registro regressivo carrega um significado geotectônico interessante e ainda muito discutido, sobre as influências das várias faixas orogênicas sobre a sedimentação do Grupo Bambuí. Entende-se que a interrupção na subsidência da bacia, causado pelo fim do soerguimento orogênico, e o constante aporte sedimentar vindo da denudação dessas cadeias de montanha, proporcionaram o progressivo assoreamento da bacia e o padrão progradacional visto na Formação Três Marias.

Nesse estudo realizado na Formação Três Marias, nota-se a quase ausência de registros fossilíferos, mesmo sendo de idade cambriana. Este fato leva a discussão sobre as condições biogeoquímicas da Bacia Bambuí durante sua deposição. Conclui-se que, por não apresentar registros expressivos de fósseis de vida complexa, essa bacia possivelmente apresentava condições que, ou impediram o desenvolvimento da vida complexa, ou impediram seu registro nas rochas.

REFERÊNCIAS

- ALKMIM, Fernando Flecha; MARTINS-NETO, Marcelo A. A bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos. *A Bacia do São Francisco geologia e recursos naturais*. **SBG**, Belo Horizonte, p. 9-30, 2001.
- ALKMIM, Fernando F.; MARSHAK, Stephen; FONSECA, Marco A. Assembling West Gondwana in the Neoproterozoic: clues from the São Francisco craton region, Brazil. **Geology**, v. 29, n. 4, p. 319-322, 2001.
- ALKMIM, Fernando F.; MARTINS-NETO, Marcelo A. Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco craton, eastern Brazil. **Marine and Petroleum Geology**, v. 33, n. 1, p. 127-139, 2012.
- ALVARENGA, Carlos JS et al. Meso-Neoproterozoic isotope stratigraphy on carbonates platforms in the Brasília Belt of Brazil. **Precambrian Research**, v. 251, p. 164-180, 2014.
- ALVARENGA, Carlos JS et al. Meso-Neoproterozoic isotope stratigraphy on carbonates platforms in the Brasília Belt of Brazil. **Precambrian Research**, v. 251, p. 164-180, 2014.
- BHATTACHARYA, J.P., 2006. Deltas. In: POSAMENTIER, H.W., WALKER, R.G. (Eds.), **Facies Models Revised**. SEPM Special Publication, vol. 84. pp. 237–292 (ISBN 1-56576- 121- 9).
- BABINSKI, Marly; VIEIRA, Lucieth Cruz; TRINDADE, Ricardo IF. Direct dating of the Sete Lagoas cap carbonate (Bambuí Group, Brazil) and implications for the Neoproterozoic glacial events. **Terra Nova**, v. 19, n. 6, p. 401-406, 2007.
- BRANCO J. J. R. 1957. Conglomerado do Samburá - MG. **Na. Acad. Bras. Ciências.**, 25:295-302.
- BROWN JR, L. F.; FISHER, W. L. Seismic-stratigraphic interpretation of depositional systems: examples from brazilian rift and pull-apart basins: section 2. Application of seismic reflection configuration to stratigraphic interpretation. 1977.
- BUATOIS, Luis A. Treptichnus pedom and the Ediacaran–Cambrian boundary: significance and caveats. **Geological Magazine**, v. 155, n. 1, p. 174-180, 2018.
- CASTRO, P. T. A. Os conglomerados associados ao Grupo Bambuí na porção sudoeste do Cráton do São Francisco: sedimentologia, estratigrafia e implicações tectônicas. **Universidade de Brasília, Tese de Doutorado, 255p. www. igc. ufmg. br/geonomos**, 1997.
- CASTRO, Paulo de Tarso Amorim; DARDENNE, Marcel Auguste. The sedimentology, stratigraphy and tectonic context of the São Francisco Supergroup at the southwest boundary of the São Francisco Craton, Brazil. 2000.

CATUNEANU; HANCOX; RUBIDGE. Reciprocal flexural behaviour and contrasting stratigraphies: a new basin development model for the Karoo retroarc foreland system, South Africa. *Basin research*, v. 10, n. 4, p. 417-439, 2002.

CATUNEANU, Octavian et al. Towards the standardization of sequence stratigraphy. **Earth-Science Reviews**, v. 92, n. 1-2, p. 1-33, 2009.

CAXITO, Fabrício A. et al. Multiproxy geochemical and isotope stratigraphy records of a Neoproterozoic Oxygenation Event in the Ediacaran Sete Lagoas cap carbonate, Bambuí Group, Brazil. **Chemical Geology**, v. 481, p. 119-132, 2018.

CAXITO, Fabricio et al. Goldilocks at the dawn of complex life: mountains might have damaged Ediacaran–Cambrian ecosystems and prompted an early Cambrian greenhouse world. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 20010, 2021.

CHANG, H. Kiang et al. Considerações sobre a evolução tectônica da Bacia do São Francisco. In: **Congresso Brasileiro de Geologia**. 1988. p. 2076-2090.

CHEEL, Richard James. Grain fabric in hummocky cross-stratified storm beds; genetic implications. **Journal of Sedimentary Research**, v. 61, n. 1, p. 102-110, 1991.

CHEEL, Richard J. et al. Hummocky cross-stratification. **Sedimentology review**, v. 1, n. 1, p. 103-122, 1993.

CHIAVEGATTO J. R. S. 1992. Análise estratigráfica das sequências tempestíficas da Formação Três Marias (Proterozóico Superior), na porção meridional da Bacia do São Francisco. MSc Thesis Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 216p.

CHIAVEGATTO, José Roberto S.; GOMES, Newton Souza; DARDENNE, Marcel Auguste. Conglomerados Oligomíticos da Formação Três Marias na Serra do Gurutuba, Norte de Minas Gerais. **Simpósio de Geologia de Minas Gerais**, v. 9, p. 83-84, 1997.

CHIAVEGATTO, J. R. S.; DARDENNE, M. A. Contribuição à sedimentologia e estratigrafia do Grupo Bambuí no norte de Minas Gerais. **Simpósio de Geologia de Minas Gerais**, v. 9, p. 81-82, 1997.

CHIAVEGATTO, J. R. S. et al. Estratigrafia do Grupo Bambuí nas regiões do Norte de Minas Gerais: Uma nova unidade estratigráfica em um contexto de inversão de bacia. In: **SBG, Simpósio de Geologia de Minas Gerais**. Ouro Preto Anais, 2003. p. 24.

CLIFTON, H. Edward. A reexamination of facies models for clastic shorelines. 2006. Costa M. T., Branco J. J. R. 1961. Roteiro de excursão Belo Horizonte-Brasília. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 15, Florianópolis, Anais, 9-25.

COSTA, R. D. et al. Mapa Geológico folha Três Marias—SE. 2011.

READING, Harold G. (Ed.). **Sedimentary environments: processes, facies and stratigraphy**. John Wiley & Sons, 2009.

CUI, Huan et al. Global or regional? Constraining the origins of the middle Bambuí carbon cycle anomaly in Brazil. **Precambrian Research**, v. 348, p. 105861, 2020.

DALRYMPLE, Robert W.; CHOI, Kyungsik. Morphologic and facies trends through the fluvial–marine transition in tide-dominated depositional systems: a schematic framework for environmental and sequence-stratigraphic interpretation. **Earth-Science Reviews**, v. 81, n. 3-4, p. 135-174, 2007.

DANTAS, Marcio Vinicius Santana et al. Carbonate storm deposits and C, O isotopes of the Lagoa do Jacaré Formation (Ediacaran) in the Paraopeba area, Bambuí Group, Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 52, n. 01, p. e20200135, 2022.

DARDENNE, Marcel Auguste. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: **Congresso Brasileiro de Geologia**. 1978. p. 597-610.

DARDENNE, Marcel Auguste. Os grupos Paranoá e Bambuí na faixa dobrada Brasília. **Simpósio sobre o Cráton São Francisco e suas faixas marginais**, v. 1, p. 140-157, 1981.

DAVIS JR, Richard A.; POX, William T. Four-dimensional model for beach and inner nearshore sedimentation. **The Journal of Geology**, v. 80, n. 4, p. 484-493, 1972

DAVIS JR, Richard A.; HAYES, Miles O. What is a wave-dominated coast?. In: **Developments in sedimentology**. Elsevier, 1984. p. 313-329.

DAVIS JR, Richard A. Beach and nearshore zone. In: **Coastal sedimentary environments**. New York, NY: Springer New York, 1985. p. 379-444.

DOTT JR, R. H.; BOURGEOIS, Joanne. Hummocky stratification: significance of its variable bedding sequences. **Geological Society of America Bulletin**, v. 93, n. 8, p. 663-680, 1982.

DUKE, William L. Hummocky cross-stratification, tropical hurricanes, and intense winter storms. **Sedimentology**, v. 32, n. 2, p. 167-194, 1985.

Duke, W. L.; Arnott, R. W. C.; Cheel, Richard J. 1991. Shelf sandstones and hummocky cross-stratification: new insights on a stormy debate. **Geology**, 19, n. 6, p. 625-628.

DUMAS, Simone; ARNOTT, R. W. C.; SOUTHARD, John B. Experiments on oscillatory-flow and combined-flow bed forms: implications for interpreting parts of the shallow-marine sedimentary record. **Journal of Sedimentary research**, v. 75, n. 3, p. 501-513, 2005.

DOS SANTOS DUTRA, Alessandra de Cássia; DE SOUSA GORAYEB, Paulo Sergio; NOGUEIRA, Afonso César Rodrigues. Depósitos sedimentares neoproterozoicos do Grupo Tucuruí-Cinturão Araguaia, Nordeste do Pará. **Geologia USP. Série Científica**, v. 14, n. 1, p. 21-36, 2014.

FRAGOSO, Daniel Galvão Carnier et al. Cyclicity in Earth sciences, quo vadis? Essay on cycle concepts in geological thinking and their historical influence on stratigraphic practices. **History of Geo-and Space Sciences**, v. 13, n. 1, p. 39-69, 2022.

GALLOWAY, William E. et al. Terrigenous shelf systems. Terrigenous Clastic Depositional Systems: **Applications to Fossil Fuel and Groundwater Resources**, p. 159-185, 1996.

GUIMARÃES, E. M. Estudos de proveniência e diagênese com ênfase na caracterização dos filossilicatos dos Grupos Paranoá e Bambuí, na região de Bezerra-Cabeceiras (GO). **Brasília-DF (Doctoral thesis, Instituto de Geociências da Universidade de Brasília)**, 1997.

GOMES, N. S. Contribuição à petrologia à diagênese dos arenitos da Formação Três Marias, Bacia do São Francisco, MG. In: **SBG, Congresso Brasileiro de Geologia**. 1988. p. 961-974.

HAMBLIN, Anthony P.; WALKER, Roger G. Storm-dominated shallow marine deposits: the Fernie–Kootenay (Jurassic) transition, southern Rocky Mountains. **Canadian Journal of Earth Sciences**, v. 16, n. 9, p. 1673-1690, 1979.

HIPPERTT, J. P. et al. The fate of a Neoproterozoic intracratonic marine basin: Trace elements, TOC and IRON speciation geochemistry of the Bambuí Basin, Brazil. **Precambrian Research**, v. 330, p. 101-120, 2019.

HOWELL, John A.; FLINT, Stephen S.; COE, A. L. The parasequences of the Book Cliffs succession. In: **The sedimentary record of sea-level change**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003. p. 158-178.

IGLESIAS, Mario et al. Estratigrafia do Grupo Bambuí e coberturas fanerozóicas no vale do rio São Francisco, norte de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 39, n. 2, p. 256-266, 2009.

KUCHENBECKER, Matheus et al. Age constraints for deposition and sedimentary provenance of Espinhaço Supergroup and Bambuí Group in eastern São Francisco Craton. **Geonomos**, 2015.

KUCHENBECKER, Matheus et al. A Formação Gorutuba: sedimentação litorânea a continental na margem leste da Bacia Bambuí (MG). **Geologia USP. Série Científica**, v. 16, n. 2, p. 67-81, 2016.

LIMA, Otávio Nunes Borges; UHLEIN, Alexandre; DE BRITTO, Walter. Estratigrafia do Grupo Bambuí na Serra da Saudade e geologia do depósito fosfático de Cedro do Abaeté, Minas Gerais. **Brazilian Journal of Geology**, v. 37, n. 4, p. 204-215, 2007.

MARTINS-NETO, M. A.; ALKMIM, F. F. Estratigrafia e evolução tectônica das bacias neoproterozóicas do paleocontinente São Francisco e suas margens: Registro da

quebra de Rodínia e colagem de Gondwana. **Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais, SBG/Núcleo MG**, p. 31-54, 2001.

MITCHUM JR, R. M.; VAIL, Peter R.; THOMPSON III, Samuel. Seismic stratigraphy and global changes of sea level: Part 2. The depositional sequence as a basic unit for stratigraphic analysis: Section 2. Application of seismic reflection configuration to stratigraphic interpretation. 1977.

MOREIRA, Débora Silvano et al. A Cambrian age for the upper Bambuí Group, Brazil, supported by the first U-Pb dating of volcaniclastic bed. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 99, p. 102503, 2020.

MOURA, Samuel Amaral et al. High-resolution stratigraphy of peritidal microbial carbonates from the Lagoa do Jacaré Formation, Bambuí Group, north of Minas Gerais state, Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 52, n. 02, p. e20210040, 2022.

NICHOLS, C. S.; FOSTER, D. L. Observations of bed form evolution with field-scale oscillatory hydrodynamic forcing. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 114, n. C8, 2009.

NIEDORODA, Alan W.; SWIFT, Donald JP. Maintenance of the shoreface by wave orbital currents and mean flow: observations from the Long Island coast. **Geophysical Research Letters**, v. 8, n. 4, p. 337-340, 1981.

LOPES, Jane Nobre. Faciologia e gênese dos carbonatos do Grupo Bambuí na região de Arcos, Estado de Minas Gerais. 1995. Tese de Doutorado.

LOPES, Jane Nobre. Diagenesis of the dolomites hosting Zn/Ag mineral deposits in the Bambui Group at Januaria Region-MG. 2002. Tese de Doutorado. [sn].

NYBERG, Björn; HOWELL, John A. Global distribution of modern shallow marine shorelines. Implications for exploration and reservoir analogue studies. **Marine and Petroleum Geology**, v. 71, p. 83-104, 2016.

PAULA-SANTOS, Gustavo Macedo et al. 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**, v. 28, n. 2, p. 702-720, 2015.

PAULA-SANTOS, Gustavo M. et al. Tracking connection and restriction of West Gondwana São Francisco Basin through isotope chemostratigraphy. **Gondwana Research**, v. 42, p. 280-305, 2017.

PAULA-SANTOS, Gustavo Macedo et al. Rare earth elements of carbonate rocks from the Bambuí Group, southern São Francisco Basin, Brazil, and their significance as paleoenvironmental proxies. **Precambrian Research**, v. 305, p. 327-340, 2018.

PENG, Shanchi et al. Global standard stratotype-section and point (GSSP) for the base of the Jiangshanian Stage (Cambrian: Furongian) at Duibian, Jiangshan, Zhejiang, southeast China. **Episodes Journal of International Geoscience**, v. 35,

n. 4, p. 462-477, 2012. Jiangshanian Stage (Cambrian: Furongian) at Duibian, Jiangshan, Zhejiang, southeast China. *Episodes Journal of International Geoscience*, 35(4), 462-477.

PETERS, Shanan E.; LOSS, Dylan P. Storm and fair-weather wave base: A relevant distinction?. **Geology**, v. 40, n. 6, p. 511-514, 2012.

PIMENTEL, Márcio M. et al. 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**, v. 31, n. 4, p. 345-357, 2011.

PLINT, A. Guy; JAMES, N. P.; DALRYMPLE, R. W. Wave-and storm-dominated shoreline and shallow-marine systems. **Facies models**, v. 4, n. 167-201, 2010.

REIS, Humberto LS; SUSS, João F. Mixed carbonate–siliciclastic sedimentation in forebulge grabens: An example from the Ediacaran Bambuí Group, São Francisco Basin, Brazil. **Sedimentary Geology**, v. 339, p. 83-103, 2016.

REIS, Humberto LS et al. **The São Francisco Basin. São Francisco Craton, Eastern Brazil: tectonic genealogy of a miniature continent**, p. 117-143, 2017.

ROSSI A. V. A, BRESAN S. M., TAVARES T. D., DANDEFER A. 2017. Estratigrafia e geocronologia da sucessão sedimentar da serra do Gorutuba, norte de Minas Gerais: implicações para a proveniência e ambiente tectônico. In: **Simpósio de Geologia do Sudeste**, 15, Anais.

ROSSI, Ariadne VA et al. Stratigraphic, isotopic, and geochronological record of a superposed pro-foreland basin in the eastern São Francisco craton during west Gondwana amalgamation. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 97, p. 102406, 2020.

ROY, Peter S. Heavy mineral beach placers in southeastern Australia; their nature and genesis. **Economic Geology**, v. 94, n. 4, p. 567-588, 1999.

SANCHEZ, Evelyn AM; UHLEIN, Alexandre; FAIRCHILD, Thomas R. Treptichnus pedum in the Três Marias Formation, south-central Brazil, and its implications for the Ediacaran-Cambrian transition in South America. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 105, p. 102983, 2021.

SEER, Hildor José; DE MORAES, Lúcia Castanheira; FOGAÇA, Antônio Celso Campolim. **Roteiro geológico para a região de Lagoa Formosa-Chumbo-Carmo do Parabaíba-MG**. SBG-Núcleo Minas Gerais, 1989.

SLOSS, L. L. INTEGRATED FACIES ANALYSIS¹ BY LL SLOSS, WC KRUMBEIN, AND EC DAPPLES². In: **Sedimentary facies in geologic history: Conference at meeting of the Geological Society of America held in New York, New York, November 11, 1948**. Geological Society of America, 1949. p. 91.

SWIFT, Donald JP et al. Hummocky cross-stratification and megaripples; a geological double standard?. **Journal of Sedimentary Research**, v. 53, n. 4, p. 1295-1317, 1983.

SWIFT, Donald JP; NUMMEDAL, Dag. Hummocky cross-stratification, tropical hurricanes and intense winter storms. **Sedimentology**, v. 34, n. 2, p. 338-344, 1987.

TANNER, William F. Origin of beach ridges and swales. **Marine Geology**, v. 129, n. 1-2, p. 149-161, 1995.

TAVARES, Túlio Delôgo et al. Detrital zircons from the Upper Três Marias Formation, São Francisco basin, SE Brazil: record of foreland deposition during the Cambrian?. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 97, p. 102395, 2020.

TINTERRI, ROBERTO et al. Combined flow sedimentary structures and the genetic link between sigmoidal-and hummocky-cross stratification. **GeoActa**, v. 10, n. 4, p. 1-43, 2011.

TUCKER, Maurice E. **Sedimentary rocks in the field**. John Wiley & Sons, 2003.

UHLEIN, Alexandre. **Transição cráton-faixa dobrada: exemplo do Cráton do São Francisco e da Faixa Araçuaí (ciclo brasileiro) no estado de Minas Gerais: aspectos estratigráficos e estruturais**. 1991. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

UHLEIN, A. et al. Estratigrafia e evolução geológica do Grupo Bambuí, Minas Gerais (Roteiro Geológico). **SBG, Congr. Bras. Geol**, v. 42, 2004.

UHLEIN, A. et al. Chapter 51 The glaciogenic Jequitai Formation, southeastern Brazil. **Geological Society, London, Memoirs**, v. 36, n. 1, p. 541-546, 2011.

UHLEIN, Alexandre et al. A Formação Lagoa Formosa, Grupo Bambuí (MG): sistema deposicional de leque submarino em bacia de ante-país. **Geonomos**, 2011.

UHLEIN, Gabriel J. et al. The Carrancas Formation, Bambuí Group: a record of pre-Marinoan sedimentation on the southern São Francisco craton, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 71, p. 1-16, 2016.

UHLEIN, Gabriel J. et al. Early to late Ediacaran conglomeratic wedges from a complete foreland basin cycle in the southwest São Francisco Craton, Bambuí Group, Brazil. **Precambrian Research**, v. 299, p. 101-116, 2017.

UHLEIN, Gabriel J. et al. Ediacaran paleoenvironmental changes recorded in the mixed carbonate-siliciclastic Bambuí Basin, Brazil. **Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology**, v. 517, p. 39-51, 2019.

UHLEIN, Gabriel J. et al. Microbially induced chromium isotope fractionation and trace elements behavior in lower Cambrian microbialites from the Jaíba Member, Bambuí Basin, Brazil. **Geobiology**, v. 19, n. 2, p. 125-146, 2021.

VAIL, Peter R. Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy: Part 1: Seismic stratigraphy interpretation procedure. 1987.

VAN WAGONER, John C. et al. An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions. 1988.

VAN WAGONER, John C. et al. Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops: concepts for high-resolution correlation of time and facies. 1990.

VIEIRA, Lucieth C. et al. Aragonite crystal fans in Neoproterozoic cap carbonates: a case study from Brazil and implications for the post–snowball earth coastal environment. **Journal of Sedimentary Research**, v. 85, n. 3, p. 285-300, 2015.

WALKER, R. G. Shelf and shallow marine sands. **Facies models**, p. 141-169, 1984.

WARREN, Lucas V. et al. The puzzle assembled: Ediacaran guide fossil Cloudina reveals an old proto-Gondwana seaway. **Geology**, v. 42, n. 5, p. 391-394, 2014.