



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**A PLATAFORMA CARBONÁTICA DE ALTA ENERGIA DA FORMAÇÃO
LAGOA DO JACARÉ (GRUPO BAMBUÍ) NA REGIÃO DE BRASÍLIA DE
MINAS, MG: ARQUITETURA SEDIMENTAR, FEIÇÕES PÓS-
DEPOSICIONAIS E POTENCIAL RELAÇÃO COM SISTEMAS
PETROLÍFERO E CÁRSTICO LOCAIS**

Pedro Victor Ferreira Neves

MONOGRAFIA nº 382

Ouro Preto, dezembro de 2020

A PLATAFORMA CARBONÁTICA DE ALTA ENERGIA DA FORMAÇÃO
LAGOA DO JACARÉ (GRUPO BAMBUÍ) NA REGIÃO DE BRASÍLIA DE
MINAS, MG: ARQUITETURA SEDIMENTAR, FEIÇÕES PÓS-
DEPOSICIONAIS E POTENCIAL RELAÇÃO COM SISTEMAS
PETROLÍFERO E CÁRSTICO LOCAIS



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof.^a Dr.^a Cláudia Aparecida Marlière de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitora de Graduação

Prof.^a Dr.^a Tânia Rossi Garbin

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. Dr. Issamu Endo

Vice-Diretor

Prof. Dr. Hernani Mota Lima

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Prof. Msc. Edison Tazava

MONOGRAFIA

Nº 382

A PLATAFORMA CARBONÁTICA DE ALTA ENERGIA DA FORMAÇÃO LAGOA DO JACARÉ (GRUPO BAMBUÍ) NA REGIÃO DE BRASÍLIA DE MINAS, MG: ARQUITETURA SEDIMENTAR, FEIÇÕES PÓS-DEPOSICIONAIS E POTENCIAL RELAÇÃO COM SISTEMAS PETROLÍFERO E CÁRSTICO LOCAIS

Pedro Victor Ferreira Neves

Orientador

Prof. Dr. Humberto Luís Siqueira Reis

Co-Orientador

Msc. Lúcio Anderson Martins

Msc. Tulio Delogo Tavares

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2020/2.

OURO PRETO

2020

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

N513a Neves, Pedro Victor Ferreira.

A plataforma carbonática de alta energia da formação Lagoa do Jacaré (Grupo Bambuí) na região de Brasília de Minas, MG [manuscrito]: arquitetura sedimentar, feições pós-deposicionais e relação com sistemas petrolífero e hidrogeológico locais. / Pedro Victor Ferreira Neves. - 2020.

96 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Humberto Luis Siqueira Reis.

Coorientadores: Me. Lucio Anderson Martins, Dr. Túlio Delôgo Tavares.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Sedimentologia. 2. Paleontologia - Ediacarano. 3. Paleontologia - Cambriano. 4. São Francisco, Rio, Bacia. 5. Hidrologia - Águas subsuperficiais. I. Martins, Lucio Anderson. II. Reis, Humberto Luis Siqueira. III. Tavares, Túlio Delôgo. IV. Universidade Federal de Ouro Preto. V. Título.

CDU 551.3.051

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526

Ficha de Aprovação

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO: A plataforma carbonática de alta energia da Formação Lagoa do Jacaré (Grupo Bambuí) na região de Brasília de Minas, MG: arquitetura sedimentar, feições pós-deposicionais e potencial relação com sistemas petrolífero e cárstico locais

AUTOR: PEDRO VICTOR FERREIRA NEVES

ORIENTADOR: Humberto Luis Siqueira Reis

COORIENTADORES: Lúcio Anderson Martins e Tulio Delogo Tavares

Aprovada em: 18 de dezembro de 2021

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Humberto Luis Siqueira Reis



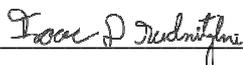
DEGEO/UFOP

Profa. Dra. Alice Fernanda de Oliveira Costa



DEGEO/UFOP

Prof. Dr. Isaac Daniel Rudnitzki



DEGEO/UFOP

Msc. Dora Atman



HIDROVIA LTDA.

Ouro Preto, 14/02/2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a *D'us* (força cósmica e universal) que me concedeu o dom da vida e me guia, sem a força e energia que este me concede nada disso seria possível.

A conclusão deste trabalho não seria possível sem o apoio da minha família, incluindo meus pais, Dalme e Luciene, meu irmão, Arthur, e da minha companheira Julia.

Tenho muito a agradecer ao meu orientador Humberto, pela paciência e compreensão nesse longo tempo em que redigi tudo aqui proposto. Ao Tulio e Isaac pela iluminação nos momentos de dúvida, e ao Lucio por todo apoio logístico. A Evelyn (UFVJM) pelas orientações e esclarecimentos. Ao André, Jady e Gabriel por serem meu braço direito nos trabalhos de campo e nos devaneios geológicos.

Agradeço as instituições DEGEO – UFOP e CPRM, pelo ensino de qualidade e gratuito, que nunca me foi negado.

E por fim, mas não menos importante, ao lugar. A gloriosa República Nau Sem Rumo, e seus atuais e ex moradores, em especial ao Xangrilá, pelos momentos de calma em meio a tormenta que guiou meu barco até aqui.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	viii
SUMÁRIO	x
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xiv
RESUMO	xix
ABSTRACT	xvii
INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO	1
1.2 LOCALIZAÇÃO.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	3
1.4 JUSTIFICATIVA	3
1.5 MATERIAIS E MÉTODOS	4
1.5.1 Revisão bibliográfica	4
1.5.2 Trabalho de campo e construção de perfis estratigráficos	5
1.5.3 Descrição petrográfica de lâminas delgadas	6
1.5.4 Interpretação paleoambiental e análise de suscetibilidade a armazenamento de fluidos	6
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1 ROCHAS SEDIMENTARES CARBONÁTICAS	8
2.1.1 Constituintes.....	8
2.1.2 Classificação De Rochas Carbonáticas	13
2.1.3 Feições diagenéticas de rochas carbonáticas.....	17
2.1.4 Sedimentação de rochas carbonáticas e fatores controladores.....	20
2.1.5 fácies sedimentares.....	26
2.2 HIDROGEOLOGIA DE MEIOS CÁRSTICOS-FISSURAIS	31
2.3 CONTEXTUALIZAÇÃO GEOLÓGICA BACIA DO SÃO FRANCISCO	32
2.3.1 Grupo Bambuí.....	33
2.3.2 Geologia Local	38
3 ARTIGO: RESULTADOS, DISCUSSÕES E CONCLUSÕES	42
4 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	60
5 APENDICES	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - a) Localização da região de estudo com as principais vias de acesso (b) mapa geológico simplificado (Kuchenbecker et al. 2014) indicando a exposição estudada neste trabalho.....	2
Figura 1.2 - Fluxograma com as etapas de trabalho	4
Figura 1.3 - Espectrômetro de raios gama RS-125.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 2.1 - Escala de grãos/cristais propostas por Folk (1974) (Modificado de Paixão 2014)	14
Figura 2.2 - Classificação de rochas carbonáticas segundo Folk (1974) (Terra 2010)	Erro! Indicador não definido.
Figura 2.3 - Classificação de rochas carbonáticas segundo Dunham (1962) (Terra 2010).	Erro! Indicador não definido.
Figura 2.4 - Classificação de rochas carbonáticas segundo Terra (2010).	Erro! Indicador não definido.
Figura 2.5 - Sistema deposicional de planície de maré. Principais estruturas sedimentares e empilhamento de fácies num ciclo denominado “ciclo de maré” (Favera 2001).....	Erro! Indicador não definido.
Figura 2.6 - Sistema deposicional de planície de maré progradante. Principais estruturas sedimentares e empilhamento de fácies num ciclo denominado “ciclo de maré” (Modificado de Favera 2001).....	Erro! Indicador não definido.
Figura 2.7 - Diagrama esquemático mostrando os subambientes de um recife, tipos orgânicos e rochas calcárias associadas (Tucker & Dias-Brito 2017).....	Erro! Indicador não definido.
Figura 2.8 - Desenvolvimento de aquíferos cársticos (Diniz Filho 2008).	Erro! Indicador não definido.
Figura 2.9 - Bacia do São Francisco e seus limites (Tonietto 2010)	Erro! Indicador não definido.

Figura 3.1 - (a) Localização da região de estudo com as principais vias de acesso (b) mapa geológico simplificado (Kuchenbecker et al. 2014) indicando a exposição estudada neste trabalho.....	44
Figura 3.2 - Estratigrafia do Grupo Bambuí modificado de Caetano Filho (2019). O retângulo vermelho indica o intervalo estratigráfico aproximado estudado neste trabalho.....	46
Figura 3.3 - A: Aspecto geral do afloramento em amarelo cruzadas <i>hummockys</i> . B: Fotomicrografia da fácies Pog-t (lâmina XIII) em luz transmitida e aumento de 2x. As setas nas cores azul, vermelho e verde indicam, respectivamente, sentido do topo, estilólitos e molde dos grãos.....	47
Figura 3.4 - A: Na porção esquerda superior da foto, geometria lenticular dos corpos oolíticos em contato sobre a fácies Llg-s. B: Acima, fácies Pog-t com gradação normal e intraclastos na base, abaixo fácies Llh com laminações cruzadas <i>hummocky</i> . C: Acima, fácies Pog-t exibindo estratificações tangenciais na base, em contato com a fácies Llg-s. D: Fotomicrografia da fácies Pog-t (lâmina II) e sua assembleia de aloquímicos predominantemente oolíticos em luz transmitida e aumento de 2x. A barra branca corresponde a 1mm e as setas amarela e azul indicam, respectivamente, a pseudomatriz recristalizada e o sentido do topo.....	47
Figura 3.5 - (A) Aspecto geral mesoscópico e (B) fotomicrografia da fácies Llg-S (lâmina V) em luz transmitida e aumento de 2x. A barra branca indica 1mm, enquanto as setas em vermelho, amarelo e verde indicam, respectivamente, os moldes dos aloquímicos, a injeção de material claro mais grosso em material microespático carbonoso, e mancha de matriz impura. Seta em azul indica sentido do topo.....	47
Figura 3.6 - Seção estratigráfica composta e de detalhe da Formação Lagoa do Jacaré ao longo da rodovia MG – 402, Brasília de Minas (MG). Os algarismos romanos representam a posição estratigráfica das lâminas delgadas.....	49
Figura 3.7 - A: Detalhe em afloramento da fácies Gos com estratificações cruzadas sigmoidais em contato erosivo/abrupto sobre a fácies Llg-s. B: Fotomicrografia em luz transmitida e aumento de 2X mostrando os principais componentes da fácies Gos. A barra branca corresponde a 1mm, as setas em vermelho, amarelo, verde e azul indicam respectivamente, oólitos fraturados ou retorcidos, cimento em mosaico fino e grosso, <i>dissolution seams</i> , e sentido do topo.....	49
Figura 3.8 - A: Fácies Goi em afloramento, com estilólitos e gradação inversa, bem como vênulas de calcita. B: Fotomicrografia da fácies Goi (lâmina I) em luz transmitida e aumento de 2x. A barra branca indica 1mm, enquanto as setas em preto, vermelho, amarelo, azul e verde indicam, respectivamente, a gradação normal, os cimentos em mosaico grosso e fino de calcita, além das franjas de calcita, a matriz neomorfizada, o sentido do topo, poros secundários preenchidos por óleo morto.....	50
Figura 3.9 - Afloramento da fácies Llf exibindo (A) laminações <i>wavy</i> e, eventualmente, laminações cruzadas de baixo ângulo (<i>hummockies</i> centimétricos), bem como (B) estruturas <i>flame</i> . (C) Fotomicrografia da mesma fácies (lâmina XI) em luz transmitida e aumento de 2X. Barra branca corresponde a 1mm, as setas em azul, verde e amarelo indicam, respectivamente, sentido do topo, vênulas preenchidas por calcita e laminações de material preto anisotrópico tangenciais a base. (D) Fotomicrografia da fácies Llf (lâmina X) em luz transmitida e aumento	

de 2X. Barra branca corresponde a 1mm, as setas em azul e vermelho indicam, respectivamente, topo e molde de grãos.....50

Figura 3.10 - (A) Laminito crenulado da fácies Lcs-c, exibindo laminações *wavy*, gretas de sinérese com geometria exótica vistas em perfil, laminações microbianas e as lentes de material calcítico lamoso e impuro. (B) Fotomicrografia da mesma fácies (lâmina XIV). A barra branca corresponde a 1mm, enquanto as setas nas cores azul, amarelo, vermelho e verde indicam, respectivamente, topo, cimentos em mosaico grosso e em franja, molde de grãos e laminações microbianas.....51

Figura 3.11 - Foto mosaico do afloramento, e a arquitetura de suas fácies. Abaixo disposição dos quatro perfis com seus ciclos menores em vermelho e os maiores em preto. Linha vermelha indica descontinuidade erosiva, a linha verde indica superfície de máxima inundação (continua) e máxima regressão (tracejada). As setas indicam direção das terminações estratiais e migração dos sistemas deposicionais.....53

Figura 3.12 - Fotos de detalhe das terminações estratiais. A localização das fotos é indicada pelos números respectivos sobre a figura 3.11.....53

Figura 3.13 - Perfil gamma ray de detalhe integrado da Formação Lagoa do Jacaré ao longo da rodovia MG - 402 na cidade de Brasília de Minas. Detalhe na individualização das regiões superiores e inferiores a descontinuidade.....54

Figura 3.14 - Bloco diagrama com modelo deposicional proposto para a Formação Lagoa do Jacaré na região de Brasília de Minas – MG.....55

Figura 3.15 - A: Fotomicrografia em luz transmitida e aumento de 2X da fácies Goi (lâmina VI). B: Fotomicrografia em luz transmitida e aumento de 2X da fácies Goi (lâmina IV). C: Fotomicrografia em luz transmitida e aumento de 2X da fácies Lcs-c (lâmina VII). D: Fotomicrografia em luz transmitida e aumento de 2X da fácies Goi (lâmina I). Barra branca representa 1mm. Setas em azul vermelho, amarelo e verde, representam, respectivamente, topo, estruturas de geração, migração e acumulação de hidrocarbonetos.....56

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Tabela de microfácies padrão baseada em diferentes autores. Retirada e parcialmente modificada de Paixão (2014).....	28
Tabela 2.2 - Divisão litoestratigráfica do Grupo Bambuí, baseado em Dardenne (1978a 1979 1981) (Modificada de Iglesias 2007).....	Erro! Indicador não definido.
Tabela 3.1 – Tabela de Fácies da Formação Lagoa do Jacaré na região de Brasília de Minas	48

ÍNDICE DE APÊNDICES

Apêndice 1 - Perfil 1	67
Apêndice 2 - Perfil 2	68
Apêndice 3 - Perfil 3	69
Apêndice 4 - Perfil 4	70
Apêndice 5 - Tabela de medidas de raios gama perfil 1	71
Apêndice 6 - Tabela de medidas de raios gama perfil 2	71
Apêndice 7 - Tabela de medidas de raios gama perfil 3	72
Apêndice 8 - Tabela de medidas de raios gama perfil 4	72

RESUMO

Nos setores central e oriental da bacia intracratônica do São Francisco, as rochas carbonáticas Ediacaranas-Cambrianas da Formação Lagoa do Jacaré são importantes reservatórios de água e gás natural. Embora vários estudos tenham sido desenvolvidos abordando estes estratos carbonatados, diferentes aspectos relacionados à sua arquitetura sedimentar e características pós-deposicionais ainda são mal compreendidos. O controle exercido por seus elementos primários e diagenéticos sobre os sistemas petrolífero e cárstico da bacia do São Francisco também não é claro. Com o objetivo de investigar a arquitetura sedimentar da Formação da Lagoa do Jacaré e sua potencial relação com os sistemas petrolífero e cárstico no norte de Minas Gerais, realizamos uma investigação detalhada sobre estratos altamente preservados expostos ao longo de um afloramento contínuo na rodovia MG-402, cidade de Brasília de Minas. A investigação foi baseada na construção de quatro seções stratigráficas na escala 1:10, bem como na interpretação de fácies sedimentares, elementos arquiteturais e superfícies, em uma correlação lateral ao longo de toda a exposição. O estudo também foi apoiado pelo levantamento gammaspectrométrico de alta resolução e pela descrição de 13 seções delgadas. Foram individualizadas sete fácies sedimentares, agrupadas em três associações de fácies. A associação de fácies FA-I compreende *mudstones*/laminitos depositadas em ambiente de submaré sob a influência de ondas de tempestade. A associação de fácies FA-II depositada em ambiente de intermaré contém *grainstones* oolíticos, mostrando leitos gradados que podem conter estratificações cruzadas sigmoidais. Estes estratos registram canais e bancos (*shoals*) de intermaré e sua deposição foi aparentemente influenciada por eventos episódicos de tempestades. A associação de fácies FA-III marca a transição entre os domínios intermaré e supramaré e compreende sucessões de carbonatos de grão fino e de leito ondulado com fissuras de sinérese e ressecamento. Ao longo do afloramento estudado, uma superfície erosiva contínua separa dois estratos diferentes: i) uma sucessão transgressiva-regressiva inferior e 1,7 m de espessura, composta de depósitos de intermaré e subramaré; e ii) uma sucessão superior composta de duas unidades regressivas- transgressivas com 1,7m a 2m de espessura. Os elementos descritos revelam a dinâmica de parte de uma plataforma de carbonato de baixo ângulo, que evoluiu sob condições de alta energia. As análises petrográficas mostram diferentes processos pós-deposicionais que afetam as rochas estudadas, incluindo a compactação mecânica a química, a formação de porosidade secundária, cimentação, migração de hidrocarbonetos e acúmulo. Características de dissolução recentes indicam a percolação da água

através de superfícies de leito, especialmente desenvolvidas nas fácies sedimentares Lcs-c, Llg-s e Llh. Estas superfícies podem representar importantes controladores para migração de água e dissolução, podendo, portanto, constituir elementos a serem considerados no estudo de aquíferos cárstico-fissurais locais.

Palavras-chave — Arquitetura Sedimentar, Ediacarno-Cambriano, Bacia Do São Francisco, Grupo Bambuí, Água Subsuperficial, Sistema Petrolífero.

ABSTRACT

In the central and eastern sectors of the intracratonic São Francisco Basin, the Ediacaran to Cambrian carbonate rocks of the Lagoa do Jacaré Formation are important water and natural gas reservoirs. Although several studies have been developed addressing these carbonate strata, different aspects related to their sedimentary architecture and post-depositional features are still poorly understood. The control exerted by their primary and diagenetic elements on the petroleum and hydrogeological systems of the São Francisco basin is also unclear. Aiming to investigate the sedimentary architecture of the Lagoa do Jacaré Formation and its relationship with petroleum and hydrogeological systems in the northern Minas Gerais state, we conducted a detailed investigation on highly preserved strata exposed along a continuous outcrop in the MG-402 highway, Brasília de Minas city. The investigation was based on the construction of four stratigraphic sections in the 1:10 scale, as well as the interpretation of sedimentary facies, architectural elements and surfaces and lateral correlation throughout the entire exposure. The study was also supported by the high-resolution gamma-spectrometric survey and the description of 13 thin-sections. We individualized seven sedimentary facies, which were grouped into three facies associations. The FA-I facies association comprises subtidal mudstones/laminites deposited under the influence of storm waves. The FA-II facies association contains intertidal oolite-rich grainstones showing graded beds that may contain sigmoidal cross-stratifications. These strata record intertidal channels and shoals and their deposition was apparently influenced by episodic storm events. The FA-III facies association marks the transition between intertidal and supratidal domains and comprises fine-grained and wave-bedded carbonate successions with syneresis and dissection cracks. Along the studied outcrop, a continuous erosional surface separates two different strata: i) a lower and 2 meters-thick transgressive-regressive succession composed of intertidal and subtidal deposits; and ii) an upper succession composed of two 1,7 to 2 meters-thick regressive-transgressive units. The described elements reveal the dynamics of part of a low angle carbonate platform, which evolved under high energy conditions. Petrographic analyses show different post-depositional processes affecting the studied rocks, including mechanical to chemical compaction, the formation of secondary porosity, cementation, hydrocarbon migration and accumulation. Recent dissolution features indicate the water percolation through bedding surfaces, specially developed in the Lcs-c, Llg-s and Llh sedimentary facies. These surfaces may represent

important elements controlling dissolution features in local karst systems and, thus, should be considered on the study of the local karst-fissure aquifers.

Keywords — Sedimentary Architecture, Ediacaran-Cambrian, São Francisco Basin, Bambuí Group, Subsurface Water, Petroleum System.

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

Rochas carbonáticas possuem grande importância econômica e científica e, em grande parte, são geradas pela precipitação (bio)química e retrabalhamento *in situ* em plataformas carbonáticas com distintas geometrias e características (e.g., Bruchette & Wright 1992; Flugel 2010; Tucker & Dias-Brito 2017). Como sua deposição é influenciada por variados fatores ambientais e biológicos, sua composição, textura e arranjo estratigráfico tende a refletir muitas das condições atmosféricas, hidrosféricas, litosféricas e biosféricas a época de sua deposição. Grande parte das rochas sedimentares carbonáticas conhecidas no registro geológico correspondem a sucessões formadas na zona fótica de ambientes marinhos e lacustres, sob condições tropicais a temperadas, baixo aporte siliciclástico, salinidade apropriada, sob a influência da atividade biológica e são marcadas pela diagênese precoce (Flugel 2010; Tucker & Dias-Brito 2017). Rochas desta natureza são conhecidas como importantes reservatórios de hidrocarbonetos, água subsuperficial e depósitos minerais (e.g., Reis and Suss 2016).

Expostas ao longo da porção leste da Bacia do São Francisco, rochas da Formação Lagoa do Jacaré compõem expressivos registros carbonáticos de idade ediacarana-cambriana do Grupo Bambuí (Alkmim & Martins-neto 2001, Reis *et al.* 2017; Caetano-Filho et al. 2019; Uhlein et al. 2019). Nesta região da Bacia do São Francisco, estas rochas são conhecidas como importantes reservatórios de água subterrânea, ao passo que em outras áreas da bacia em Minas Gerais estas sucessões foram reconhecidas como reservatórios de gás natural (Reis 2018). Embora muitos estudos tenham sido desenvolvidos nesta unidade ao longo das últimas décadas, pouco se sabe sobre sua arquitetura estratigráfica e condições paleoambientais sob as quais se desenvolveram. Também é relativamente desconhecido o controle exercido por sua arquitetura estratigráfica, componentes sedimentares e pós-deposicionais sobre a natureza e distribuição de feições permo-porosas associadas a reservatórios e rotas de migração para água subterrânea e hidrocarbonetos.

Este trabalho foca em rochas carbonáticas ediacaranas-cambrianas da Formação Lagoa do Jacaré do Grupo Bambuí, expostas em Brasília de Minas, região norte de Minas Gerais (Figura 1.1). O trabalho foi realizado a partir do levantamento de perfis estratigráficos e gamaspectrométricos de detalhe e na análise da associação de fácies e microfácies ao longo de uma exposição contínua e indeformada, com elevado grau de preservação dos elementos sedimentares originais. O estudo revelou o registro de parte de uma plataforma carbonática rasa e desenvolvida sob condições de alta energia. Além de preservar vestígios de sistemas petrolíferos antigos, os componentes estratigráficos observados parecem exercer

influência direta sobre a circulação de água subsuperficial. Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto “Implementação da Gestão Integrada de Águas Superficiais e Subterrâneas na Bacia Hidrográfica do São Francisco: Sub-bacias dos Rios Verde Grande e Carinhanha”, executado pela CPRM (Serviço Geológico do Brasil) em convênio com a Agência Nacional das Águas (ANA).

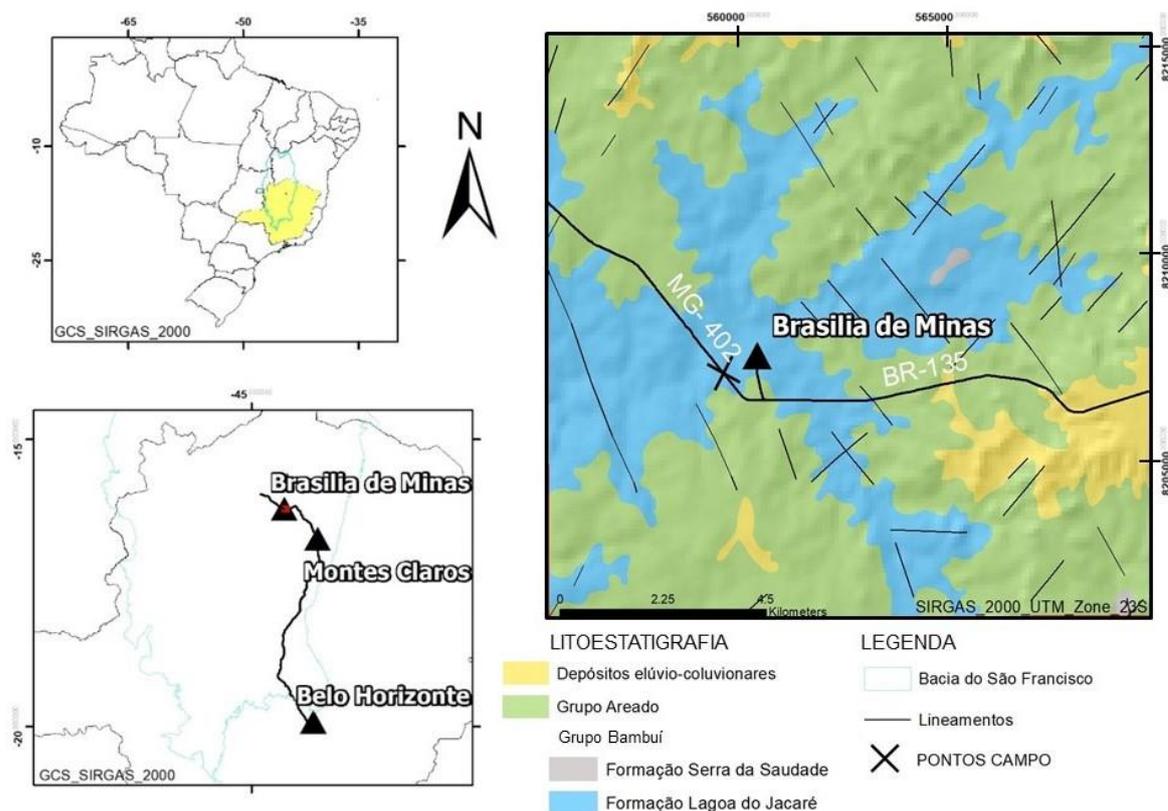


Figura 1.1 - a) Localização da região de estudo com as principais vias de acesso (b) mapa geológico simplificado (Kuchenbecker et al. 2014) indicando a exposição estudada neste trabalho.

1.2 LOCALIZAÇÃO

O afloramento estudado encontra-se ao norte de Minas Gerais, no município Brasília de Minas que, por sua vez, encontra-se inserido na Folha Brasília de Minas (1:100.000) (Figura 1.1). A área situa-se a aproximadamente 550 Km de Belo Horizonte. O acesso, partindo da capital mineira, é feito a partir das rodovias BR-040, por 120 Km sentido Brasília, até a cidade de Curvelo, onde segue-se para norte pela BR-135, por 305 Km até a cidade de Montes Claros. Posteriormente, continua-se 70Km no sentido noroeste ainda pela BR-135 até o trevo próximo de Muquém, andando a oeste por 35Km pela MG-202 até a cidade de Brasília de Minas (Figura 1.1).

1.3 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral caracterizar o arcabouço sedimentar e os sistemas deposicionais vigentes durante a deposição das rochas carbonáticas da Formação Lagoa do Jacaré aflorantes no município de Brasília de Minas, bem como sua potencial relação com os sistemas petrolífero e cárstico locais. Constituem objetivos secundários:

- Descrever e interpretar as fácies sedimentares, associações de fácies e elementos arquiteturais da Formação Lagoa do Jacaré.
- Descrever e interpretar as feições microscópicas das rochas analisadas (deposicionais e pós-deposicionais) e sua relação com elementos sedimentares descritos em escala de afloramento.
- Avaliar as possíveis relações entre os elementos estratigráficos e pós-deposicionais analisados e seu papel sobre elementos e processos associados aos sistemas petrolífero e cárstico locais (e.x.: reservatórios, rotas de migração de fluidos subsuperficiais, etc).

1.4 JUSTIFICATIVA

Este trabalho fornecerá contribuições para a compreensão das sucessões carbonáticas e condições paleoambientais associadas à deposição das rochas da Formação Lagoa do Jacaré (Grupo Bambuí), cuja arquitetura estratigráfica e os ambientes deposicionais ainda são pouco conhecidas. As rochas estudadas neste trabalho foram depositadas durante o limite entre o Ediacarano-Cambriano (e.g., Paula-Santos *et al.* 2015; Reis *et al.* 2017; Caetano-Filho *et al.* 2019), intervalo no qual a dinâmica de sedimentação carbonática ainda é relativamente desconhecida e importantes mudanças na atmosfera-hidrosfera e biosfera (explosão cambriana) ocorreram. Entender os paleoambientes e condições sob as quais se depositaram as rochas da Formação Lagoa do Jacaré poderá fornecer subsídios para a compreensão da evolução de sua bacia, bem como elementos para compreender ambientes de sedimentação vigentes durante este importante período.

A região foco do atual trabalho encontra-se inserida na porção sul da sub-bacia hidrográfica do Rio Verde Grande, e mostra-se atrativa para a investigação de recursos hídricos uma vez que esta região de clima sub-úmido seco é claramente dependente desses recursos para exercer atividades agropecuárias e mineiras. Considerando as rochas carbonáticas do Grupo Bambuí como hospedeiras dos principais recursos hídricos subsuperficiais locais, este estudo poderá fornecer suporte para o entendimento de parâmetros associados a porosidade e permeabilidade de aquíferos cárstico-fissurais locais, especialmente aqueles controlados pelo arcabouço sedimentológico e estratigráfico. Avanços no

entendimento do controle exercido pelo arcabouço sedimentar das rochas da Formação Lagoa do Jacaré sobre os aquíferos locais poderá ainda auxiliar no plano uso e manejo dos recursos hídricos locais.

1.5 MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto foi desenvolvido em cinco etapas principais (Figura 1.2). A primeira etapa compreendeu a revisão bibliográfica, seguida de compilação de dados relacionados a Bacia do São Francisco e geologia da área de trabalho, classificação de rochas carbonáticas, ambientes de sedimentação carbonática, modelos e associações de fácies. A segunda etapa compreendeu a execução dos trabalhos de campo em Brasília de Minas, onde foram realizadas as descrições de fácies e dos elementos arquiteturais em um afloramento previamente escolhido. Estes dados foram utilizados para a confecção de perfis estratigráficos de detalhe na etapa seguinte. A quarta etapa consistiu na descrição de lâminas petrográficas e a etapa final na análise e interpretação dos dados e redação do trabalho final.

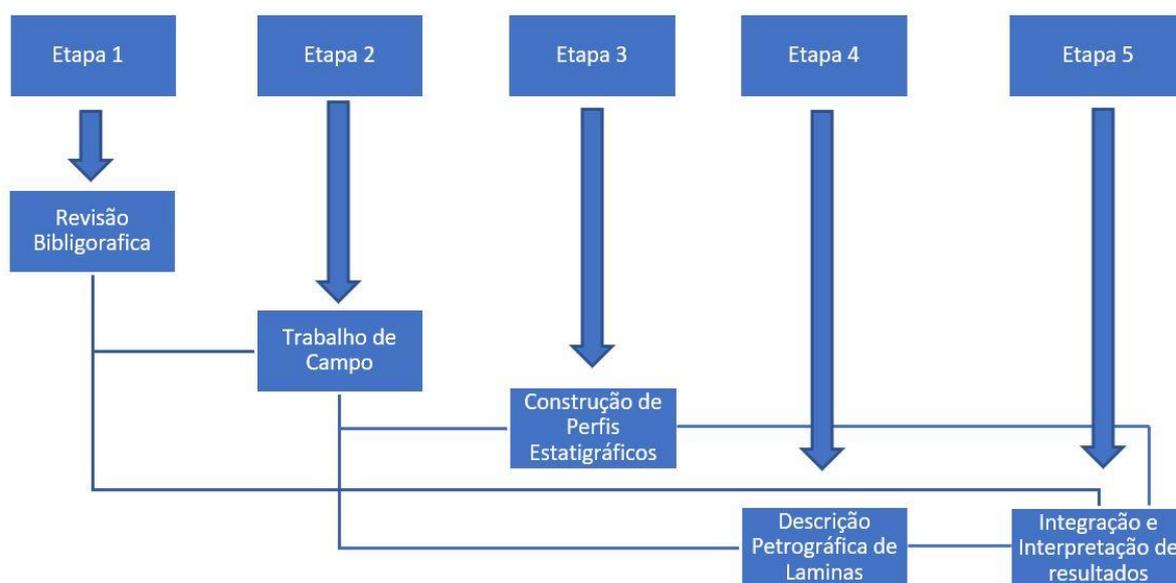


Figura 1.2 - Fluxograma com as etapas de desenvolvimento deste trabalho.

1.5.1 Revisão bibliográfica

A etapa de revisão bibliográfica pode ser dividida em três partes. A primeira foca textos versando rochas carbonáticas, seus constituintes, classificação e diagênese, bem como ambientes deposicionais, estruturas sedimentares e modelos de fácies. Os principais autores estudados nessa etapa são Tucker & Dias-Brito (2017), Dimas-Britto (2017), Walker (1992), Souza (2011), Flügel (2010) e Paixão (2014).

A segunda parte tem enfoque na geologia regional e na evolução estrutural da Bacia do São Francisco. Nessa fase, foram estudados autores como Zalan & Romeiro Silva (2007), Iglesias (2007), Campos & Dardenne (1997) e Alkmim & Martins-Neto (2001), Reis & Suss (2016), Reis et al. (2017), Uhlein et al. (2019), Caetano-Filho et al. (2019), entre outros. Os relatórios das folhas geológicas (1:100.000) Brasília de Minas (Kuchenbecker *et al.* 2014) e São João da Ponte (Romano *et al.* 2015) também foram consultados para uma análise regional da área estudada e sua geomorfologia.

Na temática de sistemas cársticos e hidrogeologia em rochas carbonáticas foram consultados Diniz Filho (2008) e Singhal & Gupta (2010), a fim de entender suas relações e desenvolvimento.

1.5.2 Trabalho de campo e construção de perfis estratigráficos

Com a finalidade de coletar informações e amostras para confecção de perfis e lâminas foram feitas campanhas de campo para descrição de um afloramento na saída de Brasília de Minas (MG). Este afloramento apresenta uma exposição contínua de mais de 100 m de comprimento, onde cerca de 5 m de rochas carbonáticas da Formação Lagoa do Jacaré encontram-se expostas e preservam grande parte dos seus elementos sedimentares e estratigráficos originais. As descrições das fácies sedimentares e arcabouço estratigráfico consideraram a composição, granulometria, cor, textura, estruturas sedimentares, geometria dos estratos, superfícies de contato, distribuição espacial e elementos arquiteturais, seguindo a metodologia tradicional de análise sedimentar e estratigráfica. Foram observadas ainda zonas associadas a dissolução e possíveis caminhos de maior permo-porosidade associada a percolação de água. Também foram coletadas atitudes de estruturas sedimentares para análise de paleocorrentes. Nesta etapa de trabalho, foram utilizados os seguintes instrumentos: martelo, trena, lupa, bússola, caderneta, ácido clorídrico (HCl).

Durante o levantamento de campo, foram construídos quatro perfis de detalhe (1:10) e com espaçamento de cerca de 30 metros. Levantamentos gamaespectrométricos foram realizados de forma complementar ao levantamento dos perfis. As leituras dos espectros de Urânio (ppm), Tório (ppm), Potássio (%) e Contagem Total (CT) foram feitas com espaçamento de 30 centímetros ou 15 centímetros (quando necessário) e com tempo de amostragem de 60 segundos. O equipamento utilizado foi um espectrômetro de raios-gama portátil, modelo RS-125 Super - SPEC do fabricante *Radiation Solutions* (Figura 1.3). Foram coletadas amostras a cada 30-15 centímetros que serviram para confecção de 13 lâminas delgadas. Os dados obtidos em campo foram tratados no software Excel e exportados em formas de gráficos que, posteriormente, foram incorporadas as cartas estratigráficas.

A partir dos dados estratigráficos e petrográficos, foram individualizadas fácies sedimentares com base nas classificações de Reading (1996), e Terra et al. (2010), codificadas da seguinte maneira:

a primeira letra maiúscula, representa a litologia, enquanto as seguintes letras minúsculas representam as estruturas sedimentares identificadas (Miall 2013).



Figura 1.3 - Espectrômetro de raios gama utilizado neste trabalho. Modelo RS-125 Super - SPEC do fabricante Radiation Solutions.

1.5.3 Descrição petrográfica de lâminas delgadas

As lâminas delgadas foram confeccionadas orientadas e descritas em microscópio petrográfico OLYMPUS BX51-P binocular com luz polarizada. Nesta etapa, foram analisadas a composição, texturas, feições diagenéticas (microestruturas, cimentação, elementos permo-porosos, etc). As microfácies aqui caracterizadas foram comparadas com os modelos de microfácies padrão propostas por Wilson (2012), Flügel (2010) e Paixão (2014) com a finalidade de associá-las a sistemas deposicionais específicos.

1.5.4 Interpretação paleoambiental e análise de suscetibilidade a armazenamento de fluidos

Nessa etapa, foram compilados os dados obtidos previamente. A partir da integração dos dados foi possível fazer interpretações paleoambientais e da evolução estratigráfica local. Nesta etapa também

foram analisadas fácies e feições sedimentares suscetíveis a dissolução e desenvolvimento de porosidade efetiva, bem como elementos que poderiam se associar ao sistema petrolífero.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ROCHAS SEDIMENTARES CARBONÁTICAS

Rochas sedimentares carbonáticas correspondem a rochas sedimentares químicas compostas majoritariamente por minerais como calcita, dolomita, aragonita, etc. Comumente, se formam a partir da precipitação e retrabalhamento *in situ*, embora componentes puramente químicos não sejam incomuns (Tucker 2009, Flugel 2010). São formadas em condições marinhas e lacustres, sob condições tropicais a temperadas, baixo aporte siliciclástico, salinidade apropriada, sob a influência da atividade biológica e são marcadas pela diagênese precoce (Flugel 2010; Tucker & Dias-Brito 2017). Diferentemente dos depósitos siliciclásticos, a diagênese das rochas carbonáticas se inicia precocemente, ainda no ambiente deposicional (e.g., Tucker & Wright 1990; Flugel 2010). Em geral, rochas carbonáticas são descritas e classificadas conforme seus diferentes constituintes, que são abordados nas seções seguintes. Tais descrições a seguir são baseadas, sobretudo, em Tucker & Dias-Brito (2017), Dimas-Britto (2017), Walker (1992), Flügel (2010) e Paixão (2014).

2.1.1 Constituintes

Rochas carbonáticas são constituídas essencialmente por quatro elementos, sendo eles:

- i) Grãos: Se trata da fração relativamente mais grosseira da rocha de comportamento hidrodinâmico semelhante (Folk 1959 *apud* Paixão 2014). Gerados em um contexto pré-deposicionais, são divididos em ortoquímicos e aloquímicos de acordo com a natureza de seus sedimentos, embora também possa ocorrer grãos terrígenos.
- ii) Matriz: Compreende o material intersticial de granulometria mais fina que a moda dos grãos.
- iii) Cimento: Ocorre como precipitados ortoquímicos.
- iv) Espaços vazios: Poros, que podem ocorrer vazios, parcial ou totalmente preenchidos.

A composição mineralógica das rochas carbonáticas é formada por minerais cuja estrutura química é constituída pelo íon CO_3 sendo eles calcita (CaCO_3), dolomita (CaMgCO_3), e aragonita (CaCO_3).

2.1.1.1 Grãos Aloquímicos

Os grãos aloquímicos são partículas carbonatadas formados a partir do retrabalhamento de substâncias químicas precipitadas dentro da bacia sedimentar (Folk 1959 *apud* Paixão 2014). Esses têm comportamento hidrodinâmico semelhante aos detritos terrígenos e apresentam transporte relativamente curto.

Grãos aloquímicos esqueletais são representados, em suma, por bioclastos, material carbonático de registro fóssil. São gerados a partir da fragmentação de conchas e outras carapaças de diversos tipos de invertebrados e algas bem como esqueletos inteiros de organismos de pequenas dimensões. Alguns bioclastos só ficam libertos após a morte do organismo construtor, outros são liberados pelo respectivo ser em sucessivas fases do seu crescimento. Aloquímicos esqueletais ocorrem como expressão da fauna e da flora existentes na respectiva bacia sedimentar, em calcários antigos tais elementos são interpretados como fósseis e microfósseis o que permite inferir o ambiente de sedimentação e ocasionalmente sua respectiva idade.

Os sedimentos aloquímicos não esqueletais tratam-se dos constituintes não bioclásticos das rochas calcárias formados dentro da bacia ou que sofreram transporte relativamente curto até sua deposição. Compreende os principais componentes não fósseis que compõem rochas calcárias sendo eles: intraclastos, grãos revestidos (oóides), e peloides

Os intraclastos (termo derivado de Folk 1952 *apud* Paixão 2014) compreendem sedimentos carbonáticos de origem local, intrabacinal, que são removidos e retrabalhados até sua deposição na bacia sedimentar. Os fragmentos geralmente são angulosos de tamanhos variáveis, compostos por lama micrítica ou areia carbonática. Implicam em ambientes de águas rasas, no contexto de intermaré-supramaré e ocorrem desde o Pré-Cambriano ao recente.

Podem se originar a partir de lama micrítica pouco compactada sujeita a ação de correntes energéticas erosivas, nesse caso os intraclastos apresentarão evidências de deformação plástica. Ocorrem também como expressão de erosão subaérea de sedimentos carbonáticos, esse mecanismo daria formas achatadas, recurvadas, e tabulares aos intraclastos. Acontecem ainda como cimentação de bioclastos, ou pellets fecais – termo que designa pelotas fecais produzidas por organismos que se alimentam de lama carbonática, só se preservam por cimentação típica de ambientes lagunares ou de maré – na zona de intermaré.

Oóides compreendem grãos esféricos a subesféricos de ocorrência Pré-Cambriana ao recente, de tamanho na faixa areia, máximo de 2mm, dotado de núcleo de natureza diversa, revestido por envoltórios concêntricos carbonáticos. Caracterizam ambientes aquáticos podendo ser de alta ou baixa energia, a depender da natureza dos envoltórios. Oncólitos são oóides de revestimento de natureza microbiana. O núcleo é envolvido por algas verdes e azuis responsáveis pelo aprisionamento de

sedimentos, ocasionalmente sendo terrígenos ou bioclásticos, muito finos, que compõe lamelas concêntricas irregulares. Ocorrem do Pré-Cambriano ao recente em ambientes lagunares ou marinhos pouco energéticos, onde ocorre o efeito “*baffle*” responsável pelo amortecimento da ação de ondas e correntes (Pereira 2007 *apud* Costa 2011). Ao microscópio óptico os oncólitos apresentaram granulometria variada e associado a lama carbonática, característico de ambientes pouco energético, e seus envoltórios não são bem definidos, com estrutura interna concêntrica, podendo ter núcleo composto. Representados por oóides de acreção físico-química, os Oólitos são grãos esféricos, de morfologia regular, com núcleos revestidos por envelopes concêntricos com estrutura fibro-radiada calcítica, resultante da recristalização de aragonita. Os ambientes favoráveis à sua formação são aqueles de águas rasas tépidas com bastante turbulência e mudança de direção da corrente como nos canais, deltas, e barras de marés. Em lâmina delgada são bem definidos geometricamente com estrutura interna radial bem definidas. Devido ao ambiente de formação, de um modo geral, são bem selecionados. Oólitos de granulometria maior que 2 mm são genericamente chamados de pisólitos, contudo, esses apresentam gênese variada.

Peloides é o termo genérico que abrange grãos de calcita micrítica escura, de formas arredondadas, elipsoidal desprovido de estrutura interna, normalmente de granulometria na faixa areia. O termo peloide é meramente descritivo e não acarreta qualquer conotação genética. Resultam, sobretudo, da fragmentação de outros grãos esqueléticos ou não.

2.1.1.2 Grãos Terrígenos

São grãos de natureza diferente da rocha que os envolve, majoritariamente siliciclásticos, compostos por minerais ou fragmentos de rochas transportados até o interior da bacia onde são retrabalhados e depositados. Denominados extraclastos, tem sua granulometria como expressão da energia do ambiente e distância da área fonte.

2.1.1.3 Ortoquímicos

Os sedimentos ortoquímicos são minerais que podem ocorrer como partículas precipitadas, cimento e/ou minerais acessórios. A cimentação carbonática é responsável pelo preenchimento de cavidades pré-existentes no sedimento ou na rocha através da precipitação química dos minerais. Tal processo pode se desenvolver durante qualquer fase na história de formação das rochas carbonáticas (Terra 2010). O fenômeno ocorre quando os fluidos nos poros se encontram supersaturados com a fase cimentante, que pode ser aragonita, calcita livre ou magnésiana, gipsita-anidrita e dolomita (Iglesias 2007). Os aspectos do cimento, como tamanho, hábito, forma e textura estão associados ao ambiente

digenético determinado. Os principais minerais acessórios gerados em processos digenéticos são glauconita, fosfato, sílica, pirita e minerais evaporíticos

2.1.1.4 Matriz Carbonática

O termo micrita foi introduzido por Folk (1962 *apud* Paixão 2014) como abreviatura do termo *microcrystalline calcite*. Esta é constituída de material carbonático menor que 0,0625mm e corresponde a fração silte e argila que compõe a rocha, tradicionalmente chamada de lama carbonática (Terra 2010). Observada em lâmina delgada, com auxílio de microscópio petrográfico, possui cor acastanhada e é quase opaca quando não neomorfizada. Em sedimentos recentes é composta por calcita (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), e aragonita (CaCO_3) (Paixão 2014). Nos calcários, a formação da matriz ocorre simultaneamente com a deposição de grãos (Terra 2010), e tem relação inversamente proporcional a turbulência das correntes locais durante o momento de deposição (Camacho 2009).

Atualmente assume-se quatro tipos de origem para produção de lama carbonática, baseado em sedimentos recentes estudados (Terra 2010), estes serão dissertados a seguir.

A micrita pode ser formada a partir da abrasão mecânica ou biogênica de partículas maiores de carbonatos. Os principais agentes seriam a ação de ondas e correntes e a pulverização feita por determinados tipos de peixes escavadores ou organismos que as ingere e posteriormente as expelam (Paixão 2014).

Whiting (Shoultze 1997) é o termo que descreve manchas brancas quilométricas que ocorrem nas superfícies dos mares. Sua gênese está associada a precipitação inorgânica de carbonatos sob a forma de agulhas de aragonita na superfície dos oceanos. Estudos geoquímicos revelam que sua composição se assemelha a de sedimentos micríticos profundos (Paixão 2014).

Como retratado anteriormente existem diversos organismos secretadores de carbonato. Algas calcárias possuem abundantes cristais aciculares de aragonita, esses se assemelham aos encontrados nos fundos oceânicos. Estudos geoquímicos associam sedimentos micríticos à desintegração de organismos algais frágeis (*ver* Paixão 2014).

A formação da lama carbonática também pode se dar através da bioacumulação de organismos. Organismos de tamanho próximo ao das micritas podem ter sua carapaça composta de carbonato, após a morte desses a acumulação de suas tecas pode vir a compor a matriz da rocha carbonática.

2.1.1.5 Porosidade

A porosidade em rochas carbonáticas, ocorre como a razão entre o volume de espaços vazios e o volume total da rocha (Tucker & Dias-Brito 2017). Essas podem ser criadas, modificadas ou destruídas

em qualquer época durante a formação das rochas calcárias (Paixão 2014), e são controladas pela textura deposicional e processos poligenéticos (Tucker & Dias-Brito 2017).

Porosidade absoluta e efetiva compreendem termos descritivos que estão associados ao volume total de vazios e a conectividade dos poros. A primeira compreende todos os vazios que compõem a rocha, enquanto a segunda está associada a conectividade entre os poros, designada como permeabilidade (Tucker & Dias-Brito 2017). Em síntese quanto mais estrangulados, estreitos e tortuosos os poros, menor será sua capacidade de e conseqüentemente menor será a permeabilidade da rocha (Tucker & Dias-Brito 2017).

Quanto a sua gênese, a porosidade pode ser diferenciada em influenciada ou não pelos demais componentes da rocha (Choquette & Pray 1976 *apud* Miranda 2013). A primeira é denominada como porosidade de fábrica seletiva, enquanto a segunda é denominada de fábrica não seletiva.

Quanto ao estágio em que são formadas são diferenciadas em porosidade primária e secundária (Tucker & Dias-Brito 2017), sendo a primeira gerada imediatamente em sua deposição e a segunda mediante a processos digenéticos.

A porosidade primária compreende as seguintes categorias (Tucker & Dias-Brito 2017):

- i) Porosidade intergranular: Ocorre entre os grãos que compreendem a rocha, comum em carbonatos arenosos e depende dos tamanhos e formatos dos grãos
- ii) Porosidade intragranular: Corresponde aos espaços que ocorrem dentro dos grãos
- iii) Porosidade fenestral: Resulta de aberturas na estrutura das rochas, maiores e mais largas do que interstícios suportados pelos grãos
- iv) Porosidade shelter: Formada a partir de partículas sedimentares, predominantemente esqueletais, que servem como abrigo, impedindo o preenchimento do espaço poroso
- v) Porosidade bioestrutural: Ocorrem em estruturas bioesqueletais rígidas
- vi) Porosidade estromáticas: Tem morfologia da base reta e o teto irregular, e possui implicações digenéticas associadas a desidratação de lamas carbonáticas ou desenvolvimento sob crostas cimentadas.

A porosidade secundária compreende as seguintes categorias (Tucker & Dias-Brito 2017):

- i) Porosidade Inter cristalina: Ocorre como variação da intergranular, situada entre cristais produzidos durante a cimentação
- ii) Porosidade Intracristalina: Se dá pela dissolução interna parcial dos grãos
- iii) Porosidade móldica: Resulta da dissolução e remoção seletiva de grãos
- iv) Porosidade de fraturamento: Decorrente de esforços os quais a rocha é submetida
- v) Porosidade em canal: Gerada pelo fluxo de fluidos, em geral alongada, associada ao alargamento de fraturas

- vi) Porosidade vulgular: Se dá pelo alargamento por dissolução de poros ou de fraturas preexistentes
- vii) Porosidade de cavidades: Compreende grandes porosidades geradas por processo de dissolução e abatimento de blocos
- viii) Porosidade por escavação ou perfuração: Ambas ocorrem pela ação de organismos e se diferenciam através da coesão do material retirado pelo organismo
- ix) Porosidade por brechação: Se dá por meio da dissolução de evaporitos, ou por fraturamento hidráulico
- x) Porosidade por ressecamento: É derivado da desidratação e conseqüente redução de volume de sedimentos expostos a superfície.

2.1.2 Classificação De Rochas Carbonáticas

Rochas carbonáticas são classificadas conforme distintos sistemas de classificação que consideram sua composição, constituintes e textura. Algumas destas classificações são listadas a seguir, com base em Tucker & Dias-Brito (2017), Terra *et al.* (2010) e Paixão (2014).

2.1.2.1 Classificação de Folk (1974)

A classificação de rochas carbonáticas de Folk (1974) usa similaridades entre arenitos e folhelhos, quanto ao seu mecanismo de formação. Parte do pressuposto que a textura da rocha é controlada pelo regime do fluxo dos fluidos deposicionais. Os classifica conforme esquema apresentado na Figura 2.1.

	Constituintes Transportados	Constituintes Autigênicos	
64 mm	Calcirrudito muito grosso	Cristalino extremamente grosso	4 mm
16 mm	Calcirrudito grosso		
4 mm	Calcirrudito médio		
1 mm	calcirrudito fino	Cristalino muito grosso	1 mm
0,5 mm	Calcarenito grosso	Cristalino grosso	0,25 mm
0,25 mm	Calcarenito médio		
0,125 mm	Calcarenito fino	Cristalino médio	0,062 mm
0,062 mm	Calcarenito muito fino		
0,031 mm	Calcilutito grosso	Cristalino fino	0,016 mm
0,016 mm	Calcilutito médio		
0,008 mm	Calcilutito fino	Cristalino muito fino	0,004 mm
	Calcilutito muito fino	Afanítica	

Figura 2.1 - Escala de grãos/cristais propostas por Folk (1974) (Modificado de Paixão 2014).

Calcirruditos: Equivalente aos conglomerados siliciclásticos, compreende rochas compostas pela moda dos grãos entre 2mm e 64mm. São subdivididos em calcirruditos finos, médios, grosseiros e muito grosseiros.

Calcarenitos: Compreende rochas com moda dos grãos entre 0,062mm e 2mm. Os divide em calcarenitos limpos, sem matriz, resultante da ação de correntes vigorosas, e calcarenitos micríticos, com presença de matriz carbonática, que resultam da ação de correntes pouco ativas. Equivalem, respectivamente, a arenitos limpos sem matriz e arenitos de matriz argilosa.

Calcilutitos: Compreende rochas compostas pela moda dos grãos entre 0,062mm e 0,008mm. Ocorrem como expressão da deposição de material carbonático em suspensão, em ambientes com ausência de correntes. Equivalem a folhelhos e argilitos siliciclásticos.

Os principais constituintes carbonáticos considerados por Folk (1974) são: o arcabouço, formado por grãos aloquímicos, responsável pela estrutura da rocha, a matriz, que é associada a micrita ou lama carbonática, e o cimento como material precipitado, formado pela calcita espática. Em função da possibilidade de mistura dos três, os classifica em três tipos (Figura 2.1).

Tipo I – Possuem aloquímicos espáticos, associados a ambientes de alta energia, ou de baixa energia, onde não ocorre produção de micrita. Resultam em rochas com pouca ou nenhuma matriz. Seriam equivalentes a rochas siliciclastica texturalmente maduras.

Tipo II – Compostos de aloquímicos micríticos, seriam carbonatos compostos com menos de 10% de aloquímicos. Associados a ambientes de baixa a moderada energia com alta produção de lama carbonática. Equivalem a arenitos texturalmente imaturos.

Tipo III – Rochas ortoquímicas compostas por micrita e sem aloquímicos. Micríticos seriam expressos por rochas formada exclusivamente de calcita microcristalina em ambientes de baixíssima energia. Dismicritos, por outro lado, correspondem a rochas compostas de calcita microcristalina e calcita espática, se formam, normalmente associadas a algum processo de cimentação, seja em porosidade primaria ou secundaria.

Folk (1974) ainda descreve um outro tipo de rocha que foge dos padrões anteriores, esses são denominados biolititos e são gerados a partir de organismos bioconstrutores.

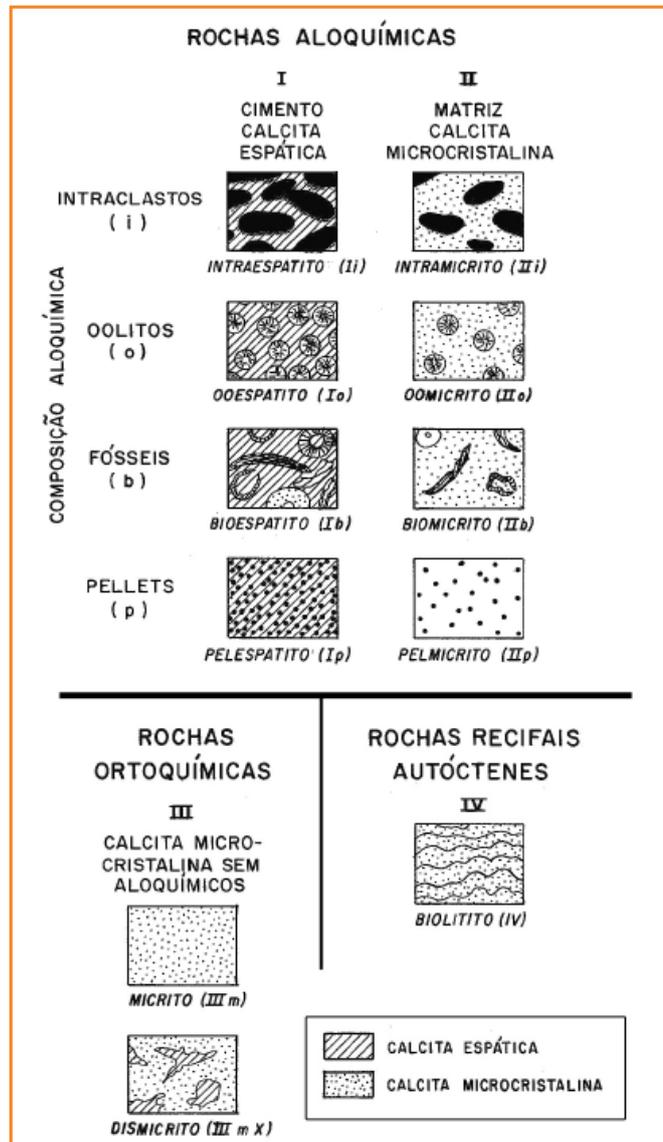


Figura 2.2 - Classificação de rochas carbonáticas segundo Folk (1974). Modificado de Terra et al. (2010).

2.1.2.2 Classificação Por Dunham (1962)

Dunham (1962) se baseia em três parâmetros ao classificar carbonatos (Figura 2.3).

- i) Presença ou ausência de lama carbonática
 - a. *Muddy carbonates*: Carbonatos compostos essencialmente de micrita.
 - b. *Grainstones*: Carbonatos com ausência de lama carbonática, apenas aloquímicos e cimento espático. Caracteriza ambientes de alta energia, águas agitadas, sem presença de micrita.
- ii) Proporção de aloquímicos
 - a. *Mudstones*: Contém menos que 10% de aloquímicos. Corresponde aos calcilutitos, implica em deposição em ambiente de baixa energia e baixa produtividade de bioclastos
 - b. *Wackstone*: Presença de mais que 10% de aloquímicos, porém, ainda elevado volume de micrita. Caracterizam ambientes de baixa energia, porém, com produção de bioclastos, mais raramente outros aloquímicos.
 - c. *Packstone*: São descritos como carbonatos lamosos suportado por grãos.
- iii) Presença ou sinais de bioconstruções
 - a. *Boudstones*: designa rochas bioconstruídas ou edificadas por organismos sésseis *in situ*. Equivalente aos biolitos.
- iv) Ausência dos parâmetros anteriores
 - a. Carbonatos cristalinos: Rochas carbonáticas nas quais a textura original foi totalmente neomorfizada, recristalizada ou dolomitizada.

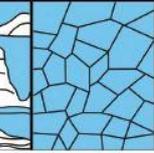
TEXTURA DEPOSICIONAL RECONHECÍVEL					Textura deposicional não-reconhecível
Componentes originais não-ligados durante a deposição			Componentes originais ligados durante a deposição		
Contém Matriz (Partículas tamanho argila/silte fino)			Sem matriz, grão-suportado		
Suportado pela matriz		O arcabouço é grão-suportado com matriz			
Menos de 10% de grãos	Mais de 10% de grãos				
<i>Mudstone</i>	<i>Wackstone</i>	<i>Packstone</i>	<i>Grainstone</i>	<i>Boundstone</i>	<i>Crystalline</i>
					

Figura 2.3 - Classificação de rochas carbonáticas segundo Dunham (1962). Retirado de Terra et al. (2010).

2.1.2.3 Classificação de Terra *et al.* (2010)

Classificação mais recente desenvolvida por pesquisadores da Petrobras S/A e colaboradores e que visa abranger todo o espectro de ocorrência de carbonatos nas bacias brasileiras. Surge como combinação de classificações clássicas adaptando e/ou modificando alguns termos. É dividida de acordo com os elementos que compõem a rocha e sua relação durante a formação da mesma. A classificação é apresentada em detalhe na Figura 2.4.

2.1.3 Feições diagenéticas de rochas carbonáticas

Representam as feições geradas após a deposição que, conduzem o sedimento inconsolidado a condição de rocha. Tais feições são importantes para compreensão da história e cenário de litificação. Para o caso de rochas carbonáticas, tais feições têm início de geração precoce, ainda no ambiente de sedimentação (e.g., Tucker & Wright 1990; Tucker & Dias-Brito 2017).

2.1.3.1 Cimentação

Compreende importante processo diagenético que ocorre mediante a significativa taxa de transferência do elemento do fluido saturado para a fase cimento. A mineralogia do cimento é expressão da química do fluido presente nos poros e sua caracterização compreende o tamanho, o hábito, a forma, e a textura (Tucker & Dias-Brito 2017).

Tabela 1

Classificação de Rochas Carbonáticas Aplicável às Bacias Sedimentares Brasileiras								
NOMENCLATURA PRINCIPAL	TEXTURA	DEFINIÇÃO	NOMENCLATURA COMPLEMENTAR	REFERÊNCIA OU MODIFICADO DE	TERMINOS CORRELATOS	TEXTURAS MODIFICADORAS	TAMANHO MÉDIO DOS ELEMENTOS EM CORTE EMPACOTAMENTO	FORMA EXTERNA (resumo de texturas)
Elementos não ligados durante a formação								
MUDSTONE		Rocha suportada pela matriz com menos de 10% de grãos (tamanho areia ou maior).	COM (Caso ocorram grãos) oolitos, oncolitos, peloides, peloides BIRDS-EYES, rocha suportada pela matriz com percentagem areal ou lentes de calcita espaciais.	Dunham (1962)	Calchilito, Disintegrilo, inusão e arceyes.			
WACKESTONE		Rocha suportada pela matriz com mais de 10% de grãos (tamanho areia ou maior).	COM para os grãos - oolitos, oncolitos, peloides, peloides fecais, intraclastos, bioclastos, esferulitos.	Dunham (1962)				
PACKSTONE		Rocha suportada pelos grãos com matriz.	"*" (composição principal): oolico, oncolítico, peloidal, peloidal fecal, intraclastico, bioclastico, esferulítico, com fragmentos de estronmatolitos, trombolitos, laminitos, leilido, dendrolito.	Dunham (1962)	Calcarenito, oomolito, biomolito, pelmicrito, intramicrito, oolospático, bioclasto, peloclasto, bioclasto, peloclasto, intraclasto.			
GRAINSTONE		Rocha suportada pelos grãos, sem matriz (< 5% de matriz).	COM para os grãos - oolitos, oncolitos, peloides, peloides fecais, intraclastos, laminitos, leilido, dendrolito.	Dunham (1962)				
FLOATSTONE		Rocha suportada pela matriz com mais de 10% dos grãos maiores que 2 mm.	COM para os grãos - oolitos, oncolitos, peloides, peloides fecais, intraclastos, bioclastos, esferulitos. Com fragmentos de estronmatolitos, trombolitos, laminitos, leilido, dendrolito.	Embry&Klwan (1971)				
RUDESTONE		Rocha suportada pelos grãos com mais de 10% dos grãos maiores que 2 mm.	fecal, intraclastico, bioclastico, esferulítico, com fragmentos de estronmatolito, trombolito, laminito, leilido, dendrolito, esferulito.	Embry e Klwan (1971)	Brecha			
BIOACUMULADO		Rocha constituída pela dominância de um tipo de organismo sem retabulamento (in situ) e granulometria areia ou maior.	"*" organismo formador: ex. ostracodes, bivalvos, macroforaminíferos, crinóides, etc....	Carozzi (1972)				
BRECHA		Rocha suportada pelos grãos com mais de 50% dos grãos angulosos maiores que 2 mm.	"*" (composição principal): intraclastica, com fragmentos de estronmatolito, trombolito, laminito, leilido, dendrolito, esferulito.	Flügel (2004); Penigonn (1967)	Brecha de Colapso, Brecha, Rudstone com clastos angulosos			
Elementos ligados durante a formação - in situ								
BOUNDSTONE		Rocha formada in situ, cujos componentes da trama original (fábria original) foram ligados durante a deposição.	"*" principais organismos formadores: ex. coralgai, a nudistas, a estronmatoporidaes, etc...	Dunham (1962)	Brallito, Barbastone, Brudstone, Framestone			
ESTROMATOLITO								
ESTROMATOLITO ARBORESCENTE								
ESTROMATOLITO ARBUSTIFORME								
ESTROMATOLITO DENDRIFORME								
TROMBOLITO								
DENDROLITO								
LEOLITO								
ESFERULITTO								
TRAVERTINO & (TUFA)								
Elementos ligados durante a formação - in situ								
LAMINITO								
CALCÁRIO CRISTALINO								
DOLOMITO								
Elementos não ligados durante a formação								
LAMINITO								
CALCÁRIO CRISTALINO								
DOLOMITO								

Figura 2.4 - Classificação de rochas carbonáticas segundo Terra (2010).

O tamanho dos cristais formados durante a fase de cimentação é associado a disponibilidade de elementos químicos que compõe os fluidos saturados. A mineralogia do cimento controla sua forma e seu hábito. A forma pode ser equidimensional ou fibrosa e o hábito variado.

A textura ou fábrica dos cimentos carbonáticos se enquadra em duas grandes categorias. A primeira abrange aqueles que tendem a contornar a superfície dos poros, esses são relativamente precoces, enquanto a segunda tende a preencher completamente os poros. Os cimentos da segunda categoria têm aspectos em forma de mosaico, gerados em crescimento competitivo (Iglesias 2007).

2.1.3.2 Compactação

A compactação ocorre devido à sobrecarga da coluna de rocha (e sedimentos) durante o soterramento dos depósitos carbonáticos. Este processo pode ser dividido em duas categorias: uma mecânica e outra físico-química.

A compactação mecânica produz empacotamento mais apertado dos grãos, redução dos poros, fraturamento e eventualmente dissolução de grãos em suas linhas de contato e redução de espessura de sedimentos lamosos (Tucker & Dias-Brito 2017). Por sua vez, a compactação química resulta na formação de estilólitos e linhas de dissolução, ocorrem quando a espessura do pacote sedimentares atinge escala quilométricas (Tucker & Dias-Brito 2017).

2.1.3.3 Dissolução

A dissolução de rochas carbonáticas é o principal fenômeno responsável pela geração da porosidade secundária. Esse processo pode ocorrer durante qualquer tempo na história dessas rochas e se dá quando qualquer um dos elementos que a compõe entra em contato com fluido solvente de elementos químicos da rocha (Tucker & Dias-Brito 2017). Os principais fatores que controlam a dissolução são as propriedades dos fluidos de formação, incluindo a temperatura, pH, eH e saturação. São esses mesmos fluidos gerados na dissolução responsáveis pela formação do cimento, neomorfismo e substituição.

2.1.3.4 Neomorfismo

O processo de neomorfismo (Folk 1959 *apud* Iglesias 2007), compreende um processo de desocupação mineral contemporâneo a precipitação de um mineral polimorfo (Bathrust 1986 *apud* Iglesias 2007). Pode ser dividido em neomorfismo agradacional que deriva da dissolução ou

degradacional devido a ação de microrganismos (Bathrust 1986 *apud* Iglesias 2007), em neomorfismo degradacional ocorre a desagregação de um cristal em um agregado dos mesmos, e é chamado de micritização, geralmente localizado nas bordas dos grãos, podendo evoluir para grãos totalmente micritizados (Scholle 1978 2003; Tucker & Wright 1990; Tonnieto 2010).

Segundo Tucker (2017), cristais gerados por neomorfismo possuem as seguintes características: i) contatos irregulares ou curvos com embainhamentos, ii) distribuição de cristais de forma irregular com manchas em desenvolvimento de mosaico grosso ou iii) presença de grãos esqueléticos flutuando em micrita, que resulta na formação de matriz neomorfizada.

2.1.3.5 Substituição

Compreende processos nos quais um mineral é substituído por outro de composição química diferente (Tucker & Dias-Brito 2017). O processo recebe diferentes nomes a partir da classe mineral que o substitui. Os principais são dolomitização e silicificação, embora a fosfatização também ocorra de forma mais restrita.

A dolomitização, termo que designa a substituição de calcita em dolomita. É um processo amplamente discutido na petrologia de carbonatos. Os modelos mais aceitos são a dolomitização de refluxo por infiltração proposto por Adams & Rhodes (1960) e o de zona de mistura proposto por Moore (1989) (Iglesias 2007).

O modelo de refluxo por infiltração associa o processo de dolomitização ao ambiente de sedimentação restrito com altos índices de evaporação. Este seria responsável pelo caráter altamente alcalino da água, que não precipita dolomita devido à complexidade de sua estrutura cristalina, mas favoreceria a troca iônica entre Ca e Mg. Neste modelo, a dolomitização é associada a fase evaporítica.

O modelo de zona de mistura se dá em ambientes marinhos superficiais onde ocorra a mistura de água meteórica com água marinha saturada em íons. A dissolução seria expressa por um fluido insaturado em Ca e saturado em Mg, resultando na troca iônica.

A silicificação é observada principalmente na forma de substituição de grãos fósseis. Ocorre a partir de fluidos meteóricos, geralmente saturados em sílica, que permeiam a rocha. O fenômeno também pode formar cimento (Tucker & Dias-Brito 2017).

2.1.4 Sedimentação de rochas carbonáticas e fatores controladores

O sedimento carbonático tem múltiplas origens e pode ser associado a três fontes principais sendo elas, bioquímica, química ou física (Iglesias 2007).

Sedimentos carbonáticos de origem bioquímica ocorrem a partir da ação de organismos bioconstrutores e rejeitos de atividades orgânicas. Sedimentos de origem química, ocorre a partir de precipitação de minerais. Sedimentos de fontes físicas ocorre por meio de mecanismos de abrasão de sedimentos carbonáticos preexistentes (Iglesias 2007).

A sedimentação carbonática é controlada essencialmente pela tectônica e clima (Paixão 2014). A tectônica responde pelo cenário em que essas serão depositados e, conseqüentemente, o regime deposicional. Ela também exerce influência na batimetria global. O clima condiciona a circulação das águas, a temperatura, a salinidade, o suprimento de nutrientes, a turbulência, as tempestades, as forças das correntes de marés e a ação de ondas. A sedimentação dos carbonatos tem preferência por latitudes em uma variação de 30° da linha do equador, em águas rasas e quentes (Paixão 2014).

Neste tópico serão apresentados os principais sistemas deposicionais de formação dos carbonatos. Sistema deposicional pode ser representado como uma entidade geográfica natural a qual se acumula sedimento, esses são caracterizados por um conjunto de parâmetros físicos, biológicos e químicos (Paixão, 2014).

2.1.4.1 Ambientes De Sedimentação Marinhos

Um sistema carbonático marinho pode se desenvolver em distintas plataformas carbonáticas e associadas a diferentes tipos de ambientes de sedimentação (Reading 1978). Os tipos de plataformas e alguns ambientes de sedimentação comuns são descritos abaixo.

2.1.4.1.1 Planícies De Maré

Região localizada entre a área continental em constante exposição, influenciada por marés sizíguas e a região abaixo do nível de maré baixa, permanentemente submerso ainda influenciado por correntes de maré e marés de quadratura (Suguio 2003). Depósitos de planície de maré ocorrem em regiões protegidas das ações de ondas, essas sofrem influência das marés e ondas de tempestade. São marcadas pela sua bimodalidade que ocorre como expressão das correntes de maré bidirecionais (Favera 2001).

As planícies de maré, mediante a sua influência pela variação das marés pode ser subdividida em três zonas particulares: supramaré, intermaré e inframaré (Figura 2.5) (Shinn 1986 *apud* Iglesias 2007).

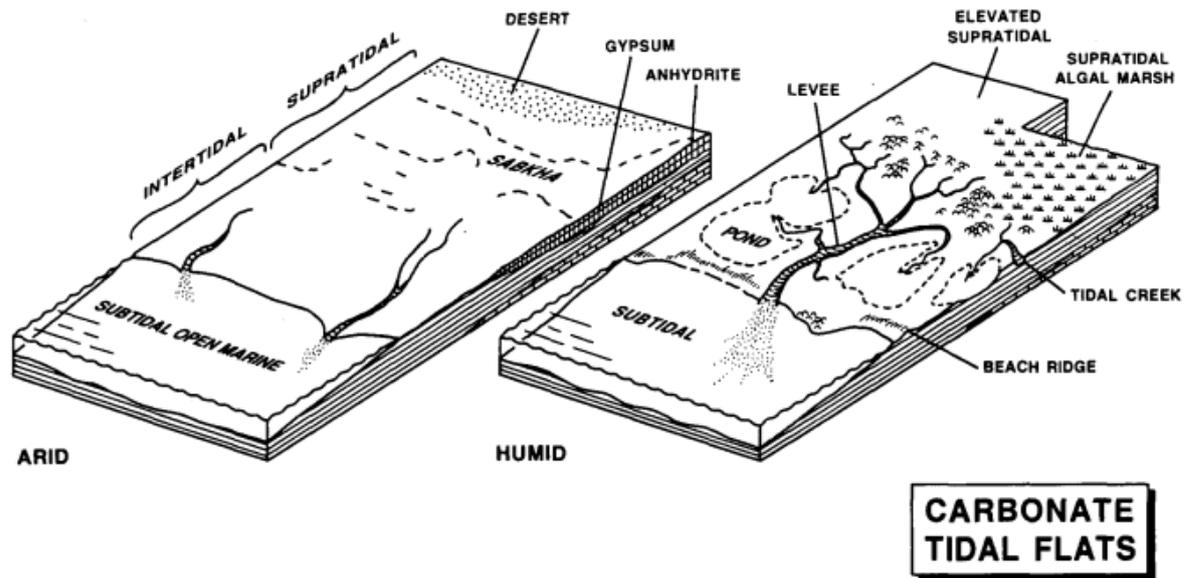


Figura 2.5- Sistemas deposicionais de planície de maré (Walker 1992)

A zona de supramaré, localiza-se acima do nível de maré alta comum. Nesta zona a influência de maré se faz apenas nos canais que drenam essa região em climas úmidos, em climas secos esses são inundados em marés sizíguas ou de tempestades. Shinn (1978 *apud* Iglesias 2007) caracteriza essa zona pelas seguintes estruturas: gretas de contração, laminação horizontal, cruzada acanalada (a depender do regime atuante), estruturas algais, porosidade vugular, porosidade fenestral, intraclastos e bioturbação (Iglesias 2007). Subordinado a esse ambiente ocorrem subambientes associados a canais de maré ou campos de dunas.

Os depósitos sedimentares formados nesse ambiente são representados por lamitos, ocasionalmente ocorrem lentes ou delgadas camadas de sedimento mais grosso, como expressão dos canais de maré, ou sedimentos transportados por tempestade respectivamente (Tucker & Dias-Brito 2017). O ambiente também é caracterizado por cimentação sinsedimentar que pode resultar em estruturas em *tepee*, intraclastos e calcretes. Dolomitização em mosaico grosso, minerais evaporíticos, normalmente preservados em pseudomorfos, crostas laminadas e pisoides vadosos também são típicos desse ambiente

A zona de intermaré localiza-se entre os níveis de marés normais, altas e baixas. O agente sedimentar predominante se expressa nas correntes bidirecionais de maré (Favera 2001). As principais estruturas e laminações diagnosticas são estratificações cruzadas de todos os tipos, incluindo espinha de peixe, superfícies de reativação, acamamentos planos, cicatrizes e canais (Tucker & Dias-Brito 2017). Subordinado a esse ambiente ocorrem barreiras, praias, e deltas de maré (Tucker & Dias-Brito 2017). As barreiras (*shoals*) são compostas essencialmente por areia carbonática e *grainstones* constituídos por oólitos e bioclastos maduros texturalmente, depositados sob alta energia, essas separam os ambientes de

intermaré e supramaré (Cruz 2012). Os bancos arenosos, que se expressam como ondulações e elevações do piso marinho, cortados por canais de maré, podem ser paralelos quando dominados por ondas, ou perpendiculares a linha de costa quando dominados por canais de maré (Tucker & Dias-Brito 2017). O transporte de areias para o talude frontal é um importante processo de progradação que pode resultar em uma unidade lamosa que engrossa para o topo (Figura 2.6), tais corpos arenosos compreendem importantes reservatórios de hidrocarbonetos, em virtude da sua seleção e baixa porcentagem de matriz (Tucker & Dias-Brito 2017)

HIGH ENERGY (BEACH)

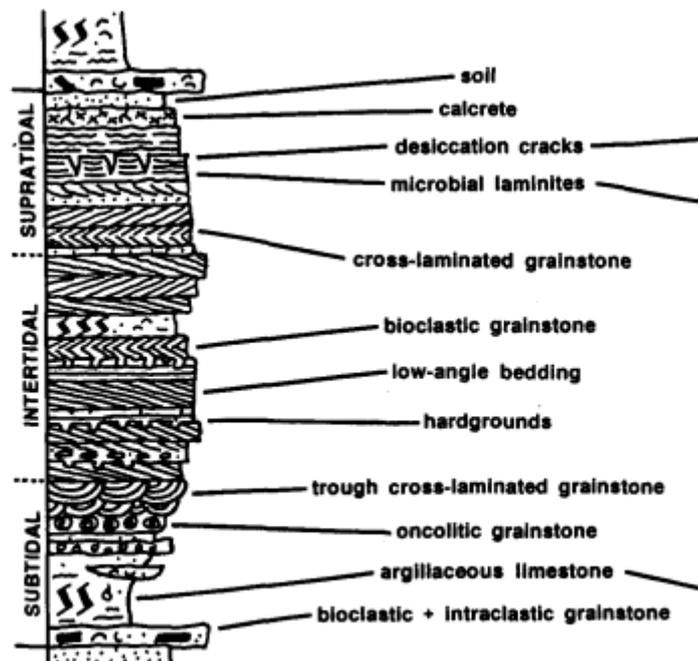


Figura 2.6 – Modelo de fácies de maré progradante de alta. Principais estruturas sedimentares e empilhamento de fácies (Walker 1992)

A região localizada abaixo do nível de maré normal baixa denomina-se zona de sub-maré. O ambiente apresenta registro fóssil limitado, porosidade vulgar, e laminações microbiana (Tucker & Dias-Brito 2007). Os sedimentos nesse ambiente são diretamente influenciados por ondas de tempestade. Compreendem sedimentos grossos com pouca matriz em regiões mais rasas, com profundidades próximas a base das ondas, evoluindo para sedimentos mais finos com menor influência de aloquímicos em profundidade, esporadicamente ocorrem níveis de brechas tempestísticas (Tucker & Dias-Brito 2017).

2.1.4.1.2 Plataformas carbonáticas

Descritas como extensas suções de calcários marinhos, formados em águas rasas, em superfície de baixo ângulo (Tucker & Dias-Brito 2017). Pode-se distinguir em cinco tipos de plataformas baseado em sua morfologia longitudinal, esses serão apresentados a seguir de baseado nas descrições de Tucker (2017). Comumente, estas plataformas podem se desenvolver sob a influência de maré e, portanto, conter registros de planícies de maré descritas anteriormente. Seguem abaixo.

Plataforma orlada, compreende rampas de águas rasas com quebra pronunciada em sua borda, resulta em talude proeminente a frente. A margem plataformal é composta por uma barreira de recifes e/ou bancos de areia bioclástica oolítica, dispostas transversalmente. A margem plataformal atua como ilha barreira formando extensos ambientes de pequena profundidade a montante, denominado laguna. A circulação de águas na laguna é restrita podendo gerar ambientes supersaturados de baixa energia.

As plataformas em rampa são superfícies extensas com inclinação menor ou igual que 1° nas quais as fases de areias carbonáticas de alta energia transicionam costa afora a fases micríticas de baixa energia e águas profundas. Não se formam recifes em barreiras, mas em manchas de recifes em pináculos na zona mais distal associados a montes de lama carbonática.

Plataformas extremamente extensas, totalmente planas associada a áreas cratônicas submersa por mares rasos são denominadas plataformas epicontinentais. Essas são limitadas por talude de inclinação variável ou barreiras recifais ou bancos de areia semelhantes as plataformas orladas. Podem desenvolver sub-bacias profundas limitadas por rampas internas ou margens barreiras. Internamente a plataforma ocorre sedimentação associada a ambientes de intermaré e inframaré.

Podem se desenvolver plataformas isoladas associado a águas rasas em alto mar limitada por taludes íngremes. Acumulam sedimentos carbonáticos puros, sem influência siliciclástica, controladas pelas direções dos ventos e tempestades.

Plataformas afogadas são aquelas pertencentes a qualquer uma das classes anteriores que foram submetidas a rápida transgressão marinha. Nesse contexto fases mais argilosas, de baixa energia, se depositam acima de sedimentos de alta energia.

2.1.4.1.3 Recifes

Comum em muitas formações carbonáticas, os recifes são corpos carbonáticos formados em pontos específicos de uma bacia, subordinados a elevação de seu piso. Tucker (2017) o descreve como construção carbonática com arcabouço estrutural bioconstruído por organismos resistentes a ondas.

O conceito de ecorecife, está associado a edificações formada por arcabouço resistente a ondas, construído por organismos sésseis. A presença do recife exerce um controle no ambiente adjacente, este

ambiente foi dividido em regiões de acordo com a localização do ecorecife, são essas: pós recife, planície recifal, crista recifal, frente do recife e talude pré recifal (Figura 2.7) (Tucker & Dias-Brito 2017).

Recifes podem ter diferente morfologia, essas foram descritas por Tucker (2017) como recifes em manchas, pequenos e de formato circular, recifes em pináculos, em geometria cônica, recife em barreira, que tem sua região pós recife dominada por lagunas, recife em franja, paralelo ao litoral e atol, que inclui uma laguna.

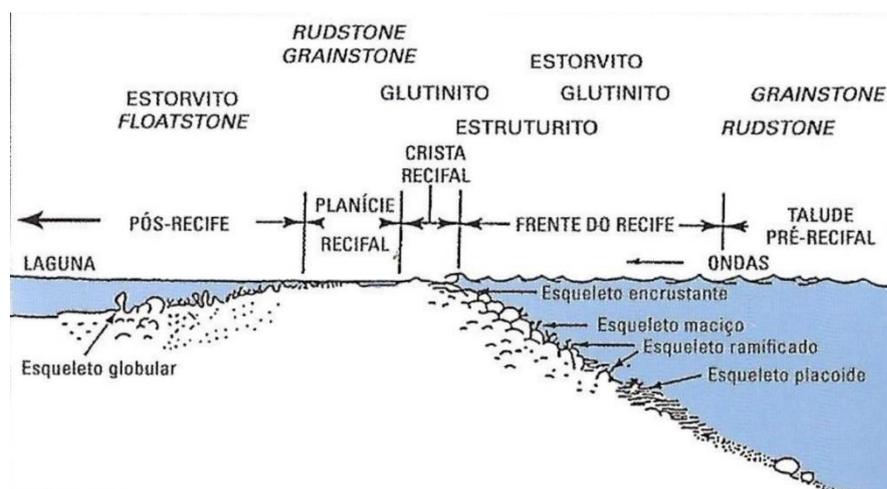


Figura 2.7- Diagrama esquemático mostrando os subambientes de um recife, tipos orgânicos e rochas calcárias associadas (Tucker & Dias-Brito 2017).

2.1.4.1.4 Periplataformas

Corresponde às áreas de uma bacia carbonática sob batimetria acima de 200m e severa restrição para o desenvolvimento de organismos bentônicos. Os sedimentos depositados nesse ambiente podem ter origem por meio de precipitação nos primeiros metros da coluna d'água ou transporte de sedimentos de bacos rasos, onde se tem produção de sedimentos por organismos bentônicos (Spadini 1992 *apud* Iglesias 2007). Os processos de transporte são identificados por Tucker (2017) como deslizamentos, escorregamentos e fluxo de grãos que ocorrem na área de talude de plataforma. A deposição por gravidade resulta em rochas de textura variável, formando brechas caóticas, mal selecionadas, com gradação inversa ou normal (Tucker & Dias-Brito 2017).

Bacias turbidíticas carbonáticas são alimentadas a partir de uma linha principal e formam depósitos interestratificados com folhelhos escuros esses apresentam marcas de sola, acamamento gradados e planos, bem como laminação cruzada (Tucker & Dias-Brito 2017).

2.1.4.2 Ambientes continentais de sedimentação carbonática

Carbonatos continentais correm em condições restritas, são agrupados por Tucker & Dias-Brito (2017) em travertinos e turfás, calcários lacustres e calcretes, e serão detalhados de acordo com tais autores a seguir.

Travertinos e tufas calcárias compreendem carbonatos de água doce. Os travertinos são formados em condições de água mineralizada por fontes termais enquanto as tufas são calcários friáveis formados em água de temperatura ambiente associado a atividade biológica, possuem resquílios de micro e macrófitas invertebrados e bactérias.

Os calcários lacustres podem ter origem na sedimentação inorgânica, algaica microbiana ou areias bioclásticas. Este ambiente pode produzir oóides de mineralogia variada a depender da saturação da água, aragonita, calcita e dolomita podem ser precipitadas. O ambiente atua da mesma forma que uma laguna marinha, podendo desenvolver “recifes” estromatólitos, banco de oóides, e oncólitos. A laminação rítmica é uma característica desse ambiente que pode ter caráter hidrológico aberto ou fechado. Em caso de lagunas fechadas essas podem ter caráter perene ou efêmero, o que reflete a sedimentação ali sucedida.

Os calcretes são formados em ambientes superficiais de exposição subaérea, em ambientes áridos onde a taxa de evaporação excede a de precipitação. Podem ocorrer em nódulos ou camadas contínuas. Apresentam estrutura maciça, laminada e pisolítica, vistas em microscópio petrográfico apresentam a característica marcante de um mosaico de calcita equigranular com pequenos grãos de quartzo dispersos.

2.1.5 Fácies sedimentares

O conceito de fácies introduzido por Selley (1970 *apud* Borghi 2000) diz respeito da porção de um corpo sedimentar que se diferencia das demais em função da sua litologia, geometria, estruturas sedimentares, trama, cores, fósseis e direções de paleocorrentes (Borghi 2000). As associações de fácies de um pacote rochoso englobam rochas com o mesmo contexto genético, que é interpretado a partir da “Lei de Sucessão Vertical de Fácies” proposto por Johannes Walther, que diz que uma sucessão vertical de sedimentos, antes foi disposta lateralmente (Borghi 2000).

Para rochas carbonáticas e evaporitos, a análise de fácies leva em conta suas peculiaridades. Em rochas carbonáticas, a composição dos sedimentos é fundamental na interpretação do sistema deposicional e a granulometria nem sempre está relacionada com o regime hidrodinâmico e setor (proximal distal) de deposição. Além disso, bacias carbonáticas são formadas e sustentadas por seus próprios sedimentos formados *in situ* e estes controlam o estilo espacial e tempo de acumulação de

sedimentos (Walker 1992). No caso dos evaporitos, a mineralogia reflete a química da água, a maioria dos sedimentos se desenvolvem *in situ*, em águas rasas ou ambientes pelágicos (Walker 1992).

Walker (1992) propõe os seguintes fatores no controle da distribuição de fácies carbonáticas e evaporíticas:

- Biologia dos organismos produtores de carbonato de cálcio
- Clima
- Oceanografia
- Penetração de Luz
- Circulação de Água
- Temperatura da Água
- Salinidade
- Tectônica

Miall (1999) propõe que o código de fácies seja feito levando em conta a litologia, a granulometria da rocha e a estrutura sedimentar. Sendo a primeira letra maiúscula para a litologia e as demais minúsculas. Contudo Walker (1992) propõe um código subjetivo a depender do objetivo do estudo, o mesmo ainda associa a análise de fácies ao estudo que infere processos deposicionais e ambientais responsáveis pela formação da rocha e associação de fácies como conjunto de fácies que ocorrem em determinado sistema.

O estudo petrográfico de rochas carbonáticas, com auxílio de lâminas delgadas quase sempre se faz necessário para interpretações de ambientes de deposição. Isto ocorre devido a caracterização ser feito com base em microfósseis e microestruturas, envolvendo alterações digenéticas que só podem ser observadas com auxílio de microscópio petrográfico (Tucker 2017). As microfácies, segundo Tucker (2017), refletem os ambientes deposicionais, as associações bióticas e os grãos não esqueléticos, contudo, para ter efetividade nas interpretações, é necessária uma amostragem sequencial orientada. As informações a serem reunidas para uma associação faciologica são: a textura da rocha, a composição qualitativa e quantitativa (aloquímicos, ortoquímicos e matriz), as estruturas deposicionais, e a trama digenética (natureza do cimento) (Tucker 2017)

Com base nesses padrões Wilson (2012) propõe 24 microfácies padrões que descrevem diversos sistemas deposicionais carbonáticos (Tabela 2.1). Tucker (2017) recomenda cuidado ao diagnosticar um ambiente baseado em uma única microfácies e recomenda a análise e associação dessas com o contexto em que estão inseridas e estruturas sedimentares presentes.

Tabela 2.1 - Tabela de microfácies padrão baseada em diferentes autores Modificada de Paixão (2014).

Microfácies	Litologias e Estruturas	Ambientes deposicionais
1	<p><i>Mudstones</i> ou <i>wackstones</i> argilosos, escuros, ricos em matéria orgânica e espículas de esponjas.</p> <p>Calcissiltitos espiculíticos, silicosos.</p> <p>Espículas geralmente orientadas, monoaxiais, ocasionalmente substituídas por calcita.</p>	<p>Ambiente de mar aberto ou bacia</p> <p>Águas profundas com pouca sedimentação e baixa energia.</p>
2	<p>Calcissiltitos micro-bioclásticos, <i>grainstones</i> e <i>packstones</i>, muito finos, contendo finos peloides e bioclastos.</p> <p>Comum conter estratificação cruzada de pequeno porte</p>	<p>Plataforma de mar aberto, próximo ao talude inferior.</p> <p>Margem profunda, distal da plataforma</p>
3	<p><i>Mudstones</i> e <i>wackstones</i> pelíticos.</p> <p>Matriz micrítica com presença de microfósseis pelíticos dispersos.</p> <p>Ocasionalmente pode ocorrer megafauna ou fragmentos de bivalves de conchas finas</p>	<p>Ambiente de mar aberto ou bacia.</p> <p>Plataforma de mar aberto, distal.</p> <p>Águas profundas pouca sedimentação e baixa energia</p> <p>Margem profunda de plataforma.</p>
4	<p>Microbrechas polimiticas ou oligmiticas ou <i>packstones</i> litoclasticos ou bioclásticos.</p> <p>Constituintes arredondados, frequentemente gradados.</p> <p>Constituídos normalmente por quartzo, sílex, intraclastos e extraclastos.</p>	<p>Deposito de talus frente ao talude.</p> <p>Depósitos carbonáticos ressedimentados</p>
5	<p><i>Grainstones</i>, <i>packstones</i>, <i>floatstones</i> com bioclastos de bioconstruções, ou fragmentos de biolitos ou <i>boundstones</i>.</p> <p>Comum a presença de estrutura geopetal (<i>half moon</i>, porosidade <i>shelf</i>)</p>	<p>Fácies de flanco de recife</p> <p>Ambiente de talus de recife</p>

6	Rudstones de bioconstruções, calcirruditos de bioconstruções ou de biolititos, sem matriz	Talude frontal de recife Bioclastos depositados em ambiente de alta energia
7	Blindstones. Subtipos de framestones, blindstones ou bafflestones	Recife de margem de plataforma
8	Wackstones com bioclastos variados. Assembleia fóssil bem preservada	Ambientes de plataformas ou lagunas abertas. Circulação de baixa energia, abaixo da ação de ondas normais
9	Wackstones, calcilitos com variedade de bioclastos e bioturbações	Ambiente de águas rasas com circulação próxima a ação das ondas.
10	Packstones ou Wackstones com bioclastos revestidos e desgastados	Inversão textural. Domínio de partículas de ambientes de alta energia transportados para ambientes de baixa energia.
11	Grainstones com bioclastos revestidos e imersos em cimento espático	Plataforma de alta energia com barras de areia carbonática
12	Coquinas, packstones de bioclastos ou rudstones de bioclastos. Predominância de determinado organismo	Taludes ou bordas de plataformas
13	Grainstones, calcarenito bioespático	Ambientes de águas rasas, com energia moderada a alta
14	Depósitos residuais, aloquímicos arredondados, grãos revestidos misturados a oóides e peloides. Podem ocorrer escurecidos com óxidos de ferro ou fosfato Presença de clastos e camadas delgadas	Acumulação lenta de material grosso em fluxo energético

15	Grainstones, calcarenitos oolíticos bem selecionados e bem compactados Presença de estratificações cruzadas	Ambientes de alta energia, com bancos oolíticos, barras de marés e praias de alta energia
16	Grainstones ou calcarenitos com peloides, pelotas fecais, localmente misturados com carapaças de ostracodes e testas de foraminíferos bentônicos	Ambientes de águas rasas e circulação razoável
17	Grainstones, calcarenitos de agregados, grapestones de peloides aglutinados ou isolados. Ocasionalmente grãos revestidos	Ambientes de plataforma com circulação restrita Planícies de maré
18	Grainstones ou calcarenitos ricos em foraminíferos	Barras de marés e canais de lagoas
19	Mudstones ou wackstones, calcilitos com textura fenestral, gradando ocasionalmente. Presença de ostracodes, peloides, esporadicamente, foraminíferos bentônicos, gastrópodes e algas verdes	Ambientes de baías restritas e lagoas
20	Estromatólitos ou microbialitos	Zonas de intermaré
21	Spongostrome mudstone, textura microbiótica em micrita e calcilitos	Zona de bancos de maré
22	Calcilito com oncóides bem desenvolvidos, wackstones ou floatstones	Ambientes de baixa energia, águas rasas nos pós recife Ocorrem na borda dos canais ou lagoas, planícies de inundação
23	Calcissilitos com ausência de fosseis, homogêneo não laminado, ocasionalmente ocorrem minerais evaporíticos	Lagos hipersalinos de marés Sabkhas
24	Rudstones ou floatstones com bioclastos e intraclastos constituídos por micrita na ausência de fosseis. Podem ocorrer imbricados ou com estratificação cruzada, sustentado pela matriz	Depósitos de canais de marés.

2.2 HIDROGEOLOGIA DE MEIOS CÁRSTICOS-FISSURAIS

Designa-se como um sistema de aquífero cárstico-fissural aqueles em que a circulação da água ocorre via fissuras presentes nas rochas e a dissolução atua resultando em grandes aberturas (Ferreira *et al.* 2007). Tais aquíferos são comumente associados ao escoamento de água subterrâneo, inclusive em climas úmidos, sendo marcados pela presença de cavidades em subsuperfície, baixas taxas de escoamento superficial associada a altas taxas de infiltração, circulação complexa de água com variação na direção de fluxo, coeficientes de armazenamento e transmissividade variados (Feitosa *et al.* 2008).

Em termos teóricos, os aquíferos cárstico-fissurais são controlados pela litologia, clima e estruturas da rocha (Diniz Filho 2008). Estes controlam a denominada carstificação, na qual o mecanismo básico é a dissolução pela água de uma rocha carbonática (Feitosa *et al.* 2008).

A litologia e estruturas primárias e secundárias determinam a suscetibilidade a dissolução da rocha e, em rochas carbonáticas, águas ácidas favorecem o ataque químico e a geração de porosidade (Diniz Filho 2008). O arcabouço estratigráfico da rocha é um fator influente na “cársticabilidade” do maciço, sendo que rochas mais porosas, bem selecionadas, com pouca matriz são mais favorecidas a dissolução e desenvolvimento de porosidade secundária. Uma vez infiltrada, a água dissolve a calcita se enriquece em Ca e prossegue circulando pelo aquífero, de maneira que a taxa de erosão por dissolução é proporcional a descarga na saída (Diniz Filho 2008).

As estruturas controladoras da circulação compreendem fraturas, falhas, planos de acamamento e estratificações (Diniz Filho 2008). Tais anisotropias otimizam o processo de dissolução da rocha aumentando a área de contato do solvente com o maciço (Diniz Filho 2008). Planos abertos, profundos, não preenchidos e pouco rugosos favorecem a condutividade hidráulica e o desenvolvimento do cárste (Singhal & Gupta 2010).

A evolução desses sistemas está concatenada ao fluxo de águas subterrâneas. Em um estágio tardio, a erosão química dilata os condutos conforme o fluxo subterrâneo transporta o material dissolvido. Tal processo acarreta o rebaixamento do nível d’água conectando os condutos (Figura 2.8) (Diniz Filho 2008).

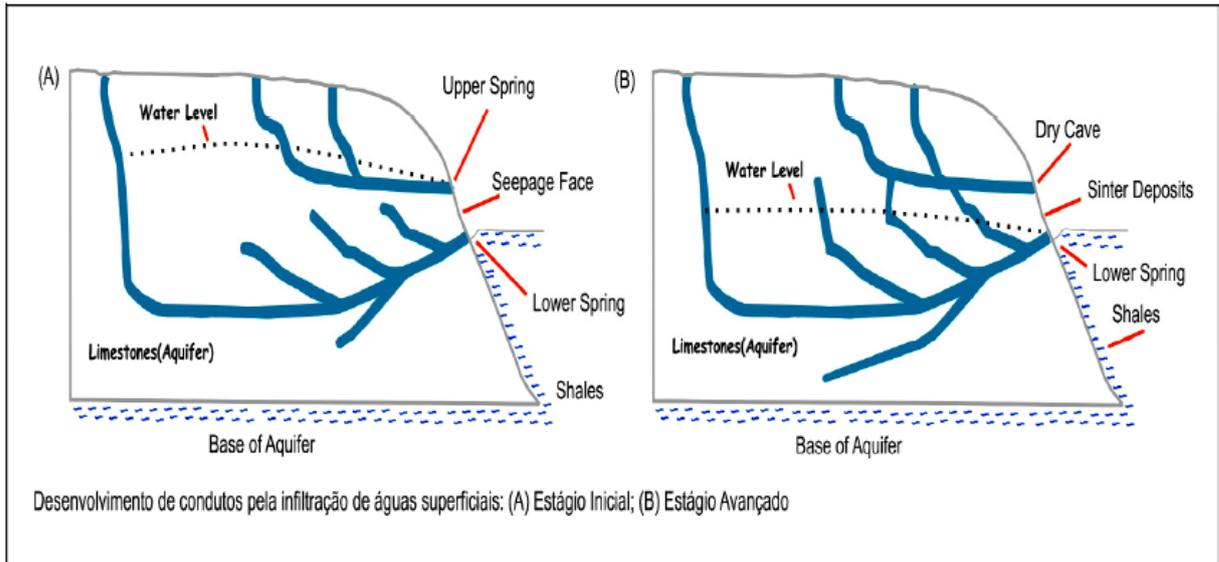


Figura 2.8 - Desenvolvimento de aquíferos cársticos. Reproduzido de Diniz Filho (2008).

2.3 CONTEXTUALIZAÇÃO GEOLÓGICA BACIA DO SÃO FRANCISCO

Classificada como uma bacia intracratônica policíclica, a Bacia do São Francisco registra múltiplos episódios de acumulação sedimentar ocorridos no interior do cráton de mesmo nome posteriores a 1,8 Ga (Alkmim & Martins-Neto 2001; Zalan & Romeiro Silva 2007; Reis et al. 2017). Segundo Alkmim e Martins-Neto (2001), os limites da bacia coincidem em sua maioria com os limites do cráton, marcados a leste pela Faixa Araçuai, a oeste pela Faixa Brasília, e a noroeste pela Faixa Rio Preto. Os limites sul e nordeste são marcados respectivamente pelas exposições de rochas do embasamento e pela zona de deformação intracratônica Corredor do Paramirim (Figura 2.9).

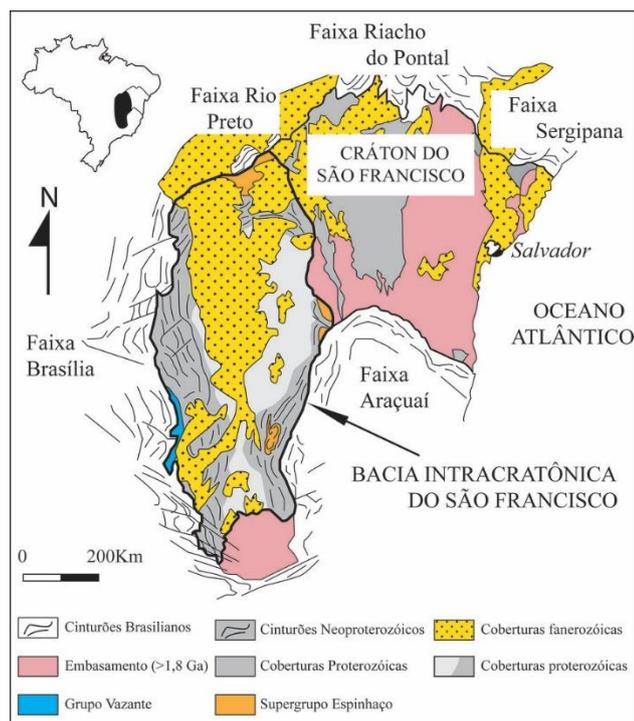


Figura 2.9 – Mapa geológico simplificado da Bacia do São Francisco e seus limites. Baseado em Alkmim & Martins-Neto e retirado de Tonietto (2010).

A Bacia do São Francisco engloba como principais unidades de preenchimento três sequências pré-cambrianas de primeira ordem: *i*) Sequência Paranoá-Espinhaço Superior, mesoproterozóico superior a neoproterozóico inferior; *ii*) Sequência Macaúbas, neoproterozóico; e *iii*) Sequência Bambuí ediacarano-cambriano. Estas unidades são afetadas por cinturões de falhas e dobras nas margens leste e oeste da bacia, os quais se desenvolveram ao final do Neoproterozoico durante o Ciclo Brasileiro (Reis et al. 2017). Sobrepostas às unidades pré-cambrianas ocorrem outras unidades fanerozóicas (*i.e.* Grupo Santa Fé, permo-carbonífero, e grupos cretáceos Areado, Mata da Corda e Urucuia) (Alkmim & Martins-Neto 2001; Reis & Suss 2016; Reis et al. 2017).

Foco deste trabalho, a Formação Lagoa do Jacaré é parte da porção intermediária a superior do Grupo Bambuí (Dardenne 1981). O grupo corresponde a principal unidade aflorante na Bacia do São Francisco e é detalhadamente descrito a seguir.

2.3.1 Grupo Bambuí

O Grupo Bambuí compreende uma espessa sucessão mista de rochas carbonáticas e siliciclásticas de idade ediacarana-cambriana depositada em ambiente plataformar marinho raso, epicontinental (Costa & Branco 1961; Dardenne 1978 1981; Warren et al. 2014; Paula-Santos et al. 2015; Reis et al. 2017a; Uhlein et al. 2016 2017; Tavares et al 2019). Conforme Alkmim & Martins-

Neto (2001), Reis et al. (2017), Caetano-Filho et al. (2019) e Kuchenbecker et al. (2020), o grupo corresponde ao registro de uma bacia de antepaís desenvolvida entre o Ediacarano e o Cambriano, contemporaneamente as faixas Brasília e Araçuai. (Figura 2.10)

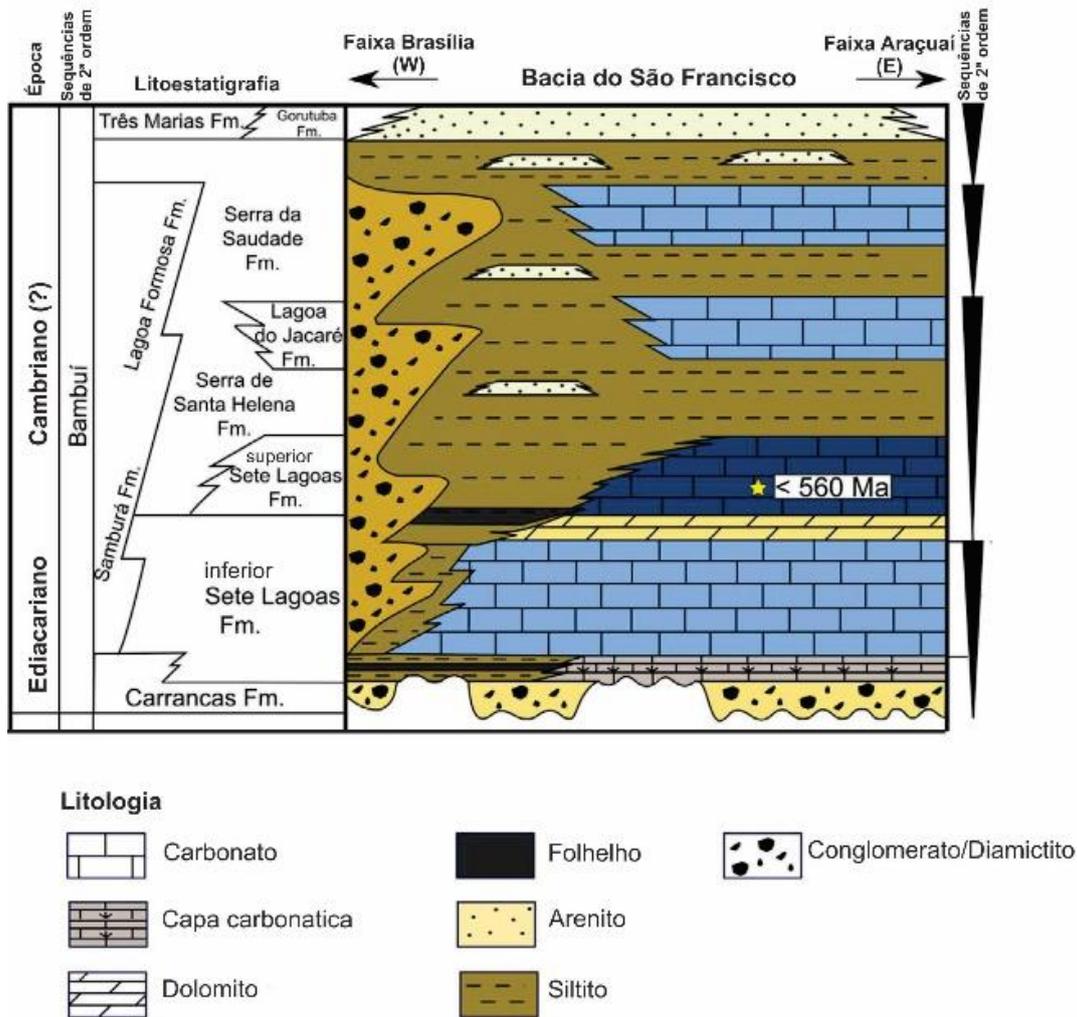


Figura 2.10 - - Estratigrafia do Grupo Bambuí modificado de Caetano Filho (2019).

Dardenne (1978) e Dardenne (1980) dividem o grupo em cinco formações principais, da base para o topo: Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade e Três Marias (Tabela 2.2) (Figura 2.10). Estas formações recobrem depósitos siliciclásticos grossos que são agrupados por alguns autores na Formação Carrancas. Enquanto a porção mista siliciclastica-carbonática inferior do Grupo Bambuí é interpretada como uma sucessão marinha, as unidades de topo incluem depósitos pelíticos, arenosos e arciosianos formados em plataformas dominadas por tempestades (Chiavegatto 1992). A porção leste da Bacia do São Francisco, conglomerados associados a arenitos grosseiros expostos localmente marcam ambientes marinhos a continentais cambrianos (Tavares et al. 2019) (Tabela 2.2)

Tabela 2.2 - Divisão litoestratigráfica do Grupo Bambuí, baseado em Dardenne (1978a 1979 1981 *apud* Iglesias 2007) (Modificada de Iglesias 2007).

	Formação	Características litológicas	Ambiente de sedimentação
GRUPO BAMBUI	Três Marias	Siltitos, arenitos e arcoseos cinza a verde-escuros.	Ambiente fluvial. Ambiente marinho a sublitorâneo, alternante. Ambiente marinho litorâneo, agitado, submetido a influência de ondas e correntes de maré; exposição subaérea temporária, frequente na zona de intermarés.
	Serra da Saudade	Folhelhos, argilitos e siltitos verdes, com lentes de calcário subordinado.	
	Lagoa do Jacaré	Calcários oolíticos e pisolíticos, cinza escuros, fétidos, siltitos e margas.	Ambiente marinho litorâneo, agitado, submetido a influência das ondas e correntes de maré.
	Serra de Santa Helena	Folhelhos e siltitos cinza a cinza esverdeados.	
	Sete Lagoas	Calcários dolomíticos e calcários microcristalinos finamente laminados, de cor cinza. Dolomitos bege litográficos, laminados com intraclastos, oólitos e estromatólitos colunares	Ambiente marinho sublitorâneo, abaixo do nível de base das ondas e correntes de maré, profundidade moderada.

Alguns autores inserem na base do Grupo Bambuí a Formação Carrancas (Costa & Branco 1961 *apud* Reis 2011), cujas principais exposições ocorrem na região de Sete Lagoas (MG). Na região, a formação é caracterizada por conglomerados fluviais polimíctos com presença de lentes de arenitos (Reis 2011). Outros autores consideram esta formação como o registro glacial do Ediacarano médio a tardio, uma vez que podem conter feições glaciogênicas e são invariavelmente cobertas por carbonatos de capa da Formação Sete Lagoas (e.g., Reis & Suss 2016; Caetano-Filho et al. 2019).

A Formação Sete Lagoas compreende rochas expostas principalmente na região da cidade homônima, sendo constituídas por uma sucessão carbonática de idade ediacarana tardia (Dardenne 1978 1981; Warren *et al.* 2014; Paula-Santos *et al.* 2015). Essa formação caracteriza um ambiente marinho que sucedeu uma transgressão marinha a qual afoga as rochas da Formação Jequitaiá (Iglesias & Uhlein 2009). Iglesias (2009) associa a variação de espessura da Formação Sete Lagoas com a significativa subsidência do embasamento, e a divide em sete fácies, interpretadas como depositadas em plataformas carbonáticas em contexto extensional.

As rochas dessa unidade foram descritas na região do vale do rio São Francisco, da base para o topo, como dolomitos, de cor rosa pálido, laminados alternados com margas, posteriormente calcários argilosos, alternando com calcários dolomíticos. Acima desses ocorrem calcários escuros, finos, bem estratificados, posteriormente brechas intraformacionais lamelares, que estão na base de um pacote

dolomítico, que se inicia com fácies heterolíticas entre calcário e dolomito seguindo para dolomito róseo com estratificação cruzada pontual. Ao topo, ocorre um espesso pacote de dolomito finamente laminado ocasionalmente estromatolítico e brechado (Iglesias & Uhlein 2009).

Vieira (2016) interpreta a sequência como depositada em rampas carbonáticas dominadas por tempestade, arranjada em dois ciclos retrogradacionais-progradacionais, que registram a interação entre subsidência, isostasia, e aporte sedimentar em tratos transgressivos. Iglesias (2007) interpreta o primeiro ciclo como correspondente a fase inicial da incursão marinha no continente, ainda com influência de sedimentação siliciclástica, enquanto o segundo representa a fase marinha onde a sedimentação terrígena não seria tão significativa sobre a carbonática.

Sobrepondo a Formação Sete Lagoas em contato concordante gradacional (Iglesias 2007), por meio do aumento gradual de frações pelíticas, ocorre a Formação Serra de Santa Helena. Representada por pacotes de rochas siliciclásticas finas, intercalados com porções magosas (Lima 2011) e calcarenitos finos que atingem espessuras métricas. As rochas dessa formação possuem exposição significativa na porção sudeste da bacia do São Francisco, compondo a base das serras do Sabonetal, Bom Sucesso, São Francisco bem como das serras na região de Manga, Nhadutiba e Montalvânia (Iglesias 2007).

Uhlein *et al.* (2019) descreve tal formação como ritimitos, microbialitos e margas com pirita euédrica na base, ascendendo para arenitos finos de matriz feldspática em acamamento heterolítico, em alguns níveis são encontrados folhelhos com gretas de contração, seguidos por ritimitos escuros com raras intercalações de margas e microbialitos

Iglesias (2007) interpreta a Formação Serra de Santa Helena como expressão do afogamento gradual da plataforma carbonática na qual se deposita a Formação Sete Lagoas. Pode ser integrada em três grandes ciclos (Uhlein *et al.* 2019). O primeiro com a deposição dos ritimitos, finamente laminados, que expressam o início de um intervalo transgressivo, seguido de um ciclo progradante com ocasional exposição subaérea, marcados pelos folhelhos com gretas de contração, estes são sobrepostos por ritimitos escuros com laminações plano paralelas marcando ambiente profundo, abaixo do nível de base das ondas (Lima 2011), em regime transgressivo.

A Formação Lagoa do Jacaré (Branco & Costa 1961), predominam largamente na porção oriental da Bacia Bambuí. A mesma ocorre em contato gradacional com a Formação Serra de Sta. Helena, que se expressa com a ocorrência de lentes de calcário negro em meio aos pelitos típicos da unidade prévia (Iglesias 2007).

Caracteriza-se pela alternância de calcários oolíticos e pisolíticos, de cor cinza escuro, fétidos, cristalinos, lenticulares e alternados com silito e margas (Dardenne 1978). Iglesias (2007) interpreta o ambiente como de sedimentação regressiva em plataforma carbonática de alta energia, sujeita a intenso retrabalhamento e episódios de tempestade, intercalados com períodos de calmaria.

Uhlein *et al.* (2019) a desmembra em duas grandes sucessões, a inferior essencialmente carbonática e a superior que mista sedimentos carbonáticos e siliciclásticos. A inferior é descrita, por tal autor, como calcarenitos dotados de estrutura hummocky, alternados com calcilitos, amiúde contendo gretas de sinérese, que precedem calcirruditos. O topo da sucessão é caracterizado por intercalações entre folhelhos pelíticos e ritimitos carbonáticos. A primeira sucessão é interpretada como depositada em águas rasas em um intervalo regressivo, e a segunda marca um afogamento das litologias anteriores em intervalo transgressivo (Uhlein 2019).

Sobrepondo a Formação Lagoa do Jacaré, em contato concordante gradacional (Iglesias 2007), ocorre a Formação Serra da Saudade (Dardenne 1978). A unidade, predominantemente pelítica, têm exposições tipo nas proximidades da Serra de São Domingos (Formoso - MG) e Serra do Jaíba (Verdelândia – MG), aflora também próximo a drenagem nas cidades de Verdelândia, e Campo Azul (Dardenne 1978, Iglesias 2007). Estima-se que as rochas da Formação Serra da Saudade tenham idade ediacaranas, com zircões mais jovens datados em 612 M.a (Rodrigues 2008; Lima 2011; Rossi et al. 2019).

Foram descritas por Dardenne (1978 1981) como folhelhos e argilitos verdes que passam progressivamente a siltito feldspáticos ou arcosianos em direção ao topo. Iglesias (2007) associa sua deposição a uma transgressão marinha, evoluindo para ambientes profundos, expressos em uma sucessão de siltitos, siltito argilosos e folhelhos esverdeados, finamente laminados. Lima (2016) a separa em cinco fácies, sendo essas ritmito pelito arenoso, carbonatos retrabalhados, ritmito areno-pelítico verde (verdete), arenito fino com hummocky e ritmito fosfático.

As estruturas observadas são associadas a influência de correntes de turbidez e episódios de tempestade em sedimentação profunda (Uhlein 2004 *apud* Iglesias 2007). Durante o episódio de transgressão marinha que origina a fm. Serra da Saudade são observados níveis de MISS (Kinneyia-type; Porada 2008, *apud* Uhlein 2019), sotopostos a episódios de alternâncias entre a razão areia/argila, caracterizando intervalos regressivos culminando na deposição biogênica de carbonatos (Uhlein 2019).

Ao topo do Grupo Bambuí ocorre a Formação Três Marias, correspondendo a fase final de sedimentação da Bacia Bambuí. Sua sedimentação ocorreu durante o cambriano, e a população de zircão mais jovens é datada em c. 527Ma (Tavares et al. 2019). Aflora principalmente em áreas na porção centro-ocidental da bacia, ocorrendo ainda em áreas relativamente pequenas da sua porção leste, especificamente, na região de Buenópolis, e das serras da Jaíba e Gorotubá no norte de Minas Gerais (Chiavegatto 1992; Kuchenbecker et al. 2016; Rossi et al. 2019; Tavares et al. 2019).

As rochas dessa formação ocorrem em contato erosivo discordante com a fm. Serra da Saudade (Kuchenbecker 2016, *apud* Uhlein 2019). São descritas por Dardenne (1978) como siltitos e arenitos arcoseos. Na região da Serra do Jaíba foram representados como brechas compostas de bioclastos

posicionadas na base, sobrepostas por arenitos arcoseanos com estratificações cruzada de baixo ângulo evoluindo a laminações tabulares no topo, pontualmente ocorrem laminações onduladas, e finas lentes de brechas tais quais a da base (Uhlein 2019). Lima (2016) ainda os divide em duas fácies, uma composta de arenitos amalgamados com hummocky e outra com siltito de laminações plano paralelas na região da Serra do Palmital.

A sedimentação desta unidade é interpretada em contexto de significativa regressão, onde se dá em ambiente litorâneo sob ação de ondas de tempestade, evidenciado pelas estruturas em hummocky, evoluindo para ambiente continental transicional expresso em estratificações cruzadas acanaladas sigmoidais (Chiavegatto 2003). Estudos petrográfico realizados por Gomes (1988) e Tavares (2019) demonstraram que os arenitos da Formação Três Marias podem ser classificados como arcoseos e subarcósio submaturos, o que sugere rápida sedimentação e proximidade da área fonte. Tais autores propõem uma evolução digenética em que os processos digenéticos se deram desde o começo da eodiagenese, ocorridos imediatamente abaixo ou na superfície de deposição, persistindo até às condições de mesodiagenese tardia, durante o soterramento efetivo. Estimando que a pilha sedimentar da Formação Três Marias possa ter atingido profundidades da ordem de até três quilômetros, antes destas rochas serem soerguidas e/ou exumadas, e novamente reexpostas a superfície de erosão, experimentando condições telodigenéticas.

2.3.2 Geologia Local

2.3.2.1 Aspectos Fisiográficos e Geomorfologia

Situada na porção extremo norte do estado de Minas Gerais (Figura 1), a área de estudo está inserida no contexto de uma região de clima sub-úmida a seco e dentro da faixa transicional entre os biomas da Caatinga e do Cerrado (Barros 2013).

A geomorfologia pode ser dividida em dois grandes domínios: i) o das chapadas, representado por platôs suavemente ondulados sustentados por arenitos cretáceos, e ii) o dissecado, que ocorre nos vales com escarpas carbonáticas e terraços aluvionares (Kuchenbecker *et al.* 2014; Romano *et al.* 2015). Nas escarpas e nos cânions onde aflora calcários, se desenvolvem feições carsticas, como dolinas, lapiás e pequenas cavidades associada as rochas carbonáticas do Grupo Bambuí (Kuchenbecker *et al.* 2014).

2.3.2.2 Estratigrafia

Na região norte de Minas Gerais, onde se insere a área de estudo, afloram as rochas dos grupos Bambuí e Areado, bem como sedimentos recentes (Kuchenbecker *et al.*, 2014; Romano *et al.*, 2015). As unidades do Grupo Bambuí aflorantes neste setor do estado englobam as formações Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré e Serra da Saudade. Estas são compostas, em suma, por rochas

carbonáticas e pelíticas de idade ediacarana-cambriana (Rodrigues 2008; Warren et al., 2014; Paula-Santos et al., 2015).

A Formação Sete Lagoas, constituída por carbonatos e dolomitos com intercalações locais de pelitos e margas. Na Folha São João da Ponte (1:100.000), o membro Lagoa Santa foi descrito como calcários negros a cinzentos, com carstificação avançada, esses afloram a extremo noroeste da área (Romano *et al.*, 2015). O membro Pedro Leopoldo não ocorre como afloramentos muito exuberantes na região e compreende calcários e dolomitos de cores claras, entre branco, rosa, cinza, e bege, com granulometria fina, pontualmente ocorrem níveis silicosos. O membro Pedro Leopoldo, via sua textura e composição se apresenta ligeiramente mais deformado que as demais rochas (Romano *et al.*, 2015).

A Formação Serra de Santa Helena aflora a noroeste da área de estudo e contém siltito vermelho arroxado. Suas ocorrências são extremamente intemperizadas (Romano *et al.*, 2015).

A Formação Lagoa do Jacaré ocupa a maior parte da região e é a principal unidade aflorante nos entornos de Brasília de Minas (Kuchenbecker *et al.*, 2014). É composta por calcários, podendo ocorrer lentes de siltitos e margas esverdeadas subordinadas. Os afloramentos dessa formação ocorrem na forma de lajedos e maciços rochosos com encostas íngremes, sustentados por calcários de retrabalhamento cinza escuro com intercalações pelíticas (Kuchenbecker *et al.*, 2014, Romano *et al.*, 2015). Porções oolítica e ricas em intraclastos de granulação fina, bem como calcários finos laminados são comuns. A alternância granulométrica confere a algumas porções aspecto rítmico (Kuchenbecker *et al.*, 2014). As principais estruturas sedimentares preservadas são estratificações plano-paralelas, cruzadas tabulares, *hummockys ripples* simétricas, dobras convolutas, estruturas de carga, gretas de contração (Kuchenbecker *et al.*, 2014, Romano *et al.*, 2015) e gretas de sinérese (Uhlein, 2019). Entre as feições pós-deposicionais destacam-se veios e vênulas de calcita, estilólitos, *dissolution seams*, e nódulos silicosos negros (Kuchenbecker *et al.*, 2014).

O aumento da fração argila dentro do pacote carbonático confere o caráter de contato transicional para a Formação Serra da Saudade. Esta unidade aflora em meia encosta e em leitos de vale e suas rochas apresentam cores entre bege, rosa e laranja, devido ao intemperismo. Quando frescos, podem ter cor entre cinza e verde claro (Kuchenbecker *et al.*, 2014). São compostos por pelitos, com pontuais lentes de arenito ou calcilutitos cinza. Possuem laminação plano paralela e cruzadas de baixo ângulo e, eventualmente, dobras convolutas. Planos de acamamento e fraturas podem ocorrer preenchidos por óxido de manganês (Kuchenbecker *et al.*, 2014).

O Grupo Aerado, responsável pela sustentação do relevo do domínio de chapadas na região, aflora principalmente no topo dos morros e ocorre em contato erosivo sobre o Grupo Bambuí (Kuchenbecker *et al.*, 2014). Contém arenitos bimodais avermelhados, silicificados, de grãos arredondados a subangulosos, com a presença de fragmentos líticos (Kuchenbecker *et al.*, 2014). As

estruturas sedimentares mais recorrentes são estratificações plano paralelas e cruzadas tabulares. Em menor frequência, ocorrem arenitos na cor bege, granulometria média, bem selecionados e maciços (Kuchenbecker *et al.*, 2014).

O restante da área é recoberto por coberturas cenozoicas que se dividem em coberturas eluviais coluviais, depósitos aluvionares e depósitos indiferenciados. Os Depósitos Aluvionares ocorrem ao longo das calhas fluviais em planícies de inundação, são constituídos de cascalho e areia mal selecionada, bem como banco argilosos, no geral ocorrem inconsolidados (Romano *et al.*, 2015). Os Depósitos Eluvio-Coluviais ocorrem em topografia alta e é relacionada ao intemperismo e desmonte de rochas areníticas, em chapadas tem caráter eluvial, quando subordinado a escarpas compõem rampas de colúvio. A composição dos depósitos eluvio-coluvionares tem composição generalizada em areia fina a média de cor bege a avermelhada mal selecionados com baixa maturidade textural, típicos de depósitos desse tipo (Kuchenbecker *et al.*, 2014). Ocasionalmente podem ocorrer processos de lateritização, contudo esse não alcança grandes espessuras (Kuchenbecker *et al.*, 2014).

2.3.2.3 Geologia Estrutural

As rochas da região de estudo se encontram no compartimento central e de transição entre os compartimentos estruturais E e Central da Bacia do São Francisco (Alkmim & Martins-Neto 2011; Resi *et al.* 2017). Neste contexto a deformação de caráter regional é pontual, e a preservação das estruturas primárias é comum. A região apresenta acervo estrutural composto essencialmente composto por planos de acamamento sub-horizontais ($<10^\circ$), cortados por planos de fraturas em direções diversas, com exceção de algumas regiões, onde os mergulhos chegam a 30° como expressão de um sutil sistema de dobramentos influenciados pela Faixa Araçuá (Kuchenbecker *et al.* 2014, Romano *et al.* 2015).

O acervo de estrutura rúpteis é caracterizado essencialmente por fraturas e falhas. Ocorrem expressivos lineamentos de direções NW-SE, bem como NE-SW, fator controlador dos padrões de drenagem e relevo. Na região entre São João da Ponte e Varzelândia, ocorre falha normal de grande extensão, de direção NE-SW, que controla o curso do rio Arapoim. Esta estrutura afeta as rochas ediacaranas-cambrianas e é responsável pela produção de brechas angulosas no contato gerado por falha entre duas fácies da formação Lagoa do Jacaré (Romano *et al.* 2015). A seis quilômetros da cidade de Mirabela ocorre lineamento em contexto regional de orientação NW-SE que foi interpretado como falha normal com bloco baixo a NE (Kuchenbecker *et al.* 2014).

Próximo as cidades de Ibiracatu e Bonança, Romano *et al.* (2015) descreve duas falhas de empurrão com traços regionais e extensões quilométricas. Estas possuem direção NE-SW e afetam tanto as rochas do Grupo Bambuí quanto os Grupos fanerozóicos, com vergência para leste estas aparentemente estão relacionadas a movimentos recentes

As fraturas ocorrem praticamente em todos os afloramentos na região, e se apresentam predominantemente em duas famílias com direções NNE e WNW, possuem mergulhos altos a subverticais (Kuchenbecker *et al.* 2014). A gênese das tais é relacionada a descompressão por soerguimento crustal (Romano *et al.* 2015). As fraturas ocorrem espaçadas nos calcários e penetrativas nos pelitos e margas, na Formação Lagoa do Jacaré tais fraturas ocorrem preenchidas por calcita branca ou preta (Romano *et al.* 2015).

A sudoeste da área estudada, ocorrem dobramentos em escala hectométrica a quilométrica, que são descritas por Romano et al. (2015) como suaves a abertas sem vergência definida, restritas ao grupo Bambuí e com eixo NNE-SSW e caimento variável. Em escala de afloramentos, tais feições ocorrem nos pelitos com geometria, em geral, abertas, simétricas, e cilíndricas, com eixo NE-SW, ocorrendo supostamente como parasíticas das dobras regionais (Romano et al., 2015). Nos calcários da Formação Lagoa do Jacaré estas estruturas são descritas em geometrias fechadas, assimétricas, e desarmônicas, relacionadas a deformação interestratal (Romano et al., 2015). Associado ao faturamento mais penetrativo NNE e NNW observam-se, esporadicamente, deslocamentos entre os planos e ocorrência de dobras de arrasto com movimentação inversa (Kuchenbecker *et al.* 2014).

O afloramento estudado em Brasília de Minas (MG) expõe rochas da Formação Lagoa do Jacaré praticamente indeformadas e com grande parte das feições primárias preservadas. Apresentando mergulhos suaves de, no máximo 10°, estas rochas podem ocorrer suavemente arqueadas e são comumente afetadas por fraturas.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 FÁCIES SEDIMENTARES

Ao longo de toda a seção (Fig. 3.1) estudada, foram observados calcários heterolíticos alternados com calcários oolíticos. Tais sucessões foram individualizadas em sete fácies sedimentares, conforme descrito a seguir.

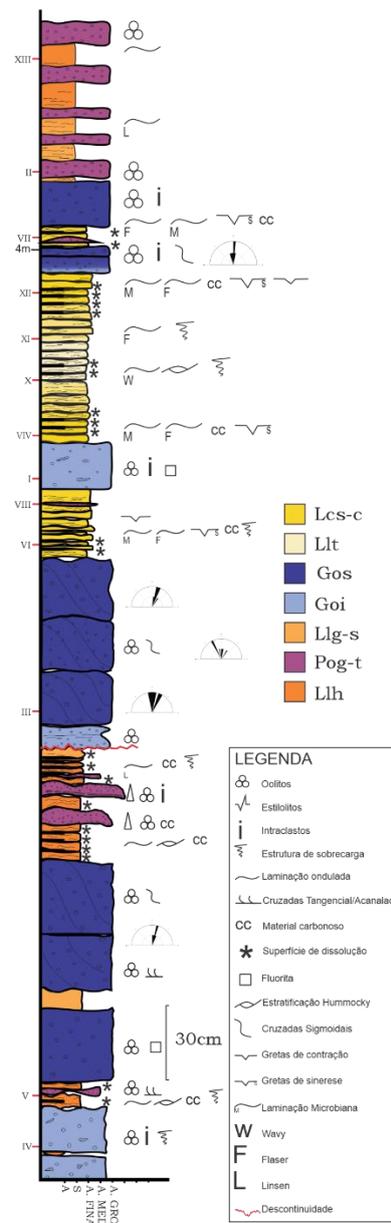


Figura 3.1 - Seção estratigráfica composta e de detalhe da Formação Lagoa do Jacaré ao longo da rodovia MG – 402, Brasília de Minas (MG). Os algarismos romanos representam a posição estratigráfica das lâminas delgadas. As meias rosetas indicam as paleocorrentes medidas em campo.

3.1.1 Laminito Liso com laminações Hummocky (Llh)

Esta fácies ocorre na forma de estratos suavemente ondulados, lateralmente contínuos, com espessura de até 5 centímetros. Corresponde a laminitos lisos com laminações internas suavemente onduladas e cruzadas de baixo ângulo, definindo os hummockys (Fig. 3.2A e 3.3B). Os estratos são limitados por filmes argilo-carbonosos e comumente contém marcas onduladas simétricas até métricas.

Petrograficamente, observa-se que as laminações escuras dessas rochas são compostas por uma matriz neomorfizadas em micro-pseudopseudoesparita e as lâminas mais claras são compostas por calcita translúcida e recristalizada na forma de pseudopseudoesparita. A assembleia de aloquímicos não foi identificada, porém poros móldicos cimentados por mosaicos de calcita espática sugerem a presença de grãos carbonáticos, que ocorrem na base das laminações claras definidas por mátrix neomorfizada. Ocasionalmente, correm estilólitos de alta amplitude preenchidos por material residual aparentemente carbonoso (Fig. 3.2B).



Figura 3.2 – A: Aspecto geral do afloramento em amarelo cruzadas *hummockys*. B: Fotomicrografia da fácies Llh (lâmina XIII) em luz transmitida e aumento de 2x. As setas nas cores azul, vermelho e verde indicam, respectivamente, sentido do topo, estilólitos e molde dos grãos.

3.1.2 Packstone oolítico com gradação normal e estratificações tangenciais (Pog-t)

Em afloramento, esta fácies sedimentar ocorre na forma de corpos lenticulares, descontínuos de espessura variável e menor que 10 centímetros. Corresponde a packstones de cor cinza escuro a pretos, exibindo gradação normal, ocasionalmente, com intraclastos tabulares centimétricos na base e estratificações cruzadas tangenciais. Os estratos são limitados por filmes argilosos intemperizados, que podem ou não ser carbonosos (Fig. 3.3B).

Em seção delgada, os packstones contêm essencialmente oólitos simples, com núcleos ocasionalmente colapsados (*half moon*), peloides, intraclastos subarredondados e agregados oolíticos do tipo *grapestone* apresentando deformação plástica, sustentados por uma matriz recristalizada composta por calcita espática. De forma geral, os aloquímicos dessa rocha ocorrem com envelopes micríticos, em contatos pontuais e empacotamento frouxo (Fig. 3.3D).

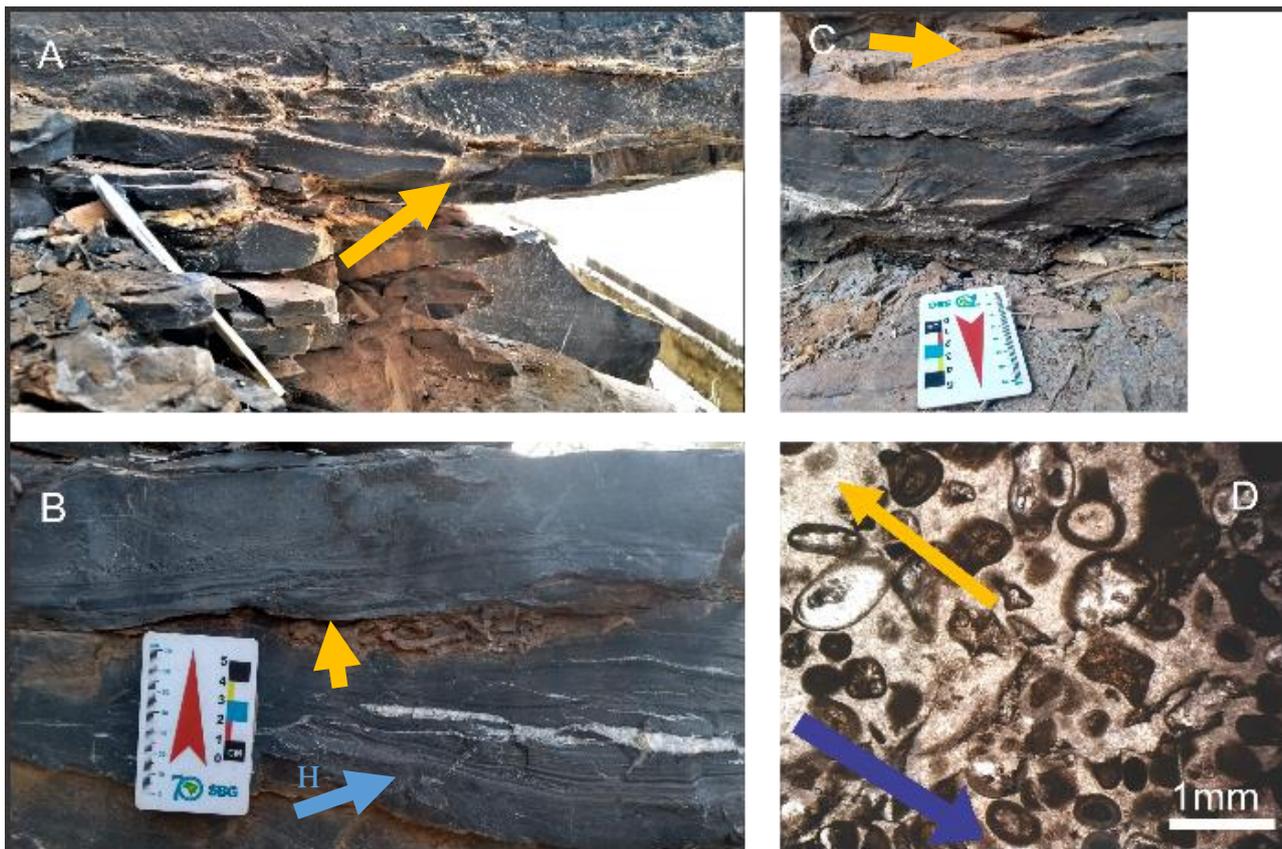


Figura 3.3- A: Geometria lenticular dos corpos oolíticos em contato sobre a fácies Llg-s. B: Fácies Pog-t com gradação normal e intraclastos na base, abaixo fácies Llh com laminações cruzadas *hummocky*. C: Fácies Pog-t exibindo estratificações tangenciais na base, em contato com a fácies Llg-s. D: Fotomicrografia da fácies Pog-t (lâmina II) e sua assembleia de aloquímicos predominantemente oolíticos em luz transmitida e aumento de 2x. A barra branca corresponde a 1mm e as setas amarela e azul indicam, respectivamente, a pseudomatrix recristalizada e o sentido do topo.

3.1.3 Laminito liso com gradação normal e estruturas de sobrecarga (Llg-s)

A fácies Llg-s se apresenta na forma de camadas centimétricas. É definida por laminitos lisos com laminações internas do tipo linsen (Fig. 3.4A). Os estratos apresentam formas de leito definidas por marcas onduladas simétricas centimétricas a métricas e são recobertos por filmes argilo-carbonosos (Fig. 3.4A).

Ao microscópico petrográfico, é possível identificar gradação normal indicada pelos moldes dos grãos que ocorrem recristalizados em meio a matriz. Observa-se que as laminações mais escuras são compostas por uma matriz neomorfizada em micro-pseudoesparita e as laminações claras têm composição calcítica, translúcida, recristalizada em pseudoesparita, tal como a fácies Llh. Observam-se ainda injeções de material claro em meio a matriz microespática, que exibem geometria sinuosa e espessam para o topo. A fácies preserva internamente manchas dispersas de matriz mais escura e aparentemente carbonosa (Fig. 3.4B). A fácies é marcada pela presença de estilólitos e dissolution seams, associados a material residual de cor preta, opaco.

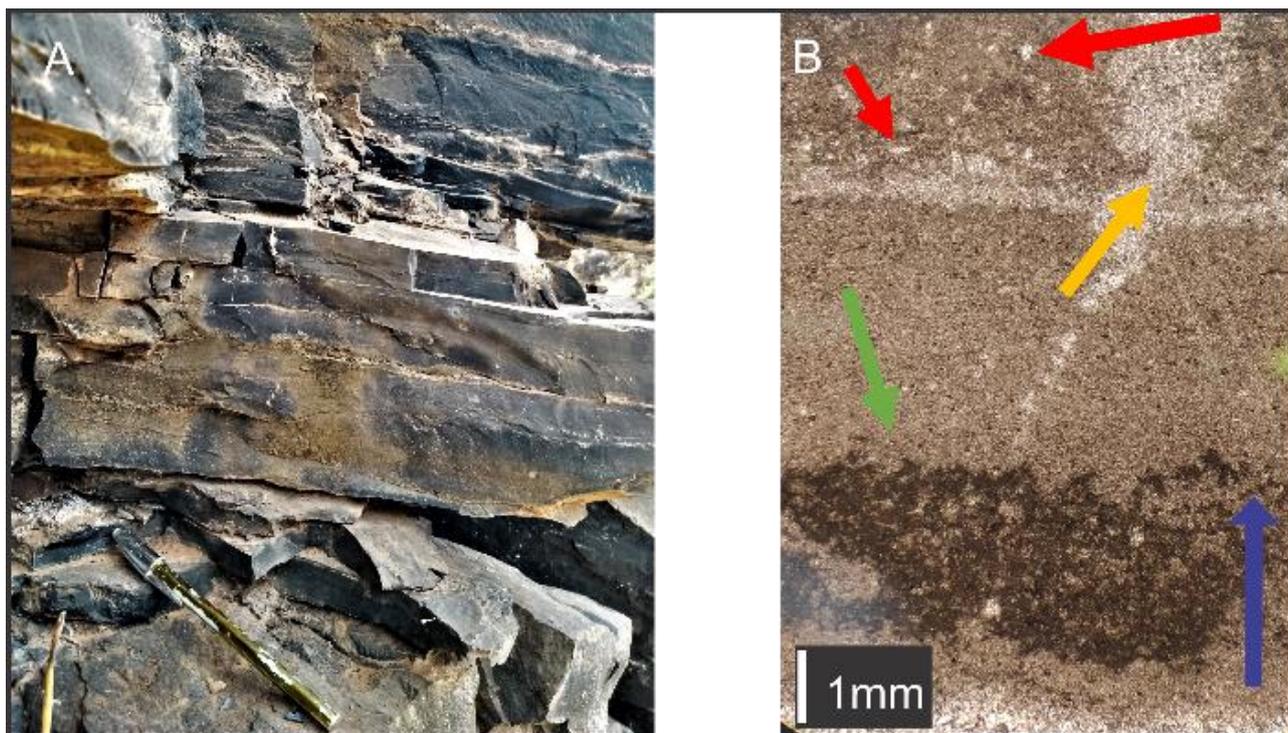


Figura 3.4 – (A) Aspecto geral mesoscópico e (B) fotomicrografia da fácies Llg-S (lâmina V) em luz transmitida e aumento de 2x. A barra branca indica 1mm, enquanto as setas em vermelho, amarelo e verde Grainstones oolítico com estratificações sigmoidais (Gos)

3.1.4 Grainstones oolítico com estratificações sigmoidais (Gos)

Esta fácies sedimentar ocorre em camadas lateralmente extensas e tabulares ou compondo corpos lenticulares métricos. Exibem topo suavemente ondulados e a base ocasionalmente erosiva, com espessura da ordem centimétrica a métrica. Estes *grainstones* exibem granulometria variando de areia a grânulo, têm coloração cinza escuro a preta e, quando percutidos, emitem um odor fétido. Exibem gradação normal, estratificações cruzadas sigmoidais e marcas onduladas assimétricas com dimensões decimétricas a métricas indicando sentido de paleocorrente variando entre NNE e NNW (Fig. 3.5A). Frequentemente, exibem estilólitos paralelos ao acamamento e os topos das camadas são delimitados por lâminas argilosas delgadas.

Quando analisada em microscópio petrográfico, a fácies sedimentar apresenta assembleia oolítica diversa que inclui oólitos de núcleo simples e policomposto, oólitos colapsados e parcialmente preenchidos por calcita em mosaico grosso, fraturados, retorcidos e peloides (Fig. 3.5B). Ocasionalmente, são observados agregados do tipo grapestone. Em geral, o arcabouço é sustentado por um cimento calcítico em mosaico fino, que, eventualmente, ocorre em mosaico grosso (Fig. 3.5B). Cristais de fluorita com hábito cúbico podem ocorrer em meio aos aloquímicos ou compondo o núcleo dos oólitos. Pontualmente, nota-se cimentação/substituição por sílica no córtex e no núcleo de alguns oólitos, além de dissolution seams preenchidos por material argiloso de cor preta e opaco.

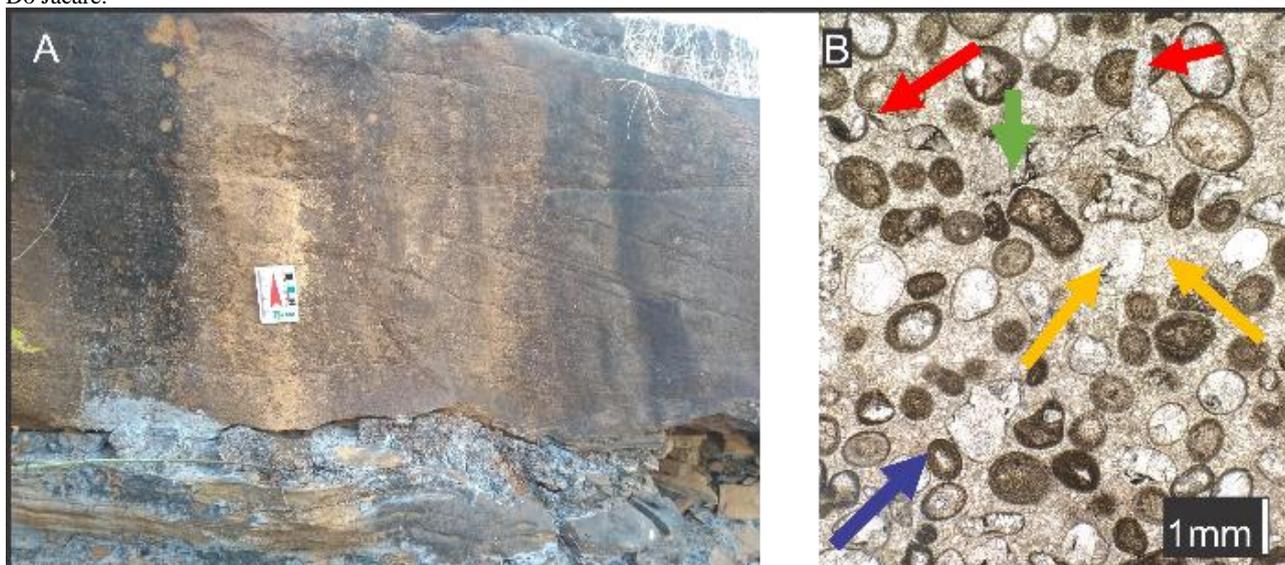


Figura 3.5 – A: Detalhe em afloramento da fácies Gos com estratificações cruzadas sigmoidais em contato erosivo/abrupto sobre a fácies Llg-s. B: Fotomicrografia em luz transmitida e aumento de 2X mostrando os principais componentes da fácies Gos. As setas em vermelho, amarelo, verde e azul indicam respectivamente, oólitos fraturados ou retorcidos, cimento em mosaico fino e grosso, *dissolution seams*, e sentido do topo.

3.1.5 *Grainstone* oolítico intraclástico (Goi)

A fácies Goi ocorre na forma de estratos contínuos de até 40 centímetros, tabulares com topos suavemente ondulados, de espessura constante e amalgamados em sucessões com espessura até métrica. Correspondem a *grainstones*, cinza a pretos, fétidos quando percutidos, e exibindo gradação normal definida por intraclastos milimétricos que passam em direção ao topo às frações oolíticas arenosas. Os acamamentos são marcados por finas laminações de argila que, ocasionalmente, podem estar estilolitizadas.

Em lâmina petrográfica, observa-se assembleia oolítica variada, marcada por oólitos simples e compostos, oólitos colapsados (com feições do tipo *half moon*), fraturados e retorcidos. Os intraclastos são constituídos essencialmente por fragmentos de mudstone ou agregados do tipo grapestone. Sustentando a rocha, ocorre cimento de calcita espática em mosaico fino e grosso. Ao redor dos grãos, nota-se coroa de cimento calcítico definindo franjas isópacas laminadas de calcita (*bladed*) (Fig. 3.6B). Nas seções delgadas, foi identificada uma lâmina extremamente cimentada, com grãos retorcidos de difícil identificação, *dissolution seams* e porosidade secundária preenchida por material preto, opaco e, aparentemente, de composição carbonosa (Fig. 3.6B). Nas seções descritas, ocorre em contato com nível mostrando gradação normal definida por intraclastos e oólitos na fração areia a grânulo na base e material lamoso no topo. As frações lamosas encontram-se na forma de calcita micro-espática. O material micro-espático destas lâminas pode ocorrer na forma de injeções na camada anteriormente descrita.

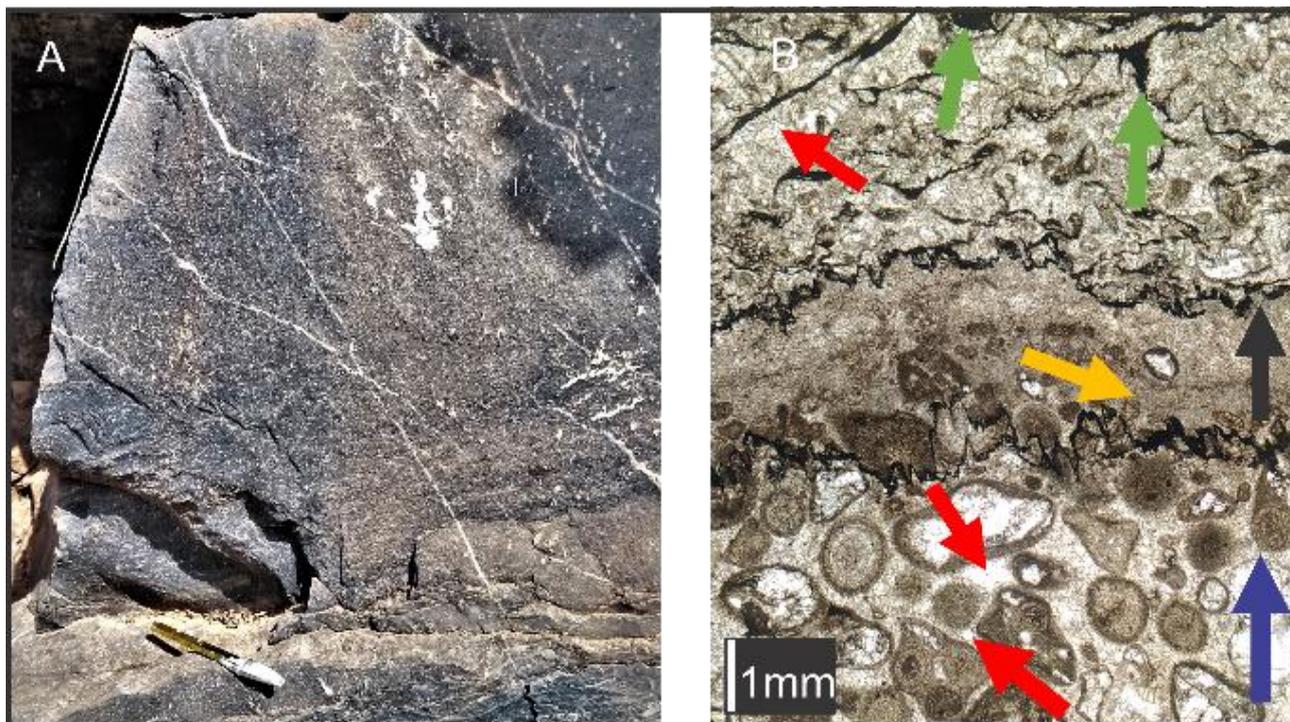


Figura 3.6 – A: Fácies Goi em afloramento, com estilólitos e gradação inversa, bem como vênulas de calcita. B: Fotomicrografia da fácies Goi (lâmina I) em luz transmitida e aumento de 2x. A barra branca indica 1mm, enquanto as setas em preto, vermelho, amarelo, azul e verde indicam, respectivamente, a gradação normal, os cimentos em mosaico grosso e fino de calcita, além das franjas de calcita, a matriz neomorfizada, o sentido do topo, poros secundários preenchidos por óleo morto.

3.1.6 Laminito liso com flaser/wavy (Llf)

Laminitos lisos com estrutura interna do tipo flaser/wavy ocorrem na forma de estratos de calcarenito, com espessura de até 5 centímetros. A fácies contém estratificações do tipo wavy-flaser, definidas por lâminas de cor cinza claro, granulometria arenosa, alternadas com lâminas lamosa escuras. Ocasionalmente, ocorrem estruturas de sobrecarga. Pontualmente as laminações se cruzam em baixo ângulo formando hummockys centimétricos (Fig. 3.7). Marcas onduladas simétricas de pequeno porte e filmes argilo-carbonosos delimitam os estratos/lâminas, que podem se associar a lentes amalgamadas de material calcítico impuro.

Em seção delgada, observa-se a gradação normal milimétrica. Além disso, nota-se laminações mais claras compostas por calcita translúcida, recristalizada em pseudoesparita, enquanto as laminações escuras são compostas por uma matriz calcítica neomorfizada em micro-pseudoesparita. Ocorre camada de material preto anisotrópico, junto ao qual as laminações tangenciam a base do estrato, aparentemente cisalhado (Fig. 3.7C). Ocasionalmente, ocorrem dissolution seams preenchidos por material preto opaco aparentemente argilo carbonoso

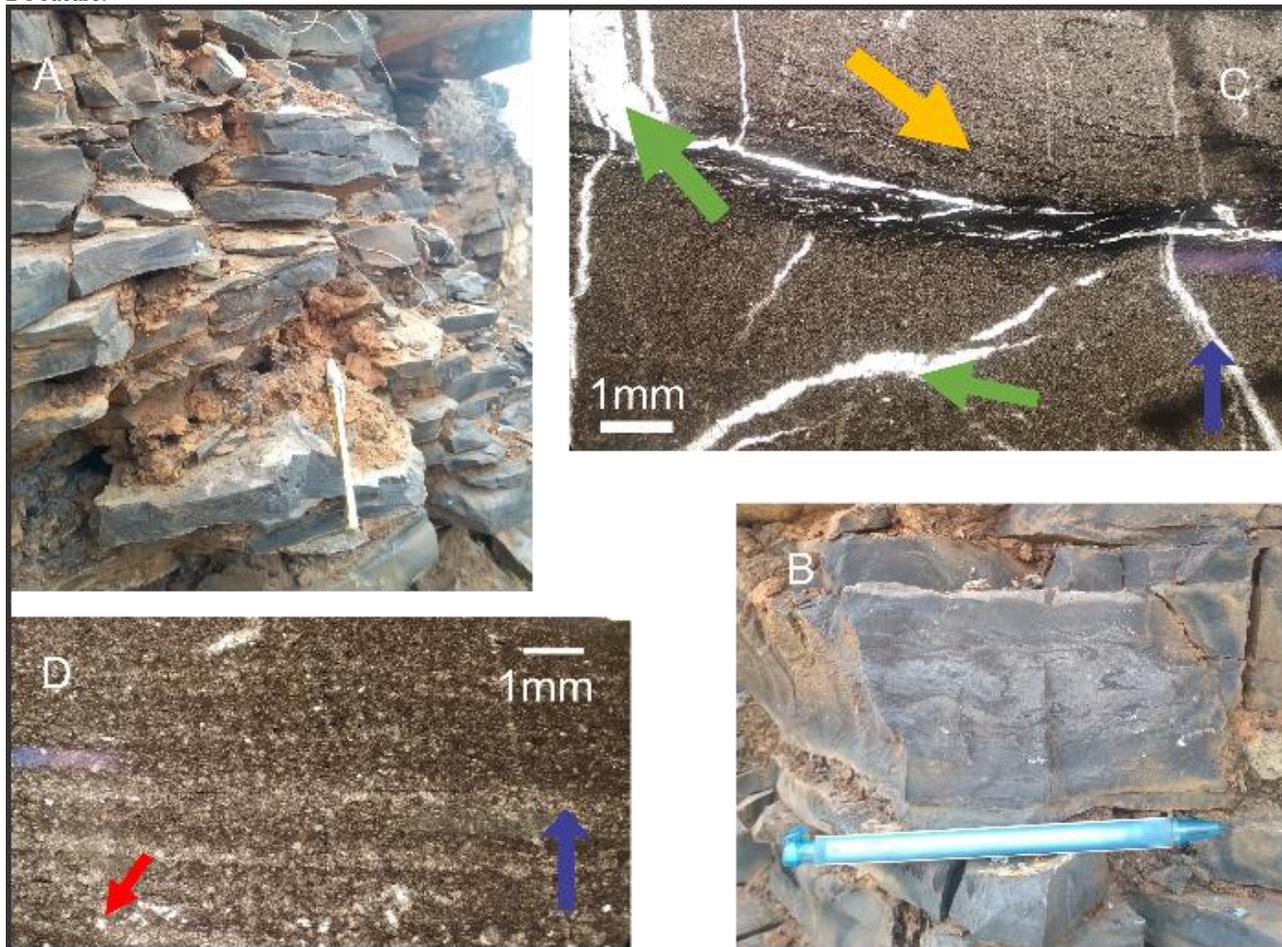


Figura 3.7 – Afloramento da fácies Llf exibindo (A) laminações wavy e, eventualmente, laminações cruzadas de baixo ângulo (*hummockies* centimétricos), bem como (B) estruturas *flame*. (C) Fotomicrografia da mesma fácies (lâmina XI) em luz transmitida e aumento de 2X. Barra branca corresponde a 1mm, as setas em azul, verde e amarelo indicam, respectivamente, sentido do topo, vênulas preenchidas por calcita e laminações de material preto anisotrópico tangenciais a base. (D) Fotomicrografia da fácies Llf (lâmina X) em luz transmitida e aumento de 2X. Barra branca corresponde a 1mm, as setas em azul e vermelho indicam, respectivamente, topo e molde de grãos.

3.1.7 Laminito crenulado com gretas de sinérese e gretas de contração (Lcs-c)

Em afloramento, esta fácies ocorre em estratos contínuos, ondulados, de espessura variável e menor que 4 centímetros. Correspondem a laminitos crenulados com laminações de natureza microbiana. A estrutura interna segue padrão flaser-wavy, dominada por laminações de cor cinza claro, granulometria arenosa, alternados com laminações argilosas escuras. Pontualmente, as laminações se cruzam em baixo ângulo formando hummockys. Na superfície de acamamento ocorrem estruturas de geometria exótica, em linhas sinuosas preenchidos por material escuro de natureza micrítica. Quando vistas em perfil, formam canais irregulares, sinuosos com espessamento para o topo, estas foram interpretadas como gretas de sinérese (Plummer & Gostin 1981; Pratt 1998) (Fig. 3.10A). Por vezes, também ocorrem gretas de contração. As camadas contém marcas onduladas simétricas centimétricas no topo e são limitadas por filmes argilo-carbonosos e, eventualmente, lentes amalgamadas de material calcítico impuro, tal como fácies Lt.

Em seção delgada, foram identificados moldes de grãos trapezados entre as laminações heterolíticas que compõem a rocha (Fig. 3.8B). Estes se apresentam preenchidos por calcita espática e se dispõem em ciclos centimétricos de gradação normal. As laminações mais escuras são compostas por uma matriz neomorfizada em micro-pseudoesparita rica em matéria orgânica e as mais claras têm composição calcítica, translúcida, recristalizada em pseudoesparita. Ocorrem fissuras preenchidas por calcita em mosaico grosso, que se dispõem na forma de franjas (Fig. 3.8B). As seções delgadas são marcadas por abundantes dissolution seams preenchidos por material argiloso de cor preta e opaco, aparentemente, de natureza carbonosa.

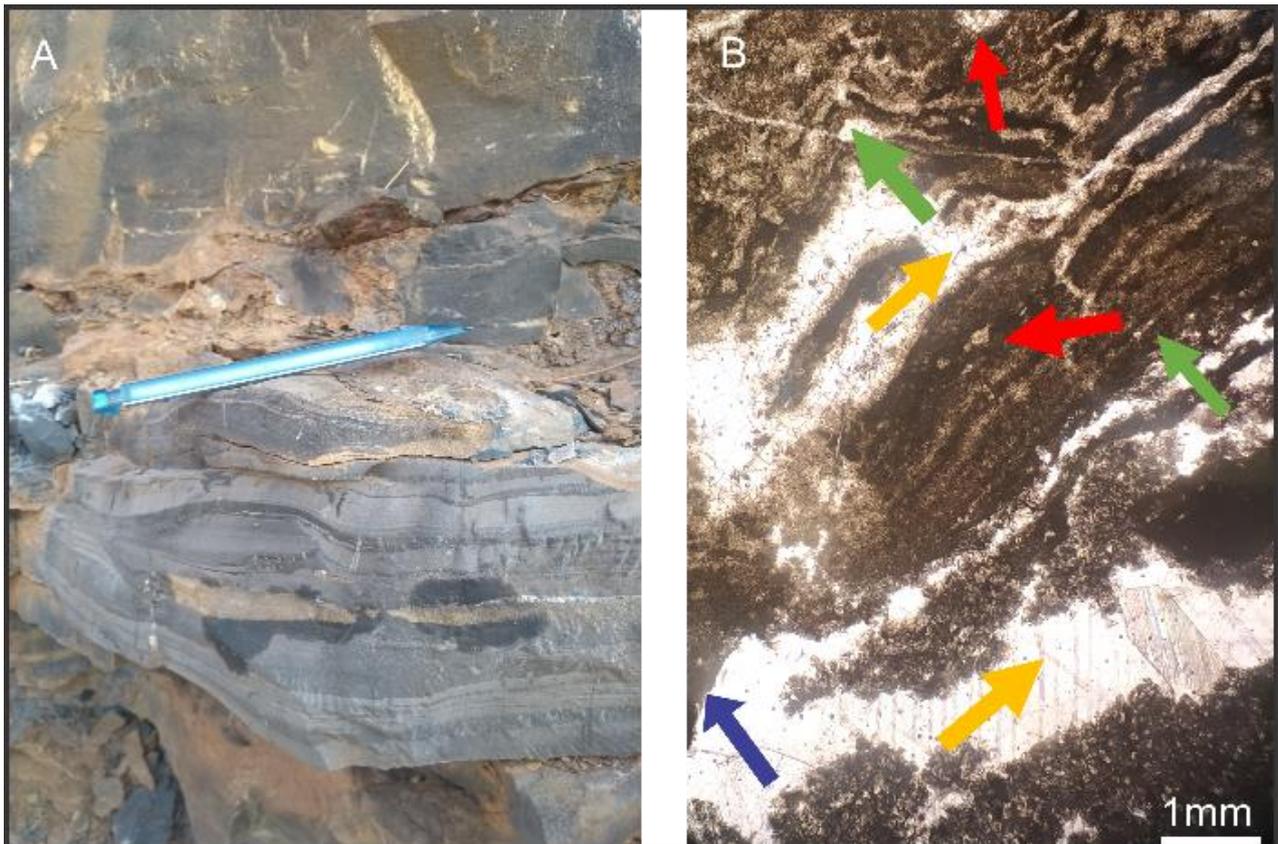


Figura 3.8 – (A) Laminito crenulado da fácies Lcs-c, exibindo laminações *wavy*, gretas de sinérese com geometria exótica vistas em perfil, laminações microbianas e as lentes de material calcítico lamoso e impuro. (B) Fotomicrografia da mesma fácies (lâmina IV). A barra branca corresponde a 1mm, enquanto as setas nas cores azul, amarelo, vermelho e verde indicam, respectivamente, topo, cimentos em mosaico grosso e em franja, molde de grãos e laminações microbianas.

Tabela 3.1 - Tabela de fácies e associação de fácies da Formação Lagoa do Jacaré

CODIGO	FÁCISS	ESTRUTURAS SEDIMENTARES E FORMAS DE LEITO	PROCESSOS SEDIMENTARES	ASSOCIAÇÃO DE FÁCIES
Llh	Laminito liso com laminações <i>hummocky</i>	. Laminação cruzada <i>hummocky</i> . Marcas onduladas simétricas centimétricas a métricas	Fluxo oscilatório associado a processos de suspensão/decantação com eventos de sedimentação por tempestade.	Sub-maré (FA – I)
Llg-s	Laminito liso com gradação normal e estruturas de sobrecarga	Laminação <i>linsen</i> . Gradação normal. Estruturas de sobrecarga. Marcas onduladas centimétricas a métricas simétricas	Fluxo oscilatório associado a processos de suspensão/decantação. Compactação precoce.	
Pog-t	<i>Packstone</i> oolítico com gradação normal	Gradação normal. Estratificação cruzada tangencial.	Fluxo trativo canalizado com desaceleração.	Sub-maré (FA-I) e Intermaré (FA-II)
Goi	<i>Grainstone</i> oolítico com intraclastos	Gradação normal. Mega marcas onduladas assimétricas.	Fluxo trativo com diminuição gradual da energia.	Intermaré (FA – II)
Gos	<i>Grainstone</i> oolítico com estratificações cruzadas sigmoidais	Gradação normal. Estratificação sigmoidal. Mega marcas onduladas.	Fluxo trativo canalizado unidirecional com desaceleração gradual.	
Llf	Laminito liso com <i>flaser</i>	Laminação heterolítica <i>wavy-flaser</i> . Gradação normal. Laminação cruzada <i>hummocky</i> . Estruturas em <i>flame</i> . Marcas onduladas simétricas centimétricas.	Fluxo oscilatório associado a processos de suspensão/decantação com eventos de sedimentação por tempestade. Compactação precoce.	Back-Shoal (FA-III)
Lcs-c	Laminito crenulado com gretas de sinérese e contração	Laminação heterolítica <i>flaser-wavy</i> com marcas onduladas simétricas. Laminação microbiana no topo de camadas milimétricas com gradação normal que também podem conter gretas de sinérese e estruturas de sobrecarga. Gretas de contração.	Fluxo oscilatório associado a processos de suspensão/decantação Deposição associada a atividade microbiana, ocasionalmente, associada a exposição subaérea. Compactação precoce.	

3.2 ASSOCIAÇÕES DE FÁCIES

As fácies descritas na seção anterior foram agrupadas em três associações de fácies que denotam ambientes de sedimentação marinhos rasos a transitacionais, influenciados por maré e/ou eventos de tempestade (Tab. 3.1). As associações são descritas abaixo.

3.2.1 Associação de fácies FA-I (sub-maré)

A associação faciológica FA-I é constituída pelas fácies Llh, Pog-t e Llg-s. Em conjunto, indicam alternância entre processos sedimentares trativos e suspensivos, influenciados por ondas de tempestade. Esses processos são indicados pelas laminações linsen-wavy, laminações cruzadas hummocky estratos com gradação normal. Episódios de alta taxa de sedimentação/alta energia e compactação precoce parecem ser registrados por injeções arenosas/espáticas em meio a matriz micro-espática. Tais processos são típicos de ambientes subaquosos desenvolvidos abaixo do nível de base das ondas de tempo bom e acima do nível de base de ondas de tempestade (Tucker & Dias-Brito 2017). A associação de fácies é interpretada como o registro de ambiente de sub-maré com influência de ondas de tempestade (Tucker & Dias-Brito 2017). A fácies Pog-t representa o registro de canais intermitentes, responsáveis pela desagregação do substrato lamoso formando os intraclastos lamelares, e envelopamento micrítico dos grãos.

A maior proporção lamosa desta associação de fácies é marcada por assinaturas relativamente altas de U, Th e K. Isso pode ser explicado pelo fato de argilominerais comumente reterem elementos radioativos adsorvidos em sua estrutura (Russell 1944; Wahl 1983). Tendências de aumento da radioatividade para o topo eventualmente marca ciclos de aprofundamento definidos pela associação de fácies FA-II na base e depósitos de sub-maré (FA-1) no topo.

3.2.2 Associação de fácies FA-II (intermaré)

A associação FA-II é constituída pelas fácies Goi e Gos e Pog-t. Estas ocorrem espacialmente associadas e alternadas as demais associações e suas fábricas indicam sedimentação sob condições de mais alta energia, associados ou não a fluxos canalizados. Esses processos são evidenciados pela assembleia oolítica variada, incluindo agregados tipo grapestone oólitos retorcidos e fraturados, gradação normal, estratificações cruzadas e marcas onduladas assimétricas de dimensões até métricas. As estratificações cruzadas sigmoidais e gradação normal da fácies Gos indicam a dinâmica de sistema de canais conectados a corpos d'água maiores (Tucker & Wright 2009). Tais fácies marcam ambiente de águas agitadas, responsáveis pela alta maturidade textural dessas fácies e ausência ou pequena quantidade de frações lamosas (Tucker & Dias-Brito 2017). As ocorrências de franjas de calcita parcialmente dissolvidas e a posterior cimentação de calcítica em mosaico fino e grosso indicam influência de água meteórica sobre estes ambientes deposicionais (Hird & Tucker 1988). Tais processos são correlacionáveis a ambiente de intermaré marcados por canais retrabalhando bancos

Neves, P.V.F. 2020, Arquitetura Sedimentar, Feições Pós Depositionais e Circulação De Fluidos Subsuperficiais Da Formação Lagoa Do Jacaré.

oolíticos. Combinados aos processos de retrabalhamento descritos acima, episódios de tempestade poderiam explicar a grande quantidade de oólitos fraturados e retorcidos identificados nestas fácies (Fig. 3.5 e 3.6) (Scholle & Scholle 2003). Neste sentido, a localização dos bancos oolíticos junto a zona de quebra das ondas de tempestade (ou mesmo, ondas de tempo bom) poderiam contribuir com o fraturamento destes grãos e a alta maturidade textural observada nestas fácies (Tucker & Wright 2009; Scholle & Scholle 2003).

Ainda durante o processo de litificação (diagênese precoce), a sobrecarga da pilha sedimentar teria sido responsável pelas injeções lamosas em meio a material oolítico.

Esta associação de fácies apresenta assinaturas gamaespectrométricas relativamente baixas de U, Th e K. Esta assinatura reflete a alta maturidade textural resultante de ambiente deposicional de alta energia (Russell 1944; Wahl 1983).

3.2.3 Associação de fácies FA-III (back-shoal)

A associação de fácies FA-III é constituída pelas fácies Lcs-c e Llt que ocorrem intercaladas em grande parte das seções levantadas, ao longo das porções intermediária e superior. A fábrica dessas rochas indica sedimentação sob condições hidrodinâmicas mistas, alternados processos trativos e suspensivos, contudo, dominado por tração com diminuição gradual de energia e ocasional exposição subaérea. Pontualmente, indicam sedimentação associada a eventos de alta energia. Tais processos são indicados, respectivamente, pelas laminações flaser-wavy, gradação normal, gretas de contração, laminações cruzadas hummockys, e estruturas em flame. As últimas sugerem episódios com altas taxas de sedimentação e compactação precoce (Potter *et al.* 2012). As laminações das fácies que compõem esta associação ocorrem relacionadas a atividade microbiana, onde frequentemente são encontrados grãos trapezados, ou gretas de sinérese com geometria sinuosa quando vistas em perfil (Fig. 3.8A). A deposição dessas rochas teria ocorrido em ambiente relativamente protegido e parcialmente isolado, mas ocasionalmente sujeitas ações de ondas de tempestade. As gretas de sinérese sugerem condições de água salinas (Plummer & Gostin 1981) ou eventos sísmicos episódicos (Pratt 1998). Neste ambiente, a variação cíclica do nível d'água, com influência de água meteórica, é responsável pela cimentação em calcita em franja e sua posterior dissolução parcial. O ambiente interpretado é compatível com subambiente de back-shoal, ambiente de transição entre intermaré e supramaré, eventualmente influenciado por ondas de tempestade (Tucker & Wright 1990; Scholle & Scholle 2003).

Esta associação de fácies ocorre comumente na porção superior de ciclos até métricos de raseamento para o topo, cuja porção basal é composta pela associação de fácies FA-I (Fig. 3.10).

As assinaturas radiométricas da associação de fácies FA-III, são relativamente altas para U, Th e K, o que indica teores mais elevados de matriz e matéria orgânica (Russell 1944; Wahl 1983) (Fig 3.11).

3.3 ARQUITETURA ESTRATIGRÁFICA E PADRÕES DE EMPILHAMENTO

As associações de fácies descritas anteriormente distribuem-se ao longo de todo o afloramento estudado e se dispõem em contatos tabulares a suavemente ondulados, bruscos ou erosivos, com ângulos de mergulho geral menores que 10° para SE. Em geral, associações de fácies intermaré a supramaré tendem a predominar na porção SE da seção estudada, enquanto em sua porção NW predominam fácies sedimentares intermaré e submaré. Embora ocorram ao longo de toda a seção, a associação de fácies submaré exibe exposições mais expressivas na porção superior central do afloramento (Fig. 3.9).

A principal superfície estratigráfica reconhecida é representada por uma superfície erosiva contínua que marca o contato basal da associação FA-II sobre a associação FA-I e pode ser identificada ao longo de todo setor noroeste da exposição estudada (Figs. 3.9 e 3.10). Abaixo desta superfície, corpos oolíticos de intermaré com variações lateral de espessura e sucessões de sub-maré definem um ciclo retrogradante de até 1,5 metros, sobreposto por uma delgada sucessão progradante cujo limite basal é marcado por radioatividades relativamente mais elevadas (Fig 3.11). Analisando as superfícies de acamamento que compõem as fácies sedimentares, observa-se estas sucessões são truncadas pela superfície erosiva, definindo terminações estratais do tipo toplap (Fig. 3.10.1, 3.10.2 e 3.10.3), no mesmo sentido em que corpos oolíticos da associação de fácies FA-II se tornam mais delgados (para SE) (Fig. 3.9).

Acima da superfície erosiva, corpos oolíticos de intermaré com variações laterais de espessura e sucessões de back-shoal definem um ciclo progradacional de 2 metros. Nesta seção, a associação FA-II ocorre em estratos suavemente ondulados e seus acamamentos são concordantes aos contatos. Por outro lado, os acamamentos da associação de fácies FA-III formam downlaps para NW sobre a associação de fácies FA-II (fácies Goi) (Figs. 3.10.4 e 3.10.5). O ciclo progradante é limitado em sua porção superior por uma superfície de máxima regressão (gretas de contração e sinérese) e um ciclo retrogradante de 1,5 m definido por associações de fácies de intermaré e sub-maré e marcado por um aumento geral da radioatividade em direção ao (Fig. 3.10 e 3.11). Nesta porção da seção estudada, estratos, sobre tudo da associação de fácies FA-I, parecem definir terminações estratais do tipo onlap (Fig. 3.9).

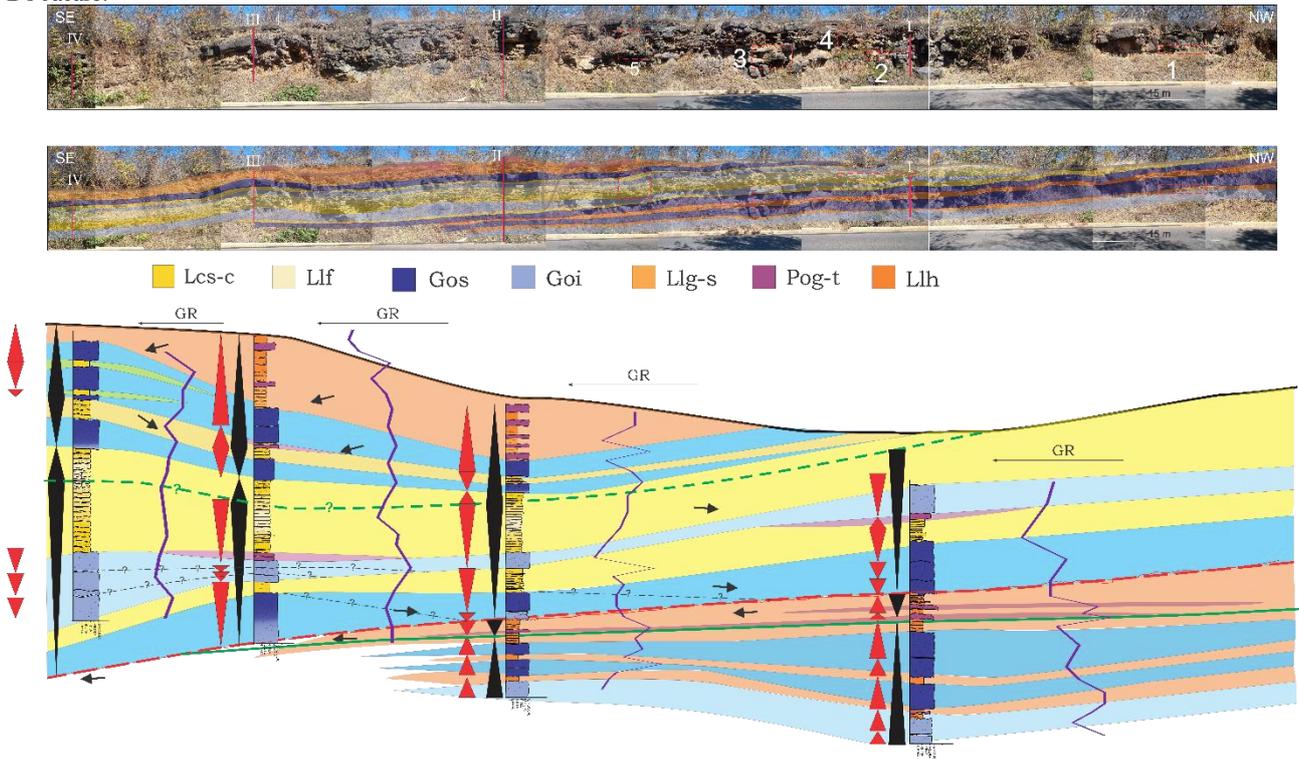


Figura 3.9 - Foto mosaico do afloramento, e a arquitetura de suas fácies. Abaixo disposição dos quatro perfis com seus ciclos menores em vermelho e os maiores em preto, indicados da base pro topo como um ciclo retrogradante-progradante e um ciclo progradante-retrogradante. Linha vermelha indica descontinuidade erosiva, a linha verde indica superfície de máxima inundação (contínua) e máxima regressão (tracejada). As setas indicam direção das terminações estratiais e migração dos sistemas deposicionais

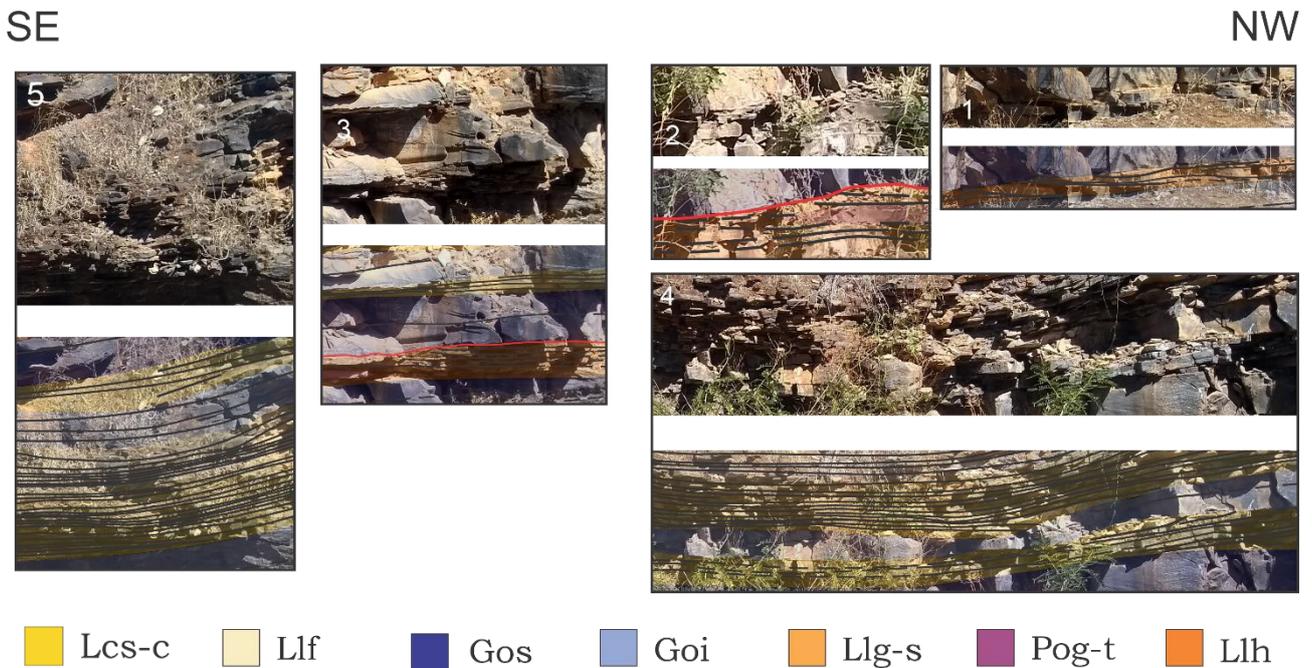


Figura 3.10 – Fotos de detalhe das terminações estratiais. A localização das fotos é indicada pelos números respectivos sobre a figura 3.9. 1, 2 e 3: toplaps 4 e 5 downlaps.

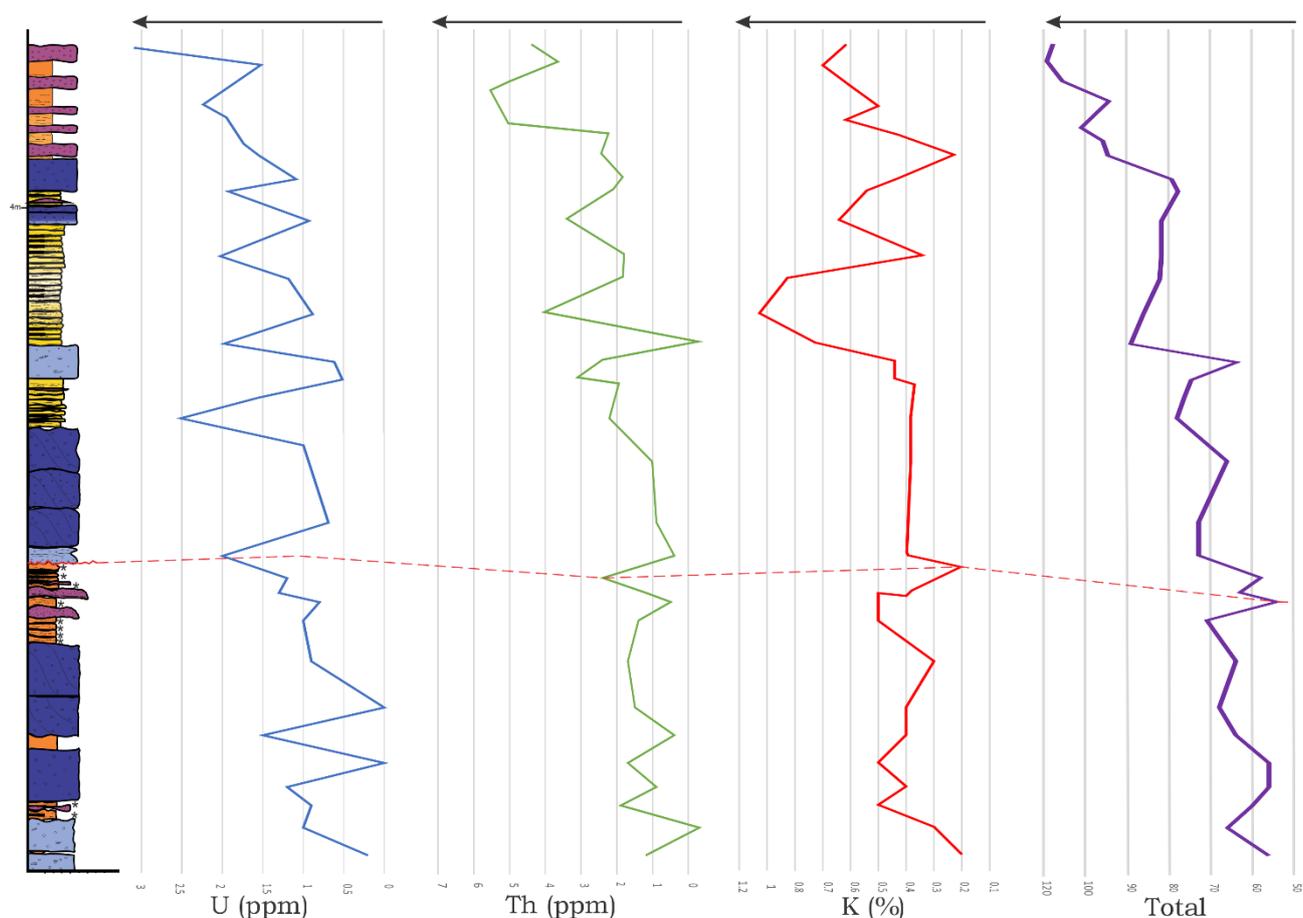


Figura 3.11 - Perfil gamma ray de detalhe integrado da Formação Lagoa do Jacaré ao longo da rodovia MG - 402 na cidade de Brasília de Minas. Detalhe na individualização das regiões superiores e inferiores a descontinuidade

3.4 FEIÇÕES PÓS-DEPOSICIONAIS

Em todas as fácies e lâminas delgadas descritas foram observadas estruturas e feições que indicam distintos processos pós-deposicionais. Produtos do neomorfismo, cimentos calcícticos, preenchimento de poros secundários por material carbonoso, estilólitos sub-horizontais, dissolution seams, vênulas e fraturas preenchidas por calcita branca compõem as feições gerais observadas (Figs. 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8).

Os processos de neomorfização mais evidentes correspondem a transformação da lama calcítica original em micropseudoesparita, o que é especialmente observado em todas as fácies (Figs 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8). Cimentos de calcita espática comumente sustentam aloquímicos das fácies Goi e Gos (Associação de fácies FA-II) e podem ocorrer preenchendo poros secundários formados na matriz e às custas da dissolução eodiagenética dos núcleos oolíticos (Figs. 3.5 e 3.6). Junto a alguns poros secundários, e ao redor de oolitos calcita em franja isopaca (bladed) indica condições de cimentação com influência meteórica em zona de mistura no freático (Flügel 2004; Kann 2019). Poros secundários observados nas fácies Goi preservam um preenchimento por material carbonoso tardio que, em virtude das suas características e distribuição, tais como as apresentadas na descrições de fácies anteriores, é aqui interpretado como petróleo morto (Fig. 3.6).

Neves, P.V.F. 2020, Arquitetura Sedimentar, Feições Pós Depositionais e Circulação De Fluidos Subsuperficiais Da Formação Lagoa Do Jacaré.

Com o avanço do soterramento, processos de dissolução por pressão culminaram na formação de estilólitos e dissolution seams. Estas feições são mais comuns nas fácies Llh, Ll_g-s, e Lls e invariavelmente são marcadas por uma concentração de resíduos carbonosos. Localmente, estas feições parecem afetar vênulas preenchidas por calcita e de espessura milimétrica (Fig. 3.13C). Por afetarem todas as feições anteriormente descritas, é possível concluir que estilólitos e dissolution seams se formaram em estágios diagenéticos mais avançados (mesodiagênese). Fraturas e veios preenchidos por calcita mostrando alto ângulo de mergulho (Fig. 3.8) e afetam indistintamente as unidades estudadas e foram formados em processos tectônicos tardios.

As condições superficiais atuais e a consequente percolação de fluidos meteóricos culminaram no desenvolvimento de feições de dissolução concentradas ao longo das superfícies de acamamento. As fácies laminadas concentram a maioria dessa porosidade secundária. Estes processos são interpretados como telodiagenéticos (Tonietto 2010).

3.5 MODELO DEPOSICIONAL DA FORMAÇÃO LAGOA DO JACARÉ NA REGIÃO DE BRASÍLIA DE MINAS – MG

A análise estratigráfica apresentada neste estudo sugere que as rochas carbonáticas da Formação Lagoa do Jacaré, em Brasília de Minas, poderiam ser depositadas em uma plataforma carbonática de baixo ângulo e alta energia (Fig. 3.12). Esta plataforma teria morfologia orlada por bancos oolíticos, que foram retrabalhados por canais de inter/sub-maré (associações de fácies FA-I e FA-II) e permitiram o desenvolvimento de ambientes relativamente protegidos, propícios ao desenvolvimento de ambiente back-shoal associado à atividade microbiana e ocasionalmente exposto (Associação de fácies FA-III) (Fairchild T. e Sanchez, E. 2015). Depósitos da associação de fácies FA-I, a frequência de oólitos fraturados e retorcidos da associação de fácies FA-II e eventuais laminações cruzadas hummocky encontradas na associação FA-III, indicam que esta planície de maré se desenvolveu sob influência de ondas de tempestade (Tucker & Wright 1990; Scholle & Scholle 2003). Dados de paleocorrente coletados na associação de fácies FA-II indicam o transporte sedimentar geral de SSE para NNW (Fig. 3.14)

Foi possível reconhecer dois ciclos sedimentares de espessura métrica, separados por uma superfície erosiva. O ciclo é composto por ciclos que migram inicialmente de intermaré para sub-maré e posteriormente na razão contrária é de natureza retrogradante-progradante e define um trato de sistemas transgressivo na base separado por uma superfície de inundação máxima de um delgado trato de sistema regressivo (Fig. 3.9). O ciclo superior é de natureza progradacional-retrogradacional, é definido por fácies que migram de intermaré pra supramaré até alcançar um nível com maior frequência de gretas de contração, onde retorna para as fácies de intermaré e, gradativamente submaré. Estes ciclos definem um trato de sistemas regressivo separado de um trato de sistemas transgressivo superior por uma superfície de máxima regressão (Fig. 3.9). A distribuição espacial das associações de fácies, paleocorrentes, a superfície erosiva, arquitetura e terminações estratiais, permitem interpretar a migração dos sistemas deposicionais no sentido NW durante o ciclo regressivo superior (Fig. 3.9 e 3.12). Durante os ciclos transgressivos, por outro lado, os sistemas deposicionais teriam migrado

no sentido oposto (Fig. 3.9). Internamente aos ciclos de menor ordem hierárquica, ocorrem ciclos de ordem centimétrica que marcam ciclos de afogamento por meio de granodecrescência ascendente e pela deposição de filmes argilo carbonosos que separam os estratos.

De uma forma geral, as sucessões sedimentares denotam um corpo d'água principal à noroeste/norte/nordeste da seção estudada e sucessivos rearranjos no balanço entre o aporte sedimentar/produção carbonática e acomodação (e.g., Catuneanu 2006; Reis and Suss 2016). Por se tratar de uma exposição relativamente limitada, é difícil estabelecer a posição exata dos estratos estudados nos ciclos estratigráficos de 2ª ordem descritos por Reis e Suss (2016), bem como os principais mecanismos controladores da ciclicidade observada. Dados disponíveis indicam que, neste momento, o desenvolvimento da Bacia Bambuí era inteiramente controlado pela subsidência flexural induzida pelas cargas tectônicas das faixas Brasília e Araçuaí (Reis et al. 2017). Apesar disso, as limitações de espessura e extensão lateral da seção estudada não permitem concluir sobre o papel da tectônica no controle da arquitetura sedimentar analisada.

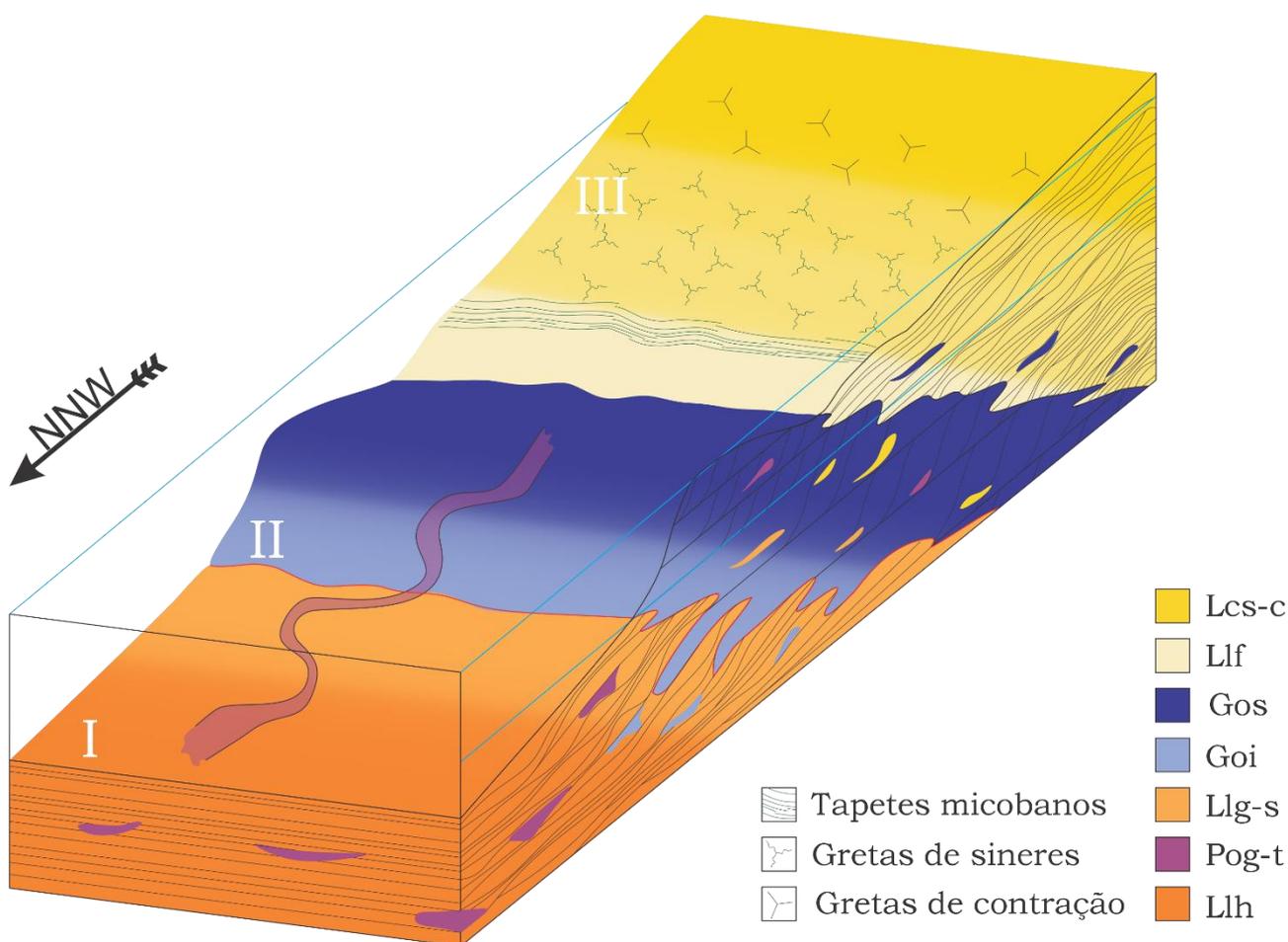


Figura 3.12 - Bloco diagrama com modelo deposicional proposto para a Formação Lagoa do Jacaré na região de Brasília de Minas – MG. As linhas azuis delimitam o ambiente de intermaré.

3.6 SOBRE ELEMENTOS E PROCESSOS DO SISTEMA PETROLÍFERO DA BACIA DO SÃO FRANCISCO E O CONTROLE DO ARCABOUÇO ESTRATIGRÁFICO SOBRE O SISTEMA HÍDRICO LOCAL

Ao longo de todo o afloramento estudado na rodovia MG – 402 foram reconhecidos elementos junto aos depósitos carbonáticos estudados que podem oferecer importantes contribuições para o estudo dos elementos e processos do sistema petrolífero da Bacia do São Francisco, bem como compreender o sistema hídrico local.

Embora encontrem-se comumente cimentadas, sucessões oolíticas transgressivas e regressivas das fácies Goi e Gos exibem evidências de formação de porosidade secundária a partir da dissolução parcial de cimento e oólitos. Localmente, estes poros encontram-se preenchidos por material preto opaco, possivelmente rico em carbono (Fig. 3.15). Em conjunto, suas características sugerem se tratar de petróleo morto. Feições diagenéticas como dissolution seams e estilólitos preenchidos por material argiloso opaco, indicam estágios de soterramento mais avançados que poderiam ter contribuído para a geração e destes hidrocarbonetos a partir de seções ricas em matéria orgânica presentes no Grupo Bambuí e sua posterior migração e preenchimento das paleoporosidades (Fig. 3.15). Depósitos carbonáticos oolíticos são reconhecidos como importantes reservatórios de hidrocarbonetos em campos como South Pars Field, Iran (Esfahli-Dizaji, B. e Rahimpour-Bonab, H. 2014.), e nas Bacias Missisipianas, EUA (Keith, B. e Zuppann, C. 1993)

Trabalhos disponíveis indicam importantes indícios de gás natural em seções correlatas a estudada neste trabalho e, ao mesmo tempo, um avançado estágio de degradação termal das rochas da Bacia do São Francisco (Reis 2018). Ao mesmo tempo que a seção estudada neste trabalho sugere que restos deste óleo teriam sido termalmente degradados, o gás natural de seções correlatas poderia ser armazenado em porosidade reliquiar junto a estas mesmas seções oolíticas.

Os perfis descritos indicam superfícies de dissolução recentes e paralelas ao acamamento, principalmente nas fácies Lcs-c, Llt Llg-s e Llh (Figs. 3.2, 3.3, 3.7, 3.8). Estas superfícies ocorrem principalmente associadas a horizontes com filmes argilo-carbonosos, tem geometria planar, paralela ao acamamento, ocasionalmente preenchidos por material saprolítico úmido, ou por calcita branca. A gênese dessas superfícies de dissolução estaria associada a percolação de água meteórica, que teria dissolvido os calcários com menor teor terrígeno ao longo do contato com camadas e lâminas insolúveis, representadas pelos filmes carbonosos. Estes filmes teriam funcionado como verdadeiras barreiras hidráulicas, permitindo a concentração de zonas mais permeáveis ao longo do acamamento. Precipitados de calcita branca junto a estas superfícies indicam a acumulação de água saturada em cálcio. Estas fácies, quando submetidas a alívio de pressão estariam mais sujeitas ao deslocamento, percolação de água e carstificação entre os frequentes planos de laminações. Ao aparentemente corresponderem a elementos controladores do sistema cárstico local, tais características indicam que as fácies Lcs-c, Llg e Llh podem representar importantes elementos para a recarga

e, eventualmente, armazenamento e fluxo de água subterrânea. Os dados levantados neste estudo indicam que este papel se aplica a estas fácies tanto quando compõem sucessões transgressivas quanto quando fazem parte de seções regressivas (Fig. 3.9). Em altas profundidades, por outro lado, a sobrecarga vertical poderia inibir o a percolação de água e desenvolvimento de feições de dissolução junto a esta fácies.

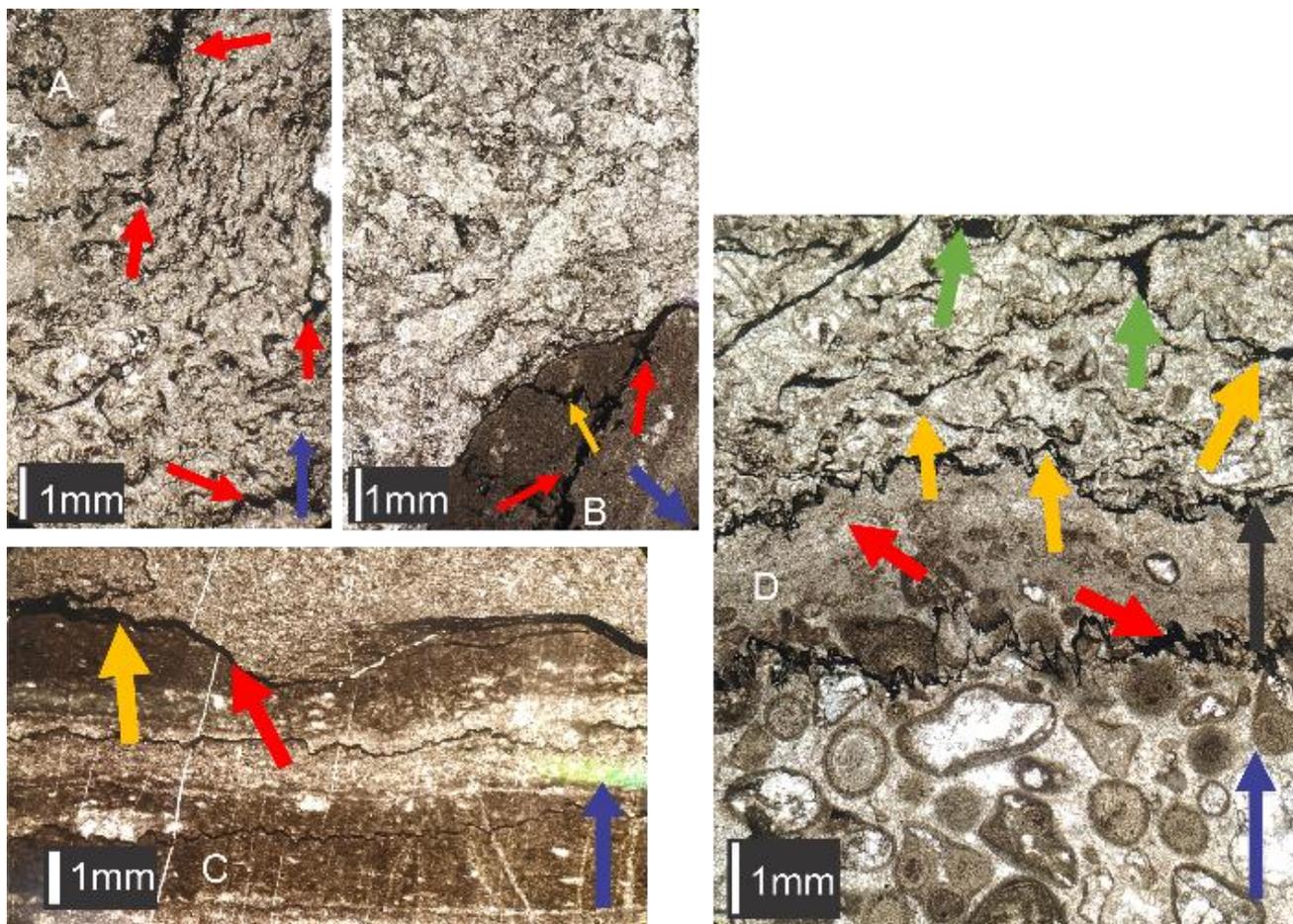


Figura 3.13 - A: Paleoporosidades secundárias preenchidas por material interpretado como óleo morto (Fotomicrografia em luz transmitida e aumento de 2X da fácies Goi (lâmina VI)). B: Canais preenchidos por material interpretado como óleo morto indicando migração (Fotomicrografia em luz transmitida e aumento de 2X da fácies Goi (lâmina IV)). C: Geometria dômica das esteiras microbianas com topo indicando acumulo e migração de material interpretado como óleo morto (Fotomicrografia em luz transmitida e aumento de 2X da fácies Lcs-c (lâmina VII)). D: Paleoporosidades secundárias e canais preenchidos por material interpretado como óleo morto (Fotomicrografia em luz transmitida e aumento de 2X da fácies Goi (lâmina I)). Barra branca representa 1mm. Setas em azul, vermelho, amarelo e verde, representam, respectivamente, topo, estruturas de geração, migração e acumulação de hidrocarbonetos.

CAPITULO 4

CONCLUSÕES

Com base nas interpretações expostas anteriormente, conclui-se que:

- i) As rochas expostas na região de Brasília de Minas, ao longo de uma seção da rodovia MG – 402, foram depositadas em plataforma carbonática rasa de alta energia e baixo ângulo em um ambiente de planície de maré. Foram identificados depósitos de sub- inter e supramaré. Depósitos de intermaré são comumente compostos por extensas sucessões oolíticas que formam estratos com espessura variável lateralmente e, aparentemente, foram retrabalhados à partir de bancos oolíticos. Estes bancos poderiam ter sido responsáveis por criar setores relativamente protegidos que receberam os depósitos de back-shoal com esteiras microbiais da associação de fácies FA-III.
- ii) O arranjo estratigráfico, arquitetura e superfícies reconhecidas junto a estas unidades definem ciclos transgressivos e regressivos de espessura métrica. Sucessões regressivas indicam uma migração dos sistemas deposicionais para NW, compatível com as paleocorrentes documentadas.
- iii) A arquitetura das sucessões estratigráficas estudadas indica que laminações das fácies sedimentares carbonática de granulometria mais fina podem exercer importante controle sobre a percolação de água e o desenvolvimento de feições cársticas locais.
- iv) Fácies sedimentares mostrando feições de dissolução antigas total a parcialmente preenchidas, bem como vestígios do que foi interpretado como óleo morto, indicam que as rochas estudadas podem representar reservatório de hidrocarbonetos, em grande parte destruído por processos pós-deposicionais. Tais reservatórios podem armazenar parte do gás natural descrito em seções correlatadas ao longo da bacia do São Francisco.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alkmim F.F., & Martins-Neto, M.A. 2001. A bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: C.P. Pinto & Martins-Neto, M.A. (eds). *Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais*. SBG, Belo Horizonte, 349p.
- Borghi, L. 2000. *Visão Geral Da Análise De Fácies Sedimentares Do Ponto De Vista Da Arquitetura Depositional*. Rio de Janeiro. MS Dissertation. Universidade Federal do Rio de Janeiro. p. 26
- Caetano-Filho, S., Paula-Santos, G. M., Guacaneme, C., Babinski, M., Bedoya-Rueda, C., Peloso, M., ... e Trindade, R. I. (2019). Sequence stratigraphy and chemostratigraphy of an Ediacaran-Cambrian foreland-related carbonate ramp (Bambuí Group, Brazil). *Precambrian Research*, 331 105365.
- Camacho, D. G. F. 2009. *Aspectos Petrográficos Dos Carbonatos Da Formação Riachuelo-Albiano, Bacia De Sergipe*. MS Dissertation. Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia.
- Campos, J. E. G.; Dardenne, M. A. 2017. *Estratigrafia E Sedimentação Da Bacia Sanfranciscana: Uma Revisão*. *Revista Brasileira De Geociências*, p. 269-282.
- Carvalho, I. S. (eds.). 2010. *Paleontologia: Microfósseis, Paleoinvertebrados*. Rio de Janeiro, Interciencia 274p.
- Catuneanu, O. 2006. *Principles of sequence stratigraphy*. Elsevier
- Costa M.T. da e Branco (1961). *Roteiro para a excursão Belo Horizonte - Brasília*. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia 14, Belo Horizonte, EEUFMG-Instituto de Pesquisas Radioativas, Publicação 15 25 p
- Costa, P. P. 2011 *Influência Da Dolomitização Como Mecanismo Responsável Pela Criação Da Porosidade Nos Calcarenitos Oolíticos/Oncolíticos Do Membro Maruim Da Formação Riachuelo De Idade Albiana Da Bacia Sergipe-Alagoas*. MS Dissertation. Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia
- Cruz, A. B. 2012. *Detalhamento Da Geologia Das Unidades Carbonáticas Do Grupo Bambuí na Região de Alvorada Do Norte, Goiás*. MS Dissertation. Universidade de Brasília p. 106
- Dardenne, M. A. 1978 *Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central*. In: Congresso Brasileiro de Geologia. p. 597-610
- Dardenne, M.A. 1981. *Os Grupos Paranoá e Bambuí na Faixa Dobrada Brasília*. In: SBG-Núcleo BA, Simpósio Cráton do São Francisco e Faixas Marginais 1, Salvador, Anais, p. 140-157
- De Almeida, F. F. M. 2017. *O cráton do São Francisco*. *Revista Brasileira de geociências*, 7(4), 349-364.
- De Oliveira Barros, K. et al. 2016., *Evolução do uso da terra na bacia hidrográfica do Rio Vieira, Montes Claros, MG*. *Revista de Geografia (Recife)*
- Dias-Brito, D. (eds.). 2017. *Guia Petrográfico dos Carbonatos do Brasil*. Rio Claro, UNESP – IGCE-UNESPetro 208 p.
- Diniz Filho, J. B. Et Al. 2008. *Atributos E Modelo Hidrogeológico Conceitual Do Aquífero Carbonático Raso Em Áreas Da Bacia Potiguar-Rn/Brasil. Águas Subterrâneas*, p. 20
- Esfarili-Dizaji, B., & Rahimpour-Bonab, H. 2014. *Generation and evolution of oolitic shoal reservoirs in the Permo-Triassic carbonates, the South Pars Field, Iran*. *Fáciess*, 60(4), 921-940.
- 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.
- Fávera, J. C. (eds) 2001 *Fundamentos de Estratigrafia Moderna*. Rio de Janeiro, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, p. 263
- Feitosa, F. A. C. et al. 2008 *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. rev. e ampl. Rio de Janeiro: CPRM, p. 835
- Ferreira, A. N. P. et al. 2007 *Águas Subterrâneas: um recurso a ser conhecido e protegido*. Secretária de Recursos Hídricos e Ambiente. p. 40
- Flügel, E. (eds.). 2010 *Microfáciess of Carbonate Rocks, Analysis, Interpretation and Application*. Berlin, Springer, 976 p.

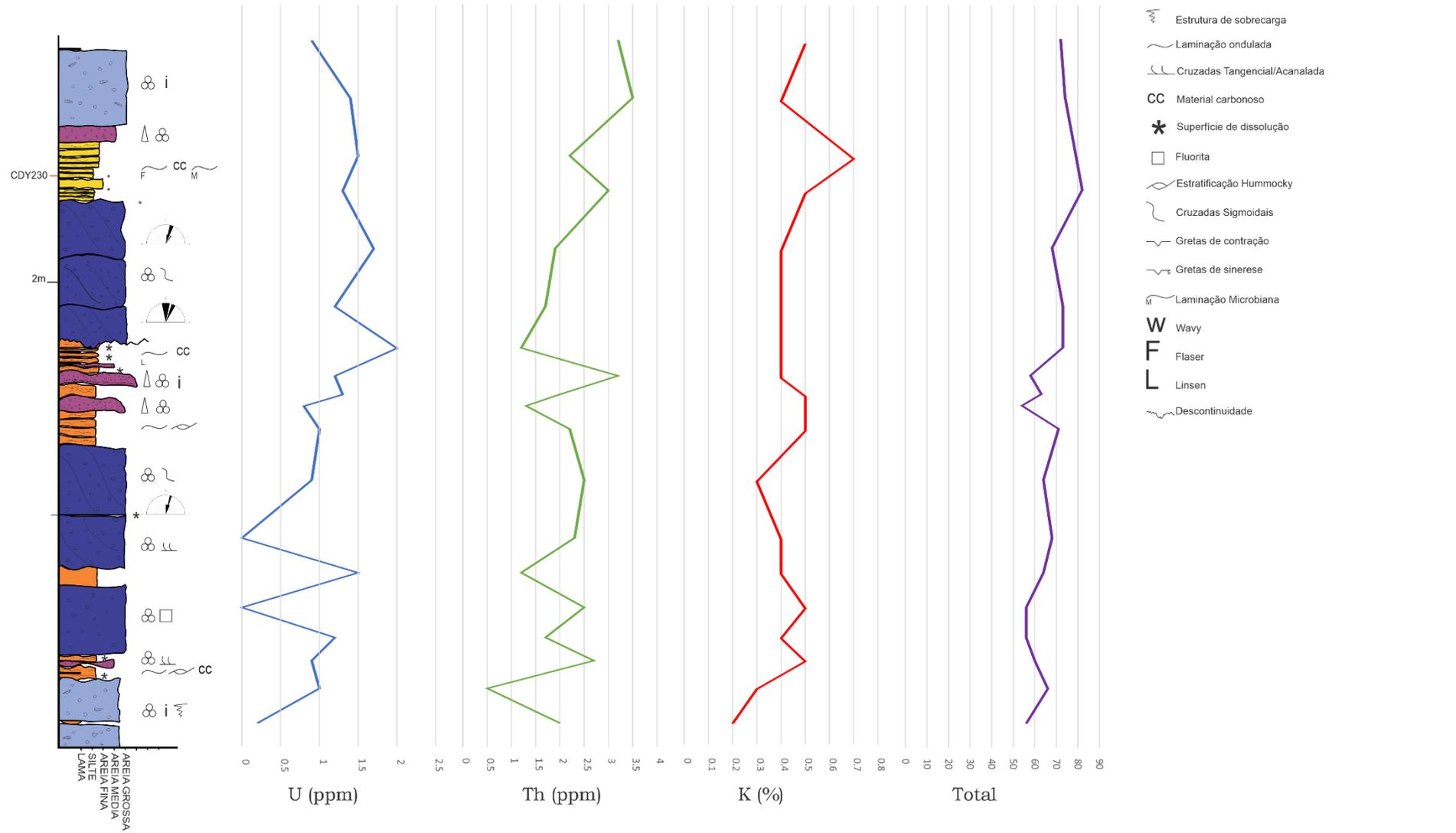
- Neves, P.V.F. 2020, Arquitetura Sedimentar, Feições Pós Depositionais e Circulação De Fluidos Subsuperficiais Da Formação Lagoa Do Jacaré.
- Flügel, E., & Flügel, E. 2004. *Microfacies of carbonate rocks: analysis, interpretation and application*. Springer Science & Business Media.
- Folk, R. L. (eds.). 1959. *Practical Petrographic Classification Of Limestones*. AAPG Bulletin, p. 138,
- Hercos, C. M. 2008 Arcabouço tectono-estratigráfico da bacia do São Francisco nos arredores das serras da Água Fria e da Onça, porção centro-norte do Estado de Minas Gerais. MS Dissertation. Universidade Federal do Ouro Preto p. 207
- Iglesias, M. I. 2007. Estratigrafia e tectônica do Grupo Bambuí no norte do estado de Minas Gerais. MS Dissertation. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte 112p.
- 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*, v. 39, n. 2, p. 256-266
- Kann, M. M. 2019. Petrografia da sequência sedimentar da Ilha Sudeste do arquipélago de São Pedro e São Paulo, Atlântico Equatorial (Bachelor's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte).
- Keith, B. D., & Zuppang, C. W. (1993). *Mississippian Oolites and Petroleum Reservoirs in the United States--An Overview: Chapter 1*.
- Kraemer, B. (eds.). 2013. *Fundamentos da Geologia e da Paleontologia*. Belo Horizonte, UNI-BH 243 p.
- Kuchenbecker M.; Batista G. A. 2014. Projeto Norte de Minas – Mapa Geológico Folha Brasília de Minas (SE.23-Y-C-V escala 1:100.000). Texto explicativo, Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais e CODEMIG
- Leão, Z. M. 2017. Plataformas carbonáticas Pré-Cambrianas: o exemplo da Formação Salitre, Proterozóico Superior, estado da Bahia. *Revista brasileira de geociências*, v. 22, n. 4, p. 407-421.
- Lima, O. N. B. 2011, Estratigrafia isotópica e evolução sedimentar do Grupo Bambuí na borda ocidental do Craton do São Francisco: implicação tectônica e paleo-ambiental.
- Lima, O. N. B.; Uhlein, A.; De Britto, W. 2016 Estratigrafia do Grupo Bambuí na Serra da Saudade e geologia do depósito fosfático de Cedro do Abaeté, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, p. 204-215,.
- Martins Neto, M. A. 2009 Sequence stratigraphic framework of Proterozoic successions in eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, v.26, p. 163-176,.
- Martins, M. Et Al. 2008., A Sequência Pré-Glacial Do Grupo Macaúbas na área-tipo e o registro da abertura do rifte Araçuaí. *Revista Brasileira de Geociências*, p. 761-772.
- Martins-Neto M. A., Alkmim F. F. 2001. Estratigrafia e evolução tectônica das bacias neoproterozóicas do paleocontinente São Francisco e suas margens: Registro da quebra de Rodínia e colagem de Gondwana. In: C.P. Pinto & M.A. Martins-Neto (eds.) *Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais*, Belo Horizonte, SBG/MG, 31-54.
- Martins-Neto, M. A. 2017 O Supergrupo Espinhaço em Minas Gerais: registro de uma bacia rifte-sag do Pale/Mesoproterozóico. *Revista Brasileira de Geociências*, p. 151-168.
- Miall, A.D. (eds.). 2013 *Principles Of Sedimentary Basin Analysis*. Springer Science & Business Media, p. 634
- Miranda, F. S.; Berner, A.; Pessoa, V. C. O. 2007 Evolução Tectono-Sedimentar Da Bacia Do São Francisco. XIV Simpósio De Geologia De Minas Gerais; X Simpósio De Geologia Do Sudeste, Diamantina, MG.
- Miranda, P. S. 2013. Análise permo-porosa de rochas carbonáticas albianas de parte da pedreira Carapeba, formação Riachuelo da bacia de Sergipe. MS Dissertation. Instituto de Geosciencias, Universidade Federal da Bahia.
- Paixão C. (eds). 2014 *Apostila de Rochas Carbonáticas*. Salvador, Congresso Brasileiro de Geologia, 84 p.
- Paula-Santos, G.M.; Babinski, M.; Kuchenbecker, M.; CaetanoFilho, S.; Trindade, R.I. e 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*, 702–720. doi:10.1016/j.gr.2014.07.012
- Plummer, P. S., & Gostin, V. A. (1981). Shrinkage cracks; desiccation or synaeresis?. *Journal of Sedimentary Research*, 51(4) 1147-1156.
- Potter, P. E., Maynard, J. B., & Pryor, W. A. 2012. *Sedimentology of shale: study guide and reference source*. Springer Science & Business Media
- Pratt, B. R. (1998). Syneresis cracks: subaqueous shrinkage in argillaceous sediments caused by earthquake-induced dewatering. *Sedimentary Geology* 117 1-10

- Reading, H.G. 1996. *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy*. Blackwell Publishing, London, pp. 615p.
- Reis H.L.S. & Suss J.F. 2016. Mixed carbonate–siliciclastic sedimentation in forebulge grabens: An example from the Ediacaran Bambuí Group, São Francisco Basin, Brazil. *Sedimentary Geology*, 339: 83-103
- Reis, H. L. S. 2011. "Estratigrafia e tectônica da Bacia do São Francisco na zona de emanções de gás natural do baixo Rio Indaiá (MG)." MS Dissertation. Universidade Federal do Ouro Preto p. 161
- Reis, H. L., Alkmim, F. F., Fonseca, R. C., Nascimento, T. C., Suss, J. F., & Prevatti, L. D. 2017. The São Francisco Basin. In: Heilbron, M., Cordani, U.G., Alkmim, F.F. (eds.). *São Francisco Craton, Eastern Brazil. Developments Regional Geology Reviews*, Switzerland, Springer, p. 117-143
- Rodrigues, J. B. 2008., Proveniência de sedimentos dos grupos Canastra, Ibiá, Vazante e Bambuí: um estudo de zircões detríticos e idades modelo Sm-Nd. MS Dissertation. Universidade Federal de Brasília p. 161
- Romano, A.; Knauer, L.G. 2015. Projeto Norte de Minas – Mapa Geológico Folha São João da Ponte (SD.23-Z-C-V escala 1: 100.000). Texto explicativo, Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais e CODEMIG
- Russell, W. L. (1944). The total gamma ray activity of sedimentary rocks as indicated by Geiger counter determinations. *Geophysics*, 9(2) 180-216.
- Santos, D. M., Sanchez, E. A., e Santucci, R. M 2018. Morphological and petrographic analysis of newly identified stromatolitic occurrences in the Lagoa do Jacaré Formation, Bambuí Group, State of Minas Gerais, Brazil. *Revista Brasileira de Paleontologia* 21, 3.
- Scholle, P. A., & Ulmer-Scholle, D. S 2003. *A Color Guide to the Petrography of Carbonate Rocks: Grains, Textures, Porosity, Diagenesis*, AAPG Memoir 77 (Vol. 77). AAPG.
- Schultze, S. 1997. Whiting events: biogenic origin due to the photosynthetic activity of cyanobacterial picoplankton. *Limnology and oceanography*, p. 133-141,
- Singhal, B. B. S., & Gupta, R. P. (eds.). 2010. *Applied hydrogeology of fractured rocks*. Roorkee, Springer Science & Business Media, 401 p. 401
- Soares, A. L. F. 2020. Análise da Deformação no Cinturão de Antepaís da Faixa Araçuai no Norte de Minas Gerais: Investigação em Rochas Carbonáticas Oolíticas da Formação Lagoa do Jacaré (Grupo Bambuí). Iniciação Científica. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 51p.
- Suguio, K. (eds.). 2003. *Geologia sedimentar*. São Paulo, Edgard Blücher, 302 p.
- Tavares, T.D., Martins, M. de S., Alkmim, F.F. e Lana, C. (2020). 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*, 97, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102395>.
- Terra, G. J. S., Spadini, A. R., França, A. B., Sombra, C. L., Zambonato, E. E., Juschaks, L. D. S., ... & Matsuda, N. S. (2010). Classificação de rochas carbonáticas aplicável às bacias sedimentares brasileiras. *Boletim Geociencias Petrobras* 18, 9-29.
- Tonietto, S. N. 2010. *Diagênese e hidrotermalismo em rochas carbonáticas proterozóicas: Grupos Bambuí e Vazante, Bacia do São Francisco*. MS Dissertation. Instituto de Geociencias Universidade de Brasília, Brazil, p. 167,
- Tucker, M. E. (eds.). 2009. *Sedimentary petrology: an introduction to the origin of sedimentary rocks*. John Wiley & Sons, p. 272
- Tucker, M. E., & Wright, V. P. 2009. *Carbonate sedimentology*. John Wiley & Sons.
- Tucker, M. E., Dias-Brito, D. (eds.). 2017. *Petrologia Sedimentar Carbonática: Iniciação com base no registro geológico do Brasil*. Rio Claro, UNESP – IGCE-UNESPetro 208 p.
- Uhlein, A.; Ersinzon, F.; Uhlein, G.J. e Alcântara, D.G. (2017). Estratigrafia e sistemas deposicionais do Supergrupo Espinhaço e grupos Bambuí e Macaúbas: roteiro de campo na Serra do Espinhaço Meridional (MG). *Terra e Didática* 13:244–257. doi:10.20396/td.v13i3.8650963
- Uhlein, A.; Trompette, R.; Egydio-Silva, M. 1995, Rifteamentos superpostos e tectônica de inversão na borda sudeste do Cráton do São Francisco. *Revista Geonomos*, v. 3, n. 1,
- Uhlein, G. J. et al. 2019. Ediacaran paleoenvironmental changes recorded in the mixed carbonate-siliciclastic Bambuí Basin, Brazil. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, v. 517, p. 39-51

- Neves, P.V.F. 2020, Arquitetura Sedimentar, Feições Pós Depositionais e Circulação De Fluidos Subsuperficiais Da Formação Lagoa Do Jacaré.
- Uhlein, G.J.; Uhlein, A.; Halverson, G.P.; Stevenson, R.; Caxito, F.A.; Cox, G.M. e Carvalho, J.F. 2016. The Carrancas Formation Bambuí Group: a record of pre-Marinoan sedimentation on the southern São Francisco craton, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 71:1–16. doi:10.1016/j.jsames.2016.06.009
- Vieira, L. C. et al. 2016., A Formação Sete Lagoas em sua área-tipo: fácies, estratigrafia e sistemas deposicionais. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 37, n. 4 suppl, p. 168-181,
- Wahl, J. S. (1983). Gamma-ray logging. *Geophysics*, 48(11) 1536-1550.
- Walker, R. G. (eds.). 1992. *Fáciess models: response to sea level change*. Canada, Geological Association of Canada, 409p.
- Warren, L.V.; Quaglio, F.; Riccomini, C.; Simões, M.G.; Poiré, D.G.; Strikis, N.M.; Anelli, L.E. e Strikis, P.C. (2014). The puzzle assembled: Ediacaran guide fossil *Cloudina* reveals an old proto-Gondwana seaway. *Geology*, 42:391–394. doi:10.1130/ G35304.1
- Wilson, J. L. 2012. *Carbonate faciess in geologic history*. Springer Science & Business Media.
- Zalan, P.V., Romeiro-Silva, P. C. 2007. Bacia do São Francisco. *Boletim de Geociencias da Petrobras*, p. 561-571.

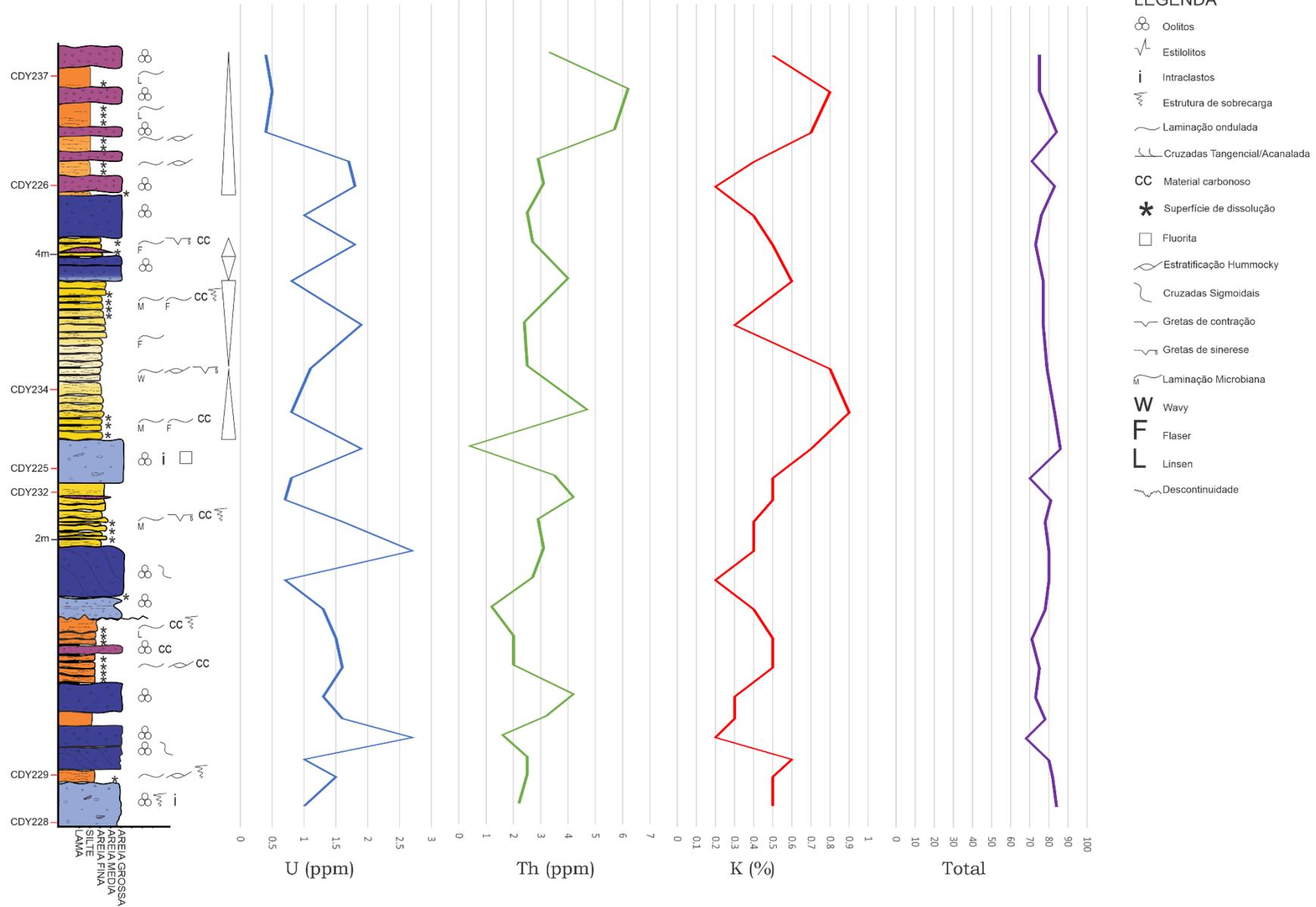
APENDICES

PERFIL I

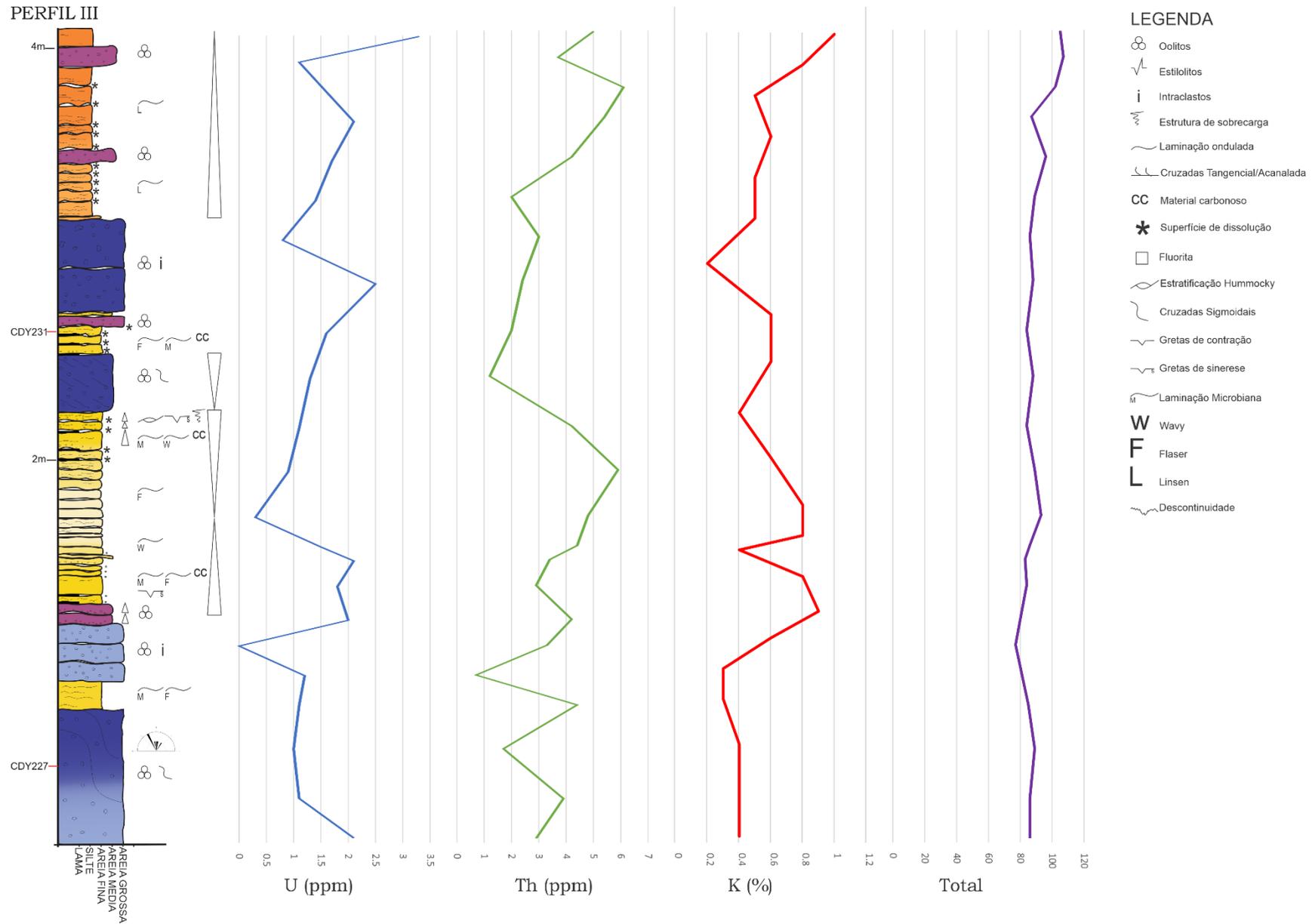


Apêndice 1 - Perfil 1

PERFIL II

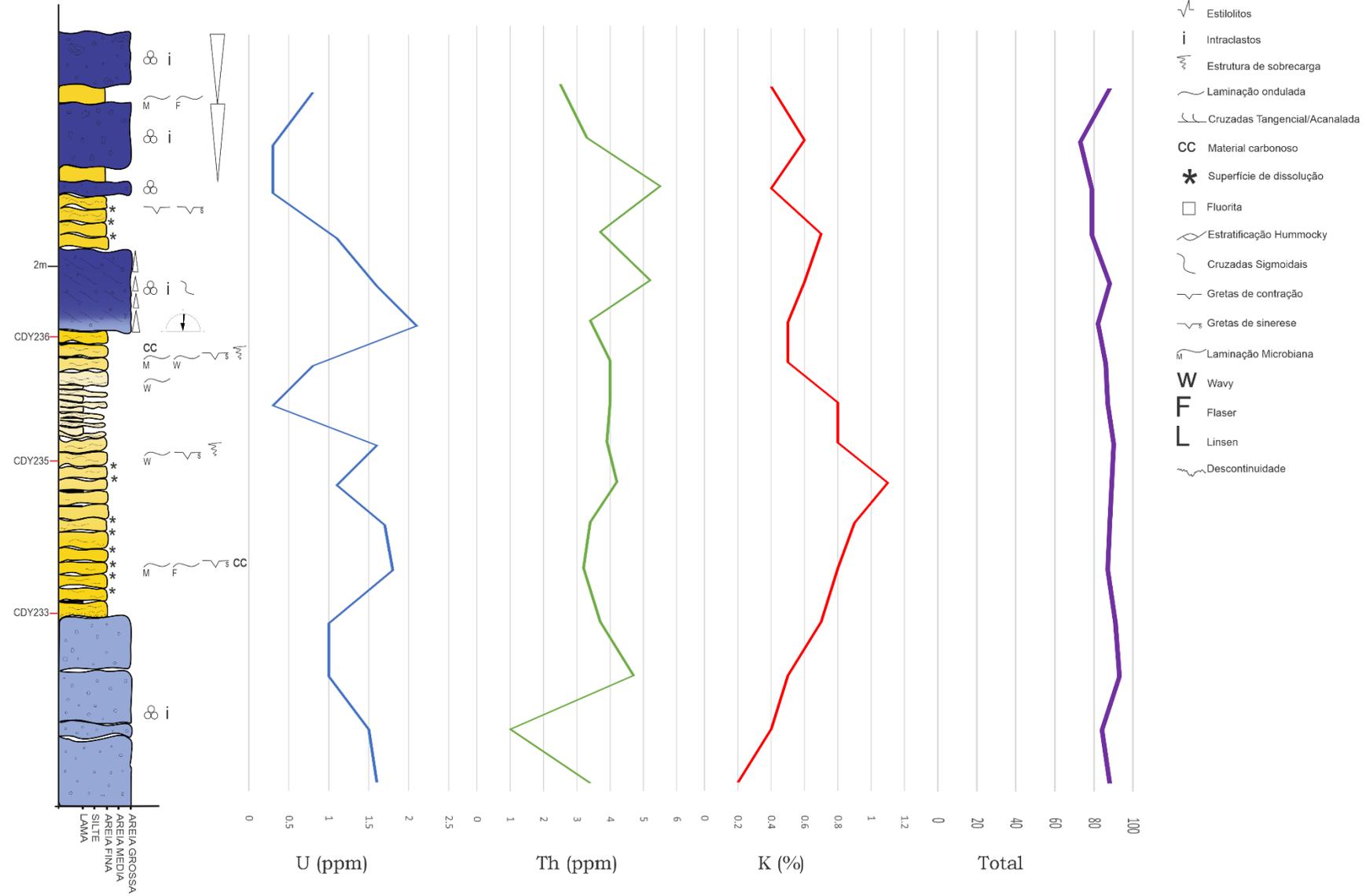


Apêndice 2 - Perfil 2



Apêndice 3 - Perfil 3

PERFIL IV



Apêndice 4 - Perfil 4

Medida	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)	Dr (Dose Rate nGy/h)	Total (nGy/h)
10	0.2	2	0.2	1.1	56
25	1	0.5	0.3	1.3	66
38	0.9	2.7	0.5	2.2	60
48	1.2	1.7	0.4	1.8	56
60	0	2.5	0.5	1.9	56
75	1.5	1.2	0.4	1.9	64
90	0	2.3	0.4	1.2	68
115	0.9	2.5	0.3	1.8	64
138	1	2.2	0.5	2.1	71
148	0.8	1.3	0.5	1.6	54
153	1.3	2	0.5	2.2	63
160	1.2	3.2	0.4	2.3	58
173	2	1.2	0.4	2.1	73
190	1.2	1.7	0.4	1.9	73
215	1.7	1.9	0.4	2.2	68

Apêndice 5 - Tabela de medidas de raios gama perfil 1

Medida	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)	Dr (Dose Rate nGy/h)	Total (nGy/h)
15	1	2.2	0.5	2	84
35	1.5	2.5	0.5	2.5	82
48	1	2.5	0.6	2.2	80
63	2.7	1.6	0.2	2.5	68
75	1.6	3.2	0.3	2.4	78
90	1.3	4.2	0.3	2.5	73
110	1.6	2	0.5	2.3	75
130	1.5	2	0.5	2.4	71
150	1.3	1.2	0.4	1.7	78
170	0.7	2.7	0.2	1.6	80
190	2.7	3.1	0.4	3.2	80
210	1.6	2.9	0.4	2.5	78
225	0.7	4.2	0.5	2.4	81
240	0.8	3.5	0.5	2.3	70
260	1.9	0.4	0.7	3.3	86
285	0.8	4.7	0.9	3.3	83
315	1.1	2.5	0.8	2.6	79
345	1.9	2.4	0.3	2.3	77
375	0.8	4	0.6	2.6	77
400	1.8	2.7	0.5	2.7	73
420	1	2.5	0.4	2	76
440	1.8	3.1	0.2	2.4	83
458	1.7	2.9	0.4	2.5	71
478	0.4	5.7	0.7	3	84
505	0.5	6.2	0.8	3.5	75
530	0.4	3.3	0.5	2.1	75

Apêndice 6 - Tabela de medidas de raios gama perfil 2

Medida	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)	Dr (Dose Rate nGy/h)	Total (nGy/h)
10	2.1	2.9	0.4	2.7	10
30	1.1	3.9	0.4	2.5	30
55	1	1.7	0.4	1.7	55
78	1.1	4.4	0.3	2.5	78
93	1.2	0.7	0.3	1.4	93
108	0	3.3	0.6	1.9	108
120	2	4.2	0.9	3.8	120
138	1.8	2.9	0.8	3.3	138
158	1.5	4.4	0.8	3.4	158
173	0.3	4.8	0.8	2.9	173
195	0.9	5.9	0.6	3.3	195
218	1.1	4.2	0.4	2.5	218
243	1.3	1.2	0.6	2	243
265	1.6	2	0.6	2.4	265
150	2.1	3.4	0.4	2.9	150
290	2.5	2.4	0.2	2.6	290
313	0.8	3	0.5	2.1	313
333	1.4	2	0.5	2.3	333
353	1.7	4.2	0.6	3.3	353
373	2.1	5.4	0.5	4.3	373
388	1.6	6.1	0.8	5.3	388
403	1.1	3.7	1	6.3	403
415	3.3	5	1.2	7.3	415

Apêndice 7 - Tabela de medidas de raios gama perfil 3

Medida	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)	Dr (Dose Rate nGy/h)	Total (nGy/h)
10	1.6	3.4	0.2	2.4	10
30	1.5	1	0.4	1.9	30
50	1	4.7	0.5	2.9	50
70	1	3.7	0.7	2.8	70
90	1.8	3.2	0.8	3.2	90
108	1.7	3.4	0.9	3.5	108
123	1.1	4.2	1.1	3.6	123
138	1.6	3.9	0.8	3.5	138
153	0.3	4	0.8	2.6	153
168	0.8	4	0.5	2.5	168
183	2.1	3.4	0.5	3	183
198	1.6	5.2	0.6	3.4	198
215	1.1	3.7	0.7	2.8	215
233	0.3	5.5	0.4	2.4	233
250	0.3	3.3	0.6	2	250
270	0.8	2.5	0.4	1.8	270

Apêndice 8 - Tabela de medidas de raios gama perfil 4