



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

FLÁVIA CALLEFO

**“ANÁLISE TAFONÔMICA E PALEOECOLÓGICA DE ESTRUTURAS ASSOCIADAS
A COMUNIDADES MICROBIANAS HOLOCÊNICAS E PERMIANAS”**

CAMPINAS

2014



NUMERAÇÃO: 482/2014

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

FLÁVIA CALLEFO

**“ANÁLISE TAFONÔMICA E PALEOECOLÓGICA DE ESTRUTURAS ASSOCIADAS
A COMUNIDADES MICROBIANAS HOLOCÊNICAS E PERMIANAS”**

ORIENTADORA: PROF^a DRA. FRESIA SOLEDAD RICARDI TORRES BRANCO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA AO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DA UNICAMP PARA
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM GEOCIÊNCIAS
NA ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS.**

**ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL
DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA ALUNA FLAVIA
CALLEFO E ORIENTADA PELA PROF^a DRA. FRESIA
SOLEDAD RICARDI TORRES BRANCO.**

CAMPINAS

2014

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca do Instituto de Geociências
Cássia Raquel da Silva - CRB 8/5752

C132a Callefo, Flavia, 1983-
Análise tafonômica e paleoecológica de estruturas associadas a comunidades microbianas holocênicas e permianas / Flavia Callefo. – Campinas, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: Fresia Soledad Ricardi Torres Branco.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.

1. Sedimentação e depósito. 2. Atividade microbiana. 3. Geologia estratigráfica - Holoceno. 4. Geologia estratigráfica - Permiano. I. Ricardi-Branco, Fresia, 1963-. II. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Geociências. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Taphonomic and paleoecological analysis of structures associated with holocen and permian microbial communities

Palavras-chave em inglês:

Sedimentation and deposition

Microbial activity

Stratigraphic geology - Holocene

Stratigraphic geology - Permian

Área de concentração: Geologia e Recursos Naturais

Titulação: Mestra em Geociências

Banca examinadora:

Fresia Soledad Ricardi Torres Branco [Orientador]

William Sallum Filho

Jacinta Enzweiler

Data de defesa: 31-03-2014

Programa de Pós-Graduação: Geociências



UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS NA
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**

AUTORA: Flávia Callefo

**ANÁLISE TAFONÔMICA E PALEOECOLÓGICA DE ESTRUTURAS
ASSOCIADAS A COMUNIDADES MICROBIANAS HOLOCÊNICAS E
PERMIANAS**

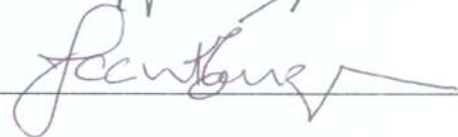
ORIENTADORA: Profa. Dra. Frésia Soledad Ricardi Torres Branco

Aprovada em: 31 / 03 / 2014

EXAMINADORES:

Profa. Dra. Frésia Soledad Ricardi Torres Branco  - Presidente

Profa. Dra. Jacinta Enzweiler



Prof. Dr. William Sallun Filho



Campinas, 31 de março de 2014

*Dedico este trabalho aos meus pais, aos meus sogros,
à minha avó e, principalmente, para Rafael Amaral Cataldo.*

*Dedico também à “tia” Cristina, que
ensinou-me a ler e a escrever.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela vida que me foi concedida, e pelas oportunidades que graças a Ele eu tive para chegar até aqui. Agradeço aos meus pais, Ana e Valdomiro, por toda a educação necessária para a construção do meu caráter. Agradeço às minhas irmãs, Anelize e Fernanda, pelos anos de diversão e companhia, brigas, lutas (até com cadeiras), mas acima de tudo, pelo amor que, apesar de não admitido com palavras, sempre existiu entre nós.

Agradeço aos meus avós Carolina e Antônio, onde quer que estejam, por tudo o que foram e pela família maravilhosa que construíram. Agradeço à minha avó Helena, a qual sempre fez muito pelos outros e me ensinou, sem intenção, o valor da caridade.

Aos meus sogros, Gláucia e Dionísio, pelo constante apoio, pelo exemplo de honestidade e por serem como pais para mim.

As minhas tias Marinês, Maria Elisa, Adelaide, Maria Luiza e Vera, pelo apoio quando precisei.

Ao padre José Donizetti Maciel, por ter sido um grande pai e amigo, e principalmente um exemplo de dedicação aos estudos.

Agradeço a todos os meus primos (que são muitos para citar os nomes), por sempre estarmos unidos, pela amizade e pelo apoio. Agradeço especialmente aos primos Claudete e Alberto, por me darem a oportunidade de ter bons estudos.

Aos meus cunhados Du e Gustavo, e meu sobrinho Felipe, este uma de minhas maiores alegrias.

Agradeço aos meus amigos, pelo apoio: Tatiana (Gorda), Nanci, Érica, Ana Érica, Edilaine, Hilton, Artur, Andrezinho, Rogério, Melina, Isabel, Deborah, Markinho, Luana e Daiane.

Aos meus amigos da CIMEI São João Batista e a todas as crianças que passaram pela minha vida. A inocência e o carinho de cada uma foram fonte de inspiração e motivação para realizar este trabalho.

A todos os professores que passaram por minha vida, me trazendo conhecimento,

seja ele científico ou sobre “coisas da vida”. O exemplo de todos me inspira a cada dia. Agradeço a professora Teresa Degani (*in memoriam*), por ter falado tão grandemente sobre Geologia, que fez com que eu me interessasse pela área. Agradeço especialmente a Marilza Andretta Leardini, minha inesquecível professora e grande exemplo de ser humano.

Aos profissionais que me ajudaram de alguma forma na construção deste trabalho, como os pesquisadores Dr. Fabio Rodrigues e Dr. Douglas Galante, do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS); geólogo Fábio Cardinale Branco; Prof^a Dra. Fosca Pedini Pereira Leite, do Departamento de Biologia Animal, IB – Unicamp; Dra. Cíntia Yamashita e Prof^a Dra. Silvia Helena de Mello e Souza, do Instituto Oceanográfico – USP; Gustavo Shimizu, do Departamento de Biologia Vegetal do IB – Unicamp; aos professores do IG Jacinta Enzweiller, Alexandre Vidal, Emilson Leite e Giorgio Basilicci, e aos funcionários e técnicos, pelo trabalho e dedicação, especialmente Valdirene Pinotti, Gorete Bernardelli, Valdir Francisco Olivieri e Erica Tonetto.

Aos proprietários das pedreiras PH7 e Gobbo, pela permissão para a retirada das amostras utilizadas neste estudo.

A minha querida orientadora Prof^a Dra. Fresia Ricardi-Branco, por todo o conhecimento transmitido, pela força, amizade, inspiração, paciência e todos os esforços realizados para que este trabalho fosse realizado. Obrigada por tudo!

E, enfim, ao meu companheiro de todas as horas, Rafael Amaral Cataldo. Agradeço por todo o seu amor, carinho, força, conhecimento e exemplo de dedicação ao trabalho. E vamos em frente com nossos sonhos!



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**ANÁLISE TAFONÔMICA E PALEOECOLÓGICA DAS ESTRUTURAS ASSOCIADAS
A COMUNIDADES MICROBIANAS HOLOCÊNICAS E PERMIANAS**

RESUMO

Dissertação de Mestrado

Flávia Callefo

Esteiras microbianas são estruturas organossedimentares laminadas, desenvolvidas a partir do acréscimo de lâminas de sedimentos aprisionados através do metabolismo de microrganismos, que induzem a precipitação de carbonato. Microbialitos são depósitos organossedimentares formados pela interação de microrganismos com sedimentos detríticos, através dos processos de trapeamento e aglutinação dos grãos e minerais. Esta pesquisa apresenta os resultados obtidos com o estudo tafonômico e paleoecológico de estruturas desenvolvidas por atividade de microrganismos, como estromatólitos, microbialitos e esteiras microbianas, com o intuito de comparar os resultados e traçar similaridades e diferenças nas relações ecológicas e ambientes de formação. Foram utilizados modelos recentes (Holoceno), como a Lagoa Salgada e Lagoa Pitanguinha, RJ, para compreender modelos fósseis (Permiano), afloramentos em Taguaí e Santa Rosa do Viterbo, SP. A metodologia se constituiu em análise de sedimentos associados, petrografia, análises composicionais (como MEV/EDS e Espectroscopia Raman) e estudo de campo. Foram levados em consideração os aspectos ambientais e biota contemporânea ao crescimento e desenvolvimento dos microbiais. As principais conclusões obtidas foram que os ambientes apresentam similaridades com relação a biota desenvolvida, bem como as relações ecológicas que estas mantinham com as comunidades microbianas responsáveis pelo desenvolvimento dos microbialitos e esteiras microbianas. O ambiente de crescimento das estruturas eram marinhos de águas rasas e hipersalinas, com o clima quente e alta taxa de evaporação. A alternância de eventos de tempestades e águas calmas, com posterior período de calmaria no qual foi possível o desenvolvimento de esteiras microbianas foram evidenciados no afloramento de Taguaí e na Lagoa Pitanguinha. Os microbialitos recentes da Lagoa Salgada sofreram maior influência de atividade de predação e herbivoria por parte de invertebrados, o que pode ter sido um fator relevante para a limitação do crescimento destas estruturas em comparação com aquelas existentes em Santa Rosa do Viterbo.

Palavras-chave: Microbialitos, esteiras microbianas, Holoceno, Permiano.



UNIVERSITY OF CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

TAPHONOMIC AND PALEOECOLOGICAL ANALYSIS OF STRUCTURES
ASSOCIATED WITH HOLOCEN AND PERMIAN MICROBIAL COMMUNITIES

ABSTRACT

Master degree dissertation

Flávia Callefo

Microbial mats can be defined as laminated organosedimentary structures developed from the addition of laminae of sediments trapped through microorganisms metabolism, which leads to carbonate precipitation. Microbialites are organosedimentary deposits generated by the interaction between microorganisms and detritic sediments through trapping and agglutination of minerals and grains play a key role. This research presents the results of taphonomic and paleoecological studies from structures developed by the activity of microorganisms such as microbialites, stromatolites and microbial mats aiming to compare between the results obtained and to map similarities and differences on the ecological relations and formation environments. Recent models such as Salgada Lagoon and Pitanguinha Lagoon (Holocene), both located on Rio de Janeiro, were used to understand Permian fossils models, outcrops located in Taguaí and Santa Rosa do Viterbo/SP. The methodology was based on the analysis of associated sediments, petrography and compositional analysis (MEV/EDS and Raman Spectroscopy) besides field studies. Aspects such as recent environments and biotas were considered to the analysis. The main conclusions were that the environments present similarities based on the development of the biotas as well as the ecological relations which those developed within the microbial communities responsible for the development of the microbialites and microbial mats. The growth environments of the structures were classified as shallow marine hypersaline waters, with warm weather and high evaporation rates. There was an alternation between storm events and calm waters. The growth of microbial mats became possible when the waters were predominantly calm evidenced by the outcrops from Taguaí and Pitanguinha Lagoon. The recent microbialites from Salgada Lagoon had a greater influence by activities from predators and herbivorous organisms such as invertebrates, which may be a relevant factor for the limitation growth of these structures when compared with those founded at Santa Rosa do Viterbo.

Keywords: Microbialites, microbial mats, Holocen, Permian.

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 JUSTIFICATIVAS PARA O ESTUDO DE ESTEIRAS MICROBIANAS E CARBONATOS MICROBIAIS | 1 |
| 1.2 OBJETIVO | 2 |
| 1.3 ÁREAS DE ESTUDO | 2 |
| 2. ESTRUTURAS MICROBIANAS E CARBONATOS | 6 |
| 2.1 BIOFILMES, ESTEIRAS MICROBIANAS E MICROBIALITOS | 6 |
| 2.2.1 Substância extracelular polimérica - EPS | 6 |
| 2.2.2 Biofilmes | 7 |
| 2.2.3 Esteiras microbianas | 8 |
| 2.2.4 Microbialitos | 11 |
| 2.3 PRECIPITAÇÃO E MINERALIZAÇÃO CARBONÁTICA | 12 |
| 2.3.1 Mineralização biologicamente controlada | 13 |
| 2.3.2 Organomineralização | 14 |
| 2.3.3 Mineralização inorgânica | 15 |
| 3. ROCHAS CARBONÁTICAS | 17 |
| 4. CONTEXTO GEOLÓGICO | 19 |
| 4.1 ESTRUTURAS MICROBIANAS PERMIANAS | 19 |
| 4.2 ESTRUTURAS MICROBIANAS HOLOCÊNICAS | 23 |
| 5. MATERIAIS E MÉTODOS | 25 |
| 5.1 AMOSTRAS ESTUDADAS | 25 |
| 5.2 TRABALHO DE CAMPO | 28 |
| 5.3 TRABALHO DE GABINETE | 29 |
| 6. RESULTADOS | 36 |
| 6.1 ESTRUTURAS MICROBIANAS PERMIANAS – MINERAÇÃO PH7, SANTA ROSA DO VITERBO/SP | 36 |
| 6.1.1 Brecha carbonática intraformacional | 37 |
| 6.1.2 Esteira microbiana | 45 |
| 6.1.3 Estromatólitos | 52 |
| 6.2 ESTRUTURAS MICROBIANAS PERMIANAS – PEDREIRA GOBBO, TAGUAÍ/SP | 58 |
| 6.2.1 Nível 1 | 61 |
| 6.2.2 Nível 2 | 72 |
| 6.2.3 Nível 3 | 80 |

| | |
|---|-----|
| 6.3 MICROBIALITOS, ESTEIRAS MICROBIANAS E ONCÓIDES – LAGOA SALGADA/RJ | 86 |
| 6.3.1 Microbialitos | 86 |
| 6.3.2 Análise de sedimentos (estromatólitos e esteiras microbianas) | 90 |
| 6.3.3 Análise por MEV/EDS | 96 |
| 6.4 ESTEIRAS MICROBIANAS E COQUINA- LAGOA PITANGUINHA/RJ | 105 |
| 7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 111 |
| 7.1 AMBIENTES HOLOCÊNICOS – LAGOAS SALGADA E PITANGUINHA/RJ | 111 |
| 7.2 AMBIENTES PERMIANOS – SANTA ROSA DO VITERBO/SP | 116 |
| 7.3 AMBIENTES PERMIANOS – TAGUAÍ/SP | 120 |
| 7.4 COMPARAÇÕES ENTRE OS AMBIENTES ANTIGOS E ATUAIS | 123 |
| 8. CONCLUSÕES | 126 |
| 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 128 |

APÊNDICE

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1.....pág. 3**
Mapa denotando áreas de estudo relativas ao Permiano. Detalhe em amarelo na foto do afloramento de Santa Rosa do Viterbo, indicando estromatólito domal gigante (modificado de Caires, E.T., 2005).
- Figura 1.2.....pág. 4**
Mapa da Lagoa Salgada, RJ, denotando pontos de coleta nas bordas nordeste, sudeste e sudoeste.
- Figura 1.3.....pág. 5**
1) Imagem de satélite da região do complexo lagunar de Araruama (foto de Vasconcellos, 2013-modificada), destacando a Lagoa Pitanguinha; 2) Foto de uma das bordas da lagoa.
- Figura 2.1.....pág. 10**
Esteira microbiana com a disposição da microbiota em relação ao tipo de metabolismo que cada grupo exerce. Foto modificada de Kurt Hanselmann, ETHZ.
- Figura 4.1.....pág. 20**
Coluna estratigráfica do Neopaleozóico da Bacia do Paraná, com destaque para o Grupo Passa Dois. Modificado de Milani *et al*, 2007.
- Figura 4.2.....pág. 21**
Litoestratigrafia do Grupo Passa Dois. Modificado de Meghioratti (2006).
- Figura 4.3.....pág. 22**
Subdivisão Estratigráfica do Subgrupo Irati (Hachiro et al.,1993).
- Figura 5.1.....pág. 30**
Metodologia utilizada para a análise das estruturas microbianas permianas coletadas em Santa Rosa do Viterbo e em Taguaí.
- Figura 5.2.....pág. 31**
Frações de sedimentos peneirados de acordo com granulometria e divididos em volumes de 10 cm³.
- Figura 5.3.....pág. 32**
Metodologia utilizada para a análise das estruturas microbianas holocênicas das lagoas Salgada e Pitanguinha.
- Figura 5.4.....pág. 33**
Classificação proposta por Embry & Klovan (1971) para rochas carbonáticas.

- Figura 6.1.....pág. 36**
Coluna estratigráfica do afloramento da pedreira PH7, evidenciando as estruturas estudadas (brecha intraformacional, esteira microbiana e estromatólitos).
- Figura 6.2.....pág. 38**
Pedreira PH7 em Santa Rosa do Viterbo, Subgrupo Irati. 1) Localização da camada de brecha em campo; 2) detalhe da estrutura; 3) face polida mostrando diferentes composições, incluindo fragmentos de esteiras microbianas, indicados por setas verdes.
- Figura 6.3.....pág. 39**
Pedreira PH7, Santa Rosa do Viterbo, Subgrupo Irati. Ossos desarticulados de mesossaurídeos na superfície do chão da frente de lavra, na brecha intraformacional. Setas verdes indicando costelas; seta azul indicando fêmur e seta amarela indicando vértebra.
- Figura 6.4.....pág. 40**
Brecha intraformacional; Pedreira PH7, Santa Rosa do Viterbo, Subgrupo Irati. 1) brecha; as setas vermelhas indicam conchas de ostracodes desarticuladas (CP6/71) e 2) porção basal; arenito carbonático; seta indicando fragmento de osso de vertebrado (CP6/78). Desenhos (esquerda) evidenciando as estruturas. Escalas de 1 mm.
- Figura 6.5.....pág. 41**
Brecha intraformacional; Pedreira PH7, Santa Rosa do Viterbo, Subgrupo Irati 1) Porção intermediária da brecha, mostrando textura disseminada de sílica – si e carbonato de cálcio (cimento calcítico – ca; CP6/71). 2) nicóis cruzados; seta amarela evidenciando concha de ostrácide (CP6/71). 3) nicóis cruzados; porção intermediária; seta amarela evidenciando oóide (estrutura concêntrica – córtex – ao redor do núcleo; CP6/71). 4) Fragmento de concha de bivalve em meio à argila (CP6/71); 5) porção basal; grãos de quartzo (Qz); seta amarela indicando matéria orgânica oxidada (CP6/76); 6) seta indicando matéria orgânica oxidada; grãos de quartzo em meio a esteira microbiana (EM; CP6/76). Escala de 1 mm.
- Figura 6.6.....pág. 42**
Brecha intraformacional; Pedreira PH7, Santa Rosa do Viterbo, Subgrupo Irati. Micrografia eletrônica com contraste composicional e espectros relacionados a carbonato de cálcio e apatita. Região de matriz, com porosidade fenestral relativa a fragmento de esteira microbiana (CP6/78). Escala de 2 mm.
- Figura 6.7.....pág. 43**
Brecha intraformacional; Pedreira PH7, Santa Rosa do Viterbo, Subgrupo Irati. Micrografia eletrônica com contraste composicional evidenciando pontos com composição de carbonato de cálcio (calcita) em região de fragmento de esteira microbiana; e sílica de forma disseminada (CP6/71). Escala de 200µm.

Figura 6.8.....pág. 44

Espectro Raman da amostra CP6/76 – brecha intraformacional, área de fragmento de esteira microbiana. Banda em 1099 cm^{-1} , correspondente ao modo vibracional de maior intensidade da dolomita.

Figura 6.9.....pág. 44

Espectro Raman da amostra CP6/76 – brecha intraformacional, área de fragmento de esteira microbiana. Banda em 1086 cm^{-1} , correspondente ao modo vibracional de maior intensidade da calcita.

Figura 6.10.....pág. 45

Espectro Raman da amostra CP6/76 – brecha intraformacional. Bandas entre $1200\text{ e }1400\text{ cm}^{-1}$, possivelmente correspondentes à matéria orgânica.

Figura 6.11.....pág. 46

1) Esteira microbiana; Pedreira PH7, Santa Rosa do Viterbo, Subgrupo Irati. Localização da esteira microbiana em campo; 2) Detalhe da estrutura em campo; 3) Face polida de esteira microbiana na qual são visíveis finas laminações da base ao topo, sem variações macroscópicas, e possível estiólito, indicado por seta azul.

Figura 6.12.....pág. 47

Esteira microbiana; Pedreira PH7, Santa Rosa do Viterbo, Subgrupo Irati. 1) Nicóis cruzados – base da amostra; seta amarela indicando concha de ostracode articulada, porém, compactada; seta azul indicando pontos de óxido de ferro (CP6/80); 2) Nicóis paralelos – topo da amostra; seta vermelha indicando estiólito; seta preta indicando porosidade fenestral (CP6/80). À esquerda, desenhos evidenciando as estruturas observadas. Escalas de 1 mm.

Figura 6.13.....pág. 48

Esteira microbiana; Pedreira PH7, Santa Rosa do Viterbo, Subgrupo Irati. Amostra CP6/80 - 1) Setas amarelas indicando valvas de ostracodes desarticuladas e compactadas; pelóides (pl) – escala de 1mm; 2) Pelóides (pl); seta amarela indicando fratura preenchida por sílica – escala de 1mm; 3) Pelóides (pl) e valvas de ostracodes compactadas – escala de 2mm; 4) Seta amarela indicando óxido de ferro; escala de 2mm; 5) Seta amarela indicando cimentação por calcita resultante de infiltração de água meteórica; calcita microcristalina (ca) e sílica (si) – escala de 1mm; 6) Textura disseminada de sílica (si) em meio a matriz de calcita (ca) – escala de 1mm.

Figura 6.14.....pág. 49

Esteira microbiana; Pedreira PH7, Santa Rosa do Viterbo, Subgrupo Irati. Amostra CP6/80 - Micrografia eletrônica com contraste composicional evidenciando pontos de composição de dolomita em fratura; matriz calcítica. Escala de $500\text{ }\mu\text{m}$.

Figura 6.15.....pág. 50

Esteira microbiana; Pedreira PH7, Santa Rosa do Viterbo, Subgrupo Irati. Amostra CP6/80 - Micrografia eletrônica com contraste composicional evidenciando pontos de composição de dolomita (interior do pelóide) e de calcita (ao redor). Escala de $500\text{ }\mu\text{m}$.

- Figura 6.16.....pág. 51**
Espectro Raman da amostra CP6/80 – esteira microbiana. Banda em 1086 cm^{-1} correspondente ao modo vibracional de maior intensidade da calcita, referente à região de matriz.
- Figura 6.17.....pág. 51**
Espectro Raman da amostra CP6/80 – esteira microbiana. Banda em 464 cm^{-1} correspondente a quartzo.
- Figura 6.18.....pág. 52**
Estromatólitos domais. Pedreira PH7, Santa Rosa do Viterbo, Subgrupo Irati. 1) Estiólitos, indicados por setas amarelas; 2) Concreção de calcita; 3) Ossos de messosaurídeos desarticulados entre as laminações.
- Figura 6.19.....pág. 53**
Estromatólitos domais. Pedreira PH7, Santa Rosa do Viterbo, Subgrupo Irati. 1) Localização dos estromatólitos em campo; 2) Maior enfoque da estrutura em campo; 3) Face polida de esteira microbiana na qual são visíveis finas laminações da base ao topo, sem variações macroscópicas.
- Figura 6.20.....pág. 55**
Estromatólitos domais. Pedreira PH7, Santa Rosa do Viterbo, Subgrupo Irati. 1) Seta amarela apontando estiólito suturado, de alta amplitude em meio a laminações do estromatólito, e fratura preenchida por calcita, indicada por seta vermelha (CP6/62); 2) Maior ocorrência de estiólitos; porosidade fenestral (CP6/62); 3) Porosidade fenestral com calcita dissolvida e recristalizada, preenchendo os poros; seta amarela apontando osso desarticulado (CP6/65); 4) Idem 3; pontos escuros são matéria orgânica oxidada (CP6/65); 5) Seta amarela apontando concentração de valvas de ostracodes substituídas por calcita, em meio a porosidade (CP6/62); 6) Poro com recristalização de calcita (CP6/62). Escala de 1mm em 1, 2, 3, 4 e 6. Escala de 2mm em 5.
- Figura 6.21.....pág. 56**
Estromatólitos domais. Pedreira PH7, Santa Rosa do Viterbo, Subgrupo Irati. Amostra CP6/64. Micrografia eletrônica com contraste composicional da porção intermediária do estromatólito domal, evidenciando pontos de composição de dolomita e ponto de composição de óxido de ferro. Escala de $200\mu\text{m}$.
- Figura 6.22.....pág. 57**
Estromatólitos domais. Pedreira PH7, Santa Rosa do Viterbo, Subgrupo Irati. Amostra CP6/67. Micrografia eletrônica com contraste composicional da porção superior, evidenciando pontos de composição de dolomita (laminação) e ponto de composição de calcita (substituição de valva de ostracode). Valvas de ostracodes indicadas por setas vermelhas. Escala de $500\mu\text{m}$.
- Figura 6.23.....pág. 59**
Pedreira Gobbo, Taguaí/SP. Formações Serra Alta e Teresina. Coluna estratigráfica modificada de Andreis *at al* (2001), mostrando os três níveis carbonáticos estudados.

Figura 6.24.....pág. 60

Pedreira Gobbo, Taguaí/SP. Formações Serra Alta e Teresina. Visão do afloramento, com os três níveis carbonáticos evidenciados em amarelo.

Figura 6.25.....pág. 61

Pedreira Gobbo, Taguaí/SP. Formações Serra Alta e Teresina. 1) Nível carbonático 1 no afloramento; 2) Detalhe do Nível 1, mostrando oncóides em contato inferior com arenito oolítico; e em contato superior com siltito. Escala de 5 cm; 3) Face polida evidenciando oncóides em meio à esteira microbiana; 4) Detalhe com visão em planta de oncóides e oóides do Nível 1.

Figura 6.26.....pág. 62

Nível 1. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP. Formações Serra Alta e Teresina. Seção polida da amostra CP6/48, com divisão de base, meio e topo, cada qual com suas características macroscópicas. Escala de 5 cm.

Figura 6.27.....pág. 64

Nível 1. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP. Formações Serra Alta e Teresina 1) Topo de amostra CP6/46, com dominância de matriz micrítica, oncóides (on) e pelóides (pl). Escala de 1mm; 2) CP6/45, topo com setas vermelhas indicando valvas de ostracodes desarticuladas e compactadas. Escala de 1mm; 3) CP6/46, porção intermediária, evidenciando oncóide com núcleo (n) arredondado e córtex (c) bem delimitado e com várias laminações concêntricas. Escala de 1mm; 4) CP6/45, porção intermediária; grãos revestidos, parcialmente dissolvidos, com espaços preenchidos por micrita. Escala de 1mm; 5) CP6/46, porção basal com seta vermelha indicando valvas de ostracodes desarticuladas em meio à matriz micrítica. Escala de 1mm; 6) CP6/55, porção basal; setas vermelhas indicando valvas de ostracodes; domínio de matriz micrítica (mc). Escala de 1mm.

Figura 6.28.....pág. 65

Nível 1. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP. Formações Serra Alta e Teresina Amostra CP6/46; Micrografia eletrônica com contraste composicional da porção basal. Espectros de hematita e calcita, correspondentes a pontos em córtex de oncóide. Escala de 500 μ m.

Figura 6.29.....pág. 66

Nível 1. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP. Formações Serra Alta e Teresina Amostra CP6/55; Micrografia eletrônica com contraste composicional da porção intermediária. Espectros de barita, correspondente a ponto em córtex de oncóide; sílica, correspondente a valva de ostracode substituída, sobreposta ao oncóide. Escala de 500 μ m.

Figura 6.30.....pág. 67

Nível 1. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP. Formações Serra Alta e Teresina Amostra CP6/45; Micrografia eletrônica com contraste composicional do topo. Espectros de óxido de titânio (rutilo) em meio à matriz; calcita, correspondente a pelóide. Escala de 500 μ m.

- Figura 6.31.....pág. 68**
 Nível 1. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP. Formações Serra Alta e Teresina Amostra CP6/46; Espectro Raman com banda característica de dolomita, adquirido com tiro em região de córtex de oncóide.
- Figura 6.32.....pág. 68**
 Nível 1. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP. Formações Serra Alta e Teresina Amostra CP6/45; Espectro Raman com bandas características de calcita (1086 cm^{-1}) e de dolomita (1099 cm^{-1}), adquiridos em região entre córtex e núcleo de oncóide.
- Figura 6.33.....pág. 69**
 Nível 1. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP. Formações Serra Alta e Teresina Amostra CP6/46; Espectro Raman com bandas em 225 , 295 e 411 cm^{-1} , característicos de óxido de ferro (hematita); banda em 1087 característica de calcita e banda em 1099 , característica de dolomita; adquiridos em região de córtex de oncóide.
- Figura 6.34.....pág. 70**
 Nível 1. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP. Formações Serra Alta e Teresina Amostra CP6/46; Mapeamento de área de oncóide, evidenciando pontos de alta intensidade de calcita (área em vermelho) e dolomita (área em verde). 1) área sem mapeamento; 2) área com dolomita mapeada; região de matriz; 3) área com calcita mapeada; região de córtex de oncóide e 4) confronto de mapeamento de calcita e dolomita. Escala de $200\text{ }\mu\text{m}$.
- Figura 6.35.....pág. 71**
 Nível 1. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP. Formações Serra Alta e Teresina Amostra CP6/46; porção intermediária do nível 1. 1) área sem mapeamento; 2) mapeamento de calcita (vermelho); 3) mapeamento de dolomita (verde). Região de matriz. Escala de $200\text{ }\mu\text{m}$.
- Figura 6.36.....pág. 71**
 Nível 1. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP. Formações Serra Alta e Teresina Amostra CP6/46; porção superior (topo) de amostra do nível 1, área de matriz entre oncóides. 1) área sem mapeamento; 2) mapeamento de calcita (vermelho); 3) mapeamento de dolomita (verde); 4) confronto de mapeamento de calcita e dolomita. Escala de $200\text{ }\mu\text{m}$.
- Figura 6.37.....pág. 72**
 Nível 2, Pedreira Gobbo, Taguaí/SP. Formações Serra Alta e Teresina; 1) Vista geral no afloramento; 2) Detalhe do Nível 2, mostrando oncóides em contato inferior erosivo com argilito; e em contato superior erosivo com siltito; 3) Face polida evidenciando oncóides e intraclastos.
- Figura 6.38.....pág. 73**
 Nível 2. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP, Formação Teresina. Amostra CP6/52, com divisão de base, meio e topo, cada qual com suas características macroscópicas.

Figura 6.39.....pág. 74

Nível 2. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP, Formação Teresina. Amostra CP6/52; 1) Porção superior, com seta amarela apontando para valvas de ostracodes preenchidas; pontos escuros consistem de matéria orgânica oxidada; 2) Porção superior, com seta amarela indicando matéria orgânica oxidada; pelóide (pl) e oncóide (on); 3) Porção intermediária com abundância de intraclastos (in) em meio a lama carbonática; seta amarela indicando concentração de valvas de ostracodes; 4) Porção intermediária com intraclastos (in) em meio a lama carbonática e argila; pontos escuros de óxido de ferro; seta amarela apontando para valva de ostracode; 5) Porção basal; oncólito (on) em meio a matriz argilosa e intraclastos; 6) Porção basal; setas amarelas indicando oóides. Escalas de 1mm.

Figura 6.40.....pág. 76

Nível 2. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP, Formação Teresina. Amostra CP6/52; Micrografia eletrônica com contraste composicional da porção superior. Espectro de óxido de ferro (hematita) em meio à matriz; espectro de sulfato de bário (barita), em meio a matriz, próxima a área do córtex do oncóide. Escala de 500 μ m.

Figura 6.41.....pág. 77

Nível 2. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP, Formação Teresina. Amostra CP6/52; Micrografia eletrônica com contraste composicional de lâmina de porção intermediária. Espectro de aluminosilicato (argila) correspondente à matriz; espectro de carbonato de cálcio (calcita), em área de córtex de oncóide. Escala de 500 μ m.

Figura 6.42.....pág. 78

Nível 2. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP, Formação Teresina. Amostra CP6/52; Mapeamento de área de oncóide; 1) área sem mapeamento; 2) mapeamento de quartzo em região de núcleo (azul); 3) mapeamento de calcita abrangendo região do córtex (vermelho); 4) confronto de mapeamento de quartzo e calcita; 5) espectro de calcita – banda em 1086 cm^{-1} ; 6) espectro de quartzo – banda em 464 cm^{-1} . Escala de 200 μ m.

Figura 6.43.....pág. 79

Nível 2. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP, Formação Teresina. Amostra CP6/52; Mapeamento de área contendo matéria orgânica em meio à matriz calcítica. 1) área sem mapeamento; 2) mapeamento de matéria orgânica (amarelo); 3) mapeamento de calcita (vermelho); 4) confronto de mapeamento de matéria orgânica e calcita; 5) espectro indicando a presença de matéria orgânica bandas entre 1200 a 1400 cm^{-1} ; 6) espectro indicando a presença de calcita (banda em 1086 cm^{-1}). Escala de 200 μ m.

Figura 6.44.....pág. 80

Nível 3. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP, Formação Teresina 1) Visão geral do afloramento; 2) Detalhe do Nível 3, mostrando limites em contato inferior com oosparito com estratificações cruzadas; e em contato superior com siltito; 3) Fácies polida evidenciando oncóides e oóides.

Figura 6.45.....pág. 81

Nível 3. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP, Formação Teresina. Seção polida da amostra CP6/58 do nível carbonático 3, com divisão de base, meio e topo, cada qual com suas características macroscópicas.

Figura 6.46.....pág. 83

Nível 3. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP, Formação Teresina. 1) Porção superior da amostra CP6/58; oncóides (On) e oóides (Oo) revestidos por lama carbonática; ausência de matriz; 2) Porção superior da amostra CP6/58; oncóide (on) e oóides (Oo) em grande abundância; seta amarela indicando agregado de oóides e pequenos oncóides, unidos por cimento micrítico; 3) Porção intermediária da amostra CP6/57; oncóide e oóides cimentados por calcita (micrita – mc e esparita); seta amarela indicando valvas de ostracodes como núcleo de oncóides; 4) Porção intermediária da amostra CP6/57; oncóides e oóides em meio à matriz micrítica e esparítica; 5) Porção basal da amostra CP6/57; seta amarela indicando valva de ostracode substituída por calcita, sendo núcleo de oncóide; oncóides e oóides em meio à matriz micrítica (mc); 6) Porção basal da amostra CP6/57; setas amarelas indicando oóides e oncóides de aragonita, com extinção radial. Escalas de 1 mm.

Figura 6.47.....pág. 84

Nível 3. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP, Formação Teresina. Amostra CP6/58; Micrografia eletrônica com contraste composicional de lâmina de porção intermediária. Espectro de sulfato de bário (barita) correspondente a pontos em meio a matriz; espectro de carbonato de cálcio (calcita), em área de matriz. Escala de 200µm.

Figura 6.48.....pág. 85

Nível 3. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP, Formação Teresina. Amostra CP6/57; Micrografia eletrônica com contraste composicional de lâmina de porção basal. Espectro de carbonato de cálcio (aragonita) correspondente a pontos na região de córtex e núcleo de oncóide; espectro de carbonato de cálcio (calcita), em área de matriz. Escala de 200µm.

Figura 6.49.....pág. 87

Microbialito da Lagoa Salgada, RJ. 1) Espécime com coluna mais espessa e uniforme na parte superior (CP6/21); 2) Amostra com desenvolvimento da estrutura sob tubos de serpulídeos, indicados por seta amarela (CP6/5); 3) Exemplar com desenvolvimento sob coquina associada a conchas de bivalves (CP6/17); 4) Os círculos vermelhos indicam as subdivisões de crescimento B (base), M (meio) e T (topo); amostra CP6/6).

Figura 6.50.....pág. 89

Microbialitos da Lagoa Salgada, RJ. 1) Porção superior (topo) de microbialito; setas vermelhas indicando fragmentos de conchas de bivalves; seta amarela indicando corte oblíquo de concha de microgastrópode *Heleobia australis* – CP6/17. Escala de 1 mm; 2) Porção superior - porosidade gerada pela ação corrosiva de cianobactérias filamentosas no carbonato de cálcio (espaços em azul correspondentes aos poros formados) – CP6/14. Escala de 0,2 mm; 3) Porção intermediária - seta amarela indicando valvas de ostracodes desarticuladas em meio a matriz, apresentando porosidade intrapartícula – CP6/25. Escala de 1 mm; 4) Porção intermediária - seta amarela indicando ação do peso de sedimentos sobre as laminações antes destas serem litificadas – CP6/17. Escala de 1 mm; 5) Porção basal - seta vermelha indicando ondulações mais definidas – CP6/25. Escala de 0,8 mm; 6) Porção basal - fragmento de briozoário em meio a matriz – CP6/6. Escala de 1 mm.

Figura 6.51.....pág. 91

Lagoa Salgada, RJ. Elementos biogênicos encontrados na triagem dos sedimentos. 1) Estrutura reprodutiva de planta do gênero *Talinum* sp. Escala de 0,5 cm; 2) Concha de *Heleobia australis* incrustada por colônia de briozoários. Escala de 1 mm; 3) Conchas de bivalves. Escala de 1 mm; 4) Foraminífero do gênero *Quinqueloculina* sp. Escala de 500 µm; 5) Tubos calcáreos de crustáceo da ordem Tanaidaceae. Escala de 1 mm; 6) Crustáceos da ordem Tanaidaceae. Escala de 1 mm.

Figura 6.52.....pág. 93

Lagoa Salgada, RJ. Borda NE. Gráficos de porcentagem das frações orgânica, inorgânica e de microgastrópodes.

Figura 6.53.....pág. 94

Lagoa Salgada, RJ. Borda SW. Gráficos de porcentagem das frações orgânica, inorgânica e de microgastrópodes.

Figura 6.54.....pág. 95

Lagoa Salgada, RJ. Borda SE. Gráficos de porcentagem das frações orgânica, inorgânica e de microgastrópodes.

Figura 6.55.....pág. 97

Lagoa Salgada, RJ. Micrografias eletrônicas de elementos biogênicos associados aos microbialitos. 1) Crustáceo da família Sphaeromatidae. Escala de 1 mm; 2) Espinho de ouriço-do-mar. Escala de 500 µm; 3) Possível fungo. Escala de 20 µm; 4) Colônia de briozoário. Escala de 200 µm; 5) Crustáceo da ordem Tanaidacea. Escala de 500 µm; 6) Crustáceo da superordem Gammaridae. Escala de 500 µm; 7) Oogônio de carófito. Escala de 200 µm; 8) Concha de bivalve com sinais de microbioerosão próximo ao umbo. Escala de 500 µm; 9) Foraminífero do gênero *Textularia* sp. Escala de 200 µm; 10) Foraminífero do gênero *Ammonia* sp. Escala de 200 µm; 11) Semente. Escala de 500 µm; 12) Foraminífero do gênero *Triloculina* sp. Escala de 200 µm; 13) Fragmento de vegetal (caule). Escala de 500 µm.

Figura 6.56.....pág. 99

Lagoa Salgada, RJ. Micrografia eletrônica com contraste composicional da porção basal do microbialito, evidenciando pontos de composição de calcita magnesiana, correspondente a valva de microgastrópode; e ponto de composição de dolomita em região de laminação do estromatólito. CP6/5. Escala de 500µm.

Figura 6.57.....pág. 100

Lagoa Salgada, RJ. Micrografia eletrônica com contraste composicional da porção intermediária do microbialito, evidenciando pontos de composição de calcita magnesiana e ponto de composição de dolomita, ambos em regiões de laminação de estromatólito, mostrando a alternância destas composições. CP6/17. Escala de 500µm.

Figura 6.58.....pág. 101

Lagoa Salgada, RJ. Micrografia eletrônica com contraste composicional de um oncóide e esteira microbiana não litificados. Ponto à esquerda evidenciando composição de óxido de ferro, e ponto de composição de fosfato de cálcio. Pontos adquiridos em região de esteira microbiana. DP7/39. Escala de 500µm.

Figura 6.59.....pág. 102

Lagoa Salgada, RJ. Micrografia eletrônica com contraste composicional de um oncóide e esteira microbiana não litificados. Ponto à esquerda evidenciando composição de carbonato de cálcio (dolomita), e ponto à direita evidenciando sulfato de cálcio (gipsita). Pontos adquiridos em região de córtex de oncóide. DP7/39. Escala de 500µm.

Figura 6.60.....pág. 103

Lagoa Salgada, RJ. Micrografia eletrônica com contraste composicional de amostra contendo oncóide e esteira microbiana não litificados. Ponto à esquerda evidenciando composição de carbonato de cálcio (dolomita), e ponto à direita evidenciando cloreto de sódio (halita). Pontos adquiridos em região de esteira microbiana. DP7/39. Escala de 200µm.

Figura 6.61.....pág. 104

Lagoa Salgada, RJ. Micrografia eletrônica com contraste composicional de amostra contendo oncóides e esteira microbiana não litificados. Ponto à esquerda evidenciando composição de cloreto de sódio (halita), e ponto à direita evidenciando composição de carbonato de cálcio (possivelmente aragonita), em teca de foraminífero do gênero *Euphidium* sp. Pontos adquiridos em região de esteira microbiana. DP7/39. Escala de 200µm.

Figura 6.62.....pág. 105

Lagoa Salgada, RJ. Micrografia eletrônica com contraste composicional de amostra de esteira microbiana contendo pirita na forma framboidal. Escala de 100 µm.

Figura 6.63.....pág. 106

Lagoa Pitanguinha, RJ. 1) Borda SW da lagoa com esteiras microbianas; 2) Detalhe da coquina associada a esteira microbiana.

Figura 6.64.....pág. 107

Lagoa Pitanguinha, RJ. Esteira microbiana associada à coquina. CP6/30. 1) Porção inferior: coquina basal; 2) Porção superior: esteira microbiana; 3) Detalhe de corte transversal, mostrando porção basal constituída de coquina e porção superior constituída por esteira microbiana. Escala de 5 cm; 4) Amostra impregnada com *epoxy* azul para visualização de espaços porosos. Escala de 5 mm.

Figura 6.65.....pág. 108

Lagoa Pitanguinha, RJ. Esteira microbiana associada à coquina. CP6/30. 1) Porção inferior; seta vermelha indicando fragmento de concha de bivalve cimentada (cortóide); seta amarela indicando cimento carbonático e seta branca indicando foraminífero; 2) Porção inferior; seta amarela indicando corte transversal de concha de gastrópode cimentada e preenchida por micrita; seta vermelha indicando fragmento de concha de bivalve cimentada; 3) Porção inferior; seta amarela indicando corte longitudinal de concha de gastrópode parcialmente preenchida por micrita; seta vermelha indicando grão de quartzo arredondado; 4) Porção inferior; setas amarelas indicando gipsita; 5) Porção inferior; seta vermelha indicando corte oblíquo de concha de gastrópode cimentada em meio a fragmentos de conchas de bivalves; 6) Porção superior (esteira microbiana); seta vermelha indicando grão de quartzo arredondado corroído pela ação de microrganismos, e seta amarela indicando laminações da esteira microbiana. Escalas de 1 mm.

Figura 6.66.....pág. 109

Lagoa Pitanguinha, RJ. Esteira microbiana associada à coquina. 1) Valvas de ostracodes. CP6/30. Escala de 1 mm; 2) Conchas de *Heleobia australis*. CP6/30. Escala de 2 mm; 3) Concha de bivalve. CP6/27B. Escala de 1 cm; 4) Espinha de peixe. CP6/27B. Escala de 0,5 cm.

Figura 6.67.....pág. 110

Lagoa Pitanguinha, RJ. Esteira microbiana associada à coquina. Ponto à esquerda evidenciando composição de elementos Zircônio (Zr) e Estrôncio (Sr), e ponto à direita evidenciando cristais de gipsita. CP6/30. Escala de 200µm.

LISTA DE TABELAS

- Tabela 5.1.....pág. 25**
Relação de amostras recolhidas no município de Santa Rosa do Viterbo (Mineração PH5), relativas a estruturas de idade Permiana. A marcação X corresponde ao tipo de análise realizada com a amostra.
- Tabela 5.2.....pág. 26**
Relação de amostras recolhidas no município de Taguaí (Mineração Gobbo), relativas a estruturas de idade Permiana. A marcação X corresponde ao tipo de análise realizada com a amostra.
- Tabela 5.3.....pág. 27**
Relação de amostras da Lagoa Salgada (Rio de Janeiro), relativas a estruturas de idade holocênica. A marcação X corresponde ao tipo de análise realizada com a amostra.
- Tabela 5.4.....pág. 28**
Relação de amostras da Lagoa Pitanguinha (Rio de Janeiro), relativas a estruturas de idade holocênica. A marcação X corresponde ao tipo de análise realizada com a amostra.
- Tabela 6.1.....pág. 63**
Resultado da contagem modal para as lâminas do nível 1, com estimativas das porcentagens dos componentes dos carbonatos.
- Tabela 6.2.....pág. 75**
Resultado da contagem modal para as lâminas do nível 2, com estimativas das porcentagens dos componentes dos carbonatos.
- Tabela 6.3.....pág. 82**
Resultado da contagem modal para as lâminas do nível 3, com estimativas das porcentagens dos componentes dos carbonatos.
- Tabela 6.4.....pág. 90**
Relação de elementos biogênicos encontrados nas cavidades e interstícios dos microbialitos, na constituição de suas laminações, e em meio a esteiras microbianas vivas presentes na Lagoa Salgada.

1. INTRODUÇÃO

Esta pesquisa apresenta os resultados do estudo tafonômico e paleoecológico de estruturas desenvolvidas por atividade microbiana, através do exame detalhado dos biossedimentos associados, petrografia, análises composicionais e de seus ambientes de desenvolvimento. Com esta finalidade, foram utilizadas comunidades microbianas modernas ou modelos recentes (Holoceno) para se entender comunidades ou modelos fósseis (Permiano), de modo comparativo.

1.1 JUSTIFICATIVAS PARA O ESTUDO DE ESTEIRAS MICROBIANAS E CARBONATOS MICROBIAIS

O estudo de esteiras microbianas e carbonatos microbiais, como os microbialitos, são de elevada importância por diversos motivos. Um deles é a capacidade destas bioconstruções de fornecer informações sobre as mais antigas formas de vida na Terra, sobre mudanças composicionais na atmosfera, na constituição química das águas marinhas e sobre as interações bióticas às quais estiveram sujeitos.

Outro motivo é que seu estudo em ambientes atuais possibilita traçar conclusões sobre microrganismos fósseis em antigos oceanos. Para estudos geobiológicos é utilizada a comparação do ambiente moderno com o antigo, o chamado “princípio atualista”, no qual “o presente é a chave para o passado” (Noffke, 2010). Os processos físicos, químicos e biológicos tendem ao uniformitarismo ao longo do tempo geológico (Vieira, 1980), sendo, portanto, a utilização de modelos recentes uma excelente ferramenta para se entender modelos fósseis. Além disso, estruturas como as esteiras microbianas podem preservar informações acerca das condições climáticas no momento da deposição dos sedimentos, sendo, portanto, excelentes registros para interpretações paleoambientais.

Os microbialitos, durante a sua formação, aprisionam involuntariamente em suas laminações sedimentos que se encontravam próximos, incluindo organismos inteiros, fragmentos de organismos ou carapaças, tanto vegetais como animais, além de fragmentos minerais (mica, hematita, etc). Os clastos de origem orgânica podem ser preservados nas laminações ao longo do tempo geológico, constituindo importantes informações sobre as interações ecológicas que lá se constituíram. As alterações na biota (principalmente após o Ediacarano) e no

macro/microambiente circundante aos microbialitos influenciam sua morfologia e sua microestrutura ao longo do tempo geológico. As condições ambientais governam o desenvolvimento das comunidades microbianas e influenciam no seu metabolismo (Dupraz *et al.*, 2009).

E por fim, o estudo de rochas carbonáticas é de grande importância econômica por estas apresentarem propriedades de reservatório (porosidade); estima-se que contenham pelo menos 40% das reservas petrolíferas conhecidas no mundo (Tucker & Wrigth, 1991). Os reservatórios petrolíferos constituídos por microbialitos apresentam relevância exploratória e são análogos, por exemplo, aos microbialitos quaternários encontrados na região dos lagos do estado do Rio de Janeiro (Papaterra, 2010), como os da Lagoa Salgada, um dos objetos de estudo desta dissertação.

1.2 OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa foi realizar um estudo tafonômico e paleoecológico de estruturas associadas a atividade microbiana, como microbialitos e esteiras microbianas, provenientes de ambientes recentes (Holoceno) e progressos (Permiano), com o intuito de comparar os resultados e traçar similaridades e diferenças nas relações ecológicas e ambientes de deposição das estruturas.

1.3 ÁREAS DE ESTUDO

As estruturas permianas coletadas foram encontradas nos municípios de Santa Rosa do Viterbo e Taguaí, no interior do Estado de São Paulo, pertencentes ao Grupo Passa Dois da Bacia do Paraná (figura 1.1). O afloramento de Santa Rosa do Viterbo, situado na pedreira de exploração de calcário Mineração PH7, encontra-se entre as coordenadas 21°49'08'' S e 47°30'28'' W, sob terrenos paleozóicos, a aproximadamente 5 km da zona urbana. O afloramento da pedreira Gobbo, também de exploração de calcário, situa-se entre as coordenadas 23°17'28'' S - 49°18'12'' W, no município de Taguaí.

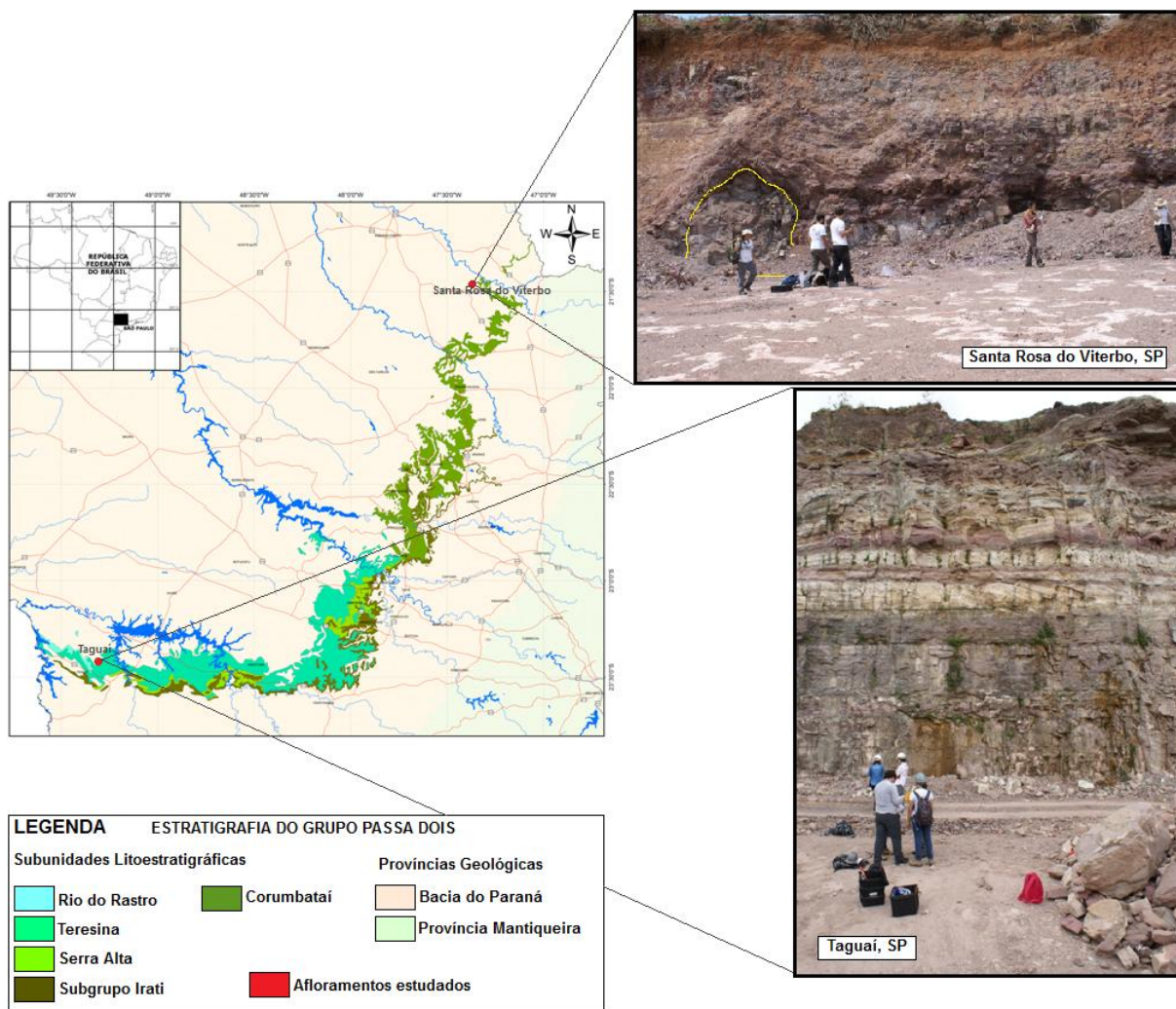


Figura 1.1: Mapa denotando áreas de estudo relativas ao Permiano. Detalhe em amarelo na foto do afloramento de Santa Rosa do Viterbo, indicando estromatólito domal gigante (modificado de Caires, E.T., 2005).

As amostras de microbialitos e esteiras microbianas recentes (Holoceno) analisadas foram coletadas nas lagoas Salgada e Pitanguinha, litoral norte do Estado do Rio de Janeiro (figura 1.2). A Lagoa Salgada, localizada entre os municípios de Campos dos Goytacazes e São João da Barra, é limitada entre as coordenadas $41^{\circ}00'30''$ W e $21^{\circ}54'10''$ S, é hipersalina (salinidade de 64‰), pH de 8,7 a 9,7 e temperatura média de 27°C (Silva e Silva *et al.*, 2007) .

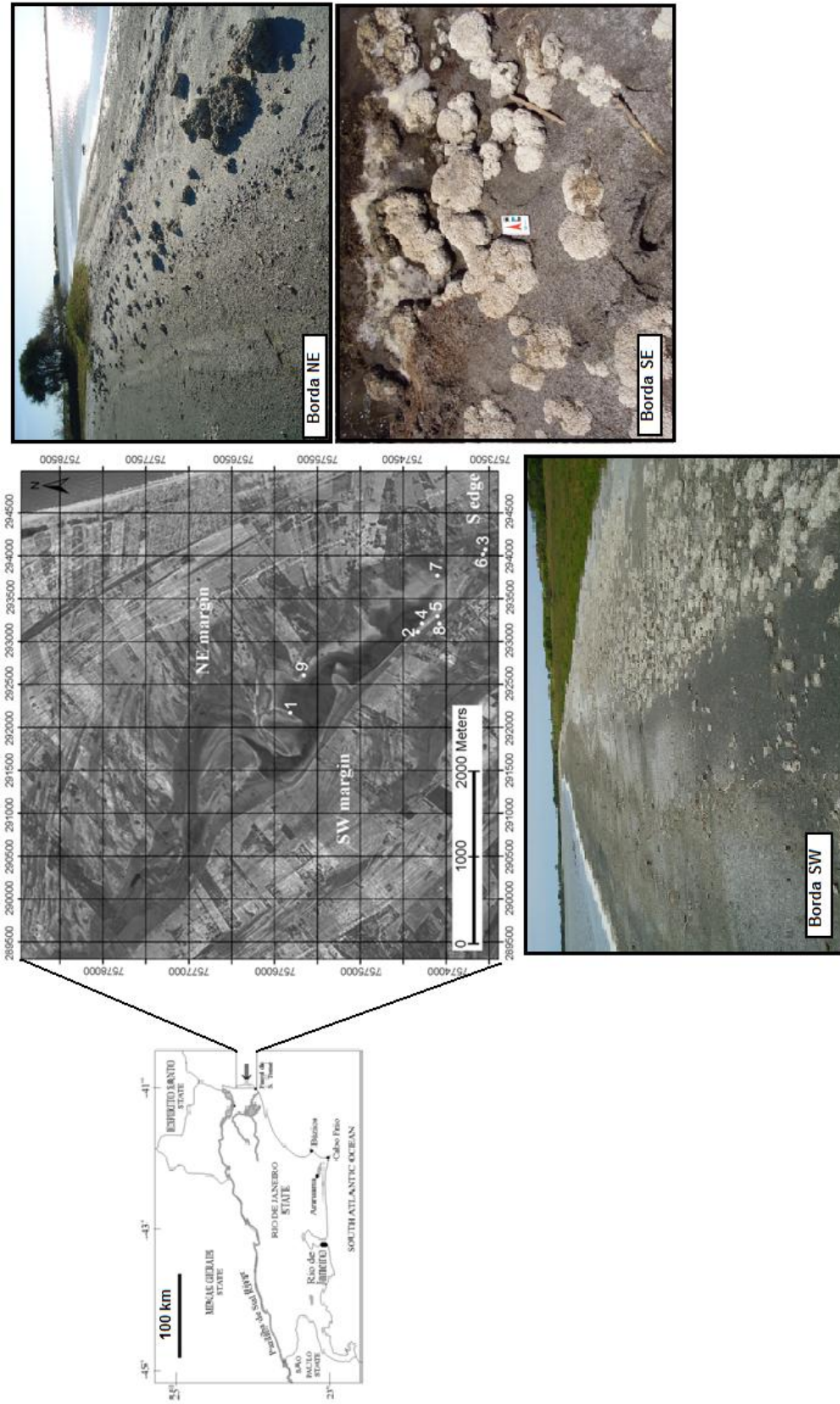


Figura 1.2: Mapa da Lagoa Salgada, RJ, denotando pontos de coleta nas bordas nordeste, sudeste e sudoeste.

A Lagoa Pitanguinha, parte do complexo lagunar de Araruama (figura 1.3), entre as coordenadas 22°56'00"S e 42°21'30"W, tem sua região caracterizada por clima semi-árido e temperatura média entre 19 a 31°C (Damazio *et al.*, 2006), pH médio de 8,3 e salinidade média de 76,5‰ (Silva e Silva *et al.*, 2007).



Figura 1.3: 1) Imagem de satélite da região do complexo lagunar de Araruama (foto de Vasconcellos, 2013 – modificada), destacando a Lagoa Pitanguinha; 2) Foto de uma das bordas da lagoa.

2. ESTRUTURAS MICROBIANAS E CARBONATOS

À luz do enorme progresso ocorrido o longo dos últimos anos acerca da gênese, desenvolvimento e evolução de estruturas microbianas, e o renovado interesse pelo estudo de rochas carbonáticas trazido pela descoberta de grandes reservatórios petrolíferos, este capítulo traz uma breve resenha sobre estas estruturas, a fim de melhorar o entendimento do assunto.

2.2 BIOFILMES, ESTEIRAS MICROBIANAS E MICROBIALITOS

As comunidades microbianas bentônicas, uma complexa associação estratificada de seres procariontes, inclusive fotossintetizantes, são responsáveis pela formação dos microbialitos, que são depósitos organossedimentares formados pela interação destes organismos com sedimentos detríticos (Burne & Moore, 1987; Riding, 2011). Através do metabolismo dos microrganismos é formada uma substância mucilaginosa e adesiva, a EPS (substância polimérica extracelular), na qual ficam incorporados formando o biofilme.

2.2.1 Substância extracelular polimérica – EPS

A EPS é uma matriz composta basicamente de polissacarídeos complexos, podendo conter também proteínas, ácidos nucleicos (Lawrence *et al.*, 2003), enzimas, lipídios, DNA extracelular (*eDNA*) e também por detritos do ambiente (Decho, 2002). Esta substância é adesiva, e suas propriedades de sorção permitem que os microrganismos se fixem a substratos sólidos, além de favorecer o transporte de nutrientes necessários para a manutenção das comunidades. Serve de reserva para períodos de escassez de nutrientes, uma vez que pode ser hidrolisada e digerida pelas colônias.

A estrutura molecular da EPS, na qual ocorrem interações hidrofóbicas, ligações catiônicas e um arranjo emaranhado de cadeias poliméricas, confere a esta substância propriedades elásticas e viscosas, além de estabilidade mecânica (Flemming *et al.*, 2007). Sua estrutura facilita a interação entre os microrganismos, que não ficam fixos em seus locais de colonização, podendo se mover de acordo com a viscosidade da matriz. Uma vez que a posição

de um microrganismo está favorável ao mesmo dentro do biofilme, a célula pode adaptar o seu metabolismo para os recursos disponíveis e se integrar ao ambiente. A EPS é capaz de transportar vesículas contendo enzimas, materiais genéticos (que podem ser trocados entre várias espécies iguais e até mesmo diferentes), e também toxinas que protegem as comunidades do biofilme do ataque por outros microrganismos externos.

Outra propriedade importante da EPS é sua função de proteção contra raios UV, comportando-se como um filtro, fator que possivelmente foi fundamental na evolução dos microrganismos do Arqueano, visto que no início da vida na Terra os mesmos habitavam águas rasas e eram expostos à radiação UV, característicos deste Éon da história geológica do planeta.

2.2.2 Biofilmes

A formação de biofilmes ocorre à medida que as células bacterianas se multiplicam. Oferecem diversas vantagens às comunidades, uma vez que os biofilmes conferem resistência a ações mecânicas que poderiam removê-los do substrato, auxiliam na autodefesa dos microrganismos. Os biofilmes também aprisionam nutrientes necessários ao crescimento microbiano.

Em um biofilme, as células formam microcolônias distribuídas pela EPS, de modo que os microrganismos ficam perfeitamente organizados, tendo sua temperatura, nutrição, salinidade e outras necessidades adequadamente atendidas. Para conseguir atender essas necessidades, é preciso que haja cooperação e comunicação entre os microrganismos, ao mesmo tempo em que devem competir por um nicho dentro da comunidade do biofilme.

O controle dos biofilmes é realizado por genes microbianos (fatores intrínsecos) e pelo ambiente (fator extrínseco), e responde imediatamente às mudanças em seu meio, ocorrendo um equilíbrio entre os microrganismos e o ambiente (Stoodley *et al.*, 2002).

No estágio inicial de um biofilme, pode ocorrer uma verdadeira batalha entre microrganismos, quando eles se reúnem para competir por espaços mais vantajosos e por nutrientes, principalmente quando são escassos. Após esta competição inicial, a comunidade tende a formar um sistema ordenado, simbiótico e favorável para todos os microrganismos, podendo haver as trocas de material genético, metabólitos e subprodutos de suas atividades, de

modo a diminuir a energia dispensada para a sobrevivência de toda a comunidade. As vantagens aumentam quando microrganismos diferentes atuam em conjunto, conferindo proteção contra agressões externas, economia de energia, aumento na sobrevivência, proliferação das colônias e aproveitamento dos subprodutos pelos vários tipos de metabolismos associados. A comunicação intercelular por meio de sinalizações químicas celulares é fundamental para a organização de um biofilme.

2.2.3 Esteiras microbianas

Os biofilmes formam finos revestimentos orgânicos ao redor de grãos de sedimento, e em maior extensão, formam verdadeiros “tapetes” microbianos, as chamadas esteiras microbianas. Estas são compostas por inúmeros microrganismos individuais, que formam uma densa e coesa rede. São estruturas organosedimentares laminadas verticalmente, caracterizadas por apresentarem altas taxas metabólicas e construídas principalmente por cianobactérias fotoautotróficas na camada mais externa, e por microrganismos anaeróbicos, como as bactérias redutoras de enxofre, nas camadas mais internas.

As comunidades se fixam a substratos sob condições favoráveis ao seu crescimento (Van Gemerdem, 1993). São produzidas através da interação de microrganismos bentônicos com o ambiente, sendo encontradas principalmente em ambientes marinhos costeiros salinos ou hipersalinos, sobre o substrato estabilizado ou *hardground*, em diversas regiões do mundo (Damazio *et al.*, 2006). Seus agentes biológicos principais, as cianobactérias, arranjam-se de forma a reter e aprisionar o sedimento que as compõem (Silva e Silva *et al.*, 2003).

No Pré-Cambriano, teve início a mineralização induzida por microrganismos, ou seja, estes organismos começaram a ser capazes de precipitar carbonato de cálcio a partir dos íons dissolvidos no ambiente (oceano), dando origem a microbialitos laminados, os estromatólitos, no final do Arqueano (aproximadamente há 2,5 Ma). Esta habilidade de criar seu próprio substrato geológico e biológico, no qual era possível reciclar os metabólitos gerados, permitiu a adaptação destes sistemas a uma extensa variedade de condições e estresses ambientais, que possibilitaram sua prevalência ao longo da história da Terra (Dupraz *et al.*, 2009).

Os microrganismos que compunham as esteiras microbianas e que deram origem a estes estromatólitos desempenharam um importante papel tanto na mudança da composição da atmosfera terrestre, através do consumo de CO₂ e liberação de O₂ (início da fotossíntese), tornando-a oxidante, quanto na mudança de composição da crosta, aumentando a diversidade mineral (Hazen *et al.*, 2008). Esse evento de oxigenação causou a extinção de grande parte da biodiversidade existente, mas foi um passo importante para o surgimento de novas formas de vida na Terra, como os metazoários.

As esteiras microbianas são consideradas o mais antigo ecossistema da Terra, estando presente há aproximadamente 3 bilhões de anos. São extremamente importantes para a investigação do passado da Terra, e seu estudo pode fornecer dados acerca das interações entre seus microrganismos, sobre os ciclos dos elementos como carbono, enxofre e nitrogênio, e sobre a interação microrganismo/mineral, como a precipitação e dissolução de carbonatos.

As esteiras microbianas produzidas por cianobactérias, geralmente estão relacionadas com espécies de forma cocóide e filamentosas. A calcificação cianobacteriana está associada com a absorção fotossintética de gás carbônico e/ou ácido carbônico, que aumenta a alcalinidade do meio e leva a calcificação das bainhas mucilaginosas formadas pelas mesmas (Visscher *et al.*, 2005). Atualmente, a calcificação cianobacteriana parece ser essencialmente um fenômeno de água doce, sendo rara nos modernos ambientes subtidais, em contraste com cianobactérias antigas que ocupavam ambientes de maré e infralitoral (Flügel, 2004).

O estágio inicial de uma esteira microbiana, como descrito anteriormente, é a formação de um biofilme simples, no qual os microrganismos se aderem à superfície de grãos de sedimentos e começam a secretar EPS. Neste estágio, o sistema ainda é muito frágil e pode ser facilmente destruído pela ação mecânica. Em ambiente favorável, este biofilme com sedimentos acrescidos cresce até formar uma camada orgânica contínua lateralmente, a qual já é considerada a esteira microbiana. O sistema é adaptável ao ambiente e responde às suas mudanças (Noffke, 2010).

Num estágio mais avançado formam-se pilhas de camadas multicoloridas, as quais compreendem cada uma um grupo diferente de microrganismo. Esta organização em camadas dos microrganismos revela a disposição dos grupos de acordo com as necessidades metabólicas (figura 2.1). Por exemplo, em algumas esteiras as formas filamentosas de cianobactérias dominam na superfície devido à necessidade de maior luminosidade, ao passo que nos estratos

mais profundos há predominância de formas esféricas, que suportam mais a ausência de luz (Vasconcelos *et al*, 2006).



Figura 2.1: Esteira microbiana com a disposição da microbiota em relação ao tipo de metabolismo que cada grupo exerce. Foto modificada de Peter Visscher, University of Connecticut (acervo pessoal).

Em uma secção transversal, as esteiras fanerozóicas exibem bandagens de coloração diferente, que podem variar de micrômetros a centímetros de espessura, dependendo do alcance da penetração de luz. As camadas superiores podem consistir em um conjunto de diatomáceas, microalgas e cianobactérias, principalmente as filamentosas, que podem ser expostas à luz solar diretamente, pois são altamente pigmentados, apresentando clorofila *a*, carotenóides intracelulares e bainhas contendo ficobilinas (Konhauser, 2007).

Quanto à coloração, as camadas verdes consistem de microrganismos fotossintetizantes e as vermelhas/roxas consistem de bactérias púrpuras sulfurosas, com pigmentos carotenoides e bacterioclorofila *a*. As camadas alaranjadas compreendem as bactérias que utilizam a bacterioclorofila *c*.

A camada mais inferior geralmente contém microrganismos obrigatoriamente fototróficos e dependentes de sulfeto, o que significa que seu limite superior de crescimento deve coincidir com o nível de produção deste subproduto. Nesta camada há limitação absoluta de luz, e contém quimioheterotrofos anaeróbicos, geralmente bactérias redutoras de sulfato e metanogênicas, que não necessitam de luz nem de oxigênio em seu metabolismo, apenas o que remanesce das comunidades microbianas das camadas superiores. A presença de bactérias redutoras de sulfato pode ser distinguida pela coloração preta e presença de sedimentos ricos em FeS₂ (pirita), BaSO₄ (sulfato de bário), entre outros (Konhauser, 2007).

Apesar desta estratificação, os microrganismos presentes atuam em simbiose, interagindo seus diferentes processos metabólicos e formando um microssistema integrado (Vasconcelos *et al.*, 2006; Noffke, 2010).

A composição taxonômica das comunidades microbianas, que varia de acordo com as condições ambientais, reflete os diferentes tipos de esteiras, fator que dá a importância a estas estruturas na reconstituição paleoambiental e taxonômica (Damazio *et al.*, 2006).

2.2.4 Microbialitos

Os microbialitos são depósitos organosedimentares que têm sua formação induzida através de processos de trapeamento e aglutinação de sedimentos, formando um lócus de precipitação mineral, pela ação metabólica dos microrganismos bentônicos (Burne & Moore, 1987; Riding, 1991); ou também por indução da microbiota, que pode acarretar na precipitação de carbonatos diretamente em camadas, formando estruturas laminadas (Vasconcelos *et al.*, 1995; Dupraz *et al.*, 2008; Sapadafora *et al.*, 2010; Riding, 2011). A história dos microbialitos reflete mudanças de longo prazo na água do mar e da química atmosférica, que têm influenciado o metabolismo microbiano e o estado de saturação de carbonato no ambiente aquático (Riding, 2011).

O termo microbialito tem sido utilizado para descrever estromatólitos carbonáticos, trombólitos e estruturas semelhantes, que ocorrem como domos e colunas nas águas rasas de lagos e mares, mas também pode aplicar-se a muitas outras acumulações autigênicas em que os

micróbios são localmente conspícuos, como espeleotemas, tufas e travertinos (Riding, 2011). A construção de carbonato é a mais comum dentre os microbialitos, porém, ocorrem no registro geológico construções de sílica (Cangemi, *et al.*, 2010). Neste trabalho, o termo microbialito foi utilizado para se referir às estruturas estromatolíticas/trombolíticas da Lagoa Salgada, visto que sua classificação como estromatólito poderia gerar contradições.

Durante a transição do Proterozóico tardio para Fanerozóico (aproximadamente 500 Ma), os microbialitos, mais especificamente os estromatólitos e trombólitos, tiveram um considerável declínio devido o surgimento de eucariontes pastadores, os quais se alimentavam dos microrganismos responsáveis pela sua formação. Apesar da influência destes eucariontes, os microbialitos perduraram até o Holoceno como exemplares das lagoas Salgada e Vermelha, no Estado do Rio de Janeiro, e em Shark Bay, na Austrália.

2.3 PRECIPITAÇÃO E MINERALIZAÇÃO CARBONÁTICA

Os processos de precipitação e mineralização carbonática são responsáveis pelo desenvolvimento de estruturas como os esqueletos internos de animais, os exoesqueletos, conchas, microbialitos, como os estromatólitos, e até espeleotemas, como estalactites e estalagmites em cavernas. A importância destes processos se dá por inúmeros motivos, como ter permitido a evolução e adaptação de animais ao ambiente externo pelo desenvolvimento dos endo e exoesqueletos; a preservação de registros de vida antiga, como os microbialitos e esteiras microbianas, dentre vários outros.

As esteiras microbianas têm a capacidade de fazer o balanço entre a forma redutora e a forma oxidada do carbono, mais simplificada entre matéria orgânica e gás carbônico. Dependendo da alcalinidade e das condições do meio, o CO₂ pode estar presente na água como íons carbonato, os quais podem se ligar a cátions de metais como o cálcio e o magnésio, para a formação de minerais de carbonato.

A precipitação do carbonato é estimulada por vários processos metabólicos, como a fotossíntese, a redução de sulfato, amonificação e a denitrificação, todos realizados pelas

comunidades microbianas que compõem as esteiras. Uma vez precipitado, o carbonato é trapeado e aglutinado na EPS, que funciona como sítio de nucleação para a cristalização do mineral (Bahniuk, 2013). A precipitação ocorre em função da alcalinidade e da disponibilidade de cálcio livre no meio. O aumento na alcalinidade do carbonato provoca sua precipitação. De acordo com Visscher e Stoltz (2005), a aquisição de carbono pelas comunidades microbianas exerce forte impacto na alcalinidade do carbonato, o que influencia na sua precipitação.

2.3.1 Mineralização biologicamente controlada

A biomineralização, ou mineralização biologicamente controlada, é o processo no qual as atividades celulares dos organismos eucariotos envolvidos direcionam a nucleação, crescimento, morfologia e alocação final do mineral formado, podendo formar um esqueleto interno ou externo no organismo. É o que ocorre com algas calcáreas, moluscos, equinodermos e mamíferos. Pode-se considerar que consiste de um processo intrínseco, ou seja, o próprio organismo que ocasiona a precipitação, seja por atividade enzimática, seja por atividade metabólica. Ambas resultam num endo ou exoesqueleto biomineral.

O termo biomineral refere-se ao mineral que é produzido por organismos vivos, e consiste no próprio mineral e em seus componentes orgânicos. Muitas vezes, os biominerais têm suas próprias propriedades específicas de forma, tamanho, cristalinidade e composição de elementos traços e isotópicos. Pode-se utilizar o termo para definir o produto de uma “escolha seletiva de elementos” que são incorporados nas estruturas funcionais do organismo, sob estrito controle biológico. Biominerais são considerados provas de vidas diretas, como os fósseis de organismos (Dupraz *et al.*, 2008).

Na biomineralização, os sítios de nucleação dos carbonatos são geneticamente controlados, formando matrizes macromoleculares. Para que ocorra, é estritamente necessária a presença de organismos vivos, pois as atividades celulares controlam a nucleação, crescimento, morfologia e locação final dos minerais, como expresso anteriormente.

Este processo de mineralização tem como resultado, por exemplo, conchas de moluscos, esqueletos de animais, carapaça calcárea de algas, entre vários outros.

2.3.2 Organomineralização

O processo de organomineralização pode ser intrinsecamente dirigido (resultado de metabolismo microbiano), sendo um processo ativo e biologicamente induzido; ou pode ser extrinsecamente dirigido, resultado de processos ambientais como a evaporação, sendo passivo e biologicamente influenciado (Dupraz *et al.*, 2008).

Para o processo ativo dá-se o nome mineralização biologicamente induzida, enquanto que para o processo passivo denomina-se mineralização biologicamente influenciada.

Um organomineral consiste em qualquer precipitação mineral através da interação de organopolímeros com componentes não biológicos, sem formação de esqueletos e sem controle estritamente biológico (Perry *et al.*, 2007). Em outras palavras, refere-se à precipitação mineral em uma matriz orgânica isenta de controle genético, e pode-se considerar os organominerais como evidências indiretas de vida, ao contrário dos biominerais.

Os depósitos minerais resultantes da organomineralização são chamados microbialitos (Burne e Moore, 1987; Riding, 1991).

Organomineralização ativa

Este tipo específico de mineralização, também chamada de mineralização biologicamente induzida, se refere à precipitação mineral como resultado de atividades microbianas, ou seja, as atividades metabólicas destes organismos induzem a mineralização. É um processo intrínseco, controlado por atividades metabólicas de organismos procariotos, no qual o sítio de nucleação do mineral é randomicamente distribuído por uma matriz EPS e, assim como na biomineralização, é requerida a presença de organismos vivos para sua ocorrência.

As atividades metabólicas dos organismos induzem condições favoráveis para a precipitação mineral, e a matriz orgânica influencia na morfologia e composição do mineral formado.

Como produto deste tipo de mineralização, têm-se os organominerais, como os microbialitos (estromatólitos e trombólitos, por exemplo).

A mineralização biologicamente induzida surgiu com o desenvolvimento de comunidades microbianas nos oceanos do Arqueano, que ocasionaram a precipitação de carbonato, formando os estromatólitos (Dupraz *et al.*, 2008).

Organomineralização passiva

Este tipo de mineralização, mineralização biologicamente influenciada, resulta de processos ambientais, como evaporação e desgaseificação, podendo ocorrer sob a influência de organismos procariontes ou de uma matriz orgânica. A presença de organismos vivos não é estritamente requerida. Sua definição implica numa ação indireta da biota no microambiente químico circundante, que resulta na precipitação carbonática.

O sítio de nucleação do mineral é diageneticamente produzido numa matriz macromolecular, ou randomicamente distribuído por uma matriz EPS, como na organomineralização ativa. O produto também é um organomineral, no entanto, em escala micro ou nanométrica, com morfologias variadas. A matriz orgânica também influencia na morfologia e na composição mineral (Dupraz *et al.*, 2008).

2.3.3 Mineralização inorgânica

O processo de mineralização inorgânica é aquele que não requer a presença de organismos vivos e não há controle do processo por ação biológica, como nos outros processos de precipitação carbonática. Ocorre extrinsecamente, controlado pelo ambiente, ocorrendo em substratos abióticos. Tem seu sítio de nucleação variado, seu produto é denominado simplesmente mineral, e tem como exemplos os espeleotemas, como as estalactites e estalagmites (Dupraz *et al.*, 2008).

3. ROCHAS CARBONÁTICAS

As rochas carbonáticas são majoritariamente produzidas em ambientes marinhos e seus sedimentos são formados através de processos biologicamente induzidos, biologicamente controlados (biomineralização), e também por processos inorgânicos (Flügel, 2004). Com o início o processo de mineralização induzida por microrganismos, ou seja, quando os organismos vivos começaram a ser capazes de precipitar carbonato de cálcio a partir dos íons dissolvidos no ambiente (oceano), tiveram origem os microbialitos laminados, os estromatólitos, no final do Arqueano (aproximadamente há 2,5 Ma). Estes ocorrem até os dias atuais. A capacidade de biomineralização refletiu mudanças na evolução de animais capazes de produzir exo e endoesqueletos carbonáticos (Tucker, 2001).

Os sedimentos carbonáticos modernos são compostos basicamente pelos minerais calcita (CaCO_3) e aragonita (polimorfo da calcita), sendo encontrados dois tipos de calcita: calcita baixo magnésio ($< 4 \text{ mol } \% \text{ MgCO}_3$) e calcita alto magnésio ($> 4 \text{ mol } \% \text{ MgCO}_3$). Estes minerais podem ser substituídos diageneticamente por dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) (Tucker, 1991). Vasconcelos *et al.*, (1997) consideram valores de até 29% em mol de MgCO_3 para calcita com alto teor de Mg; de 30 a 45% em mol de MgCO_3 para Ca-dolomita e 45 a 50% em mol de MgCO_3 para dolomita.

Para as rochas carbonáticas podem ser considerados seis principais componentes: grãos (oóides, pisóides, oncóides, pelóides e bioclastos); matriz; componentes terrígenos; cimento (micrita ou esparita); cristais substituídos de dolomita e espaços de poros (Adams & Mackenzie, 2011).

A dolomita, geralmente, resulta da substituição pós-deposicional da calcita, dificilmente sendo de origem primária. Para que isto ocorra, são necessárias condições favoráveis, como alta temperatura, baixo pH e salinidade cerca de oito vezes maior que a água do mar (Friedman, 1981).

A maior parte dos organismos que dão origem ao carbonato biogênico está associado a ambientes de água limpa e de temperaturas amenas, salinidade normal e profundidade baixa, condições estas que fazem com que seus exo e endoesqueletos, ou carapaças, sejam formadas de calcita ou aragonita (Stanley, 2006).

Os grãos carbonáticos podem ter origem orgânica ou inorgânica. De acordo com Flügel (2004), podem ser separados em *skeletal grains* (bioclastos) e *non-skeletal grains* (aqueles não derivados de esqueletos de organismos). Dentre os *non-skeletal grains*, estão os pelóides, agregados de grãos, clastos e os *coated grains* (ou grãos revestidos), os quais compreendem os cortóides, oncóides, oóides e pisóides. Porém, há controvérsias a respeito desta divisão, uma vez que a maioria dos grãos revestidos e grãos agregados têm origem por processos bióticos (Flügel, 2004).

4. CONTEXTO GEOLÓGICO

4.1 Estruturas microbianas permianas

Bacia do Paraná

A Bacia do Paraná ocupa uma área de 1.750.000 km² dentro da depressão periférica da Plataforma Sul-Americana (Almeida, 1980). A porção da bacia situada em território brasileiro, que compreende uma extensão de 1.150.000 km², abrangendo uma grande porção da região sul do País. Contempla quase que inteiramente os Estados de Santa Catarina, Paraná, metade do Rio Grande do Sul e parte dos Estados do Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, interior de São Paulo e sul de Minas Gerais.

Em sua borda leste, o limite está representado pelo arco afrobrasiliano, que esteve ligado à costa do continente africano durante o Mesozóico (Petri & Fulfaro, 1983). A sequência vulcano-sedimentar nela registrada abarca um intervalo de tempo que se inicia no Ordoviciano Superior (450 Ga), finalizando no Cretáceo Superior, há 66 Ga (Cortez, 2008).

O pacote vulcano-sedimentar da Bacia do Paraná apresenta espessura de aproximadamente 7.000 metros, sendo possível encontrar em seu registro sequências sedimentares indicativas de oscilações marinhas e eventos epigenéticos, como soerguimentos e subsidências. De acordo com Milani (1997), a bacia pode ser subdividida em seis supersequências: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano); Paraná (Devoniano); Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico); Gondwana II (Mesotriássico-Neotriássico); Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo).

Durante o Permiano Superior, a bacia foi caracterizada por um mar epicontinental (Meglhioratti, 2006), a partir do qual foi depositada extensas camadas de rochas sedimentares durante período de pouca atividade tectônica. Esta sequência sedimentar, que é parte da supersequência Gondwana I proposta por Milani *et al.* (2007), está englobada dentro do Grupo Passa Dois, sendo este último o qual contempla os carbonatos permianos estudado nesta pesquisa (figura 4.1).

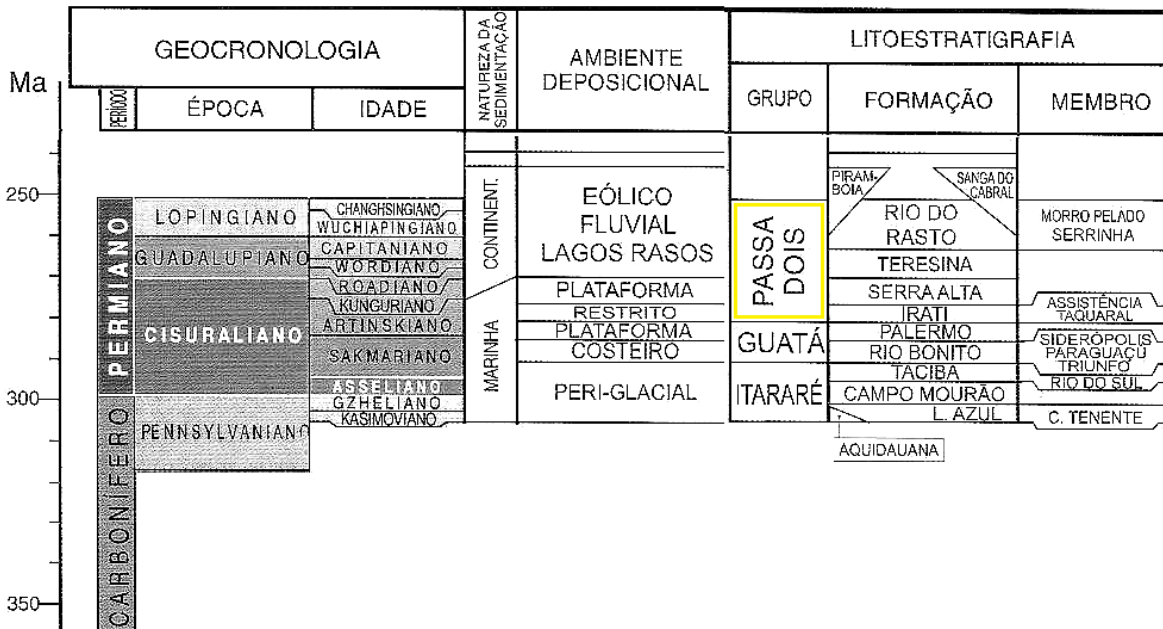


Figura 4.1: Coluna estratigráfica do Neopaleozóico da Bacia do Paraná, com destaque para o Grupo Passa Dois. Modificado de Milani *et al.*, 2007.

Grupo Passa Dois

O Grupo Passa Dois compreende o Subgrupo Irati, e as formações Serra Alta, Teresina e Rio do Rastro, este subdividido em membros Serrinha e Morro Pelado. Possui idade permiana superior e suas áreas de afloramento situam-se na borda leste da Bacia nos estados de São Paulo, Paraná e Santa Catarina (Milani *et al.*, 2007).

Especificamente a partir do noroeste do estado de São Paulo, incluindo os estados do Mato Grosso e Goiás, acima do Subgrupo Irati situa-se a Formação Corumbataí (figura 4.2).

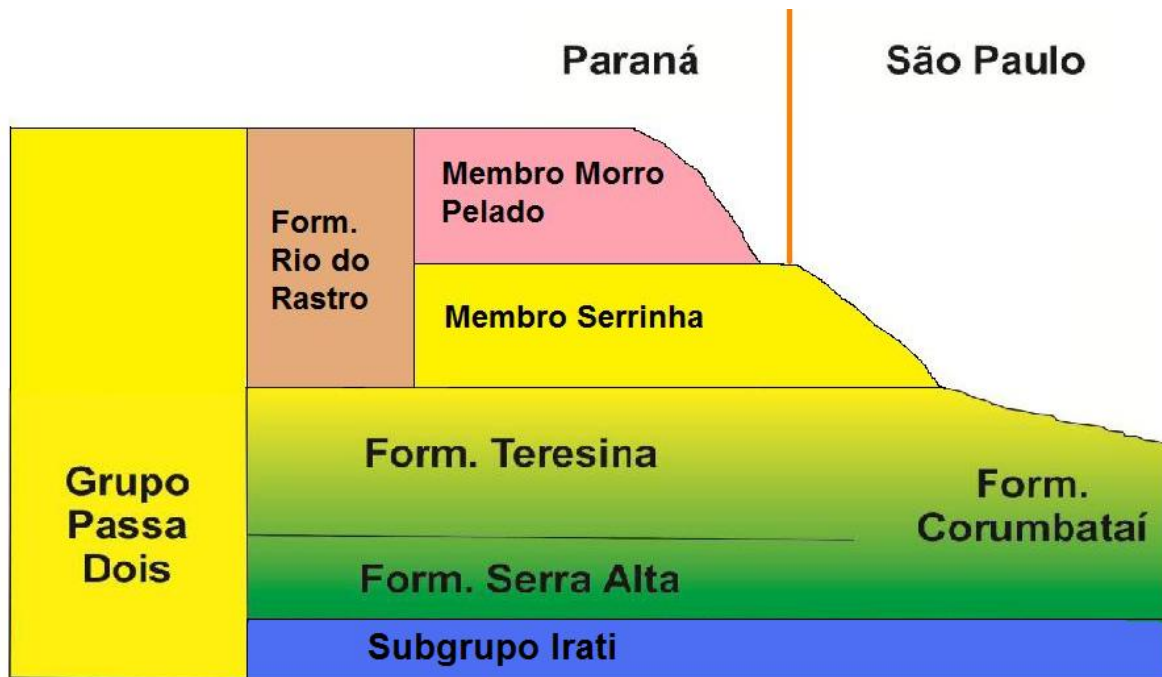


Figura 4.2: Litoestratigrafia do Grupo Passa Dois. Modificado de Meghioratti (2006).

Subgrupo Irati

O Subgrupo Irati, unidade basal do Grupo Passa Dois, é constituído por rochas sedimentares associadas a condições de mar restrito, progressivamente mais salino da base para o topo, apresentando folhelhos betuminosos, arenitos, margas, carbonatos e anidrita, indicativos de uma geometria de bacia complexa, em que se configuravam ambientes de golfo e baías de profundidades e salinidades extremamente variáveis (Hachiro *et al.*, 1993). No Estado de São Paulo é subdividido estratigraficamente nas formações Taquaral e Assistência, sendo esta última composta pelos membros Morro do Alto e Ipeúna (Hachiro, 1996). Na Formação Assistência são abundantes colônias algálicas e encontram-se estruturas biossedimentares, como os estromatólitos de Santa Rosa do Viterbo, e ao sul do município de Taguaí (SP), estratos/níveis/camadas de rochas constituídas de carbonatos finamente laminadas associadas a microbialitos, sendo estas as bioconstruções que atuaram como prováveis áreas-fonte de dispersão do material carbonático (Hachiro, 1996). A figura 4.3 mostra a subdivisão do Subgrupo Irati e sua litoestratigrafia.

| SUBGRUPO | FORMAÇÃO | MEMBRO | CAMADA |
|----------|--------------------------------|---------------|---|
| | <i>Serra Alta / Corumbataí</i> | | |
| IRATI | Assistência | Ipeúna | <i>Ritmitos Superiores</i> |
| | | | <i>Ritmitos delgados regulares</i> |
| | | | Camada Bairrinho (Campo de Estromatólitos de Sta. Rosa de Viterbo) |
| | | Morro do Alto | <i>Camada Laje Azul</i> |
| | | | <i>Ritmitos inferiores</i> |
| | | | <i>Camadas evaporíticas</i> |
| | | | <i>Camadas de folhetos pirobetuminosos</i> |
| | <i>Taquaral</i> | | |
| | Tatuí | | |

Figura 4.3 – Subdivisão Estratigráfica do Subgrupo Irati (Hachiro *et al.*,1993).

O Subgrupo Irati é dividido em duas formações: Taquaral e Assistência. A Formação Assistência caracteriza-se por folhelhos acinzentados e pretos pirobetuminosos de laminação paralela, além de calcário dolomítico, nos quais podem ocorrer marcas onduladas, oóides, brechas, esteiras microbianas e grãos de quartzo. Possui espessura aproximada de 30 metros. Seu conteúdo fóssilífero consta de fragmentos dos répteis *Mesosaurus brasiliensis* (Mac Gregor, 1908) e *Stereosternum tumidum* (Cope, 1886), restos somitos de crustáceos e mais raramente fragmentos de peixes, insetos, palinórfos, troncos permineralizados, escassas impressões de folhas de *Glossopteris* e estromatólitos. A presença de evaporitos em sua porção basal fornece indícios de que o ambiente possuía clima árido. A ciclicidade de calcários dolomíticos e folhelhos betuminosos mostra alternância de períodos secos e úmidos (Hachiro, 1996). Schnider *et al.* (1974) interpretaram estas características como sendo de um ambiente marinho, com águas calmas e sem ação de ondas para o Membro Taquaral, e ambiente de bacia restrita, marinho e de águas rasas para o Membro Assistência.

Formação Serra Alta

Situa-se acima do Subgrupo Irati e possui argilitos, folhelhos, siltitos escuros com laminações paralelas e concreções calcíferas. Apresentam uma espessura de 80 a 90 metros. O ambiente de deposição foi interpretado por Schneider *et al.* (1974) como sendo marinho, com águas calmas, sem ação de ondas. Na deposição de sua porção superior, o mar caracterizava-se por apresentar águas mais rasas e agitadas. Seus fósseis constituem-se de fragmentos de peixes, ostracodes, palinóforos, bivalves, moluscos e coprólitos (Faria *et al.*, 2010).

Formação Teresina

Situada acima da Formação Serra Alta, contém camadas de argilitos e folhelhos, em intercalação com siltitos e arenitos finos acinzentados. Esta intercalação indica transição de um ambiente marinho profundo para um ambiente mais raso e agitado (Schneider *et al.*, 1974). Em sua porção intermediária ocorrem calcários, calcários oolíticos e coquinas. Apresenta laminações *flaser*, onduladas, gretas de contração, *ripples* e diques clásticos.

Os carbonatos ocorrem em maior abundância em alguns níveis, especialmente na porção intermediária a superior da unidade, raramente alcançando espessuras próximas a um metro. Neles são encontrados fósseis como valvas de bivalves e ostracodes (Rohn *et al.* 2003), bem como fósseis de vegetais permineralizados de carófitas (oogônios e caules), licófitas (caules e micrófilos), monilófitas (frondes) e lenhos de coníferas (Faria *et al.*, 2010).

4.2 Estruturas microbianas holocênicas

A Lagoa Salgada localiza-se ao nordeste do estado, com formação associada ao desenvolvimento do complexo deltáico do rio Paraíba do Sul (Raja Gabaglia & Milani, 1990). Neste complexo a deposição de areia em cordões litorâneos paralelos à linha da costa represou a água do mar formando várias lagoas e, juntamente com as oscilações do nível do mar durante o Neógeno, promoveram a transição de ambiente marinho a lagunar, com o rio desembocando diretamente no Oceano Atlântico.

A planície do rio Paraíba do Sul evoluiu em quatro fases, de acordo com Martin *et al.* (1984):

1ª – devido ao nível relativo do mar maior que o atual, foram desenvolvidos vários corpos lagunares;

2ª – o nível relativo do mar diminuiu, criando terraços arenosos e cordões litorâneos da Formação Barreiras;

3ª – o nível relativo do mar teve uma rápida ascensão, tendo seu alcance máximo, o que erodiu grande parte dos cordões litorâneos formados, iniciando a gênese da planície costeira e alagando as áreas mais baixas e vales escavados nesses terraços da Formação Barreiras, formando lagunas na costa;

4ª – ocorreu novo abaixamento do nível relativo do mar, transferindo sedimentos da plataforma continental para a zona de praia.

A Lagoa Salgada formou-se nesta planície costeira, ao sul da foz do Rio Paraíba do Sul, mais especificamente ligada a um estágio erosivo no qual uma inversão hidrodinâmica de ondas somada ao aumento do nível do mar, provocou um deslocamento de ilhas-barreiras, dando origem às lagoas hoje existentes próximas a Cabo de São Tomé.

Acima do pacote arenoso formado encontram-se os microbialitos carbonáticos (Rodrigues *et al.*, 1981 *apud* Srivastava, 1999). Segundo Lemos (1996), a sequência lagunar é formada pela fácies de lama plástica cinza clara com níveis carbonáticos, lama orgânica e lama com microgastrópodes. Estas lentes carbonáticas teriam sido depositadas devido à associação da redução da pluviosidade e aumento da evaporação. Através da datação de conchas nos sedimentos marinhos, foi indicada idade no Holoceno tardio para a formação da lagoa (Lemos, 1996).

A origem do sistema lagunar de Araruama está ligado ao mesmo processo. Em sua região, após sucessivos aumentos no nível do mar, houve o surgimento de duas séries de cordões litorâneos arenosos, os quais ocasionaram o fechamento de um sistema de pequenas lagoas. Nestas são observadas estruturas biossedimentares relacionados ao desenvolvimento e crescimento de comunidades microbianas (Silva e Silva *et al.*, 2004). Fazem parte deste sistema as lagoas Pernambuco, Vermelha, Pitanguinha e Brejo do Espinho, entre outras.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Amostras estudadas

Amostras permianas

Foram estudadas um total de 18 amostras de Santa Rosa do Viterbo e 7 de Taguaí, todas incluídas no acervo de Paleontologia do IG-UNICAMP dentro das coleções CP6 - Coleção de Pesquisa 6 – Icnofósseis, e DP9 – coleção didática . As Tabelas 5.1 e 5.2 mostram as etapas de análises realizadas para cada amostra.

Tabela 5.1 – Relação de amostras recolhidas no município de Santa Rosa do Viterbo (Mineração PH5), relativas a estruturas de idade Permiana. A marcação X corresponde ao tipo de análise realizada com a amostra.

| ESTRUTURAS MICROBIANAS PERMIANAS | | | | | | |
|---|-----------------------|---------|----------------|-----|-----|-------|
| Santa Rosa do Viterbo (Mineração PH7) - Total: 18 amostras | | | | | | |
| amostra | descrição | lâminas | seções polidas | MEV | EDS | Raman |
| CP6/61 | estromatólito - base | X | | | | |
| CP6/62 | estromatólito - base | X | X | | X | |
| CP6/63 | estromatólito - meio | | X | | | |
| CP6/64 | estromatólito - meio | X | | | | |
| CP6/65 | estromatólito - topo | X | | | | |
| CP6/66 | estromatólito - topo | X | X | | | |
| CP6/67 | estromatólito - topo | X | | | | |
| CP6/69 | brecha - topo | X | X | | X | |
| CP6/70 | brecha - topo | | | | | |
| CP6/71 | brecha - meio | X | X | | X | |
| CP6/72 | brecha - base | | | | | |
| CP6/73 | brecha - base | | X | | | |
| CP6/74 | brecha - base | | | | | |
| CP6/75 | brecha - base | | | | | |
| CP6/76 | brecha - base | X | | | | X |
| CP6/77 | brecha - base/siltito | | | | | |
| CP6/78 | brecha - base/siltito | X | | | X | |
| CP6/80 | esteira microbiana | X | X | | X | X |

Tabela 5.2 – Relação de amostras recolhidas no município de Taguaí (Mineração Gobbo), relativas a estruturas de idade Permiana. A marcação X corresponde ao tipo de análise realizada com a amostra.

| ESTRUTURAS MICROBIANAS PERMIANAS | | | | | | |
|---|--------------------|---------|----------------|-----|-----|-------|
| Taguaí (Mineração Gobbo) - Total: 7 amostras | | | | | | |
| amostra | descrição | lâminas | seções polidas | MEV | EDS | Raman |
| CP6/45 | oncólito - nível 1 | X | | | X | X |
| CP6/46 | oncólito - nível 1 | X | | | X | X |
| CP6/52 | oncólito - nível 2 | X | X | | X | X |
| CP6/55 | oncólito - nível 1 | | X | | | |
| CP6/57 | oncólito - nível 3 | X | | | X | |
| CP6/58 | oncólito - nível 3 | X | | | X | X |
| CP6/59 | oncólito - nível 3 | | X | | | |

Amostras holocênicas

Foram estudadas 32 amostras recolhidas na Lagoa Salgada e 3 na lagoa Pitanguinha, todas incluídas no acervo de Paleontologia do IG-UNICAMP, dentro das coleções CP6 – icnofósseis, DP9 e DP7- coleção didática. As Tabelas 5.3 e 5.4 são relativas às etapas concluídas para as amostras de cada uma, respectivamente.

Tabela 5.3 – Relação de amostras da Lagoa Salgada (Rio de Janeiro), relativas a estruturas de idade holocênica. A marcação X corresponde ao tipo de análise realizada com a amostra.

| ESTRUTURAS MICROBIANAS HOLOCÊNICAS | | | | | | | |
|------------------------------------|-------------------|---------|--------------|-----|-----|-----------------|----------------------|
| Lagoa Salgada - Total: 32 amostras | | | | | | | |
| amostra | descrição | lâminas | seção polida | MEV | EDS | sedimento solto | sedimento incrustado |
| CP6/3 | microbialito (NE) | | | X | | X | |
| CP6/4 | microbialito (NE) | | | X | | X | |
| CP6/5 | microbialito (NE) | X | | | X | X | X |
| CP6/6 | microbialito (NE) | X | | X | | X | X |
| CP6/7 | microbialito (NE) | | | X | | X | |
| CP6/8 | microbialito (NE) | | | X | | X | |
| CP6/10 | microbialito (NE) | | X | X | | X | |
| CP6/11 | microbialito (NE) | | X | | | X | |
| CP6/12 | microbialito (NE) | | X | | | X | |
| CP6/13 | microbialito (NE) | | X | | | X | |
| CP6/14 | microbialito (NE) | X | X | X | | X | X |
| CP6/15 | microbialito (NE) | | X | | | X | |
| CP6/16 | microbialito (NE) | | | X | | X | |
| CP6/17 | microbialito (SW) | X | X | X | X | X | X |
| CP6/18 | microbialito (SW) | | | X | | X | |
| CP6/19 | microbialito (SW) | | | | | X | |
| CP6/20 | microbialito (SW) | | X | X | | X | |
| CP6/21 | microbialito (SW) | X | X | X | | X | X |
| CP6/25 | microbialito (SW) | X | X | X | | X | X |
| CP6/26 | microbialito (SW) | | | | | X | |
| CP6/P26 | sedimento (SW) | | | X | | X | |
| CP6/P26A | sedimento (SW) | | | X | | X | |
| DP9/335 | sedimento (SE) | | | X | | X | |
| DP9/336 | sedimento (NE) | | | | | X | |
| DP9/337 | esteira (SE) | | | X | | | X |
| DP9/337B | sedimento (SE) | | | X | | X | |
| DP7/12A | esteira (SE) | | | X | | | X |
| DP7/13 | sedimento (SE) | | | X | | X | |
| DP7/39 | oncóides (SE) | | | X | X | | X |
| DP7/16E | sedimento (SE) | | | X | | X | |
| DP7/16F | sedimento (SE) | | | X | | X | |
| DP7/12B | esteira (SE) | | | X | | | X |

Tabela 5.4 – Relação de amostras da Lagoa Pitanguinha (Rio de Janeiro), relativas a estruturas de idade holocênica. A marcação X corresponde ao tipo de análise realizada com a amostra.

| ESTRUTURAS MICROBIANAS HOLOCÊNICAS | | | | | | | |
|---------------------------------------|--------------------|---------|--------------|-----|-----|-----------------|----------------------|
| Lagoa Pitanguinha - Total: 3 amostras | | | | | | | |
| amostra | descrição | lâminas | seção polida | MEV | EDS | Sedimento solto | sedimento incrustado |
| CP6/27 B | coquina/esteira | | | | | X | |
| CP6/27 A | esteira microbiana | | X | | | | X |
| CP6/30 | coquina/esteira | X | | X | X | X | |

5.2 Trabalho de campo

Estruturas microbianas permianas (Tabelas 5.1 e 5.2)

No município de Santa Rosa do Viterbo, na frente de lavra da Mineração PH7, foram realizadas coletas nos dias 22 e 23 de setembro de 2012, e em 19 de outubro de 2013. Foram coletadas 10 amostras de brecha intraformacional (base a topo), 7 amostras de estromatólito gigante (base a topo; dimensão: 1,65 m de altura e 1,13 m de largura) e uma amostra de esteira microbiana.

No município de Taguaí, as amostras foram coletadas em afloramento pertencente à Mineração Gobbo, em visitas realizadas nos dias 10 de março de 2012, e 21 de setembro de 2013. Realizou-se o levantamento da coluna estratigráfica na pedreira, sendo localizados três níveis carbonáticos contendo esteiras microbianas, oncóides e oóides. Foram coletadas 7 amostras abrangendo os três níveis.

A cada amostra retirada de cada afloramento, definiu-se a base e topo, procurando registrar a exata procedência dentro da litoestatigrafia da sequência sedimentar.

Estruturas microbianas holocênicas (Tabelas 5.3 e 5.4)

Para a coleta dos microbialitos, esteiras microbianas e sedimentos associados, foram realizadas três viagens de campo até a Lagoa Salgada, RJ, para observação das amostras *in situ* e coleta das mesmas. Na primeira viagem, 13 amostras (incluindo estromatólitos domais, esteiras microbianas e sedimentos nos entornos da lagoa) foram coletadas na porção emersa, em sua borda NE. Na segunda viagem foram coletadas 9 amostras (incluindo estromatólitos domais e

sedimentos) localizadas na margem SW da lagoa. Na terceira viagem, 10 amostras (incluindo sedimentos, esteiras e oncólitos) foram retiradas da margem NE e SE.

Na Lagoa Pitanguinha foram coletada 7 amostras, abrangendo coquina associada a esteira microbiana e oncólitos em processo de fossilização, porém foram utilizadas para este estudo apenas 3 amostras, sendo uma de oncólitos (registrada como CP6/27A) e duas de coquina associada a esteira microbiana (registradas como CP6/27 B e CP6/30).

5.3 Trabalho de gabinete

Estruturas microbianas permianas

As seções polidas foram analisadas utilizando-se microscópio estereoscópico ZEISS Stemi DV4 (com aumento de 8 a 32x), sendo descritas as macroestruturas. As lâminas petrográficas foram descritas utilizando-se o microscópio petrográfico Leica DM EP, fotografadas com a câmera Leica DMC2900 junto ao software LAS CORE – Leica. As lâminas delgadas foram confeccionadas no Laboratório de Laminação do IG-Unicamp e do IG-UnB, Brasília.

Após estudo petrográfico, as lâminas foram levadas ao laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), do IG – Unicamp, para a análise qualitativa de elementos químicos utilizando-se o detector EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*), bem como o detector de elétrons retroespalhados.

Com a obtenção dos dados elementares e a possível caracterização dos minerais presentes nas amostras, elas foram levadas ao AstroLab (Laboratório de Astrobiologia da Universidade de São Paulo), localizado no Observatório Abrahão de Moraes, em Vinhedo-SP. Foram realizadas análises de Espectroscopia Raman.

O fluxograma a seguir (Figura 5.1), mostra a sequência de etapas realizadas para o estudo dos microbialitos permianos.

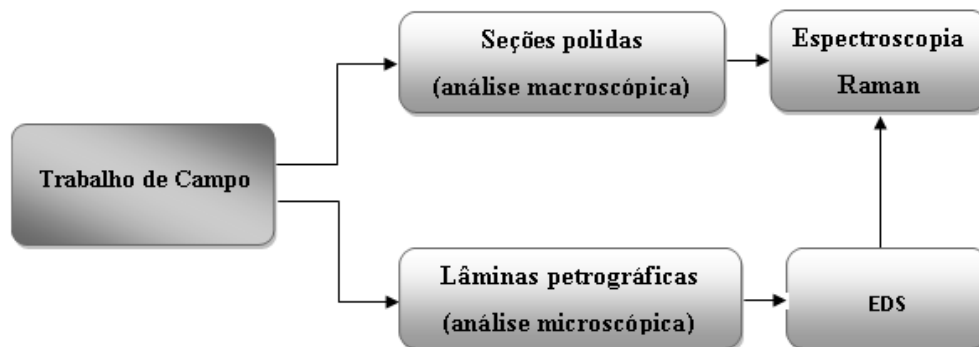


Figura 5.1 – Metodologia utilizada para a análise das estruturas microbianas permianas coletadas em Santa Rosa do Viterbo e em Taguaí.

Estruturas microbianas holocênicas

Para os microbialitos holocênicos, as amostras consistiam de estromatólitos, coquinas, esteiras microbianas, oncólitos, sedimentos soltos e sedimentos incrustados nas estruturas estromatolíticas.

Inicialmente, os sedimentos soltos recolhidos nos arredores da Lagoa Salgada foram peneirados, separados em três frações referentes à escala de Wentworth: maior que 1 mm, entre 0,5 mm e 1 mm e menor que 1 mm. Posteriormente foram separados em volumes de 10 cm³ (padrão para estudo com microfósseis) e pesados na balança CG ZIBROR EZ 600 (Figura 5.2). O mesmo se fez com os sedimentos recolhidos das cavidades dos estromatólitos e com os sedimentos incrustados que faziam parte da matriz das estruturas.

Para as amostras de esteiras microbianas e oncólitos que se encontravam úmidos e recobertos por mucilagem (EPS), foram secos em estufa antes de realizar os procedimentos acima citados.



Figura 5.2: Frações de sedimentos peneirados de acordo com granulometria e divididos em volumes de 10 cm³.

Com os sedimentos separados foi realizado o quarteamento, isto é, a divisão do volume em quatro partes iguais, com maior homogeneidade possível. De um quarto do volume, foi feita a triagem na qual separou-se o material de origem orgânica (bioclastos) e de origem inorgânica. Após a pesagem, foram confeccionados gráficos com as proporções encontradas.

Com o volume de 10 cm³, foi feita a triagem dos sedimentos soltos e incrustados com o auxílio de microscópio estereoscópico ZEISS Stemi DV4 (aumento de 8 a 32x), placa de Petri com fundo escuro e pincéis, com os quais foram coletados os elementos biogênicos encontrados. Estes foram colados em lâminas específicas para coleções de microfósseis.

Os foraminíferos foram separados por diferença de densidade, utilizando-se tricloroetileno. A identificação foi realizada com o auxílio da oceanógrafa Cíntia Yamashita, do Instituto Oceanográfico da USP.

As secções polidas foram estudadas com a utilização do microscópio estereoscópico, descrevendo-se a base, o meio e o topo dos estromatólitos, com base nas macroestruturas observadas.

Foram confeccionadas lâminas petrográficas, as quais foram analisadas e posteriormente enviadas ao MEV/EDS.

O fluxograma abaixo mostra a metodologia adotada (Figura 5.3).

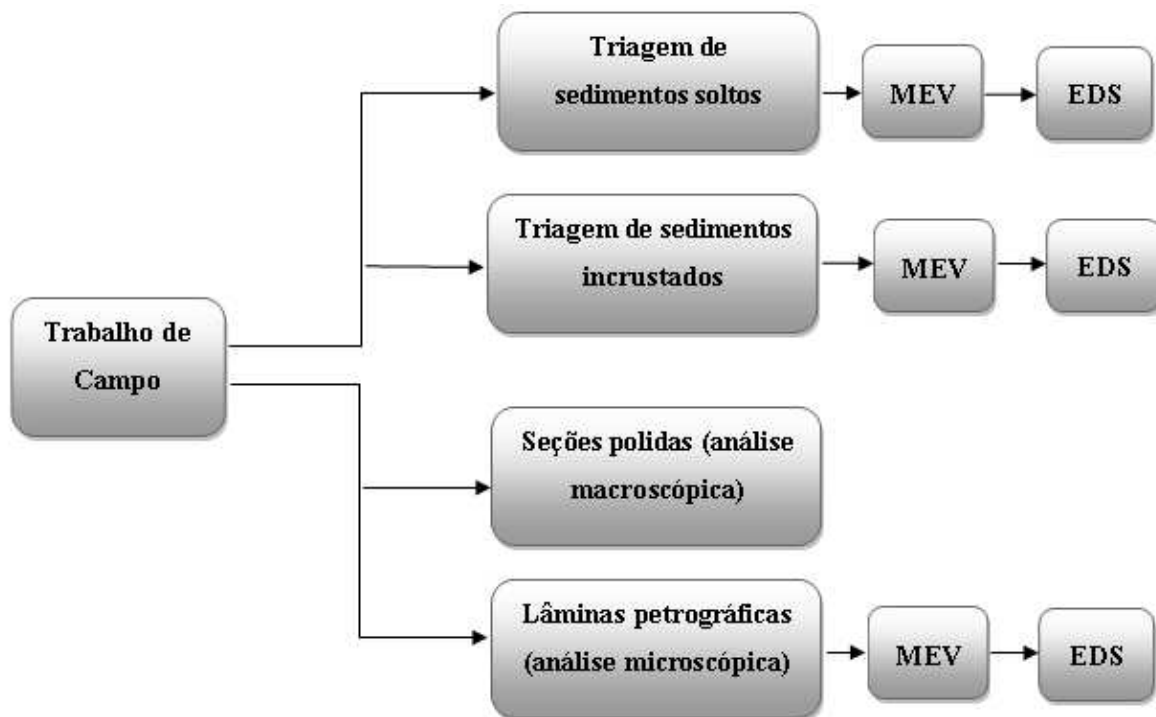


Figura 5.3 - Metodologia utilizada para a análise das estruturas microbianas holocênicas das lagoas Salgada e Pitanguinha.

Análise de lâminas petrográficas

Um dos principais focos no estudo das microfácies foi a identificação de estruturas biogênicas em meio à matriz das rochas, ou como grãos. Para as rochas carbonáticas, foi utilizada a classificação proposta por Embry & Klovan (1971), que leva em conta a textura deposicional, porém apresenta maior detalhamento para estruturas carbonáticas construídas por ação de organismos (figura 5.4).

| CALCÁRIOS ALÓCTONES | | | | | CALCÁRIOS AUTÓCTONES | | | | |
|---|----------------------|---|----------------------------|---------------------------------------|---|--|---|----------------------------------|--|
| Componentes originais não-ligados organicamente durante a deposição (<10% grão >2 mm) | | | | Textura deposicional não-reconhecível | Componentes originais não-ligados organicamente durante a deposição | | Componentes originais ligados organicamente durante a deposição | | |
| Contém Matriz (Partículas tamanho argila/silte fino) | | | | | >10% grãos >2 mm | | Organismos que atuam como obstáculos | Organismos que encrustam e ligam | Organismos que constroem um arcabouço rígido |
| Suportado por matriz | | O arcabouço é grão-suportado com matriz | Sem matriz, grão-suportado | | Suportado pela matriz | Suportado por componentes maiores que 2 mm | | | |
| Menos de 10% de grãos | Mais de 10% de grãos | | | | | | | | |
| <i>Mudstone</i> | <i>Wackestone</i> | <i>Packstone</i> | <i>Grainstone</i> | <i>Crystalline</i> | <i>Floatstone</i> | <i>Rudstone</i> | <i>Bafflestone</i> | <i>Bindstone</i> | <i>Framestone</i> |
| | | | | | | | | | |

Figura 5.4 – Classificação proposta por Embry & Klovan (1971) para rochas carbonáticas.

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)/EDS

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi utilizada para a visualização de microestruturas de elementos biogênicos encontrados em meio aos sedimentos holocênicos, auxiliando na identificação de táxons. Para realizar as análises, foi necessário metalizar as amostras com a aplicação de carbono, utilizando-se o metalizador QUORUM QISOTES, que faz com que os elétrons possam ser bem conduzidos, da superfície até seu aterramento, de maneira a não prejudicial à geração das imagens. O software utilizado para o desenvolvimento das análises foi o Labbok, da Carl Zeiss.

O detector de elétrons retroespalhados, capaz de gerar imagens devido a diferenças composicionais da amostra, foi utilizado nas lâminas, bem como o detector EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*), útil para caracterizar os elementos químicos presentes nas amostras e fornecer a proporção dos mesmos. O método se dá pela incidência de um feixe de elétrons sobre um mineral. Os elétrons das camadas mais internas dos átomos excitados mudam de estado de energia para os níveis mais energéticos, e quando liberam a energia ao voltarem ao estado fundamental, esta é emitida em ondas no comprimento de raios-x, que são identificadas e quantificadas pelo detector de raios-x localizado na câmara de vácuo do MEV. O software utilizado relaciona o número de contagens por segundo em relação à energia em keV, sendo capaz de identificar o elemento químico atingido.

Como a distinção entre dolomita e calcita com alto teor de magnésio ainda é controversa na literatura, foram considerados valores de até 29% em mol de $MgCO_3$ para calcita com alto teor de Mg; de 30 a 45% em mol de $MgCO_3$ para Ca-dolomita e 45 a 50% em mol de $MgCO_3$ para dolomita, de acordo com estudos de Vasconcelos *et al.* (1997).

Espectroscopia Raman

Para as análises por Espectroscopia Raman, foi utilizado o equipamento micro-Raman Renishaw InVia, com excitação em 785 nm e detecção com CCD (dispositivo de carga acoplada). Os dados foram adquiridos e analisados através do programa Wire 3.4, da Renishaw, por modo de mapeamento de áreas ou em espectros de pontos selecionados nas amostras. Utilizou-se lentes de aumento de 20X, 50X ou 100X no microscópio acoplado ao espectrômetro.

A técnica consiste na obtenção de espectros relacionados à frequência de fótons que são espalhados ao atingirem moléculas da amostra de interesse, sendo medida esta frequência em relação à intensidade (número de eventos em cada frequência).

A incidência dos fótons é realizada através de um feixe monocromático, que ao interagir com a amostra ocorre um processo inelástico, no qual estes fótons são espalhados com energia diferente àquela incidente. A diferença de energia ocorre devido à interação dos fótons incidentes com a molécula atingida, a qual tem certa frequência de vibração, que faz com que estes fótons sejam espalhados. A equação 1 define o fenômeno.

$$E_i = E_f \pm h\nu_{molec} \quad (1)$$

E_i – Energia do fóton incidente;

E_f – Energia do fóton espalhado;

ν – frequência de vibração da molécula

h – constante de Planck.

A maioria dos fótons sai com a mesma energia de incidência (espalhamento elástico denominado espalhamento *Rayleigh*, quando $E_i = E_f$); parte sai com energia maior (*Raman anti-Stokes*) e parte com energia menor (*Raman Stokes*), ambos espalhamentos inelásticos. A radiação espalhada é separada por um monocromador, e um detector mede sua intensidade, resultando num espectro com banda característica da molécula da amostra analisada.

6. RESULTADOS

6.1 Estruturas microbianas permianas – Mineração PH7, Santa Rosa do Viterbo/SP

Foram coletadas amostras referentes à esteira microbiana, brecha calcárea intraformacional e estromatólito. Os resultados estão apresentados de maneira separada para cada tipo de amostra. A coluna estratigráfica (figura 6.1) mostra a superposição de cada estrutura no afloramento. A brecha intraformacional e a esteira microbiana compreendem a base do Membro Ipeúna, subdivisão da Formação Assistência pertencente ao Subgrupo Irati. Os estromatólitos pertencem ao topo do Membro Ipeúna, em contato superior com a Formação Corumbataí.

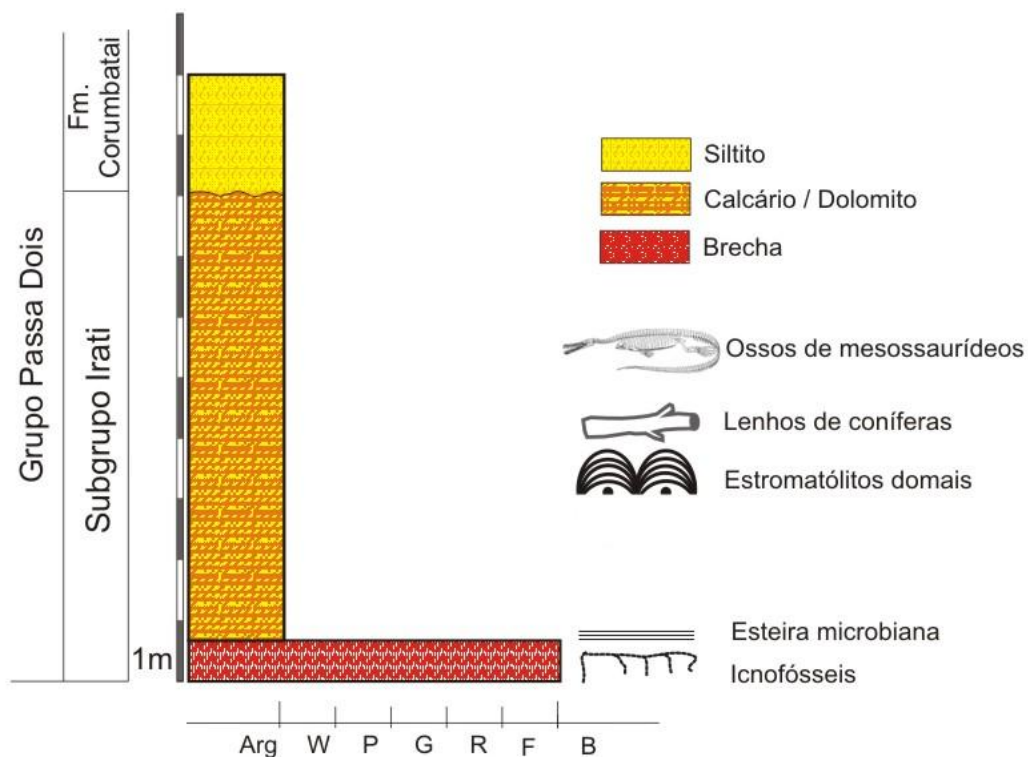


Figura 6.1 – Coluna estratigráfica do afloramento da pedra PH7, evidenciando as estruturas estudadas (brecha intraformacional, esteira microbiana e estromatólitos).

6.1.1 Brecha carbonática intraformacional

No afloramento, situa-se no chão da pedreira, abaixo da porção basal dos estromatólitos domais que lá ocorrem, com contato abrupto. Apresenta-se intimamente relacionada a esteiras microbianas, apresentando fragmentos destas em sua composição. Em toda a extensão visível do chão, ocorre ora acima das esteiras, ora abaixo e, por vezes, intercalada a ela.

Apresenta espessura variável ao longo do afloramento, que variam no intervalo de 20 até 70 cm.

Análise macroscópica

É composta por abundantes clastos de tamanho variado, de alguns milímetros a aproximadamente 1 cm, sendo majoritariamente angulares. Alguns apresentam coloração esbranquiçada, outros marrons, muito semelhantes com a coloração da matriz, esta de granulometria fina. É formada por rochas sedimentares da própria bacia (intraformacionais). Em meio aos clastos são visíveis fragmentos de esteira microbiana, possivelmente gerados por ressecamento, desprendimento e transporte por pouca distância até a região de formação da brecha (figura 6.2).

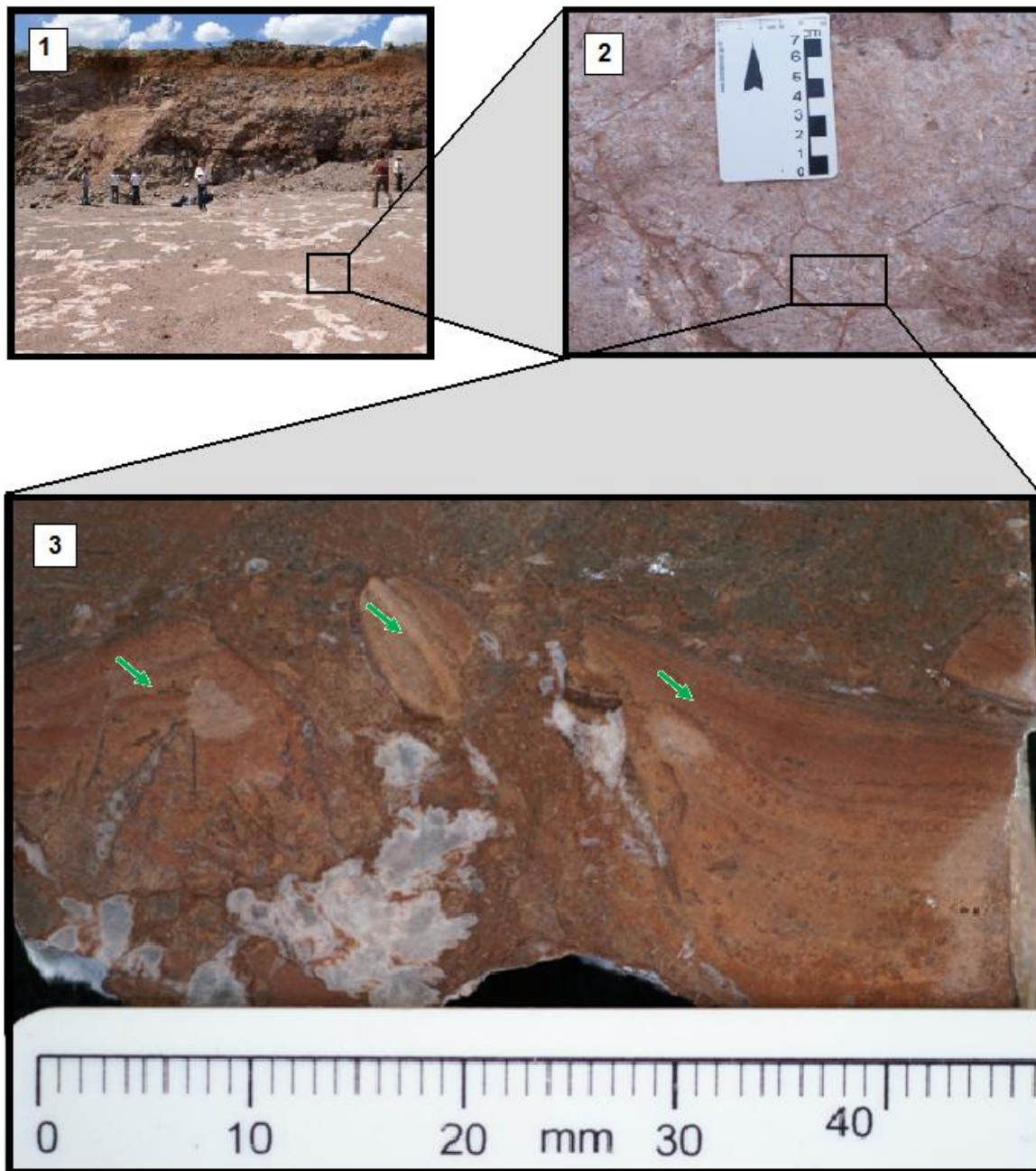


Figura 6.2 – Pedreira PH7 em Santa Rosa do Viterbo, Subgrupo Irati. 1) Localização da camada de brecha em campo; 2) detalhe da estrutura; 3) face polida mostrando diferentes composições, incluindo fragmentos de esteiras microbianas, indicados por setas verdes.

São bem evidentes em meio à brecha, ossos desarticulados e fragmentados de mesossaurídeos (figura 6.3), os quais coexistiram com a formação da estrutura. Os mesmos são encontrados em meio aos domos dos estromatólitos e formando parte de suas estratificações.

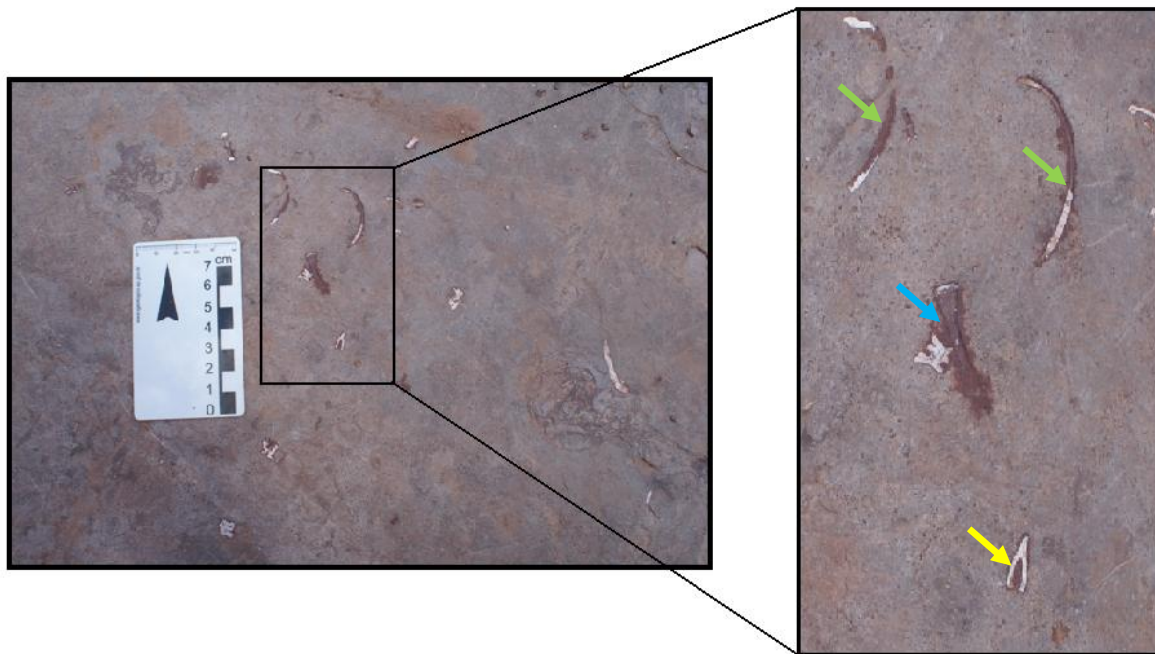


Figura 6.3: Pedreira PH7, Santa Rosa do Viterbo, Subgrupo Irati. Ossos desarticulados de mesossaurídeos na superfície do chão da frente de lavra, na brecha intraformacional. Setas verdes indicando costelas; seta azul indicando fêmur e seta amarela indicando vértebra.

Análise microscópica

A análise das seções delgadas revelou, na porção basal da brecha, abundantes grãos de quartzo com extinção reta e formato predominantemente angular, com alguns grãos sub-arredondados, constituindo de fragmentos de arenito carbonático. Contém pontos de óxido de ferro e raros feldspatos (plagioclásio). A matriz, de granulação muito fina, é composta por calcita (micrita). Ocorrem alguns bioclastos, como ostracodes (figura 6.4-1), fragmentos de conchas de bivalves (figura 6.5-4) e de ossos de vertebrados (figura 6.4-2).

A porção intermediária é caracterizada pela presença de valvas de ostracodes desarticuladas, abundantes grãos de quartzo com as mesmas características da base, feldspatos

(plagioclásio), matéria orgânica oxidada, pequenos pontos de óxido de ferro e escassos oóides. A partir desta porção, ocorrem fragmentos de esteiras microbianas, estas reconhecidas devido à trama fenestral típica de carbonatos de origem microbiana (Tebbutt *et al.*, 1965).

O topo, com contato abrupto com as estruturas microbianas, apresenta as mesmas características apresentadas pela base, porém, há maior participação dos fragmentos de esteiras microbianas, estas ocorrendo em fragmentos que variam de alguns milímetros a aproximadamente 1 cm. São visíveis valvas de ostracodes isoladas, em aglomerações, e por vezes preenchidas por micrita.

Alguns poros são preenchidos por calcita (micrita), e outros são recristalizados. Diversas lâminas apresentaram uma textura disseminada de sílica em meio à matriz carbonática (figura 6.4-1).

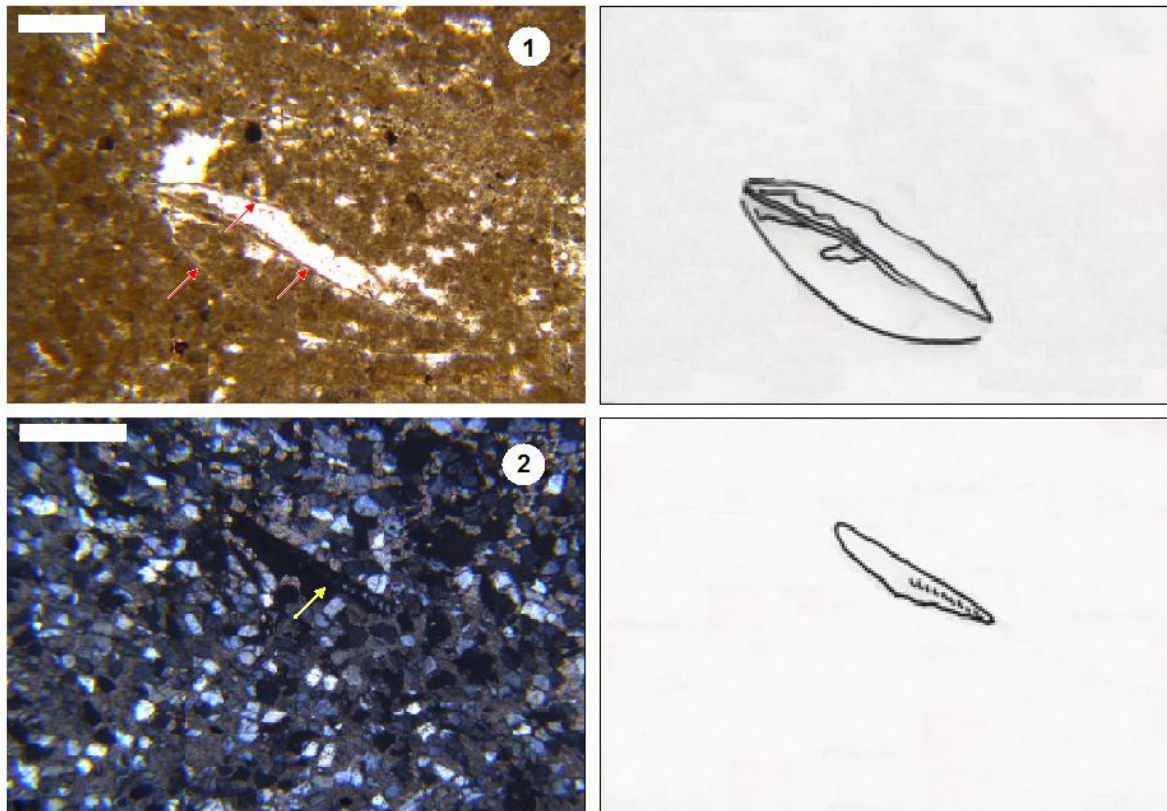


Figura 6.4 – Lâminas petrográficas - brecha intraformacional; Pedreira PH7, Santa Rosa do Viterbo, Subgrupo Irati. 1) as setas vermelhas indicam conchas de ostracodes desarticuladas (CP6/71) e 2) porção basal; arenito carbonático; seta indicando fragmento de osso de vertebrado (CP6/78). Desenhos (esquerda) evidenciando as estruturas biogênicas. Escalas de 1 mm.

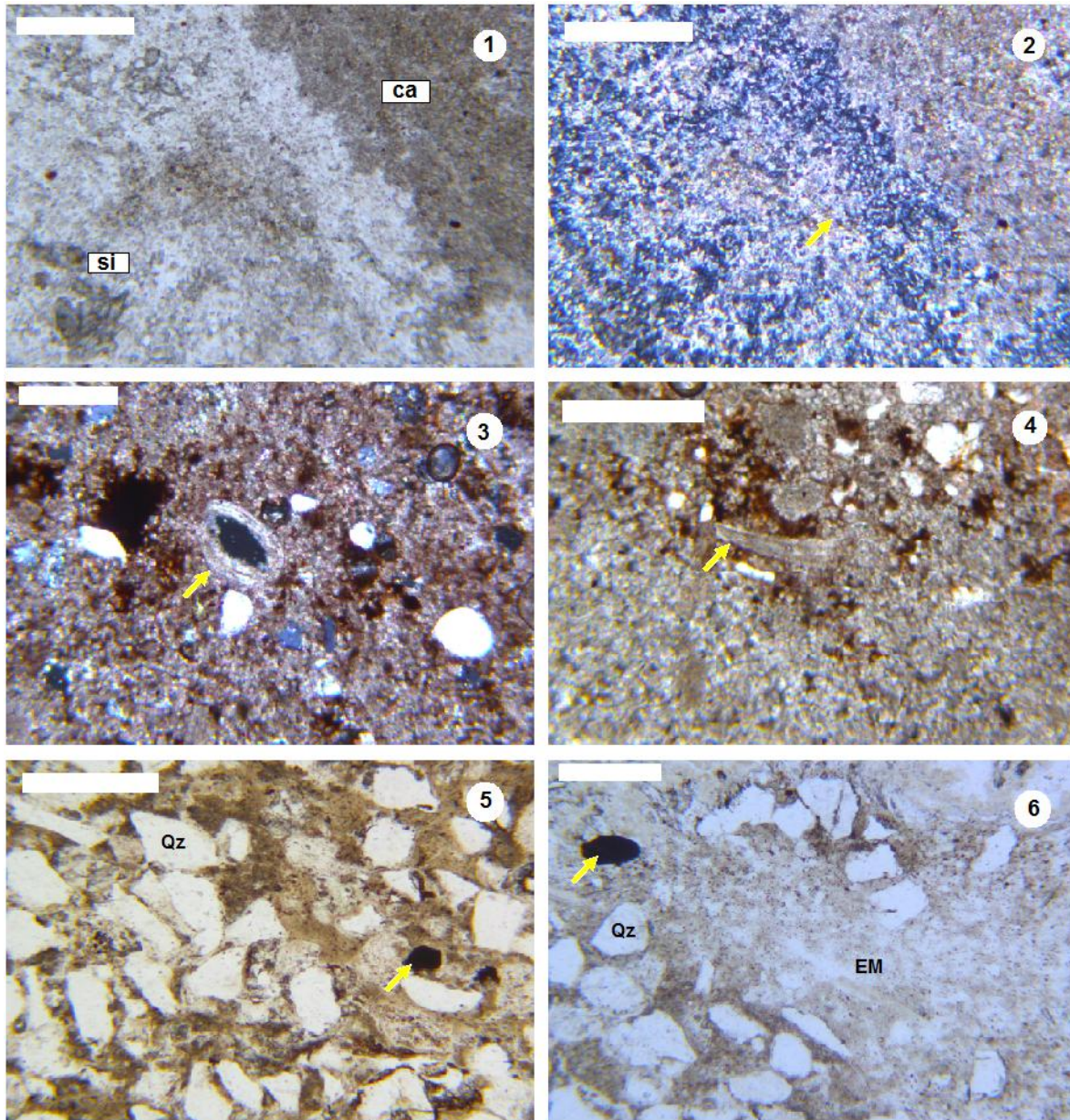


Figura 6.5: Lâminas petrográficas - brecha intraformacional; Pedreira PH7, Santa Rosa do Viterbo, Subgrupo Irati 1) Porção intermediária da brecha, mostrando textura disseminada de sílica – si e carbonato de cálcio (cimento calcítico – ca; CP6/71). 2) nicóis cruzados; seta amarela evidenciando concha de ostrácode (CP6/71). 3) nicóis cruzados; porção intermediária; seta amarela evidenciando oóide (estrutura concêntrica – córtex – ao redor do núcleo; CP6/71). 4) Fragmento de concha de bivalve em meio à argila (CP6/71); 5) porção basal; grãos de quartzo (Qz) – arenito carbonático; seta amarela indicando matéria orgânica oxidada (CP6/76); 6) seta indicando matéria orgânica oxidada; grãos de quartzo em meio a esteira microbiana (EM; CP6/76). Escalas de 1 mm.

Análise por MEV/EDS

A análise por EDS revelou a matriz de carbonato de cálcio (calcita), porém, alguns tiros indicaram a presença de sílica (figura 6.7), corroborando com as análises petrográficas. A composição da maioria dos grãos foi de silício e oxigênio, sendo, portanto, constituídos de quartzo. Estruturas de origem biogênica foram reveladas, como fragmentos de ossos (figura 6.6), de composição de fosfato de cálcio (apatita), e por vezes, de carbonato de cálcio devido à substituição. Estes ossos possivelmente eram pertencentes aos mesossaurídeos (*Mesossaurus brasiliensis*, segundo Mezzalira (1980), fósseis muito comuns na região). Para as porções nas quais eram observadas as estruturas fenestrais típicas de esteiras microbianas, a sua composição de carbonato de cálcio foi confirmada (figura 6.7 e figura 6.7).

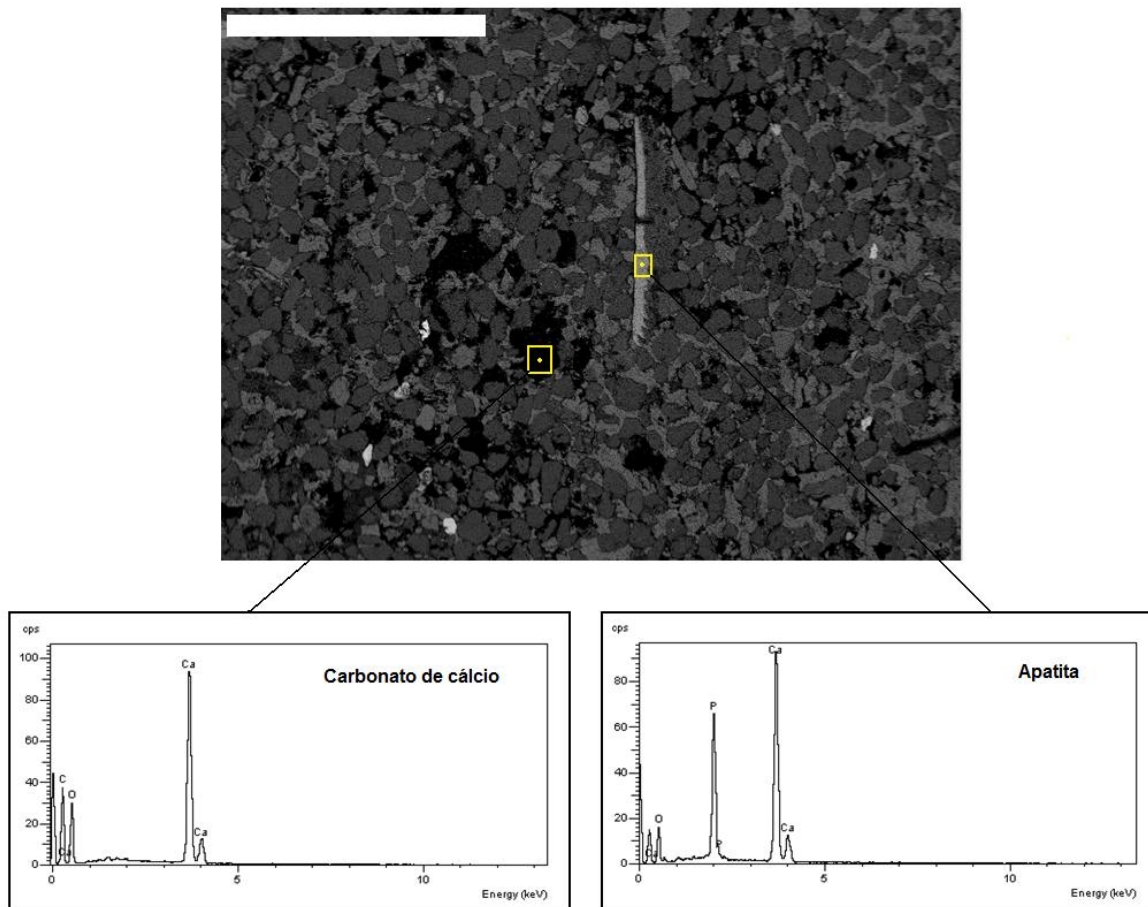


Figura 6.6: Brecha intraformacional; Pedreira PH7, Santa Rosa do Viterbo, Subgrupo Irati. Micrografia eletrônica com contraste composicional e espectros relacionados a carbonato de cálcio e apatita. Região de matriz, com porosidade fenestral relativa a fragmento de esteira microbiana (CP6/78). Escala de 2 mm.

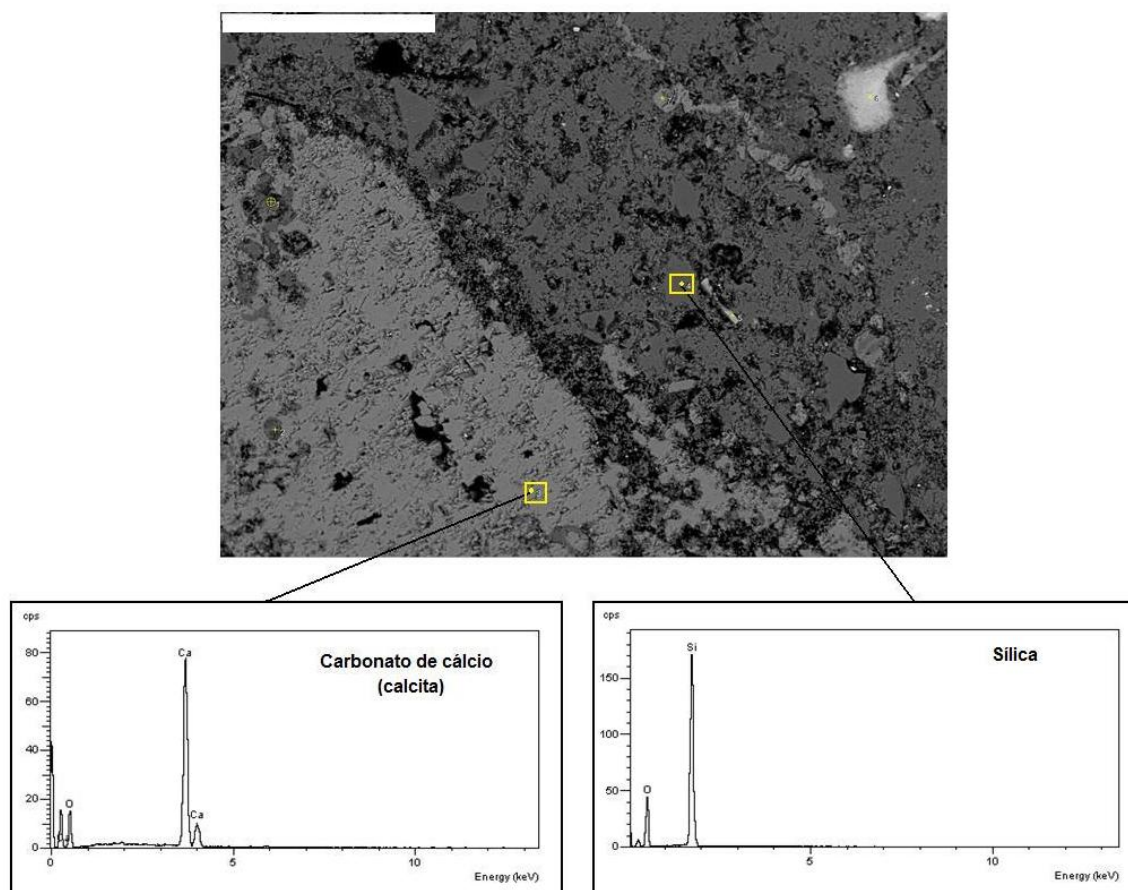


Figura 6.7 – Brecha intraformacional; Pedreira PH7, Santa Rosa do Viterbo, Subgrupo Irati. Micrografia eletrônica com contraste composicional evidenciando pontos com composição de carbonato de cálcio (calcita) em região de fragmento de esteira microbiana; e sílica de forma disseminada (CP6/71). Escala de 200 μ m.

Espectroscopia Raman

Foram gerados espectros de pontos específicos escolhidos através da visão em microscópio acoplado ao espectrômetro. Estas amostras se encontravam bastante silicificadas, o que prejudicou, de certo modo, as análises, pois a fluorescência emitida interferiu na detecção das bandas.

Alguns resultados obtidos, como a detecção de bandas relacionadas ao quartzo e carbonato de cálcio (calcita – figura 6.9), corroboraram as análises por EDS. Em região da amostra correspondente a fragmento de esteira microbiana, foi detectada banda de dolomita (figura 6.8). Bandas entre 1200 a 1400 cm^{-1} são características de grupos $-\text{CH}$, podendo estar

relacionadas à presença de matéria orgânica de composição e origem não identificada (figura 6.10).

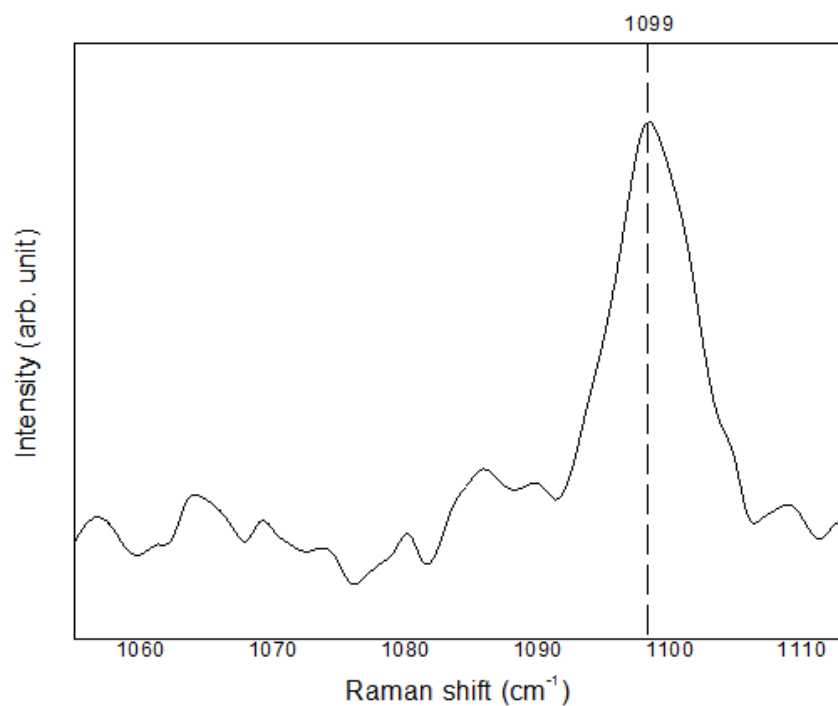


Figura 6.8: Espectro Raman da amostra CP6/76 – brecha intraformacional, área de fragmento de esteira microbiana. Banda em 1099 cm^{-1} , correspondente ao modo vibracional de maior intensidade da dolomita.

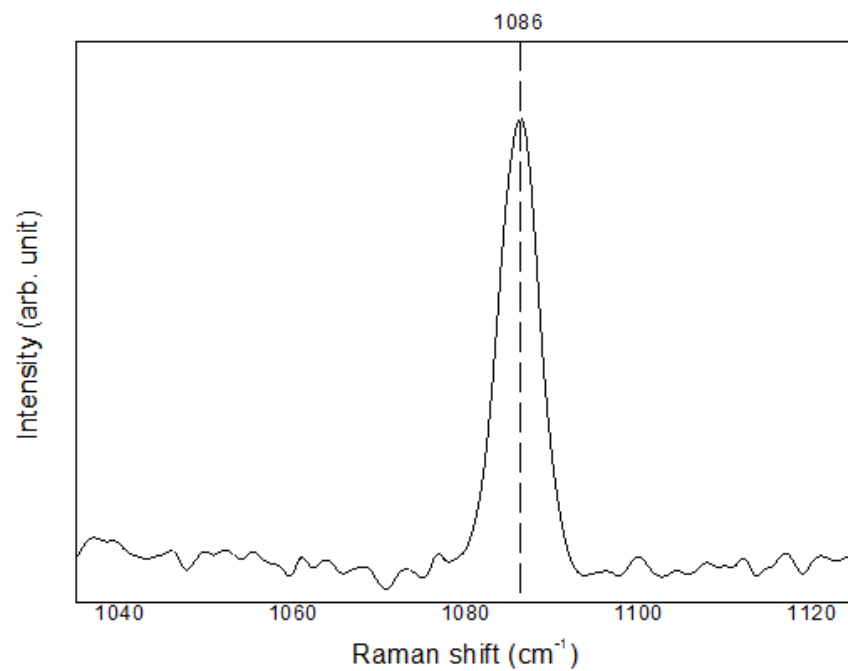


Figura 6.9: Espectro Raman da amostra CP6/76 – brecha intraformacional, área de fragmento de esteira microbiana. Banda em 1086cm⁻¹, correspondente ao modo vibracional de maior intensidade da calcita.

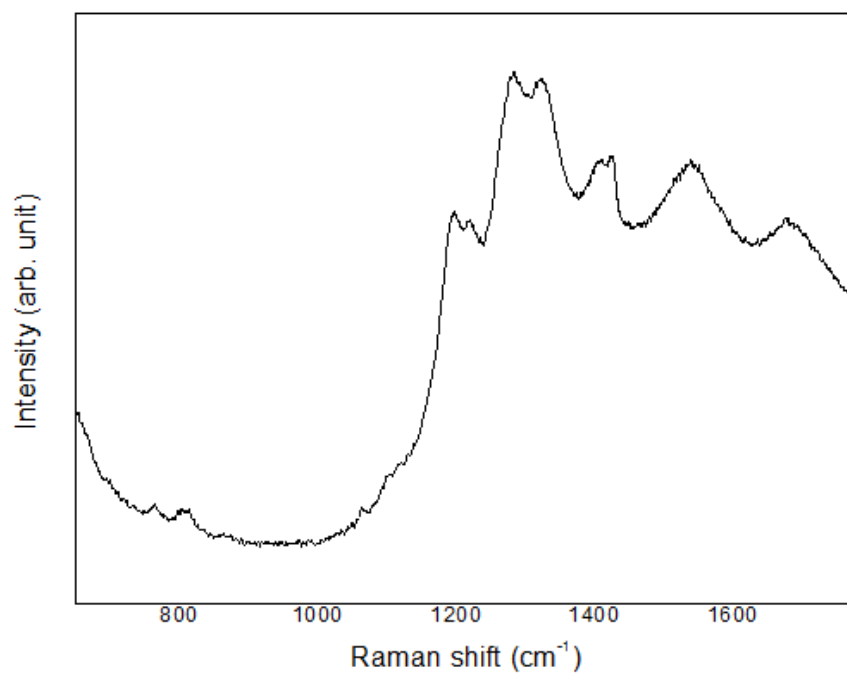


Figura 6.10: Espectro Raman da amostra CP6/76 – brecha intraformacional. Bandas entre 1200 e 1400 cm⁻¹, possivelmente correspondentes à matéria orgânica.

6.1.2 Esteira microbiana

Desenvolvida paralelamente acima de brecha intraformacional, alcança espessuras variáveis por toda a extensão do afloramento, sendo as amostras recolhidas de altura aproximada de 7 cm. Foi a base para o crescimento de estromatólitos gigantes, e a porção basal destes é, por vezes, fácil de ser confundida com as esteiras. Na extensão do afloramento, em alguns locais encontra-se intercalada à brecha intraformacional, e em outros por baixo ou por cima da mesma.

Análise macroscópica

As amostras apresentam laminações plano-paralelas horizontais e por vezes levemente onduladas. A granulometria é fina, o que torna as laminações muito homogêneas, não possuindo grandes variações base/topo (figura 6.11). Sua coloração é acinzentada, alternando tons escuros e claros. Há indícios de compactação, como estiólitos, são visíveis em meio às laminações.

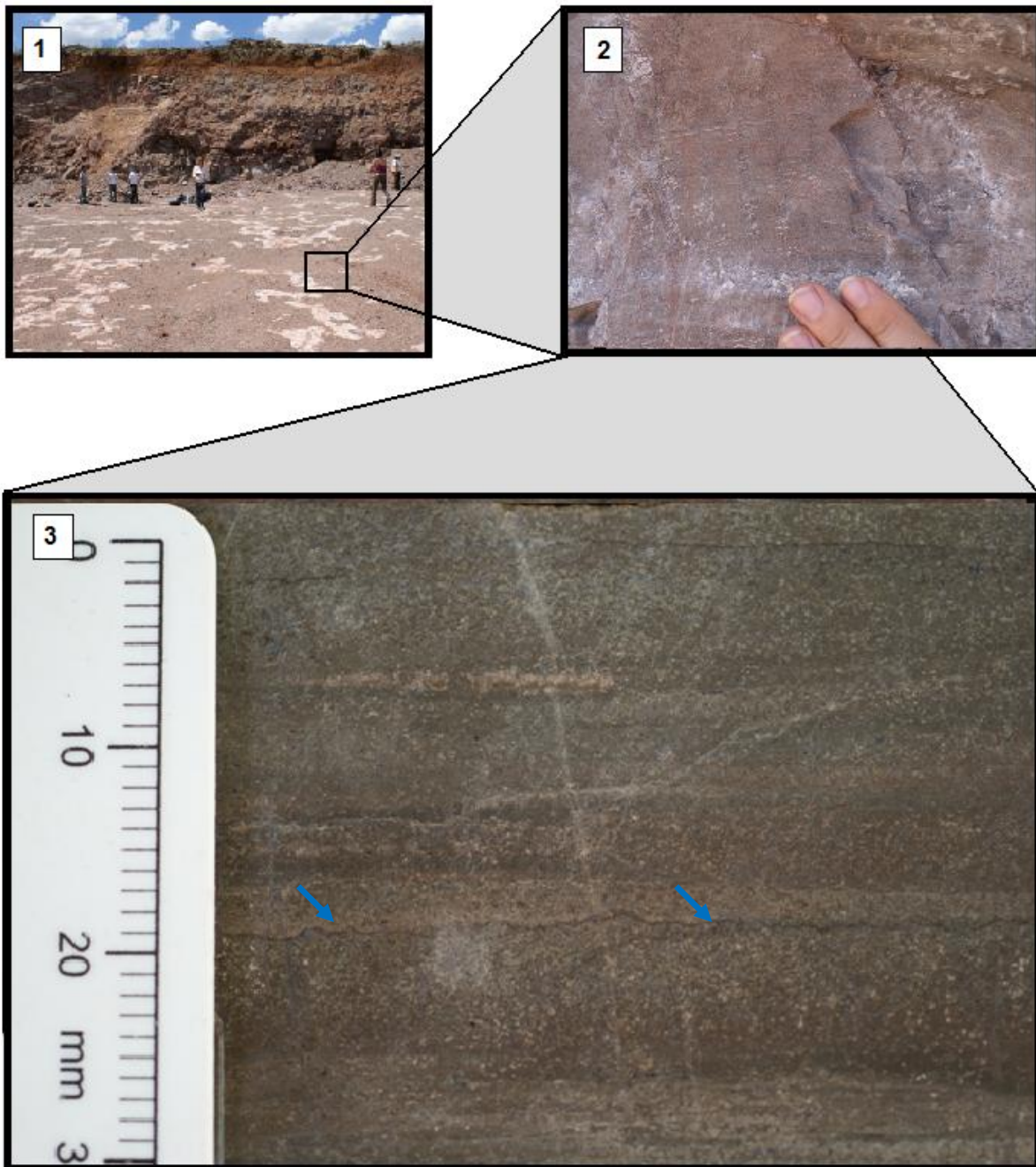


Figura 6.11 – 1) Esteira microbiana; Pedreira PH7, Santa Rosa do Viterbo, Subgrupo Irati. Localização da esteira microbiana em campo; 2) Detalhe da estrutura em campo; 3) Face polida de esteira microbiana na qual são visíveis finas laminações da base ao topo, sem variações macroscópicas, e possível estiólito, indicado por seta azul.

Análise microscópica

São evidentes porosidades ou tramas fenestrais (figura 6.12-2) típicas de estruturas microbianas, de origem poligenética. Também são visíveis pontos escurecidos, consistindo de óxido de ferro hipercolado; estiólitos paralelos às laminações (figura 6.12-2), formados por solução de pressão, associados à acumulação, neste caso, de óxido de ferro; ostracodes; conchas de bivalves; fragmentos de ossos de mesossaurídeos, pelóides e poros recristalizados por calcita (figura 6.13).

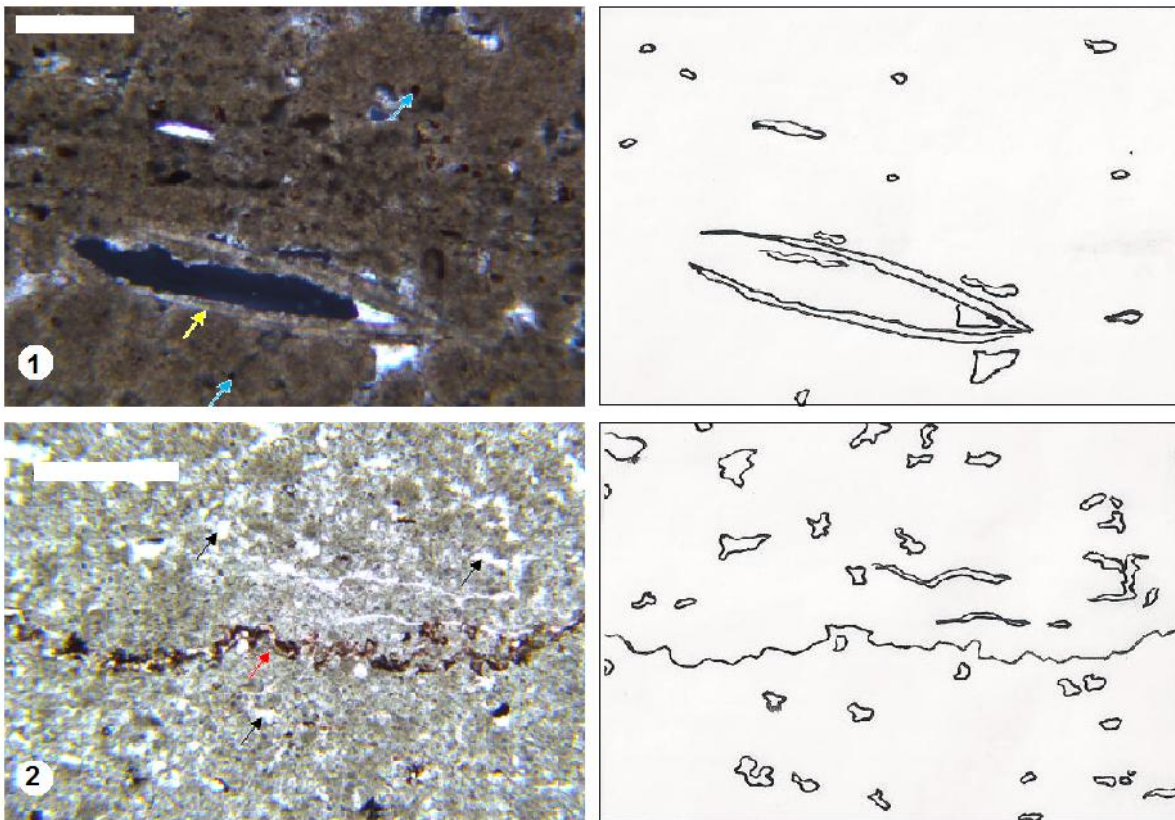


Figura 6.12 – Esteira microbiana; Pedreira PH7, Santa Rosa do Viterbo, Subgrupo Irati. 1) Nicóis cruzados – base da amostra; seta amarela indicando concha de ostracode articulada, porém, compactada; seta azul indicando pontos de óxido de ferro (CP6/80); 2) Nicóis paralelos – topo da amostra; seta vermelha indicando estiólito; seta preta indicando porosidade fenestral (CP6/80). À direita, desenhos evidenciando as estruturas observadas. Escalas de 1 mm.

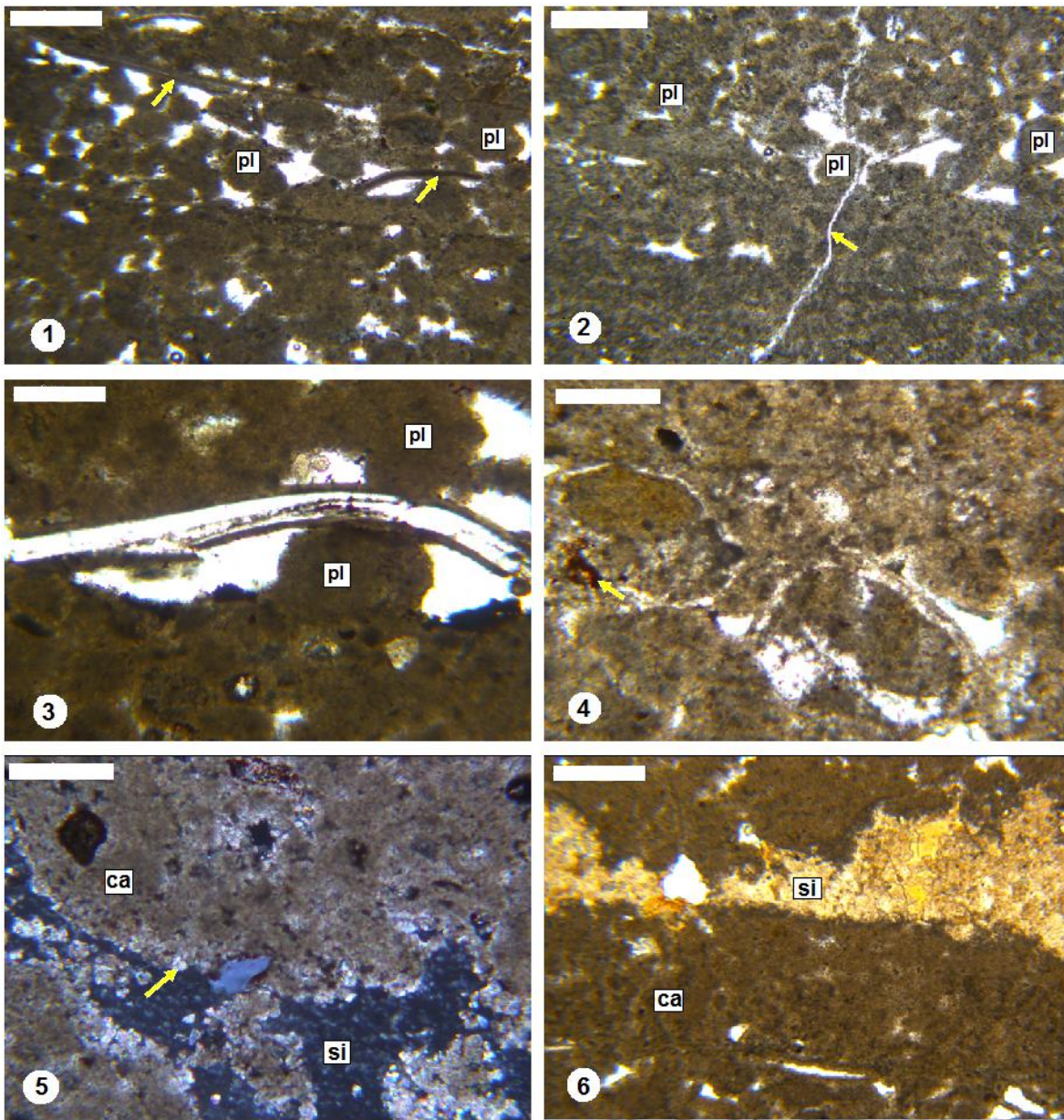


Figura 6.13 – Esteira microbiana; Pedreira PH7, Santa Rosa do Viterbo, Subgrupo Irati. Amostra CP6/80 - 1) Setas amarelas indicando valvas de ostracodes desarticuladas e compactadas; pelóides (pl) – escala de 1mm; 2) Pelóides (pl); seta amarela indicando fratura preenchida por sílica – escala de 1mm; 3) Pelóides (pl) e valvas de ostracodes compactadas – escala de 2 mm; 4) Seta amarela indicando óxido de ferro - escala de 2 mm; 5) Seta amarela indicando cimentação por calcita resultante de infiltração de água meteórica; calcita microcristalina (ca) e sílica (si) – escala de 1mm; 6) Textura disseminada de sílica (si) em meio a matriz de calcita (ca) – escala de 1mm.

Análise por MEV/EDS

Com o auxílio do EDS, foi determinada a composição elementar da matriz, que consistia de calcita. As micrografias eletrônicas revelaram porosidades e fraturas preenchidas por dolomita (figura 6.14).

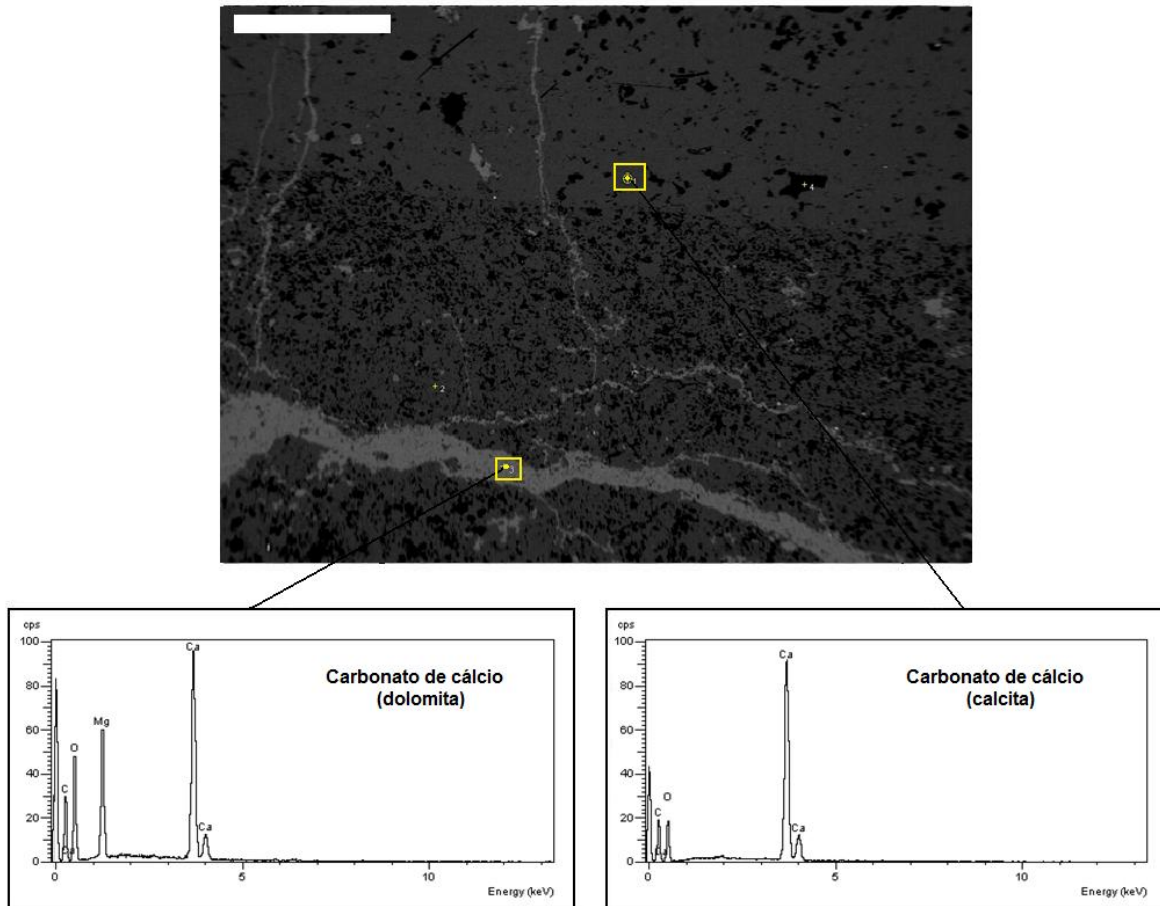


Figura 6.14 - Esteira microbiana; Pedreira PH7, Santa Rosa do Viterbo, Subgrupo Irati. Amostra CP6/80 - Micrografia eletrônica com contraste composicional evidenciando pontos de composição de dolomita em fratura; matriz calcítica. Escala de 500 μm .

A composição dos pelóides resultou na composição de dolomita. Em regiões ao seu redor, a composição consistia de calcita, como na matriz (figura 6.15). Cabe ressaltar que foi levado em consideração a não existência de um córtex ou laminações concêntricas ao redor do núcleo na interpretação destas estruturas como pelóides.

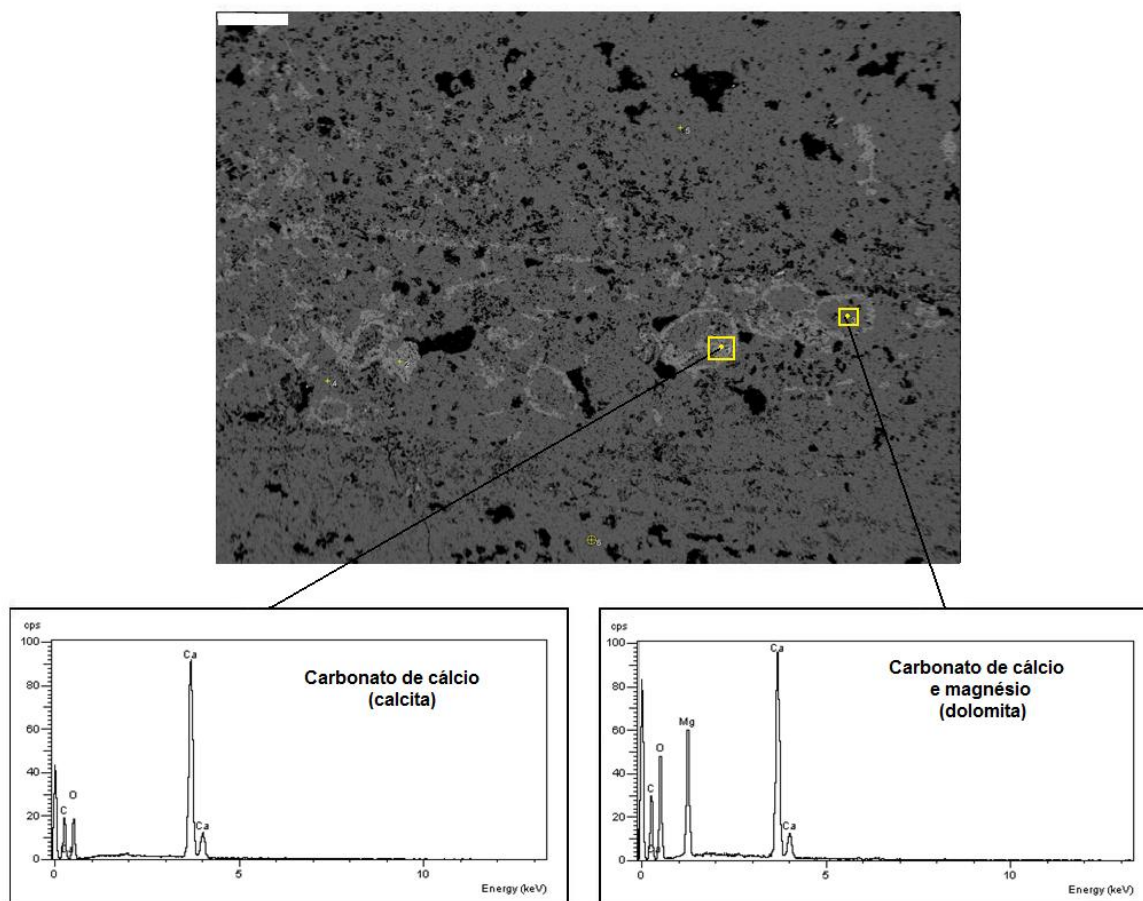


Figura 6.15 – Esteira microbiana; Pedreira PH7, Santa Rosa do Viterbo, Subgrupo Irati. Amostra CP6/80 - Micrografia eletrônica com contraste composicional evidenciando pontos de composição de dolomita (interior do pelóide) e de calcita (ao redor). Escala de 500 μm .

Análise por Espectroscopia Raman

A análise por espectroscopia Raman confirmou a composição da matriz, constituída de calcita, característica de banda em 1086 cm^{-1} (figura 6.16). Também detectou a presença de quartzo (figura 6.17) em análise pontual, possivelmente de algum grão situado por entre as laminações.

Devido à fluorescência emitida pela amostra, por esta estar intensamente silicificada, houve limitações na obtenção de bons resultados com esta técnica, ficando a análise restrita somente a pontos onde as bandas ficaram intensas, compensando a baixa razão sinal/ruído.

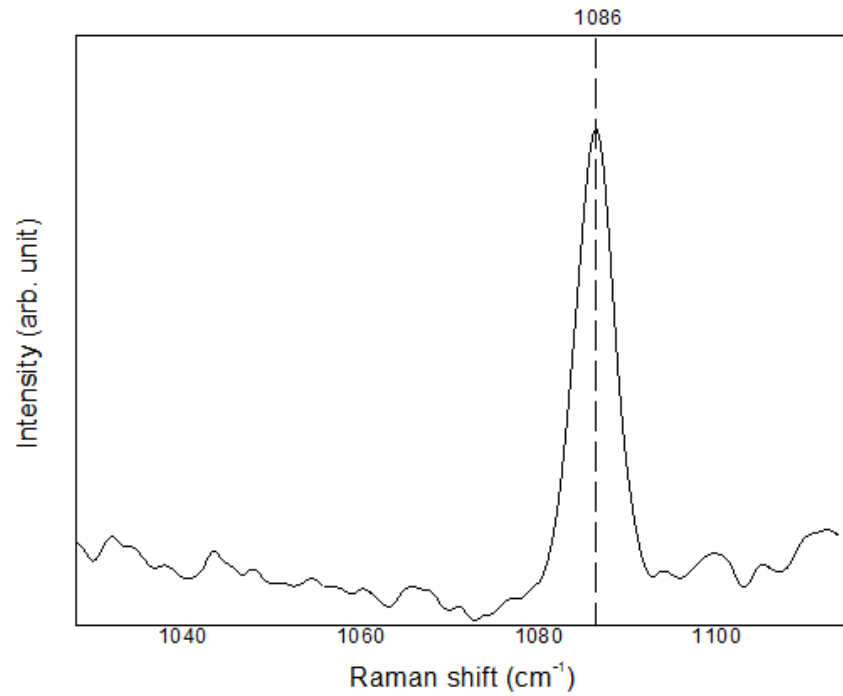


Figura 6.16: Espectro Raman da amostra CP6/80 – esteira microbiana. Banda em 1086 cm^{-1} correspondente ao modo vibracional de maior intensidade da calcita, referente à região de matriz.

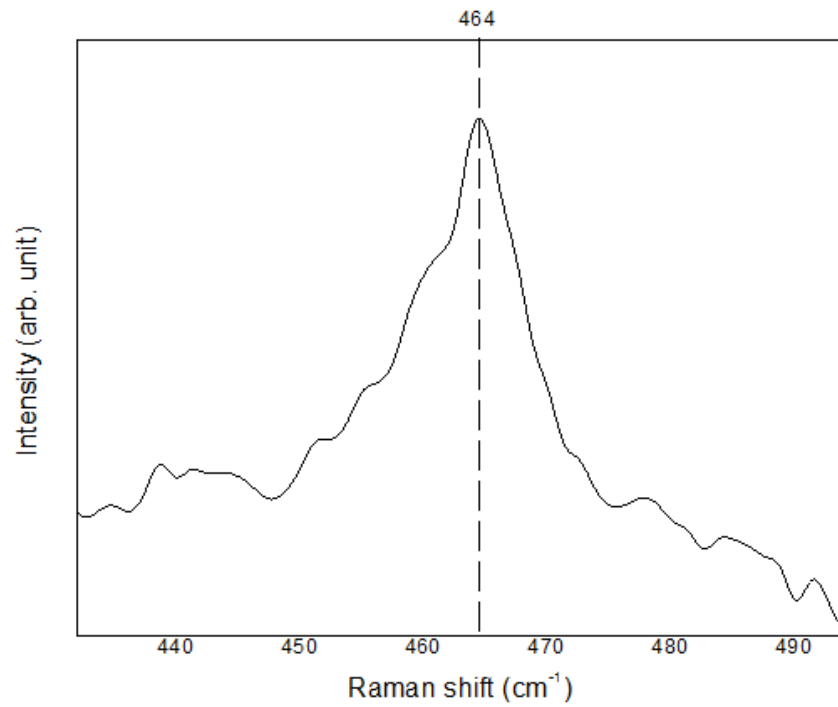


Figura 6.17: Espectro Raman da amostra CP6/80 – esteira microbiana. Banda em 464 cm^{-1} correspondente a quartzo.

6.1.3 Estromatólitos

Os estromatólitos domais gigantes que ocorrem em Santa Rosa do Viterbo encontram-se acima das esteiras microbianas e apresentam altura aproximada de 1,70 m, com comprimento variando de 2 a 6 metros, sendo separados uns dos outros por espaços muito curtos (poucos centímetros), por vezes preenchidos por calcita e ossos de mesossaurídeos desarticulados e fragmentados. Correspondem à porção basal do Membro Ipeúna, Formação Assistência (Hachiro, 1996).

Análise macroscópica

Consistem de estromatólitos domais a pseudo-colunares, com raras porções tendendo a ramificação, sendo estas na porção superior das colunas. Suas laminações são levemente onduladas, finas e possuem, entre si, concreções de sílica e calcita, sendo que esta última ocorre diversas vezes de forma recristalizada, formando nódulos e geodos (figura 6.18).

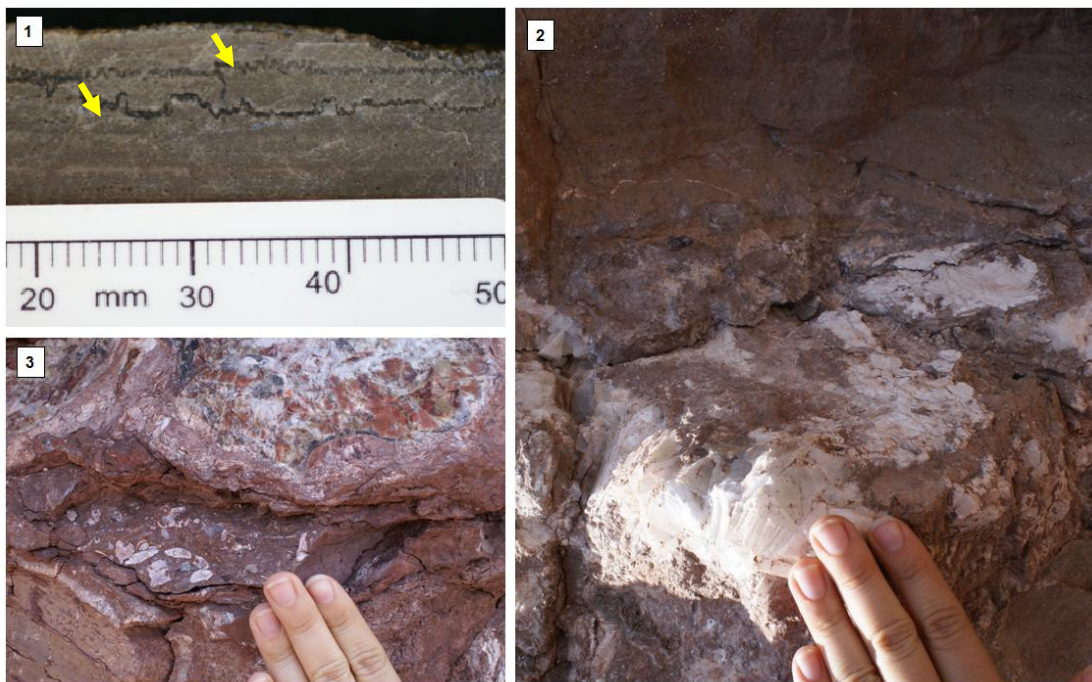


Figura 6.18: Estromatólitos domais. Pedreira PH7, Santa Rosa do Viterbo, Subgrupo Irati. 1) Estiólitos, indicados por setas amarelas; 2) Concreção de calcita; 3) Ossos de mesossaurídeos desarticulados entre as laminações.

Entre suas laminações comumente apresentam ossos de mesossaurídeos em grande quantidade, sendo a maior parte deles em estado fragmentado, desarticulados a parcialmente articulados. A figura 6.19 mostra a localização das estruturas na frente de lavra.

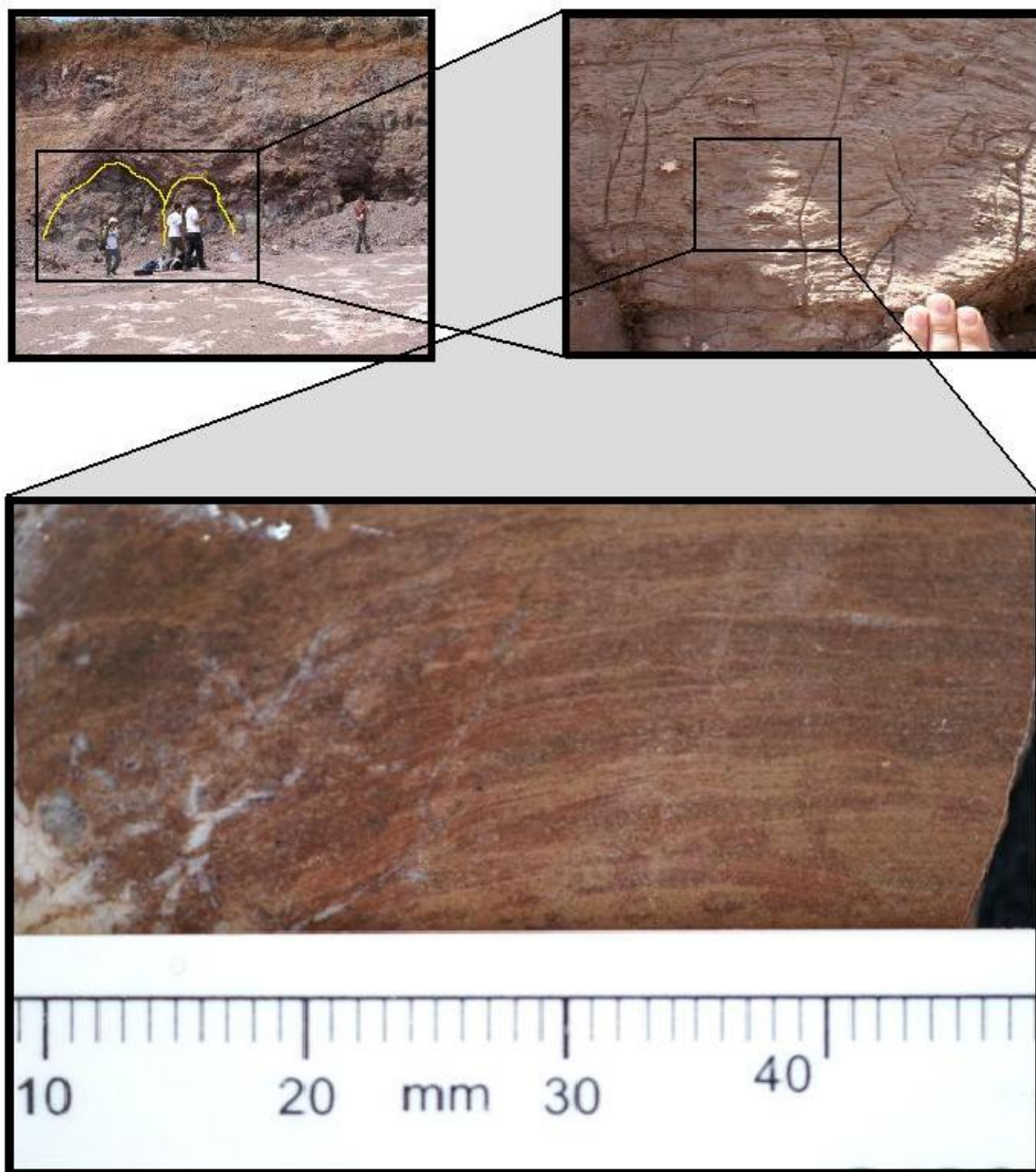


Figura 6.19: Estromatólitos domais. Pedreira PH7, Santa Rosa do Viterbo, Subgrupo Irati. 1) Localização dos estromatólitos em campo; 2) Zoom da estrutura *in situ*; 3) Face polida de esteira microbiana na qual são visíveis finas laminações da base ao topo, sem variações macroscópicas.

Em sua base, ocorrem laminações de esteira microbiana, sobre as quais se iniciam as que correspondem aos estromatólitos, que são um pouco mais espessas. As diferenças nas laminações dos estromatólitos em relação às da esteira microbiana se dão por conta das ondulações mais intensas e maior distinção entre uma lâmina e outra. As laminações das esteiras são mais coesas entre si e dificilmente distinguíveis macroscopicamente.

Apresenta contato abrupto com a base da Formação Corumbataí, sendo visíveis, nesta região, concreções de sílica.

Análise microscópica

Microscopicamente são visíveis as laminações e a trama fenestral típica de construções de origem microbiana. Estas estruturas ocorrem mais preservadas em algumas porções, com ocorrência de estiólitos, os quais apresentam picos de alta amplitude (cerca de 1mm), são do tipo suturado (Choquette & James, 1987), contém óxido de ferro em suas suturas (figura 6.20 – 1 e 2) e ocorrem com maior frequência próximo à porção basal das bioconstruções.

Em algumas lâminas são observados pontos de matéria orgânica oxidada (figura 6.20 - 6), fragmentos de ossos de mesossaurídeos (figura 6.20 – 3 e 4) e algumas valvas de ostracodes desarticuladas, compactadas e substituídas por calcita, ora únicas (figura 6.20 – 3), ora acumuladas em pequena quantidade (figura 6.20 – 5). Também foram observadas fraturas preenchidas por micrita.

A base dos estromatólitos possui laminações finas, porém, bem distinguíveis entre si. Há predominância de matriz, apresenta raramente alguns clastos como grãos de quartzo predominantemente subangulosos e de extinção reta.

Na porção intermediária dos estromatólitos as laminações são menos distintas, e de granulometria mais fina. Raramente ocorrem clastos em meio a elas, consistindo de grãos de quartzo angulosos. São visíveis alguns pontos escuros, de preto a marrom, correspondentes a óxido de ferro e alguma matéria orgânica oxidada.

No topo dos estromatólitos, pela análise petrográfica, foi possível observar certa alternância de laminações com predominância de matriz, e outras com predominância de clastos,

estes consistindo de grãos de quartzo, fragmentos ossos e calcita. Em comparação com a parte intermediária, esta apresenta as laminações mais evidentes e distintas entre si.

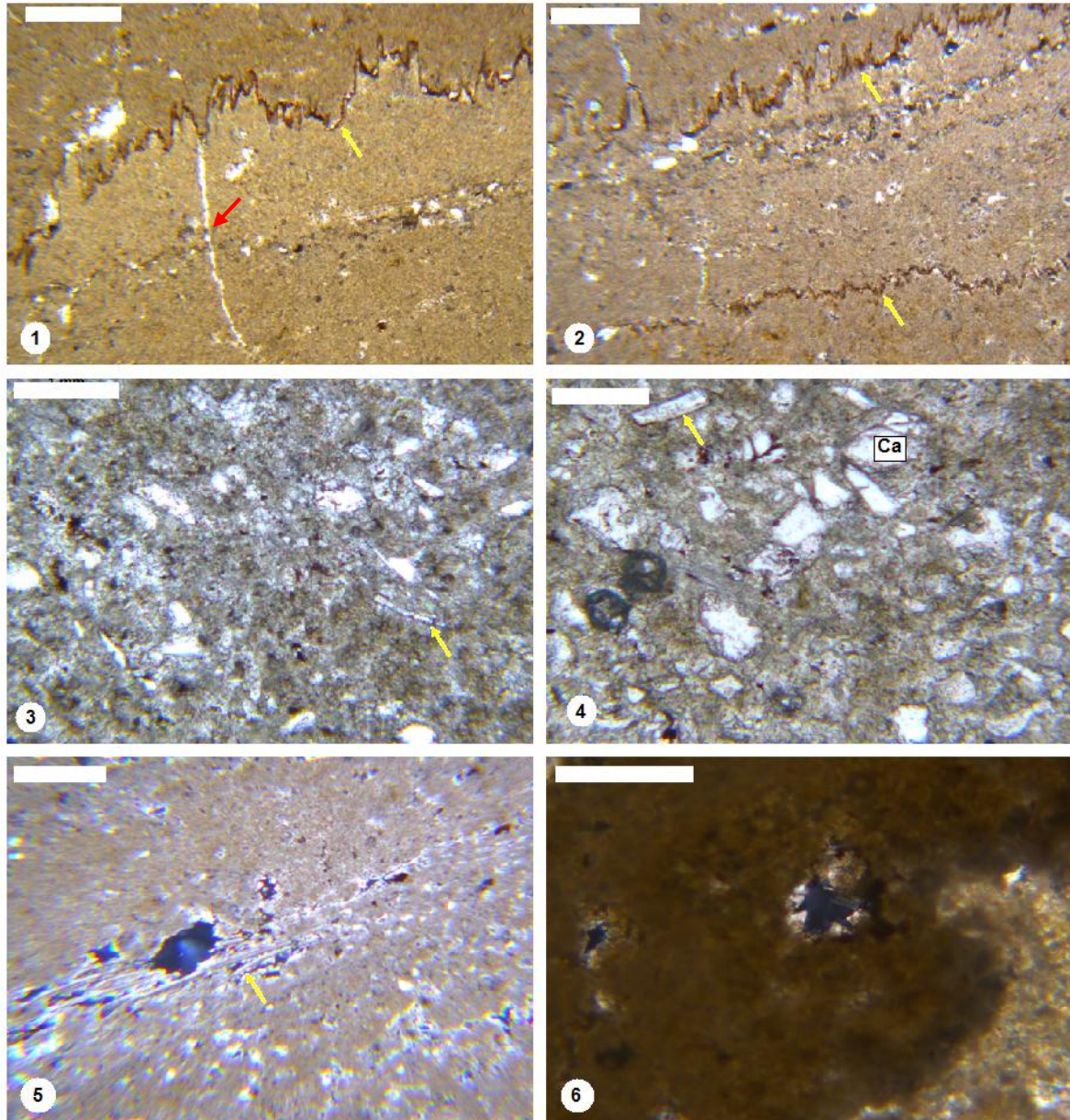


Figura 6.20: Estromatólitos domais. Pedreira PH7, Santa Rosa do Viterbo, Subgrupo Irati. 1) Seta amarela apontando estiólito suturado, de alta amplitude em meio a laminações do estromatólito, e fratura preenchida por calcita, indicada por seta vermelha (CP6/62); 2) Maior ocorrência de estiólitos; porosidade fenestral (CP6/62); 3) Porosidade fenestral com calcita dissolvida e recrystalizada, preenchendo os poros; seta amarela apontando osso desarticulado (CP6/65); 4) Idem 3; pontos escuros são matéria orgânica oxidada (CP6/65); 5) Seta amarela apontando concentração de valvas de ostracodes substituídas por calcita, em meio a porosidade (CP6/62); 6) Poro com recrystalização de calcita (CP6/62). Escala de 1mm em 1, 2, 3, 4 e 6. Escala de 2mm em 5.

Análise por MEV/EDS

A análise por EDS detectou, na maioria dos pontos, a composição de carbonato de cálcio e magnésio associado (dolomita – figura 6.22). A dolomita gerou contraste composicional nas micrografias, sendo facilmente detectada por pontos mais claros. Também ficaram evidentes pontos escuros, estes de composição de óxido de ferro (figura 6.21).

Em meio às laminações, foi detectada a presença de alto teor de fósforo associado a cálcio e oxigênio, correspondentes ao fosfato de cálcio dos fragmentos de ossos, corroborando com a análise das lâminas petrográficas.

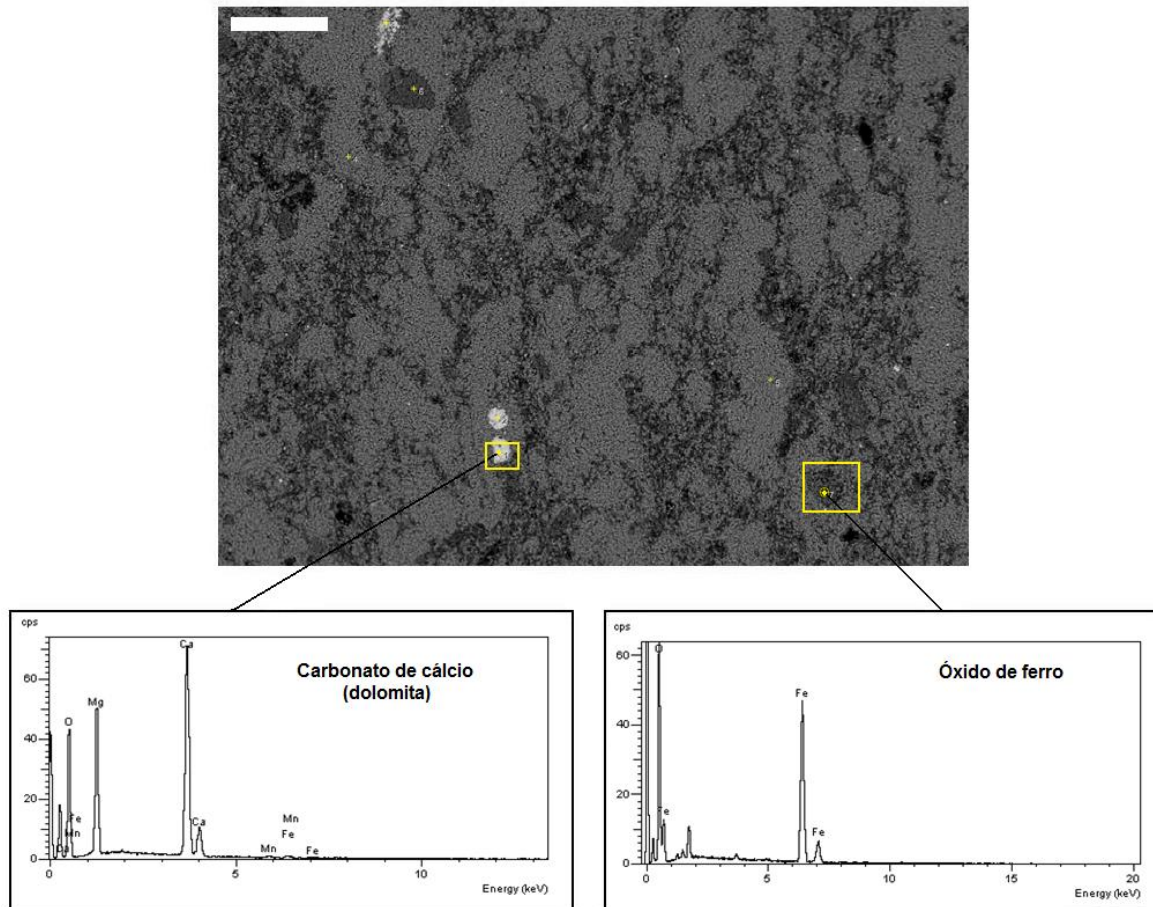


Figura 6.21 – Estromatólitos domais. Pedreira PH7, Santa Rosa do Viterbo, Subgrupo Irati. Amostra CP6/64. Micrografia eletrônica com contraste composicional da porção intermediária do estromatólito domal, evidenciando pontos de composição de dolomita e ponto de composição de óxido de ferro. Escala de 200 μm .

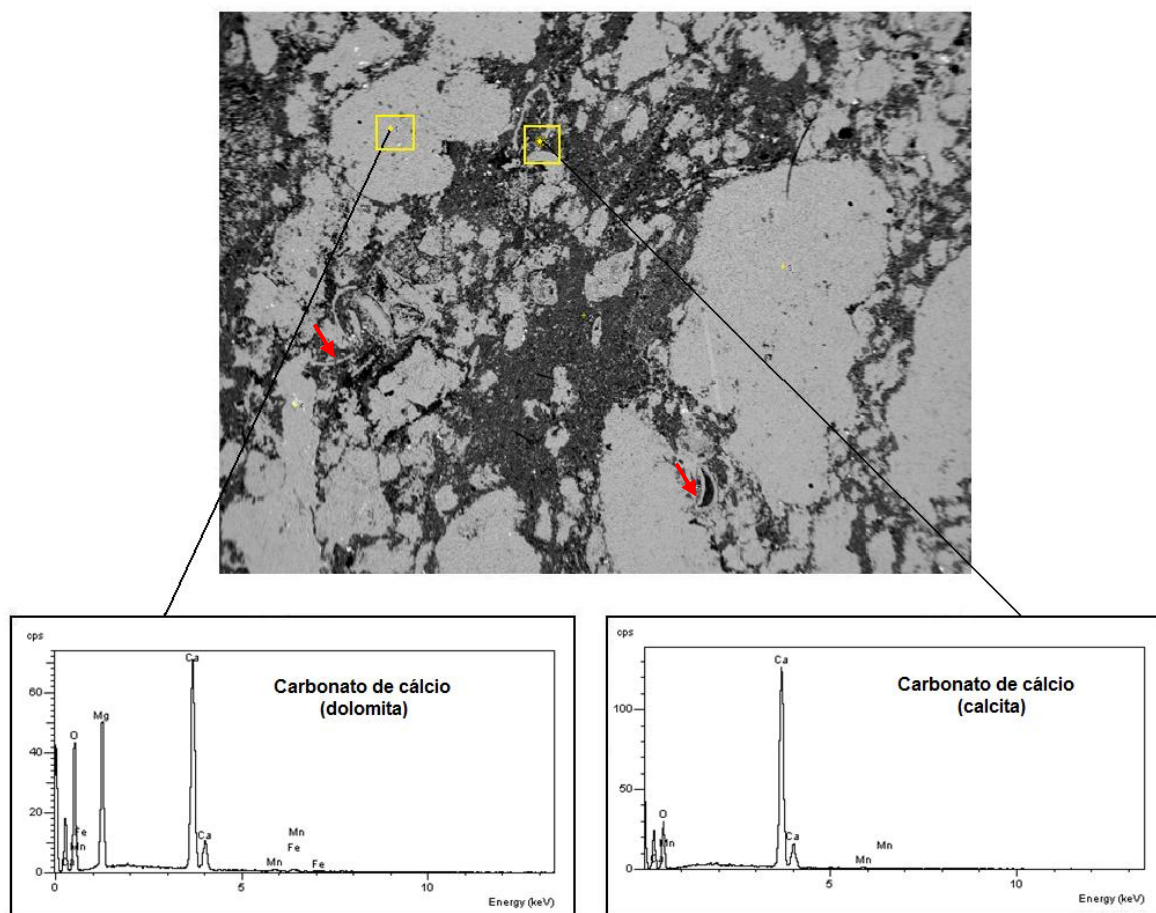


Figura 6.22 – Estromatólitos domais. Pedreira PH7, Santa Rosa do Viterbo, Subgrupo Irati. Amostra CP6/67. Micrografia eletrônica com contraste composicional da porção superior, evidenciando pontos de composição de dolomita (laminação) e ponto de composição de calcita (substituição de valva de ostracode). Valvas de ostracodes indicadas por setas vermelhas. Escala de 500 μm .

Devido ao fato das amostras estarem altamente silicificadas, não foi viável a análise por espectroscopia Raman.

6.2 Estruturas microbianas permianas – Pedreira Gobbo, Taguaí /SP

Foram coletadas amostras dos três primeiros níveis carbonáticos contendo oncóides, oóides e esteiras microbianas, como dispostos na coluna estratigráfica (Figura 6.23), de acordo com as observações de campo e as encontradas na literatura (Andreis *et al*, 2001). Acima do terceiro nível, de aproximadamente 10 metros de altura, foram observados mais níveis com estes carbonatos, porém, o acesso a eles foi impossível devido à altura e falta de segurança para a coleta de amostras (figura 6.24).

A base do afloramento compreende o topo da Formação Serra Alta, embora os três níveis carbonáticos estudados situem-se dentro da Formação Teresina. Encontram-se intercalados a siltitos de coloração arroxeadada, com gretas de contração de fácil distinção na sequência vertical do afloramento. Os oncólitos estavam bem evidentes e apresentavam coloração branca.

Os resultados estão dispostos separadamente para cada nível, detalhando para cada um deles, os estudos referentes à sua base, meio e topo.

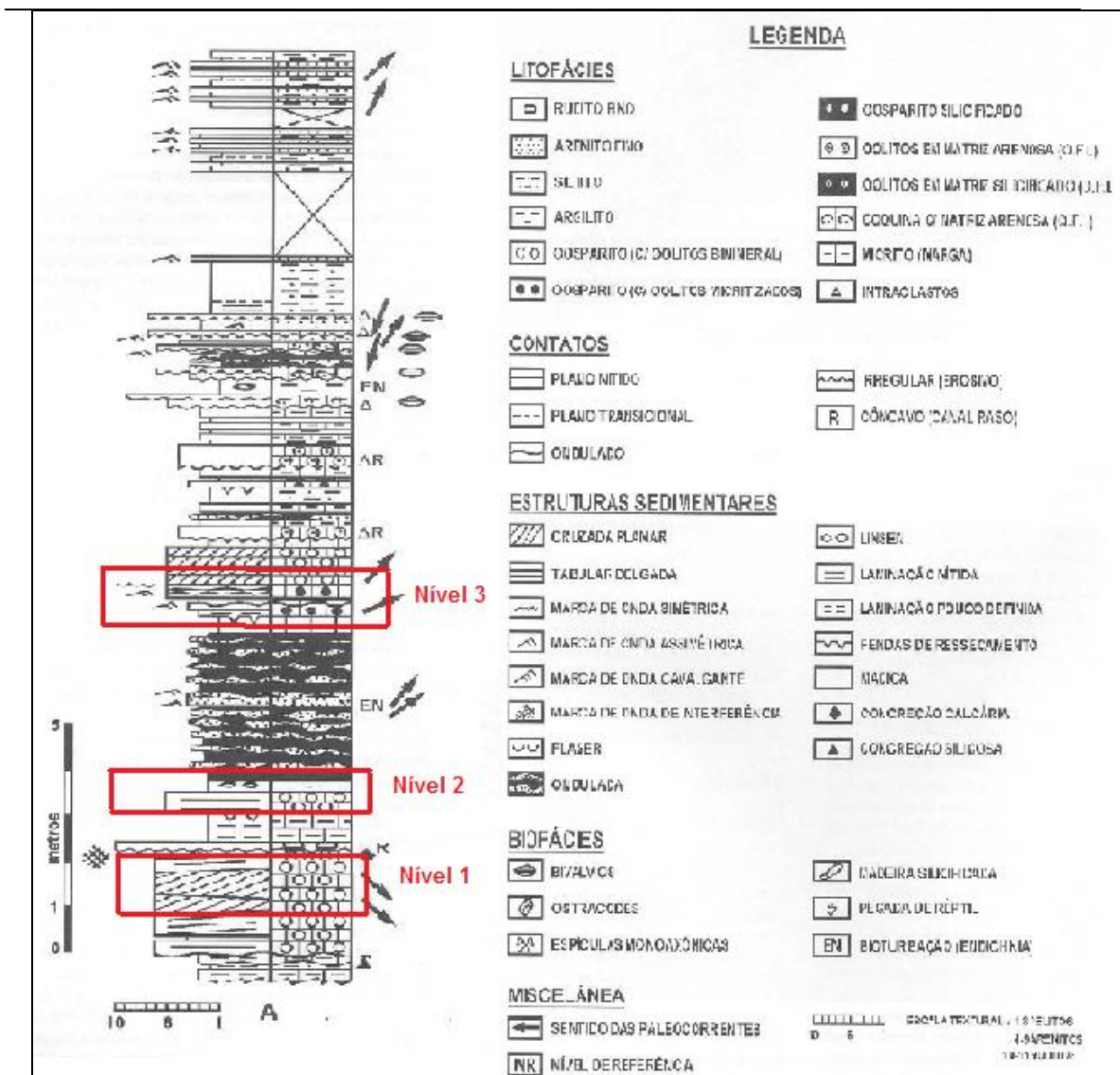


Figura 6.23 – Pedreira Gobbo, Taguaí/SP. Formações Serra Alta e Teresina. Coluna estratigráfica modificada de Andreis *at al* (2001), mostrando os três níveis carbonáticos estudados.

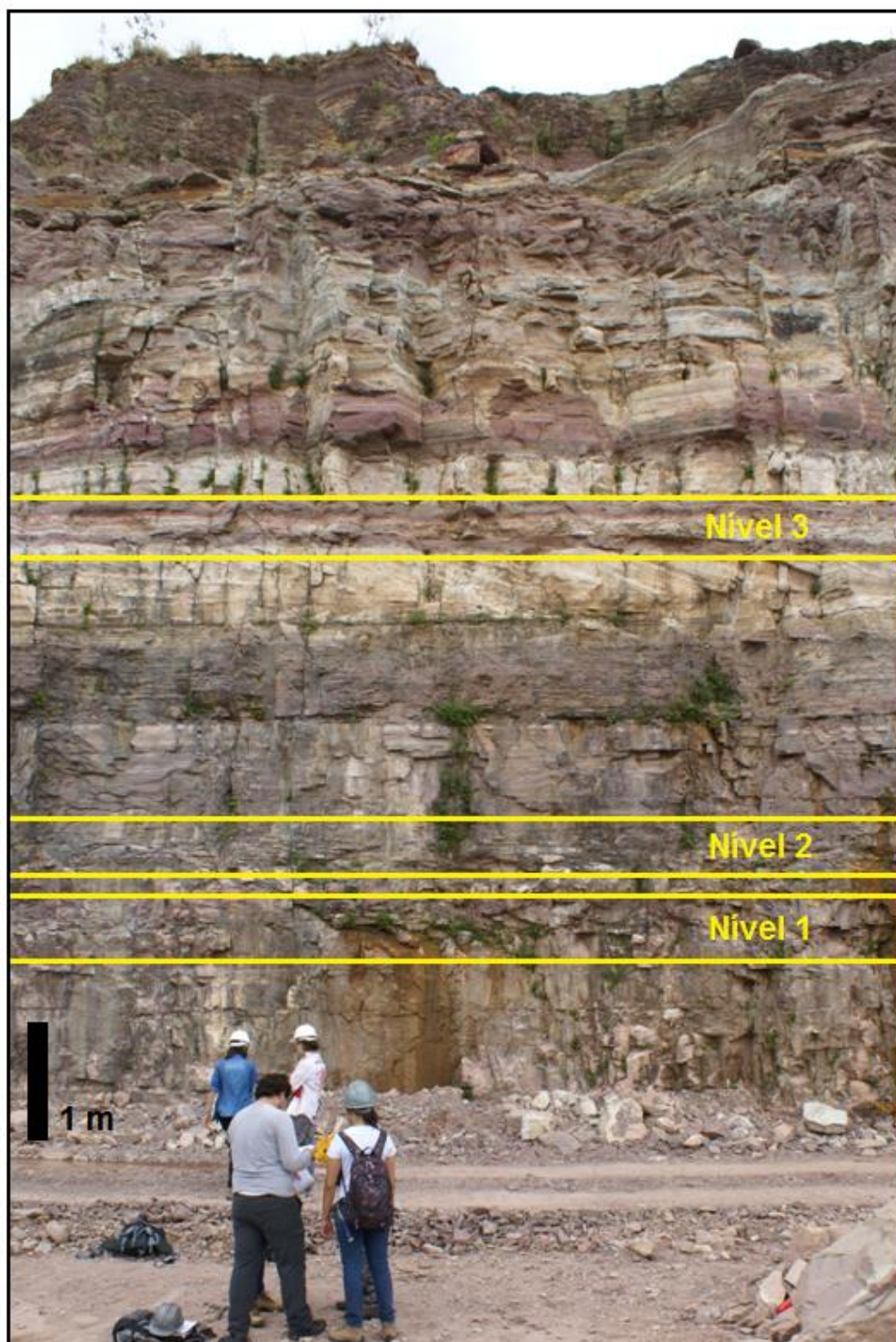


Figura 6.24: Pedreira Gobbo, Taguaí/SP. Formações Serra Alta e Teresina. Visão do afloramento, com os três níveis carbonáticos evidenciados em amarelo.

6.2.1 Nível 1

Situa-se a 2,50 m de altura a partir da base do afloramento, possuindo entre 5 a 10 cm de espessura. Encontra-se sotoposto, em contato erosivo a um arenito oolítico com concreções e laminações plano-paralelas. Em seu limite superior, com contato mais abrupto, observa-se siltito de coloração rosada com laminação do tipo *flaser*.

São evidentes associações deste nível com oncóides e oóides, estes bem evidentes e situados em meio a esteiras microbianas (figura 6.25).

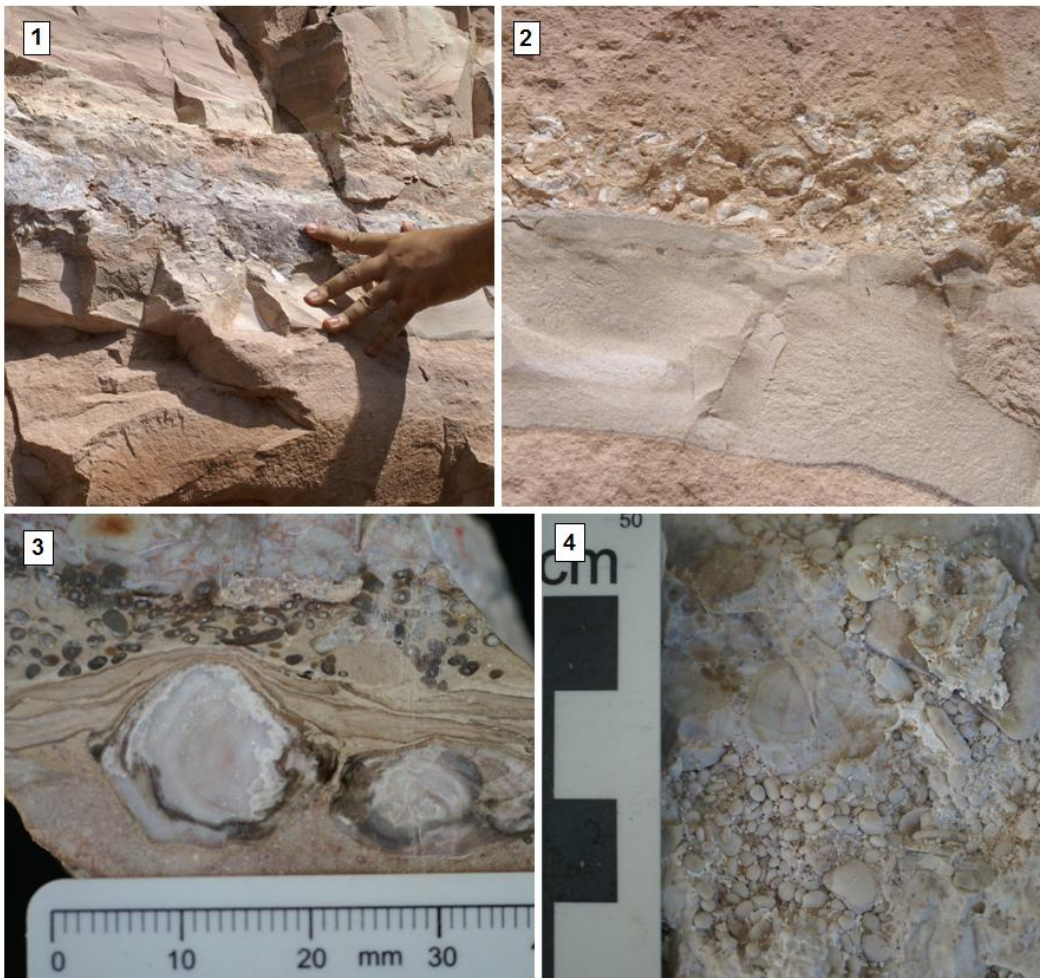


Figura 6.25: Pedreira Gobbo, Taguaí/SP. Formações Serra Alta e Teresina. 1) Nível carbonático 1 no afloramento; 2) Detalhe do Nível 1, mostrando oncóides em contato inferior com arenito oolítico; e em contato superior com siltito. Escala de 5 cm; 3) Face polida evidenciando oncóides em meio à esteira microbiana; 4) Detalhe com visão em planta de oncóides e oóides do Nível 1.

Análise macroscópica

A base das amostras tem de 2,5 a 3 cm de espessura, com aparentes laminações de esteira microbiana, com aporte de oncóides de formato elíptico, estes de 1 a 2 cm de diâmetro, aproximadamente. O meio, de mais ou menos 3,50 cm de espessura, contém maior concentração de oóides muito pequenos (menores que 0,5 mm de diâmetro) cimentados, com raros oncóides iguais aos da base. O topo, com aproximadamente 2 cm, tem domínio de oncóides de coloração branca, com diâmetro variando de 0,5 a 1 cm, estes mantendo o formato elíptico, e em meio a matriz de coloração rosa claro (figura 6.26).

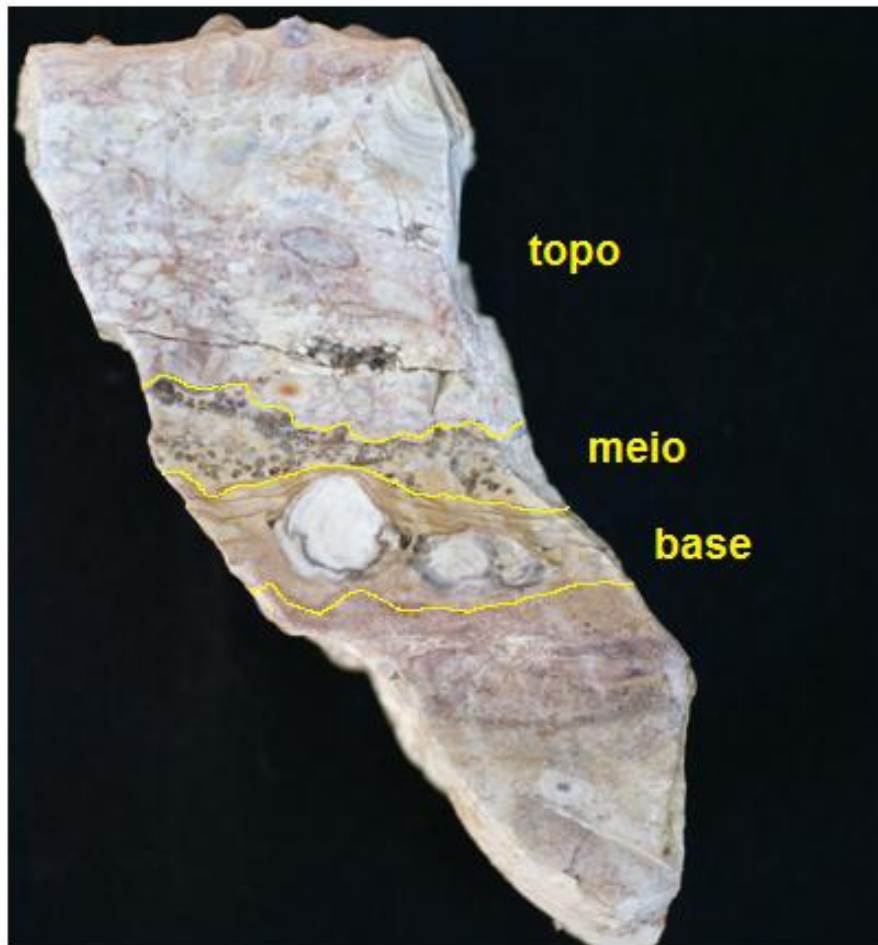


Figura 6.26: Nível 1. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP. Formações Serra Alta e Teresina. Seção polida da amostra CP6/48, com divisão de base, meio e topo, cada qual com suas características macroscópicas. Escala de 5 cm.

Análise microscópica

A porção basal é composta principalmente por matriz micrítica, valvas de ostracodes, escassos oóides e abundantes oncóides de laminação concêntrica, na sua maioria de formato alongado. Consiste de um *wackstone*, pois possui domínio de matriz e oncóides, sendo uma construção carbonática relacionada a organismos (figura 6.27 – 5 e 6).

A porção intermediária possui oóides unidos por cimento micrítico, valvas de ostracodes, oncóides e pelóides (estes de ocorrência rara). Há evidências de dissolução dos grãos revestidos, formando porosidade móldica. Alguns espaços de dissolução foram preenchidos por micrita. Consiste de um *packstone*, pois é clasto suportado, com domínio de clastos e ausência de matriz (figura 6.27 – 3 e 4).

A porção superior é mais espessa, contém maior abundância em matriz micrítica, intraclastos e pelóides, consistindo de um *wackstone*. Também há evidência de dissolução dos grãos, gerando porosidade. São visíveis valvas de ostracodes desarticuladas e compactadas devido à pressão do pacote (figura 6.27 – 1 e 2).

A contagem modal das lâminas foi realizada com triagem de espaços de 1 x 2,5 cm. Com os resultados, foi possível classificar os carbonatos de cada porção segundo a classificação de Embry & Klovan (1971). A classificação consta na tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Resultado da contagem modal para as lâminas do nível 1, com estimativas das porcentagens dos componentes dos carbonatos.

| NÍVEL 1 | matriz | intraclastos | pelóides | bioclastos | oncóides | oóides | classificação |
|----------------|---------------|---------------------|-----------------|-------------------|-----------------|---------------|----------------------|
| topo | 70% | 5% | 2% | 3% | 15% | 5% | <i>wackstone</i> |
| meio | 0 | 0% | 2% | 6% | 12% | 80% | <i>packstone</i> |
| base | 65% | 0% | 0% | 5% | 25% | 5% | <i>wackstone</i> |

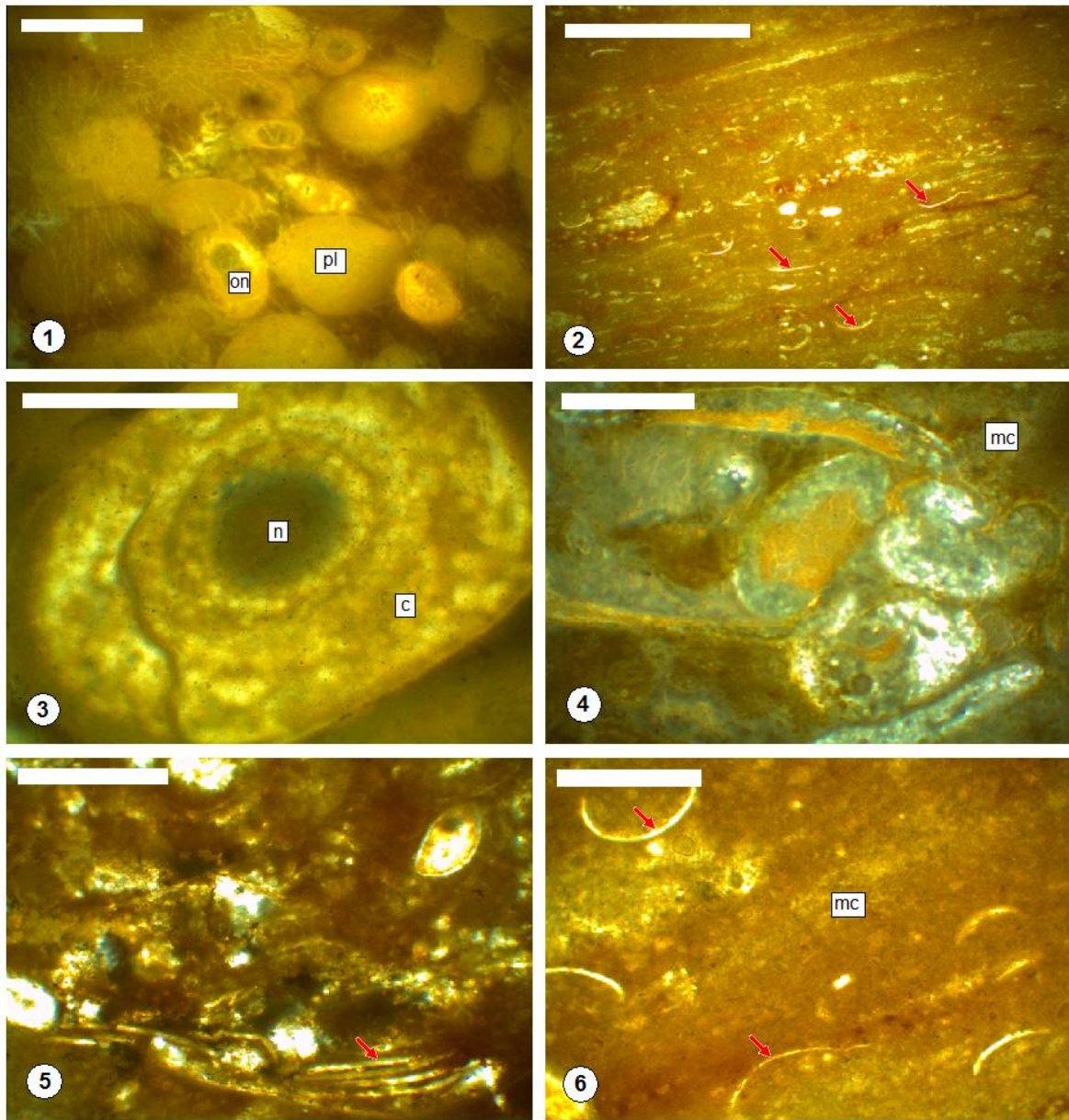


Figura 6.27: Nível 1. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP. Formações Serra Alta e Teresina 1) Topo de amostra CP6/46, com dominância de matriz micrítica, oncóides (on) e pelóides (pl). Escala de 1mm; 2) CP6/45, topo com setas vermelhas indicando valvas de ostracodes desarticuladas e compactadas. Escala de 1mm; 3) CP6/46, porção intermediária, evidenciando oncóide com núcleo (n) arredondado e córtex (c) bem delimitado e com várias laminações concêntricas. Escala de 1mm; 4) CP6/45, porção intermediária; grãos revestidos, parcialmente dissolvidos, com espaços preenchidos por micrita. Escala de 1mm; 5) CP6/46, porção basal com seta vermelha indicando valvas de ostracodes desarticuladas em meio à matriz micrítica. Escala de 1mm; 6) CP6/55, porção basal; setas vermelhas indicando valvas de ostracodes; domínio de matriz micrítica (mc). Escala de 1mm.

Análise por EDS

Os pontos analisados nas lâminas provenientes do Nível 1 resultaram em diferentes composições elementares e, de acordo com cálculos de proporção de cada elemento registrado, os minerais resultantes foram: dióxido de silício, carbonato de cálcio, óxido de ferro, sulfato de bário e dióxido de titânio.

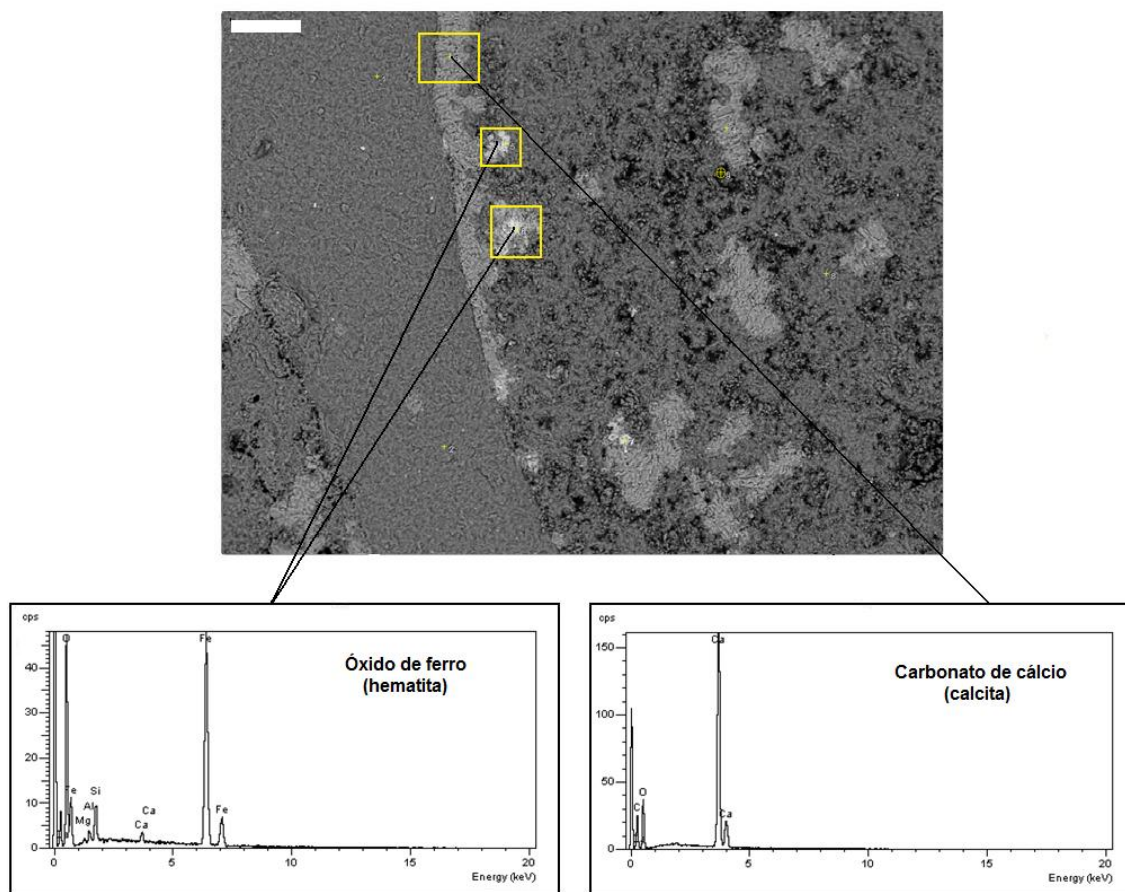


Figura 6.28: Nível 1. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP. Formações Serra Alta e Teresina Amostra CP6/46; Micrografia eletrônica com contraste composicional da porção basal. Espectros de hematita e calcita, correspondentes a pontos em córtex de oncóide. Escala de 500 μ m.

Para oncóides, observou-se que o córtex era composto de carbonato de cálcio (calcita – figura 6.28), com sílica em alguns raros pontos. O núcleo era formado basicamente de grãos de quartzo. Na matriz das amostras foi revelada a presença de sílica e carbonato de cálcio (calcita). Alguns pontos de óxido de ferro (hematita) e sulfato de bário (barita) foram encontrados nas bordas dos oncóides e na matriz (figura 6.29).

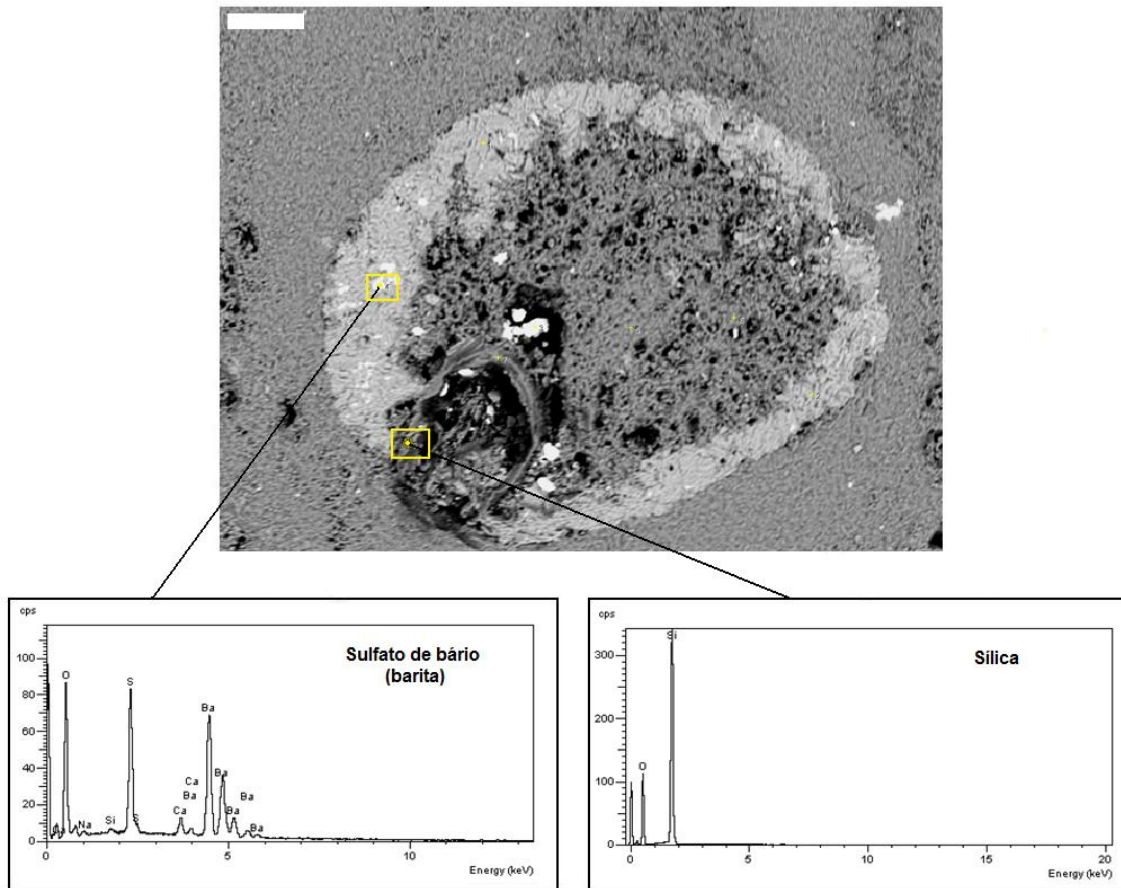


Figura 6.29: Nível 1. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP. Formações Serra Alta e Teresina Amostra CP6/55; Micrografia eletrônica com contraste composicional da porção intermediária. Espectros de barita, correspondente a ponto em córtex de oncóide; sílica, correspondente a valva de ostracode substituída, sobreposta ao oncóide. Escala de 500 μm .

Os pelóides da porção superior do Nível 1 são basicamente compostos de carbonato de cálcio (calcita), provavelmente resultante de substituição. Pontos de composição mineral como dióxido de titânio (rutilo), foram encontrados aleatoriamente em meio à matriz, como clastos (figura 6.30).

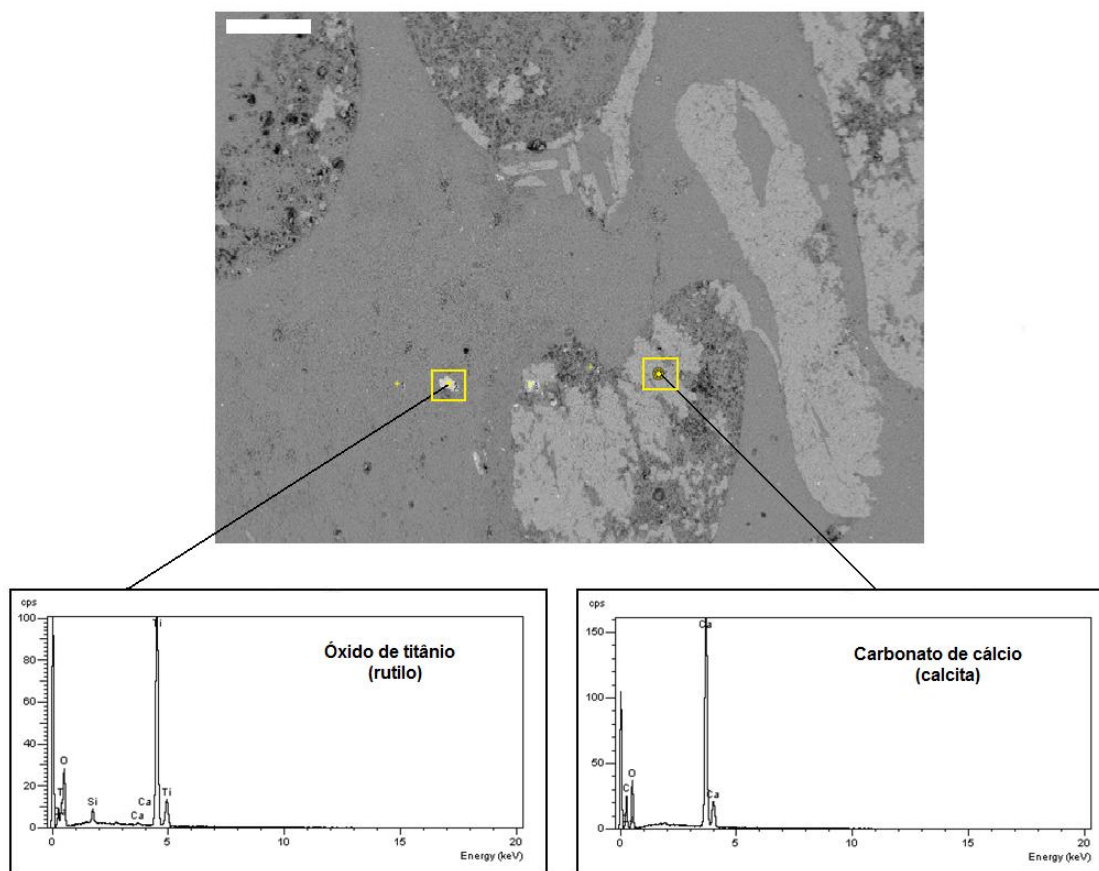


Figura 6.30: Nível 1. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP. Formações Serra Alta e Teresina Amostra CP6/45; Micrografia eletrônica com contraste composicional do topo. Espectros de óxido de titânio em meio à matriz; calcita, correspondente a pelóide. Escala de 500 μ m.

Espectroscopia Raman

A análise por espectroscopia Raman revelou a composição calcítica para o córtex dos oncóides, bem como outros de composição dolomítica, por apresentar a banda em 1086 cm^{-1} , característica do mineral (figuras 6.31 e 6.32). Este resultado corroborou com o obtido pelas análises por EDS, porém, apenas para a composição de calcita. Também detectou a presença de óxido de titânio (possivelmente rutilo).

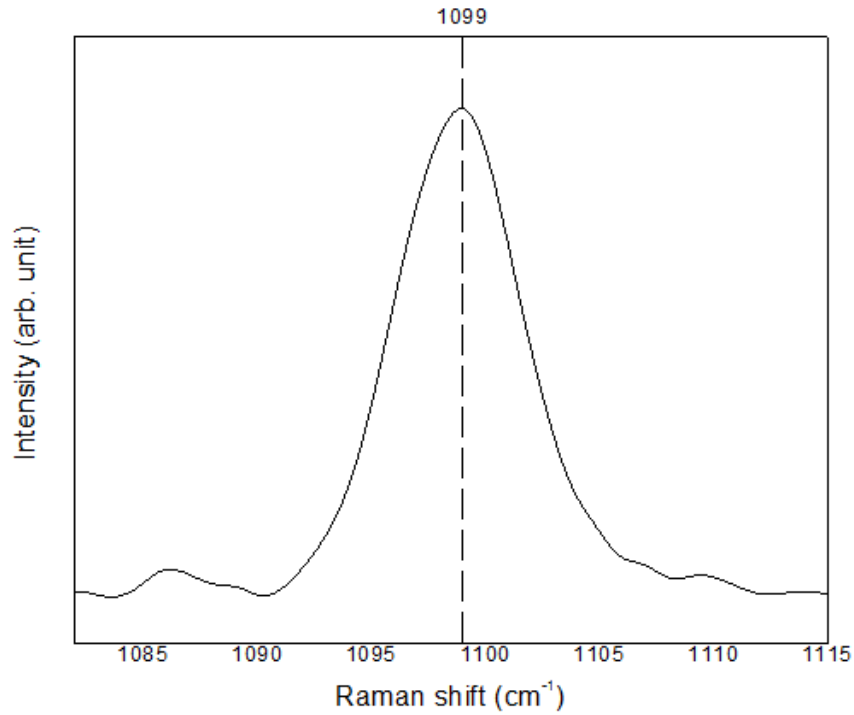


Figura 6.31: Nível 1. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP. Formações Serra Alta e Teresina Amostra CP6/46; Espectro Raman com banda característica de dolomita, adquirido com tiro em região de córtex de oncóide.

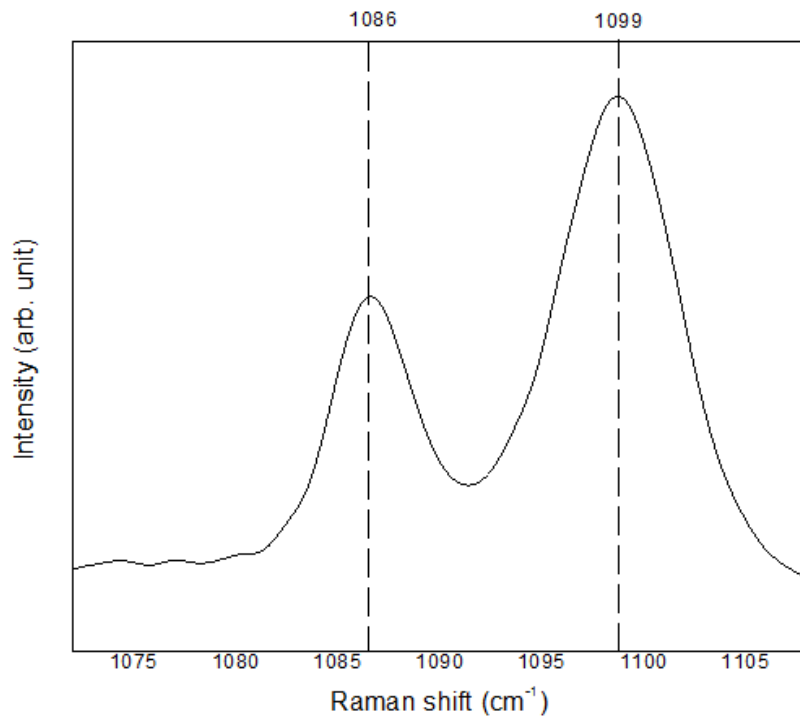


Figura 6.32: Nível 1. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP. Formações Serra Alta e Teresina Amostra CP6/45; Espectro Raman com bandas características de calcita (1086 cm⁻¹) e de dolomita (1099 cm⁻¹), adquiridos em região entre córtex e núcleo de oncóide.

A presença de barita, resultado obtido com o EDS e esperado pela espectroscopia Raman, não foi detectada por esta técnica devido às análises terem sido prejudicadas pela alta fluorescência gerada pelas amostras. Bandas menores relacionadas a alguma frequência vibracional de moléculas destes minerais foram detectadas, porém, as bandas mais intensas e características dos mesmos não foram observadas.

A hematita, resultado anteriormente obtido com as análises por EDS, foi confirmada com a detecção de bandas nas frequências 295, 411 e 611 cm^{-1} (figura 6.33), em áreas próximas ao córtex de um oncóide.

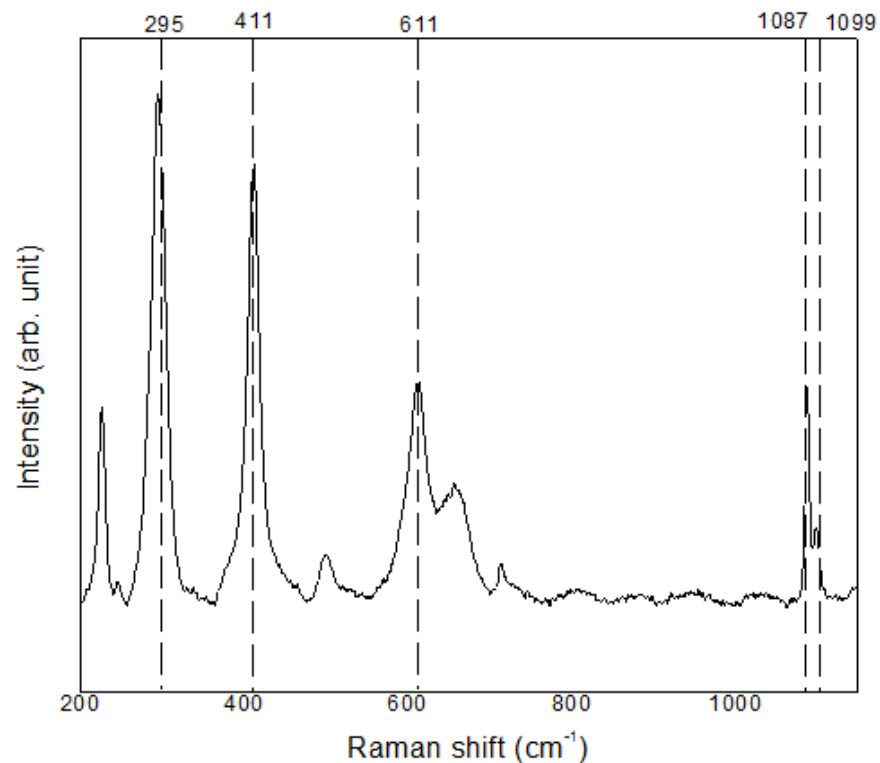


Figura 6.33: Nível 1. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP. Formações Serra Alta e Teresina Amostra CP6/46; Espectro Raman com bandas em 225, 295 e 411 cm^{-1} , característicos de óxido de ferro (hematita); banda em 1087 característica de calcita e banda em 1099, característica de dolomita; adquiridos em região de córtex de oncóide.

Para estas amostras, foi realizado um mapeamento utilizando-se o espectrômetro Raman, de áreas contendo calcita e áreas contendo dolomita, visto que estes minerais tiveram alta frequência de bandas durante a aquisição dos dados.

Procurou-se selecionar áreas das amostras que contivessem estruturas de interesse, como os oncóides. Foi possível, portanto, delimitar mineral e visualmente estas estruturas. (figuras 6.34, 6.35 e 6.36).

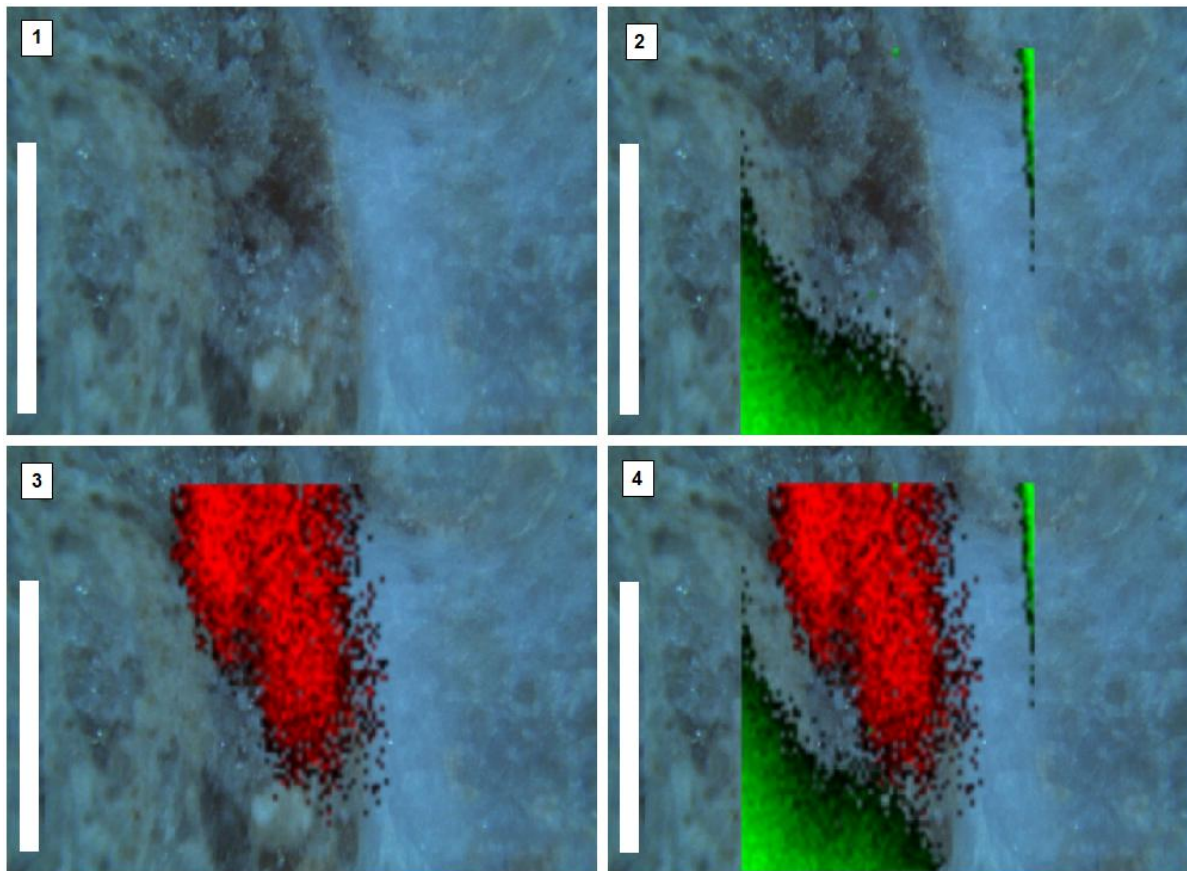


Figura 6.34: Nível 1. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP. Formações Serra Alta e Teresina Amostra CP6/46; Mapeamento de área de oncóide, evidenciando pontos de alta intensidade de calcita (área em vermelho) e dolomita (área em verde). 1) área sem mapeamento; 2) área com dolomita mapeada; região de matriz; 3) área com calcita mapeada; região de córtex de oncóide e 4) confronto de mapeamento de calcita e dolomita. Escalas de 200 μm .

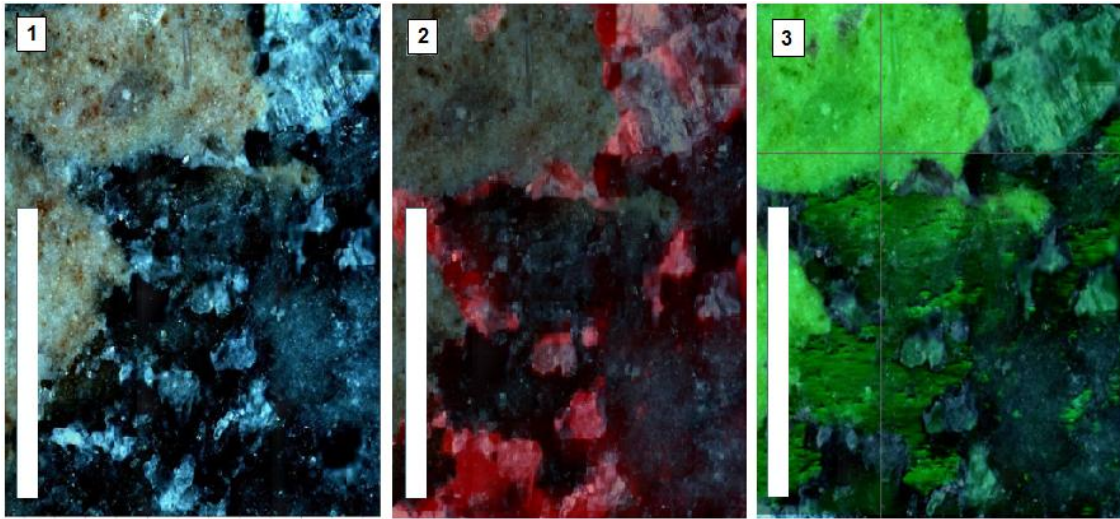


Figura 6.35: Nível 1. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP. Formações Serra Alta e Teresina Amostra CP6/46; porção intermediária do nível 1. 1) área sem mapeamento; 2) mapeamento de calcita (vermelho); 3) mapeamento de dolomita (verde). Região de matriz. Escalas de 200 μm .

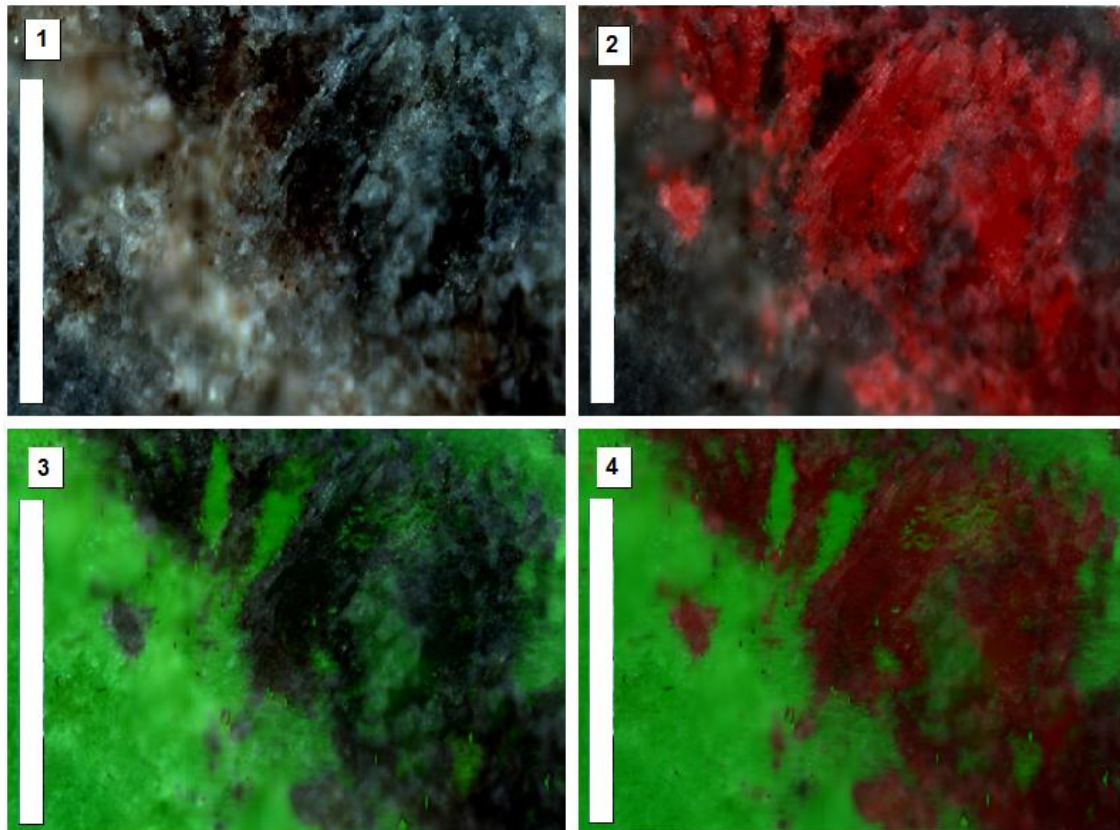


Figura 6.36: Nível 1. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP. Formações Serra Alta e Teresina Amostra CP6/46; porção superior (topo) de amostra do nível 1, área de matriz entre oncóides. 1) área sem mapeamento; 2) mapeamento de calcita (vermelho); 3) mapeamento de dolomita (verde); 4) confronto de mapeamento de calcita e dolomita. Escalas de 200 μm .

6.2.2 Nível 2

Localizado a 4,40 metros de altura a partir da base do afloramento, apresenta aproximadamente 25 cm de espessura, estando sotoposto a argilito rosado, com contato irregular (erosivo). Acima deste nível, também com contato erosivo, situa-se um siltito de coloração arroxeadada, com evidentes laminações plano-paralelas (figura 6.37).

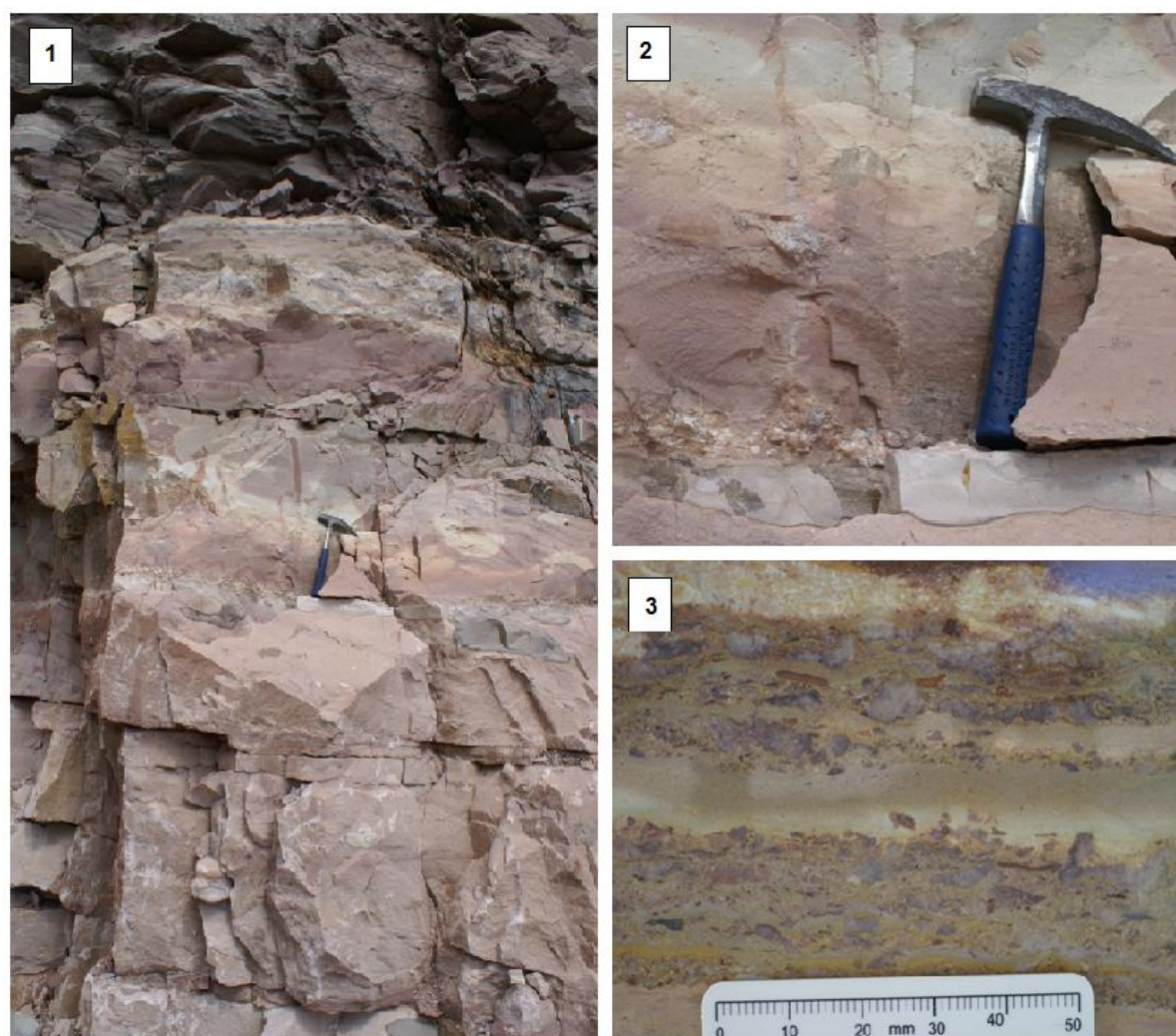


Figura 6.37: Nível 2, Pedreira Gobbo, Taguaí/SP. Formações Serra Alta e Teresina; 1) Vista geral no afloramento; 2) Detalhe do Nível 2, mostrando oncóides em contato inferior erosivo com argilito; e em contato superior erosivo com siltito; 3) Face polida evidenciando oncóides e intraclastos.

Análise macroscópica

A porção basal apresenta de 5 a 6 cm de espessura, com matriz de coloração rósea, com alguns intraclastos evidentes. A porção intermediária tem aproximadamente 5 cm de espessura, contendo matriz de coloração mais escura que a da base, maior quantidade de intraclastos (estes de coloração mais clara), valvas de ostracodes e oóides de 0,2 a 0,5 mm de diâmetro, estes dispostos em laminações. O topo, de aproximadamente 2,5 cm de espessura, contém muita matriz de coloração escura, com poucos intraclastos (figura 6.38).

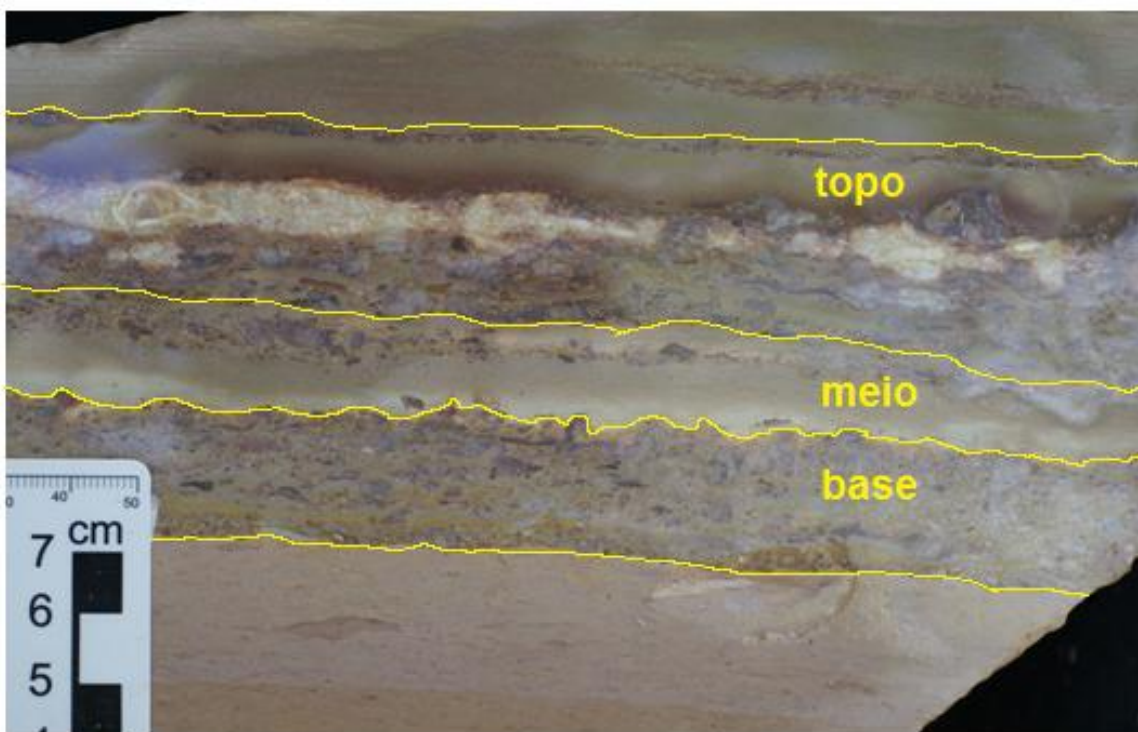


Figura 6.38: Nível 2. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP, Formação Teresina. Amostra CP6/52, com divisão de base, meio e topo, cada qual com suas características macroscópicas.

Análise microscópica

A porção inferior é caracterizada por intraclastos (figura 6.39-5), valvas de ostracodes (desarticuladas ou não), oóides de formato elíptico a arredondado, envolvidos por matriz de coloração escura (acinzentada). Os constituintes aloquímicos compreendem mais de 10% dos

componentes da lâmina, sendo esta matriz suportada. Consiste, portanto, de um *wackstone* (figura 6.39-5 e 6).

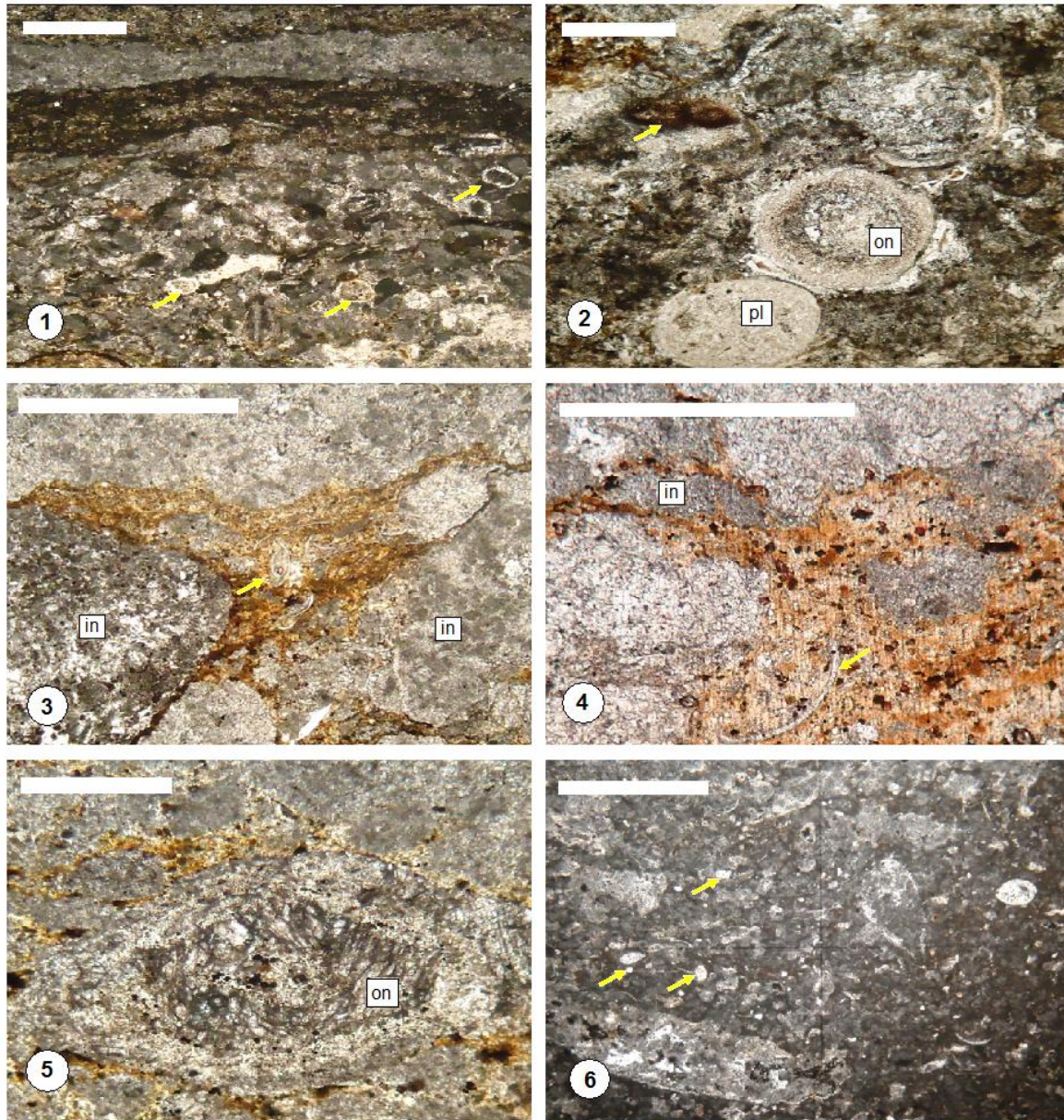


Figura 6.39: Nível 2. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP, Formação Teresina. Amostra CP6/52; 1) Porção superior, com seta amarela apontando para valvas de ostracodes preenchidas; pontos escuros consistem de matéria orgânica oxidada; 2) Porção superior, com seta amarela indicando matéria orgânica oxidada; pelóide (pl) e oncóide (on); 3) Porção intermediária com abundância de intraclastos (in) em meio a lama carbonática; seta amarela indicando concentração de valvas de ostracodes; 4) Porção intermediária com intraclastos (in) em meio a lama carbonática e argila; pontos escuros de óxido de ferro; seta amarela apontando para valva de ostracode; 5) Porção basal; oncólito (on) em meio a matriz argilosa e intraclastos; 6) Porção basal; setas amarelas indicando oóides. Escalas de 1mm.

Na porção intermediária é observada uma menor abundância de aloquímicos, sendo estas valvas de ostracodes e oóides. Contém muitos intraclastos e apresenta fábrica grão-suportada, porém, há grande teor de lama carbonática, sendo classificada, portanto, como um *packstone* (figura 6.39-3 e 4).

No topo foi observada predominância de argilas e de aloquímicos (oóides, oncóides e valvas de ostracode). Contém matéria orgânica oxidada e foi classificada como um *wackstone* (figura 6.39-1 e 2).

A classificação dos carbonatos foi baseada na contagem modal expressada na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Resultado da contagem modal para as lâminas do nível 2, com estimativas das porcentagens dos componentes dos carbonatos.

| NÍVEL 2 | matriz | intraclastos | pelóides | bioclastos | oncóides | oóides | classificação |
|----------------|---------------|---------------------|-----------------|-------------------|-----------------|---------------|----------------------|
| topo | 70% | 18% | 0 | 5% | 2% | 5% | <i>wackstone</i> |
| meio | 26% | 60% | 0 | 2% | 0 | 2% | <i>packstone</i> |
| base | 70% | 20% | 0 | 5% | 0 | 5% | <i>wackstone</i> |

Ao contrário do que foi observado no Nível 1, não foram encontrados pelóides. A porcentagem de intraclastos no Nível 2 superou a do Nível 1 consideravelmente, porém, quase não foi registrada a presença de oóides.

Análise por EDS

Para os pontos analisados nas lâminas provenientes do Nível 2, os minerais resultantes dos cálculos com as proporções foram: dióxido de silício (sílica), carbonato de cálcio (calcita), carbonato de cálcio com alta taxa de magnésio (dolomita), alumino-silicato (argilomineral) e óxido de ferro (hematita).

As composições dos grãos carbonáticos como os oncóides, bem como a composição da matriz, foram iguais às do Nível 1: o córtex constituído de calcita, núcleo de dióxido de silício, o

que sugere que se constituía de um grão de quartzo; e matriz dolomítica em alguns pontos e argilosa em outros.

A barita ocorreu em áreas da matriz, próximas ao córtex de oncóide (figura 6.40), sugerindo relação com a estrutura, assim como evidenciado no nível 1. Pontos de óxido de ferro (hematita), foram encontrados em meio à matriz e nos intraclastos.

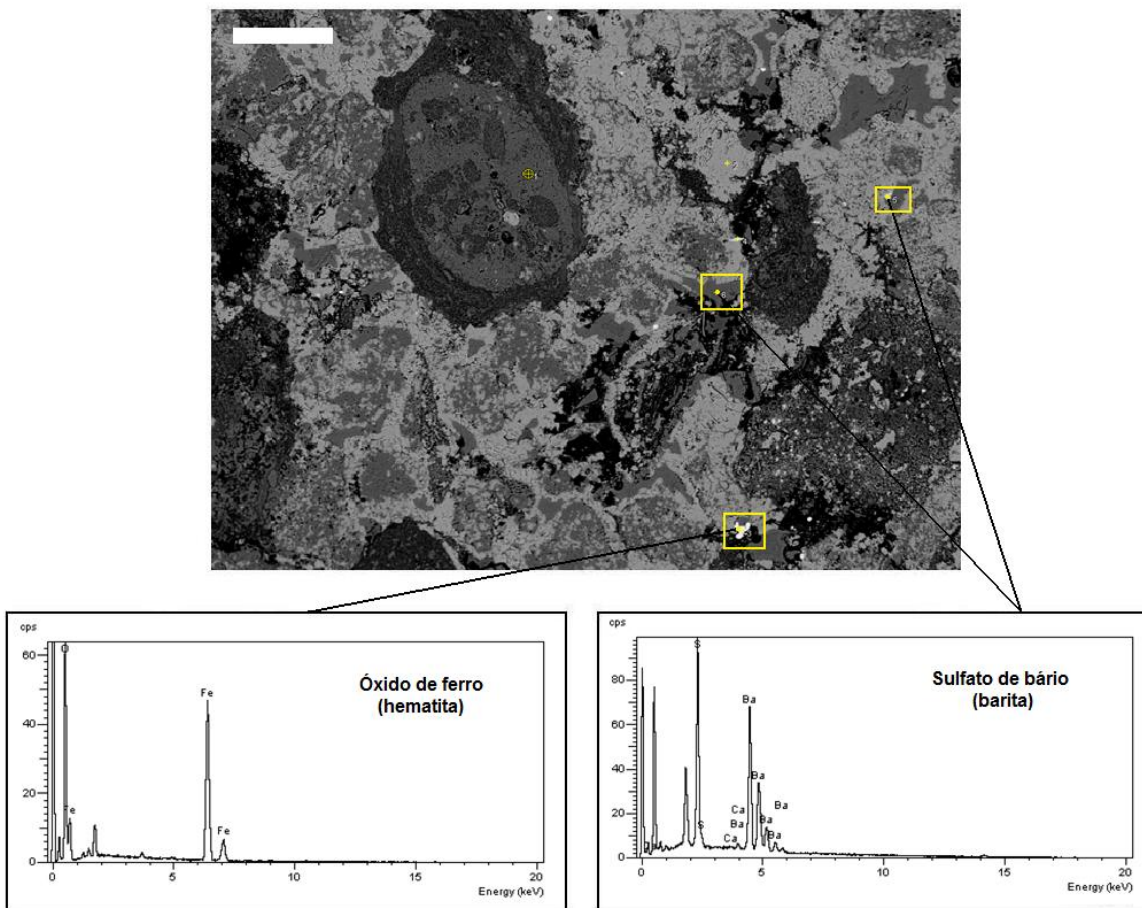


Figura 6.40: Nível 2. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP, Formação Teresina. Amostra CP6/52; Micrografia eletrônica com contraste composicional da porção superior. Espectro de óxido de ferro (hematita) em meio à matriz; espectro de sulfato de bário (barita), em meio a matriz, próxima a área do córtex do oncóide. Escala de 500µm.

A matriz, para o Nível 2, apresentou maior quantidade de pontos nos quais foi detectada a presença de argila (figura 6.41), enquanto que, para o Nível 1, esta apresentava predominância de carbonato de cálcio, sendo em algumas áreas calcita, e em outras dolomita. As valvas de ostracodes encontradas apresentaram composição de calcita, provavelmente originada de processo de substituição do mineral original.

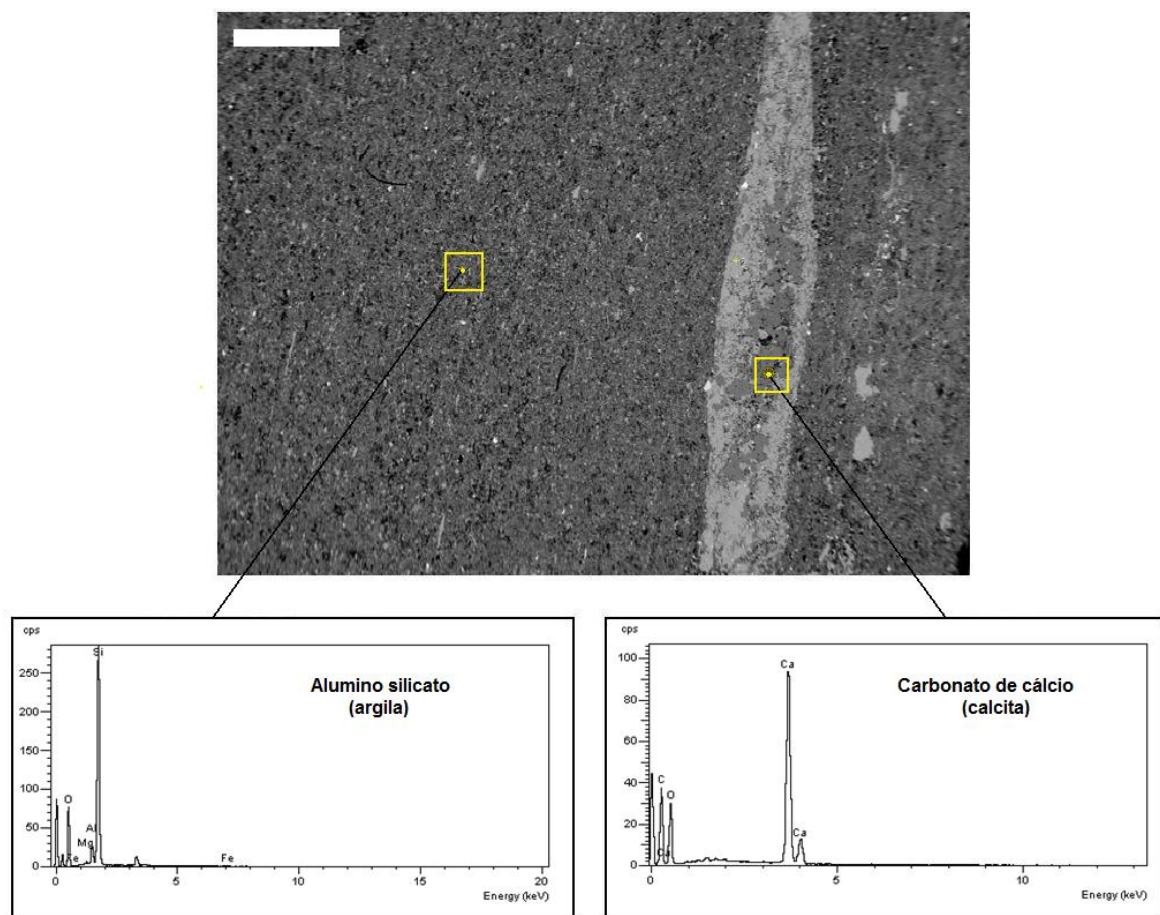


Figura 6.41: Nível 2. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP, Formação Teresina. Amostra CP6/52; Micrografia eletrônica com contraste composicional de lâmina de porção intermediária. Espectro de alumino-silicato (argila) correspondente à matriz; espectro de carbonato de cálcio (calcita), em área de córtex de oncóide. Escala de 500 μ m.

Espectroscopia Raman

Os resultados obtidos com a espectroscopia Raman para o Nível 2 foram semelhantes aos apresentados para o Nível 1 quanto às composições minerais de matriz (calcita e dolomita) e núcleo de oncóide (quartzo). Quanto a região de córtex, não foi detectada a presença de dolomita, o que diferenciou dos resultados do Nível 1. Os mapeamentos realizados nestas amostras evidenciaram bem as regiões de oncóides (figura 6.42), bem como mostraram áreas com concentração de matéria orgânica em meio a matriz de calcita (figura 6.43).

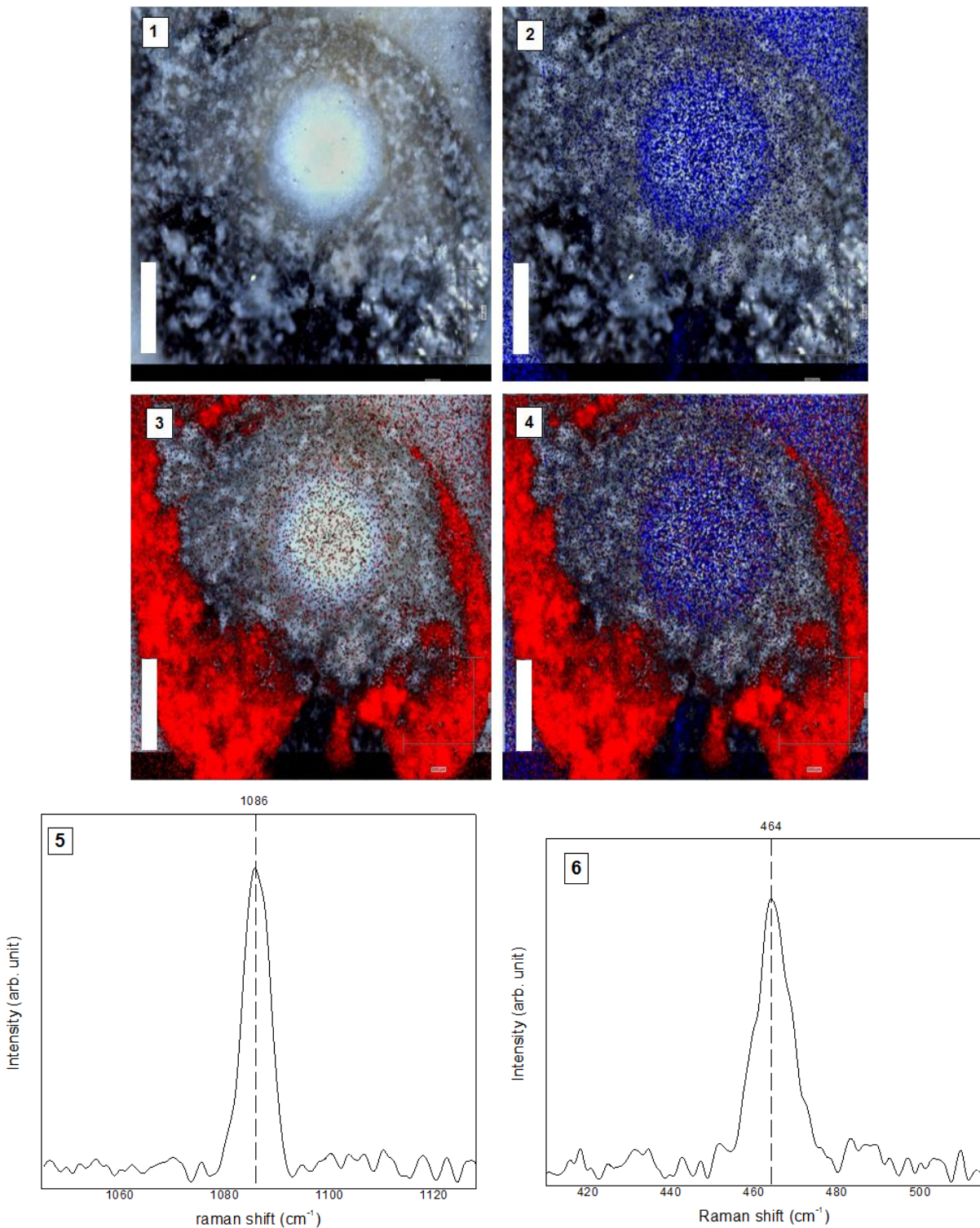


Figura 6.42: Nível 2. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP, Formação Teresina. Amostra CP6/52; Mapeamento de área de oncóide; 1) área sem mapeamento; 2) mapeamento de quartzo em região de núcleo (azul); 3) mapeamento de calcita abrangendo região do córtex (vermelho); 4) confronto de mapeamento de quartzo e calcita; 5) espectro de calcita – banda em 1086 cm^{-1} ; 6) espectro de quartzo – banda em 464 cm^{-1} . Escalas de $200\text{ }\mu\text{m}$.

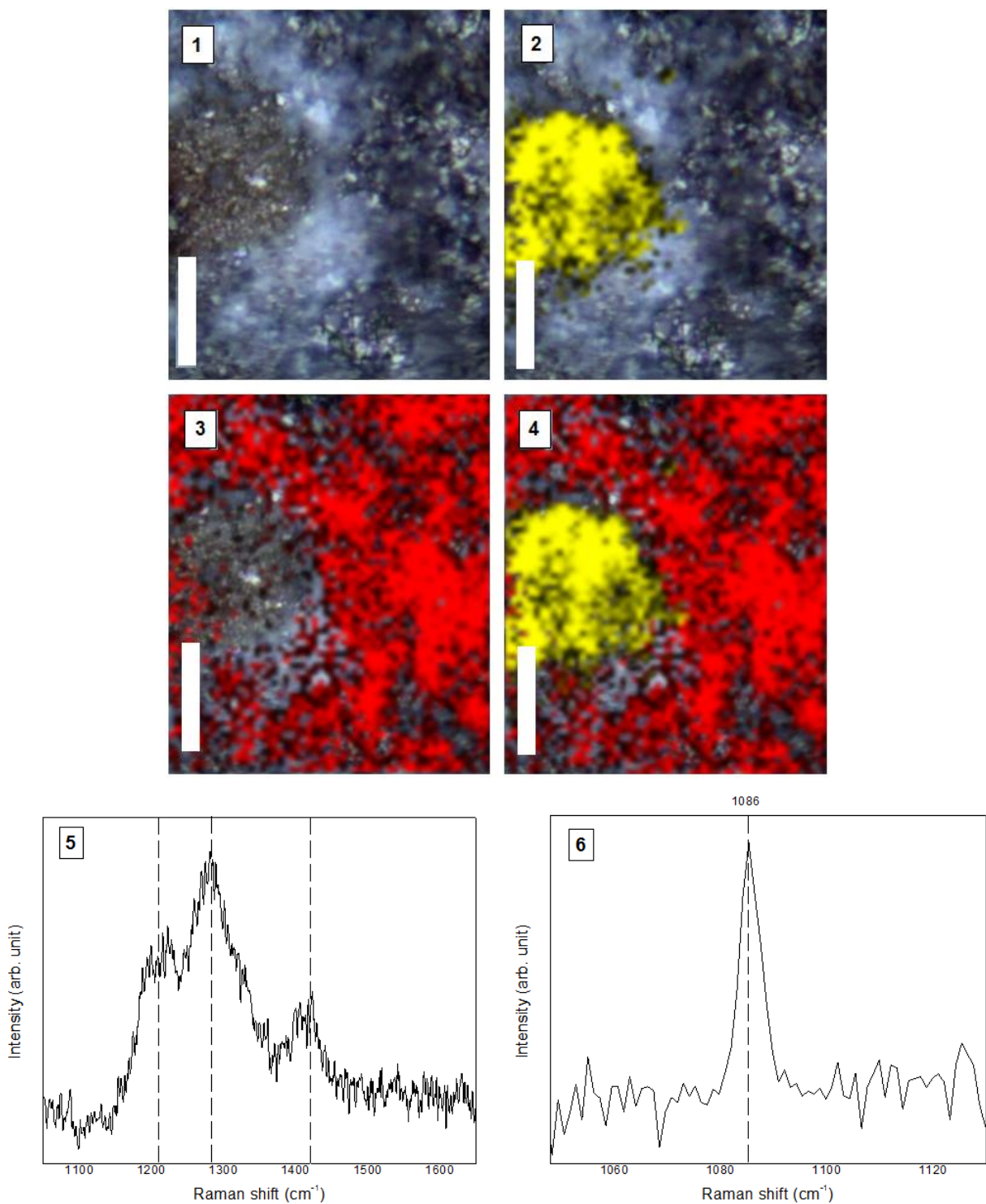


Figura 6.43: Nível 2. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP, Formação Teresina. Amostra CP6/52; Mapeamento de área contendo matéria orgânica em meio à matriz calcítica. 1) área sem mapeamento; 2) mapeamento de matéria orgânica (amarelo); 3) mapeamento de calcita (vermelho); 4) confronto de mapeamento de matéria orgânica e calcita; 5) espectro indicando a presença de matéria orgânica (bandas entre 1200 a 1400 cm^{-1}); 6) espectro indicando a presença de calcita (banda em 1086 cm^{-1}). Escalas de 200 μm .

6.2.3 Nível 3

Situado a 8 metros de altura da base do afloramento, possui aproximadamente 25 cm de espessura, situa-se acima de oosparito com evidentes estratificações cruzadas, com o qual está em contato abrupto. Acima do nível, também em contato abrupto, ocorre siltito laminado plano-paralelamente (figura 6.44).

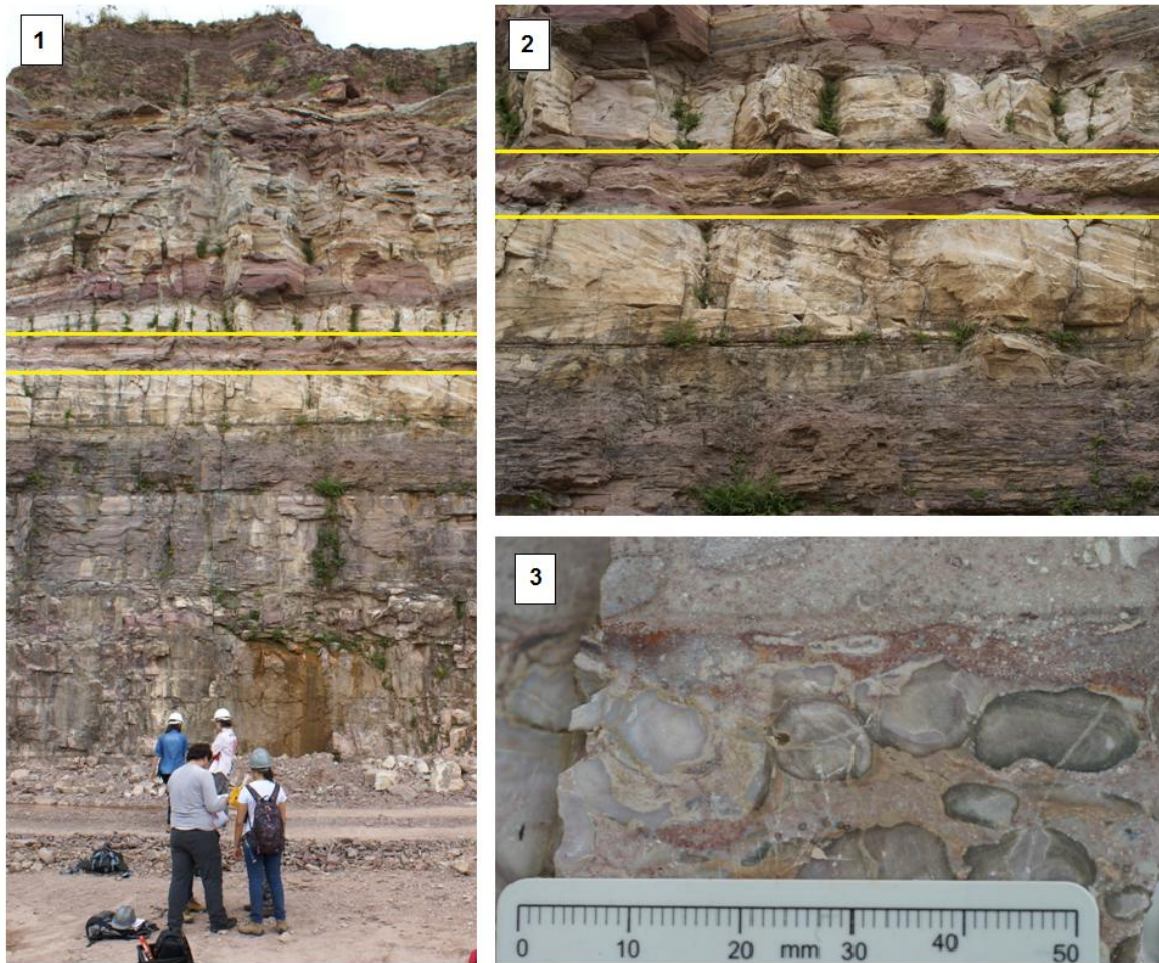


Figura 6.44: Nível 3. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP, Formação Teresina 1) Visão geral do afloramento; 2) Detalhe do Nível 3, mostrando limites em contato inferior com oosparito com estratificações cruzadas; e em contato superior com siltito; 3) Fácies polida evidenciando oncóides e oóides.

Análise macroscópica

A porção basal exibe em torno de 4 cm de espessura. É composta por oóides e oncóides, estes com formatos elípticos a arredondados. (figura 6.45).

A porção intermediária, de espessura de aproximadamente 4 cm, apresenta menor quantidade de oóides, estes de coloração escura e núcleo mais claro. Os oncóides desta porção têm o núcleo esbranquiçado e córtex gradualmente escurecido em relação ao núcleo, de modo que quanto mais afastado do núcleo, mais escura se apresenta a laminação.

A porção superior apresenta espessura de 7,5 cm, possui oóides arredondados e alguns oncóides esbranquiçados, estes com 0,5 a 2 cm de diâmetro.

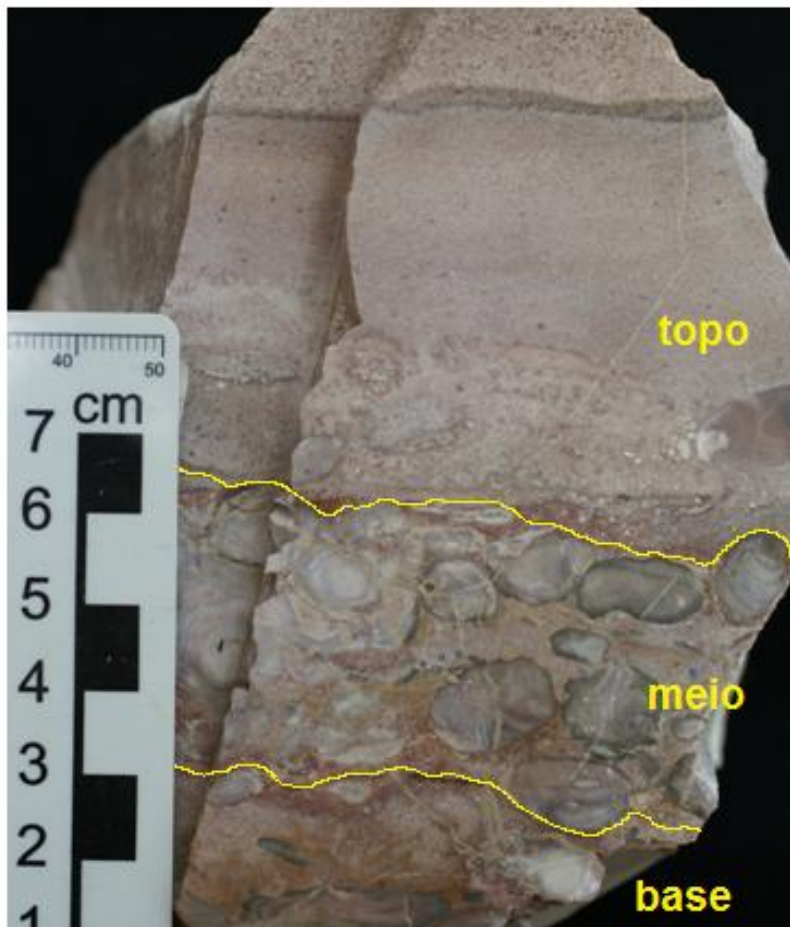


Figura 6.45: Nível 3. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP, Formação Teresina. Seção polida da amostra CP6/58 do nível carbonático 3, com divisão de base, meio e topo, cada qual com suas características macroscópicas.

Análise microscópica

Na porção basal a porcentagem de matriz é menor, ocorrendo predominância de grãos, sendo estes a maioria oóides compostos de aragonita. Esta pode ser reconhecida pelo fato de, por ser ortorrômbica e possuir extinção reta, quando presente na estrutura radial do oóide, fica com extinção cruzada (figura 6.46-6). Também é caracterizada por oncóides com formato esférico, com alguns poucos elípticos. São visíveis escassas valvas de ostracodes, estas constituindo núcleos de oncóides (figura 6.46-5). A cimentação é por calcita (micrita). Consiste de um *grainstone*.

Na porção intermediária predominam os oncóides e poucos oóides, cimentados por calcita (micrita). Ocorrem argilas e valvas de ostracodes, estas, por vezes, como núcleo de oncóides. Consiste de um *wackstone*, pela grande quantidade de matriz, e mais de 10 % de aloquímicos (figura 6.46-3 e 4).

A porção superior possui abundantes oóides, valvas de ostracodes como núcleo de oncóides e cimento micrítico, sendo classificado como um *packstone*, pela ausência de matriz e grande quantidade de grãos revestidos por lama carbonática, estes grão-suportados (figura 6.46-1 e 2).

A classificação dos carbonatos foi baseada na contagem modal expressada na tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Resultado da contagem modal para as lâminas do nível 3, com estimativas das porcentagens dos componentes dos carbonatos.

| NÍVEL 3 | matriz | intraclastos | pelóides | bioclastos | oncóides | oóides | classificação |
|----------------|---------------|---------------------|-----------------|-------------------|-----------------|---------------|----------------------|
| topo | 0% | 0% | 0% | 10% | 15% | 75% | <i>packstone</i> |
| meio | 47% | 0% | 0% | 8% | 43% | 2% | <i>wackstone</i> |
| base | 10% | 0% | 0% | 6% | 14% | 70% | <i>grainstone</i> |

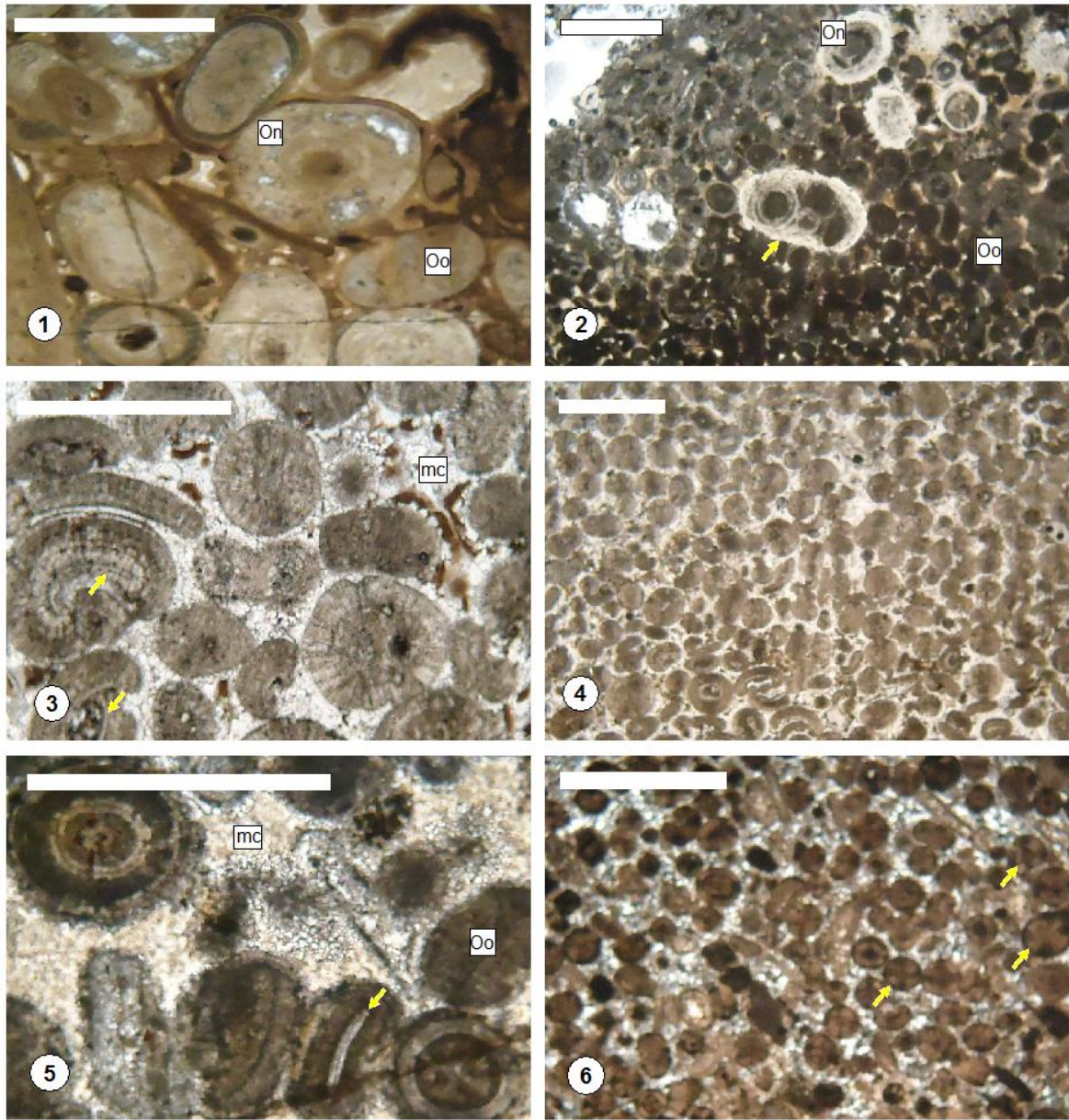


Figura 6.46 – Nível 3. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP, Formação Teresina. 1) Porção superior da amostra CP6/58; oncóides (On) e oóides (Oo) revestidos por lama carbonática; ausência de matriz; 2) Porção superior da amostra CP6/58; oncóide (on) e oóides (Oo) em grande abundância; seta amarela indicando agregado de oóides e pequenos oncóides, unidos por cimento micrítico; 3) Porção intermediária da amostra CP6/57; oncóide e oóides cimentados por calcita (micrita – mc e esparita); seta amarela indicando valvas de ostracodes como núcleo de oncóides; 4) Porção intermediária da amostra CP6/57; oncóides e oóides em meio à matriz micrítica e esparítica; 5) Porção basal da amostra CP6/57; seta amarela indicando valva de ostracode substituída por calcita, sendo núcleo de oncóides; oncóides e oóides em meio à matriz micrítica (mc); 6) Porção basal da amostra CP6/57; setas amarelas indicando oóides e oncóides de aragonita, com extinção radial. Escalas de 1 mm.

Análise por EDS

Os pontos analisados nas lâminas provenientes do Nível 3 resultaram na detecção de 6 elementos químicos, dos quais, pelos cálculos de proporção, os minerais resultantes foram: dióxido de silício, carbonato de cálcio e óxido de ferro.

Assim como nos níveis 1 e 2, a barita aparece associada ao carbonato de cálcio (calcita), ou em meio a matriz (figura 6.47).

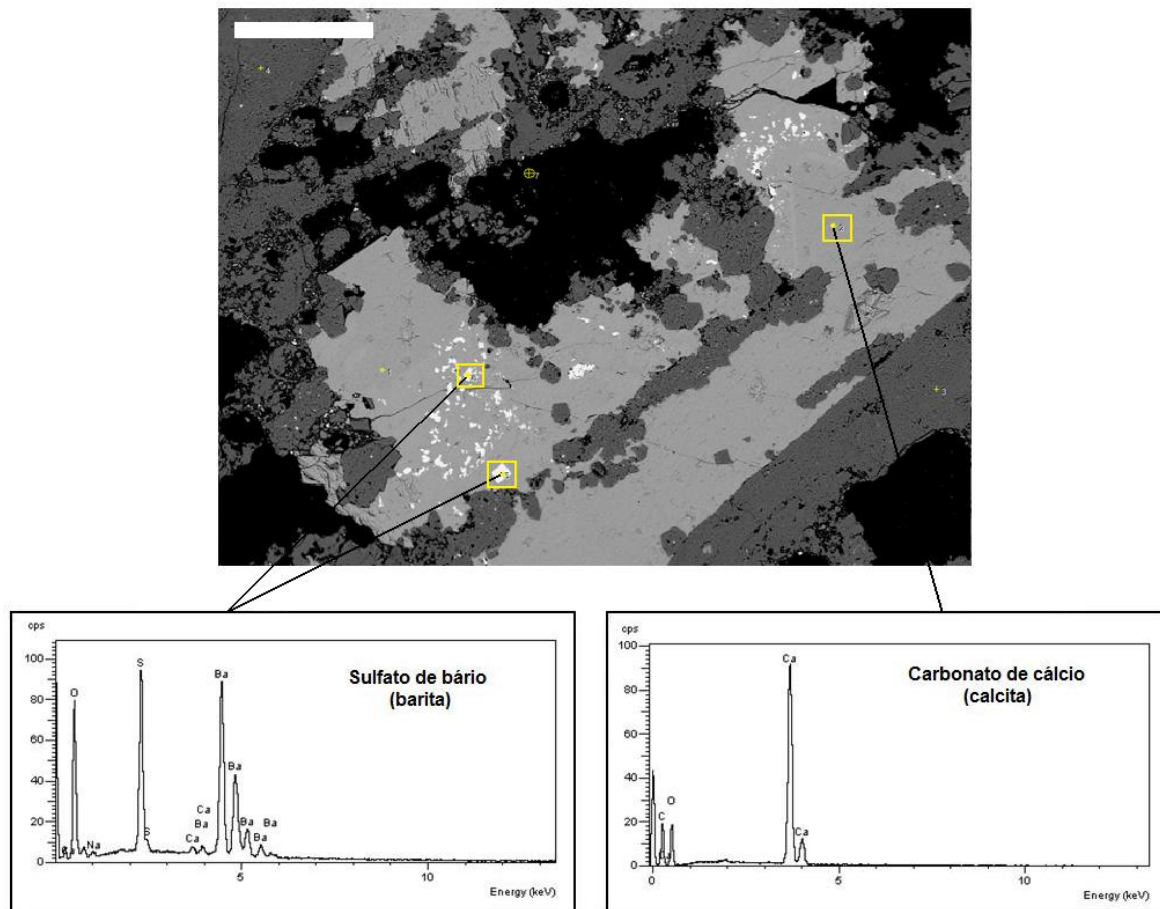


Figura 6.47: Nível 3. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP, Formação Teresina. Amostra CP6/58; Micrografia eletrônica com contraste composicional de lâmina de porção intermediária. Espectro de sulfato de bário (barita) correspondente a pontos em meio a matriz; espectro de carbonato de cálcio (calcita), em área de matriz. Escala de 200 µm.

Corroborando com as análises petrográficas, nas quais se distinguiu a composição de aragonita do córtex de oóides e oncóides, a análise por EDS confirmou este resultado. Espectros obtidos em pontos destas estruturas revelaram a presença de carbonato de cálcio (CaCO_3), que, combinado com o aspecto visual e por esta ser um polimorfo da calcita, concluiu-se que consistia de argonita. A matriz próxima a estes grãos apresentou composição de calcita (micrita), conclusão também obtida em combinação com as análises petrográficas (figura 6.48).

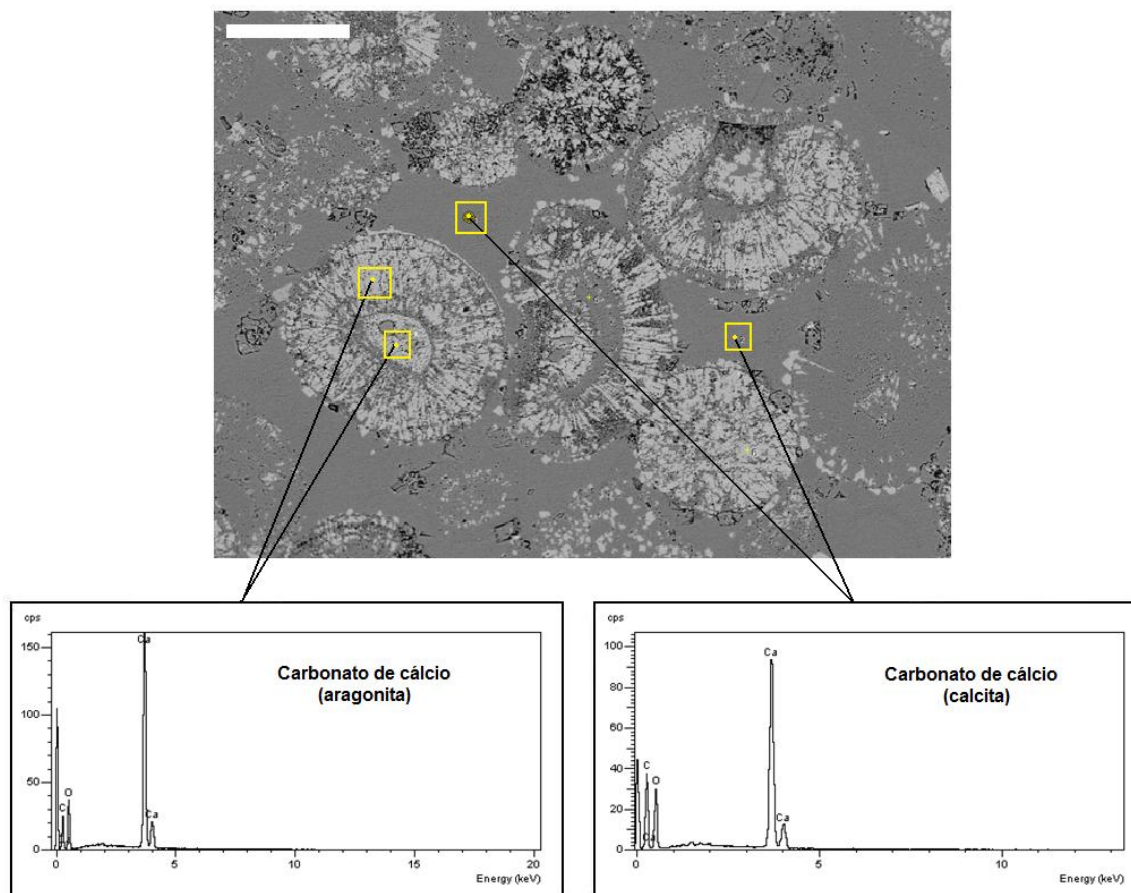


Figura 6.48: Nível 3. Pedreira Gobbo, Taguaí/SP, Formação Teresina. Amostra CP6/57; Micrografia eletrônica com contraste composicional de lâmina de porção basal. Espectro de carbonato de cálcio (aragonita) correspondente a pontos na região de córtex e núcleo de oncóide; espectro de carbonato de cálcio (calcita), em área de matriz. Escala de 200 μm .

Não foi possível a obtenção de resultados confiáveis com a Espectroscopia Raman para as amostras do Nível 3 devido à baixa razão sinal/ruído, o que impossibilitou a discriminação de bandas de interesse.

6.3 Estromatólitos, esteiras microbianas e oncóides – Lagoa Salgada/RJ

Os microbialitos estudados são provenientes das bordas NE e SW da Lagoa Salgada, uma vez que não foram observados no extremo SE da lagoa. Deste extremo, foram recolhidos sedimentos associados a esteiras microbianas e oncóides não litificados. A análise dos sedimentos foi realizada para todas as amostras, e está apresenada neste trabalho de forma conjunta para os microbialitos, esteiras e oncóides.

6.3.1 Microbialitos

Análise macroscópica

As amostras estudadas apresentaram basicamente as mesmas características macroscópicas. Os microbialitos analisados foram divididos em três porções: basal (B), mediana (M) e topo (T), sendo estas diferenciadas no desenvolvimento das estruturas ao longo do tempo (figura 6.49-4).

Algumas amostras apresentaram crescimento inicial da estrutura estromatolítica sob o substrato de tubos calcificados de poliqueta da família Serpulidae; filo Annelida; classe Polychaeta (figura 6.49-2 e 6.49-4). Outras cresceram sob o substrato de esteiras microbianas (figura 1 -3). Nas cavidades encontram-se diversos bioclastos, principalmente conchas do gastrópode *Heleobia australis* (D'Orbigny, 1835), espécie muito abundante no local.

A porção basal possui a parte inferior com laminações contínuas em algumas amostras, ou onduladas em outras, sendo evidenciadas interrupções no desenvolvimento inicial das colunas, e posterior crescimento de novas colonizações com desenvolvimento de outras colunas. Algumas possuem laminação difusa e as colunas são pouco evidentes. As laminações iniciais seguem o formato do substrato, tomando sua forma domal ao longo de seu crescimento.

A porção mediana (intermediária) apresentam colunas que variam com a espessura, são bastante difusas e com muitas cavidades, estas muito grandes em algumas amostras. Os formatos das colunas são complexos, bastante variados: ora alongadas, ora intensamente ramificadas. Em suas muitas cavidades, macroscopicamente são visíveis muitas conchas de *Heleobia australis*.

A porção superior (topo) apresenta laminação mais uniforme, bastante ondulada e os cabeços dos domos formados são menos evidentes. As cavidades são bastante numerosas, porém, menores que na porção intermediária, e nelas ainda são encontrados as conchas dos gastrópodes. No interior dos cabeços encontram-se estruturas que parecem ser de origem biótica, como perfurações e reentrâncias (figura 6.49-4).

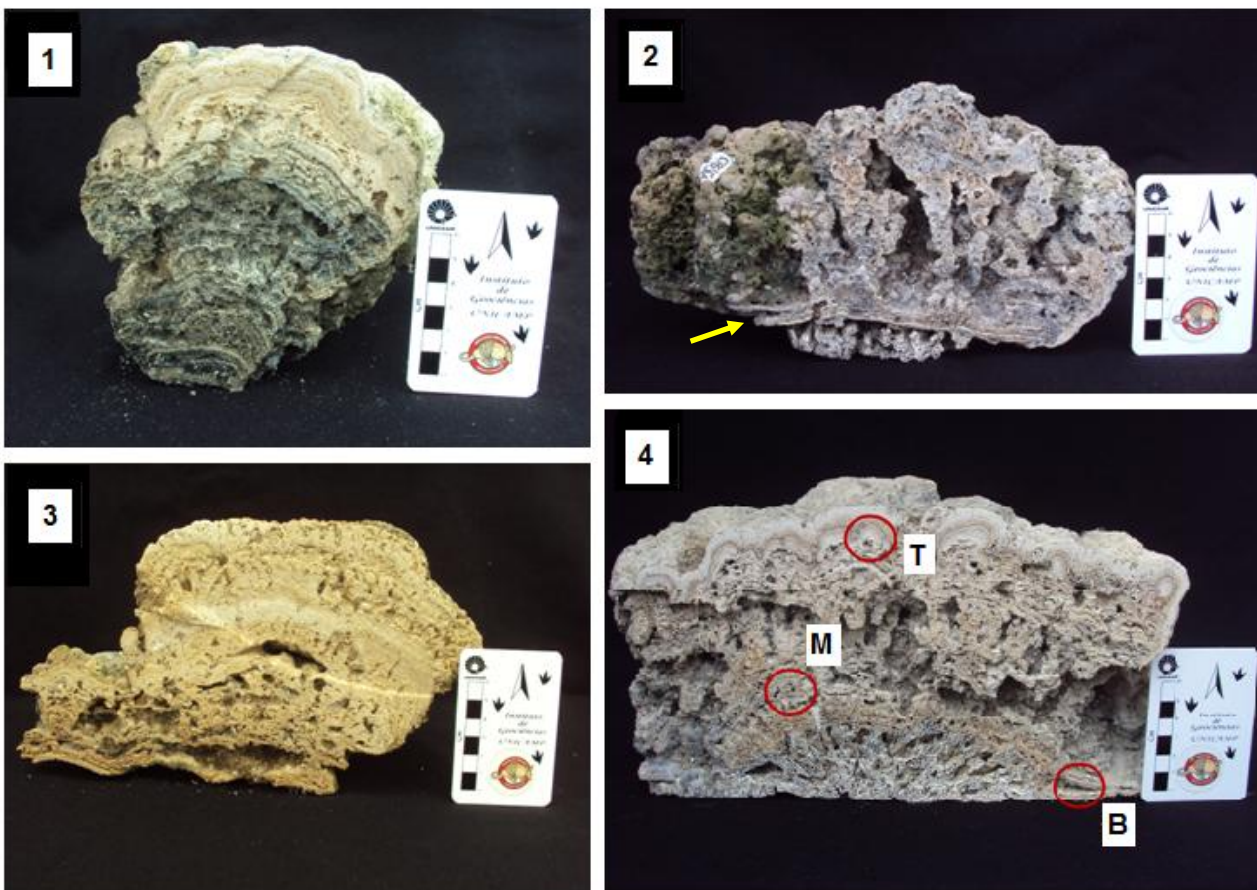


Figura 6.49: Microbialito da Lagoa Salgada, RJ. 1) Espécime com coluna mais espessa e uniforme na parte superior (CP6/21); 2) Amostra com desenvolvimento da estrutura sob tubos de serpulídeos, indicados por seta amarela (CP6/5); 3) Exemplar com desenvolvimento sob coquina associada a conchas de bivalves (CP6/17); 4) Os círculos vermelhos indicam as subdivisões de crescimento B (base), M (meio) e T (topo); amostra CP6/6).

Análise microscópica (lâminas petrográficas)

A análise petrográfica forneceu informações mais refinadas sobre as estruturas, bem como a verificação dos tipos de porosidade, de elementos biogênicos integrando as laminações, minerais e relações texturais. Os minerais observados consistem majoritariamente de grãos de quartzo, apresentam extinção reta e variam na forma sub-arredondada a sub-angular. Também foram encontrados feldspatos (microclínio e plagioclásio) e micas (biotita e muscovita). Ocorre, por vezes, envelope micrítico em grãos de quartzo. A cimentação acontece por micrita e esparita (raramente). Os elementos biogênicos encontrados em maior abundância foram microgastrópodes, foraminíferos, bivalves e ostracodes.

Para a porção basal dos microbialitos, as lâminas mostram uma forte cimentação calcítica e esparítica. Em outras aparecem tubos de serpulídeos sobre os quais as estruturas cresceram, gerando grande porosidade intrapartícula. Outro tipo de porosidade encontrada são os espaços corroídos pela ação de cianobactérias filamentosas. Os grãos de quartzo variam de sub-arredondados a sub-angulares. As laminações são onduladas (figura 6.50-5) e por vezes tomam a forma do grão, pelóide ou elemento biogênico sobre o qual se desenvolveram. São visíveis por entre as laminações: conchas de microgastrópodes, valvas de ostracodes, briozoários (figura 6.50-6) e fragmentos de conchas de bivalves. Devido a forte cimentação, estruturas como tecas de foraminíferos se tornaram de difícil identificação.

A porção mediana (intermediária) apresenta cavidades maiores e textura mais heterogênea. A presença de foraminíferos é comum, sendo possível indicar seus gêneros. Entre as laminações ocorrem microgastrópodes e ostracodes, estes em menor abundância. Há maior definição das laminações, estas mais onduladas e tendendo a ramificações. Algumas amostras têm laminação contínua, o que é raro na maioria delas. Ocorrem pelóides em algumas lâminas. Os tipos de porosidade encontrados foram móldica, intrapartícula e microperfurações por ação de cianobactérias.

Na porção superior (topo), os domos, cabeços e laminações são menos evidentes que nas outras porções. Os elementos biogênicos, principalmente os gastrópodes e ostracodes, são mais dificilmente distinguíveis. Em muitas de suas lâminas são visíveis pelóides revestidos por

envelope micrítico. Ocorre porosidade por ação de cianobactérias (figura 6.50-2), porosidade intrapartícula e móldica. Com relação às outras porções, esta apresenta maior cimentação.

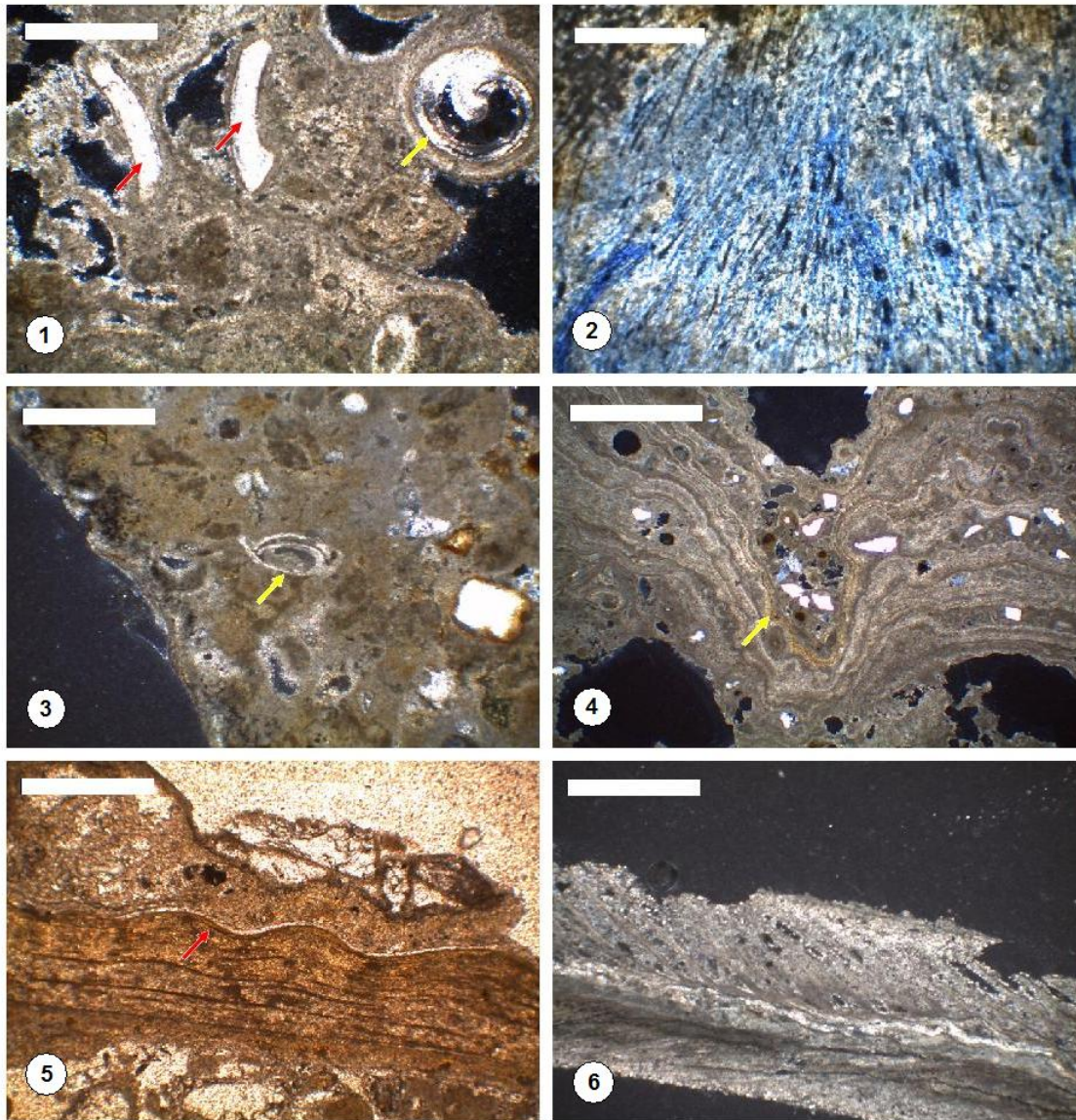


Figura 6.50: Microbialitos da Lagoa Salgada, RJ. 1) Porção superior (topo) de microbialito; setas vermelhas indicando fragmentos de conchas de bivalves; seta amarela indicando corte oblíquo de concha de microgastrópode *Heleobia australis* – CP6/17. Escala de 1 mm; 2) Porção superior - porosidade gerada pela ação corrosiva de cianobactérias filamentosas no carbonato de cálcio (espaços em azul correspondentes aos poros formados) – CP6/14. Escala de 0,2 mm; 3) Porção intermediária - seta amarela indicando valvas de ostracodes desarticuladas em meio a matriz, apresentando porosidade intrapartícula – CP6/25. Escala de 1 mm; 4) Porção intermediária - seta amarela indicando ação do peso de sedimentos sobre as laminações antes destas serem litificadas – CP6/17. Escala de 1 mm; 5) Porção basal - seta vermelha indicando ondulações mais definidas – CP6/25. Escala de 0,8 mm; 6) Porção basal - fragmento de briozoário em meio a matriz – CP6/6. Escala de 1 mm.

6.3.2 Análise de sedimentos (microbialitos e esteiras microbianas)

Os minerais encontrados junto aos sedimentos triados consistem predominantemente de grãos de quartzo sub-arredondados a sub-angulosos e micas (biotita e muscovita). Encontram-se também muitos grãos formados por aglutinação de carbonato de cálcio. Os elementos biogênicos variam para cada amostra, porém alguns em específico são comuns a quase todas, como os microgastrópodes *Heleobia australis*, ostracodes e foraminíferos. A tabela 6.4 relaciona os elementos biogênicos encontrados como sedimentos soltos e incrustados, bem como os encontrados em meio às esteiras microbianas.

Tabela 6.4 – Relação de elementos biogênicos encontrados nas cavidades e interstícios dos microbialitos, na constituição de suas laminações, e em meio a esteiras microbianas vivas presentes na Lagoa Salgada.

| ELEMENTOS BIOGÊNICOS | Presentes nas cavidades dos estromatólitos | Constituindo as laminações dos estromatólitos | Constituindo as esteiras microbianas |
|--------------------------------|--|---|--------------------------------------|
| Foraminíferos | | | |
| <i>Quinqueloculina</i> | X | X | X |
| <i>Ammonia</i> | X | X | X |
| <i>Elphidium</i> | X | | X |
| <i>Rosalina</i> | X | | |
| <i>Triloculina</i> | X | X | |
| <i>Bolivina</i> | X | | X |
| <i>Milliolinella</i> | X | | |
| <i>Rotallina</i> | X | | |
| <i>Textularia</i> | X | | |
| <i>Cibicides</i> | X | | |
| <i>Pseudomonion</i> | | | X |
| Metazoários | | | |
| <i>Heleobia australis</i> | X | X | X |
| Conchas de bivalves | X | X | X |
| Carapaças de crustáceos | X | | |
| Tubos de tanaidáceos | X | | |
| Ostracodes | X | X | X |
| Cracas | X | | X |
| Crustáceo gamarídeo | X | | |
| Crustáceo tanaidáceo | X | | |
| Crustáceos esferomatídeos | X | | |
| Fragmentos de artropódes | X | | X |
| Briozoários | X | X | X |
| Escama de peixe | X | | |
| Espinho de ouriço-do-mar | X | | |
| Vegetais | | | |
| Fragmentos de vegetais | X | X | X |
| Semente (<i>Tallinum</i> sp.) | X | | X |
| Girogonites de carófito | | | X |

As areias coletadas ao redor dos microbialitos apresentam semelhança em composição com os sedimentos dos interstícios, porém, nestes a proporção da fração inorgânica é maior. A figura 6.51 exemplifica alguns dos elementos de origem biogênica encontrados.

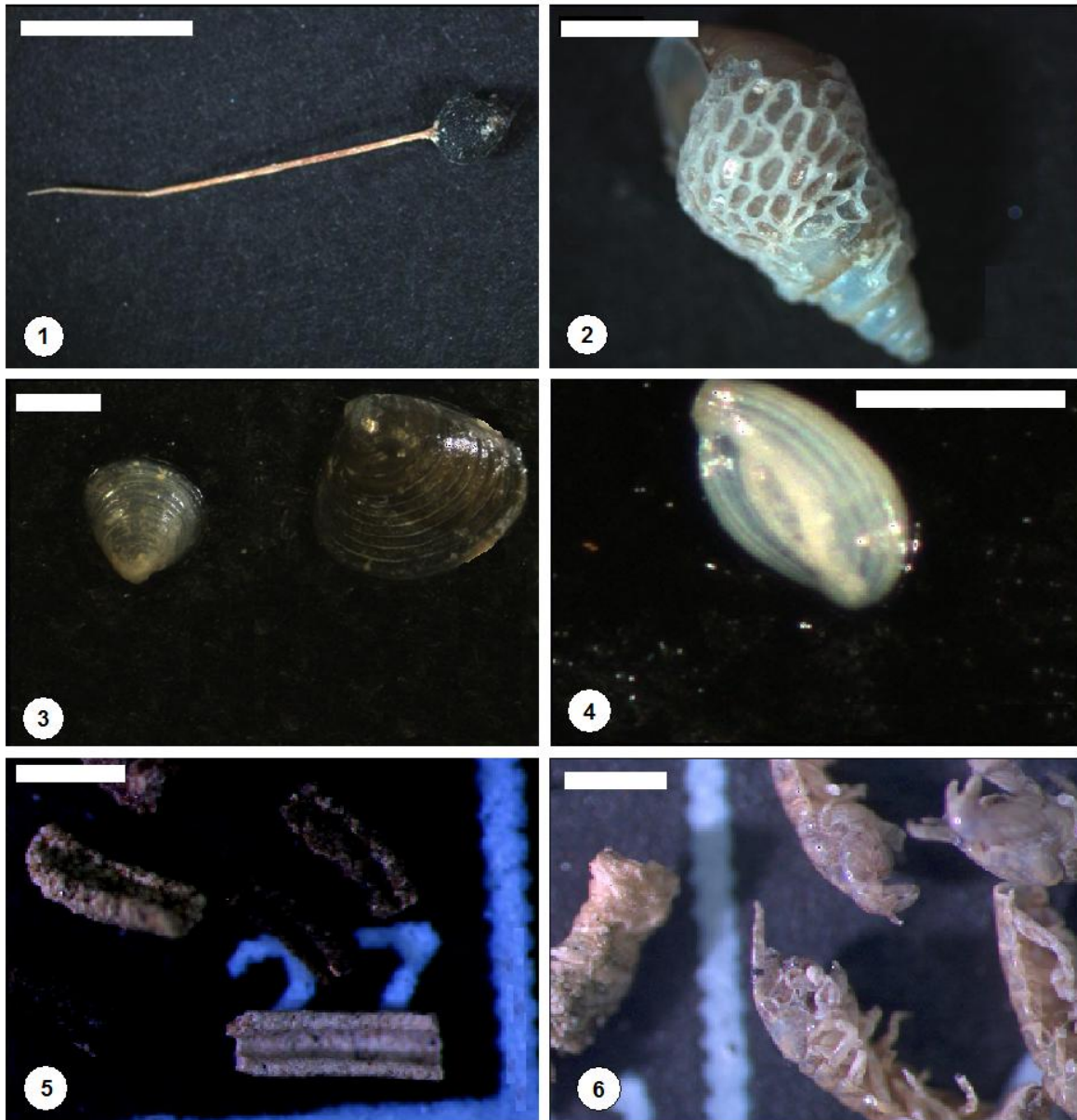


Figura 6.51 – Lagoa Salgada, RJ. Elementos biogênicos encontrados na triagem dos sedimentos. 1) Estrutura reprodutiva de planta do gênero *Talinum* sp. Escala de 0,5 cm; 2) Concha de *Heleobia australis* incrustada por colônia de briozoários. Escala de 1 mm; 3) Conchas de bivalves. Escala de 1 mm; 4) Foraminífero do gênero *Quinqueloculina* sp. Escala de 500 μ m; 5) Tubos calcáreos de crustáceo da ordem Tanaidaceae. Escala de 1 mm; 6) Crustáceos da ordem Tanaidaceae. Escala de 1mm.

Para todas as bordas da lagoa analisadas, a composição de biogênicos se assemelha, porém, são encontradas carófitas apenas na borda SE, ao passo que os crustáceos (todos os gêneros encontrados) são vistos somente nas bordas NE e SW.

A borda SE não apresenta estruturas estromatolíticas, apenas esteiras microbianas associadas a oncóides, ambos não litificados. A triagem, para estes, foi realizada após secagem de porções recolhidas.

Com os dados obtidos a partir da pesagem das frações orgânicas e inorgânicas que foram separadas durante a triagem dos sedimentos, foi possível a confecção de gráficos denotando a participação, em porcentagem, das frações representadas. Alguns dos gráficos estão contidos nas figuras 6.52, 6.53 e 6.54.

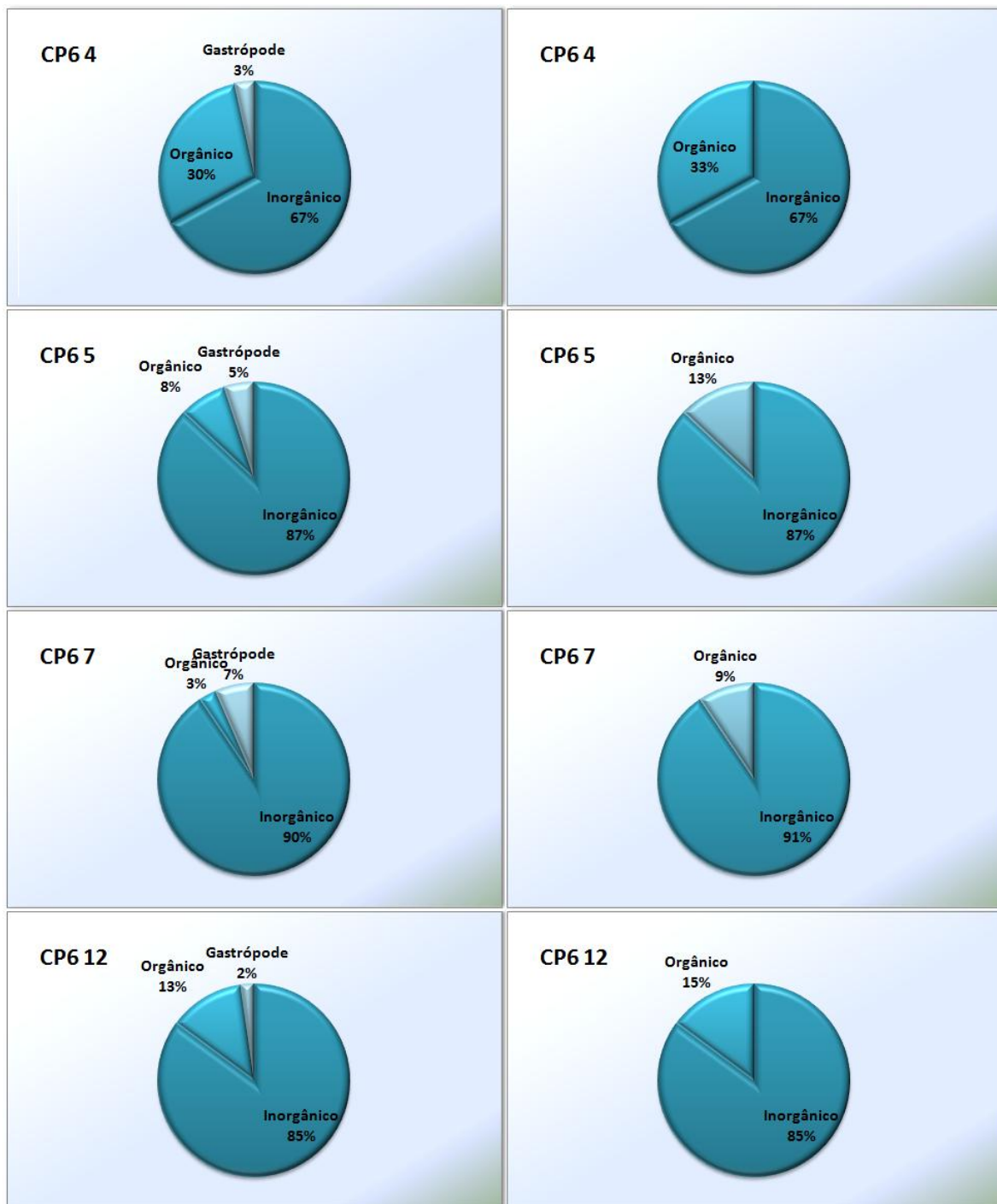


Figura 6.52: Lagoa Salgada, RJ. Borda NE. Gráficos de porcentagem das frações orgânica, inorgânica e de microgastrópodes.

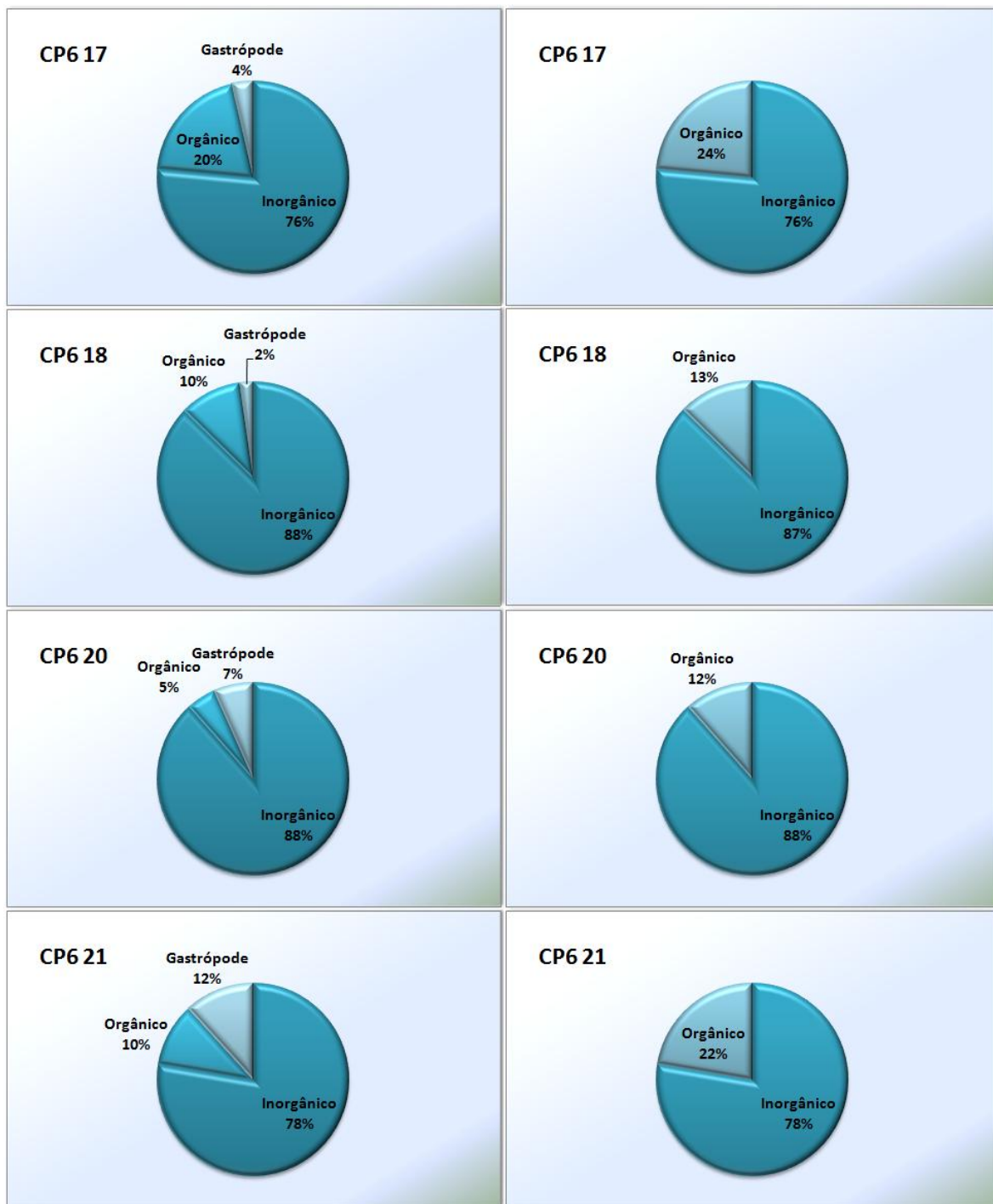


Figura 6.53: Lagoa Salgada, RJ. Borda SW. Gráficos de porcentagem das frações orgânica, inorgânica e de microgastropodes.

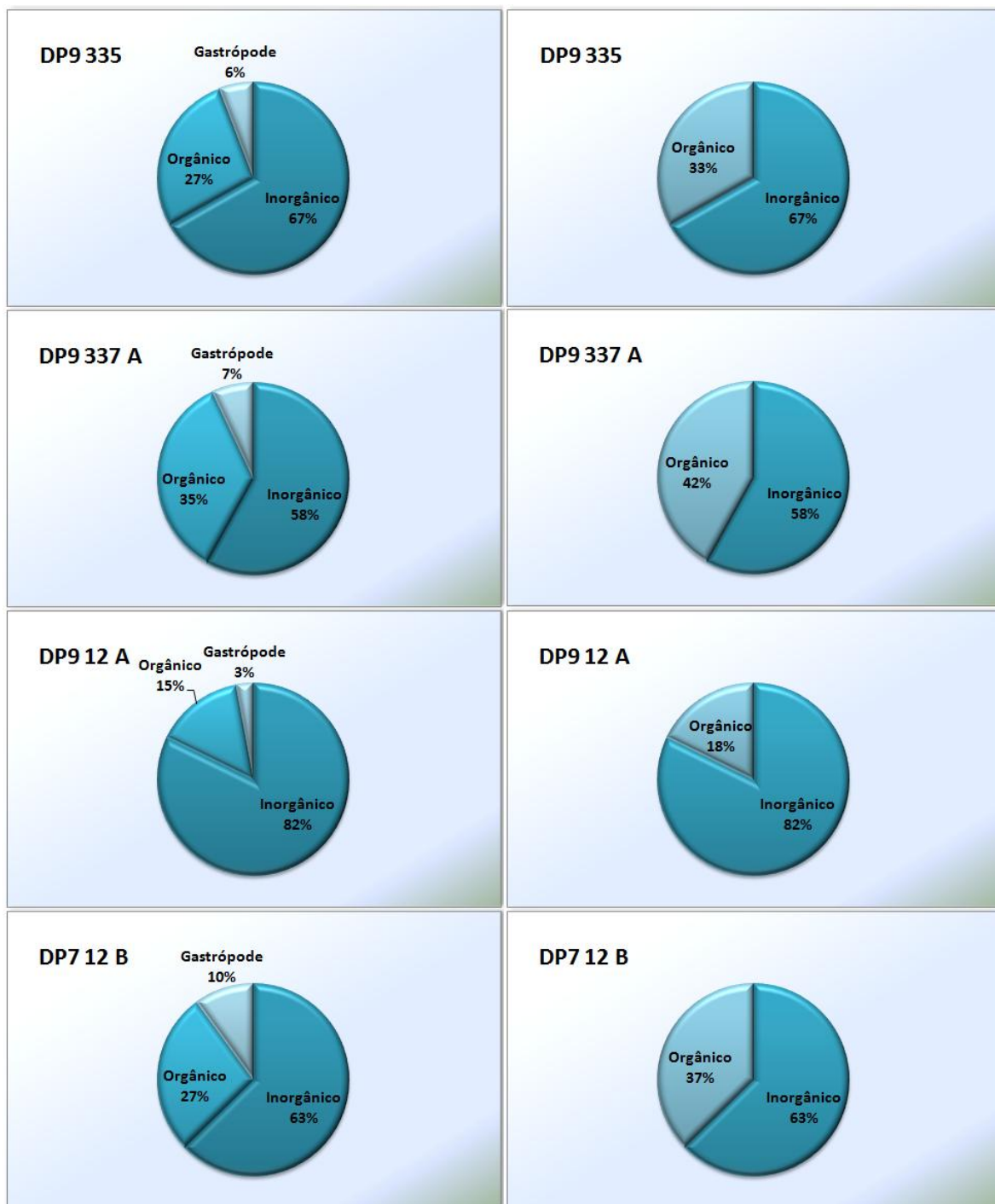


Figura 6.54: Lagoa Salgada, RJ. Borda SE. Gráficos de porcentagem das frações orgânica, inorgânica e de microgastrópodes.

6.3.3 Análise por MEV/EDS

- *elétrons secundários (obtenção de imagens)*

Por alguns elementos biogênicos apresentarem tamanho muito reduzido ou estarem fragmentados, sua identificação ao microscópio estereoscópico ficou comprometida. Dessa forma, a análise com o detector de elétrons secundários foi utilizada para a identificação destes elementos, o que permitiu a classificação ao menor nível taxonômico possível (figura 6.55).

Para os crustáceos, foi possível a melhor visualização de apêndices, estruturas fundamentais para a sua classificação. Para os foraminíferos, foi importante a observação de caracteres morfológicos como o tipo de parede, arranjo das câmaras, posição e tipo de abertura das carapaças, suturas, quilhas, aberturas suturais, etc.

Foi possível também a verificação de indícios de ação de cianobactérias através de microbioerosão em conchas (figura 6.55-8). Para muitos dos fragmentos, apêndices ou estruturas isoladas de organismos foram possíveis de serem classificados pelo menos ao nível de classe.

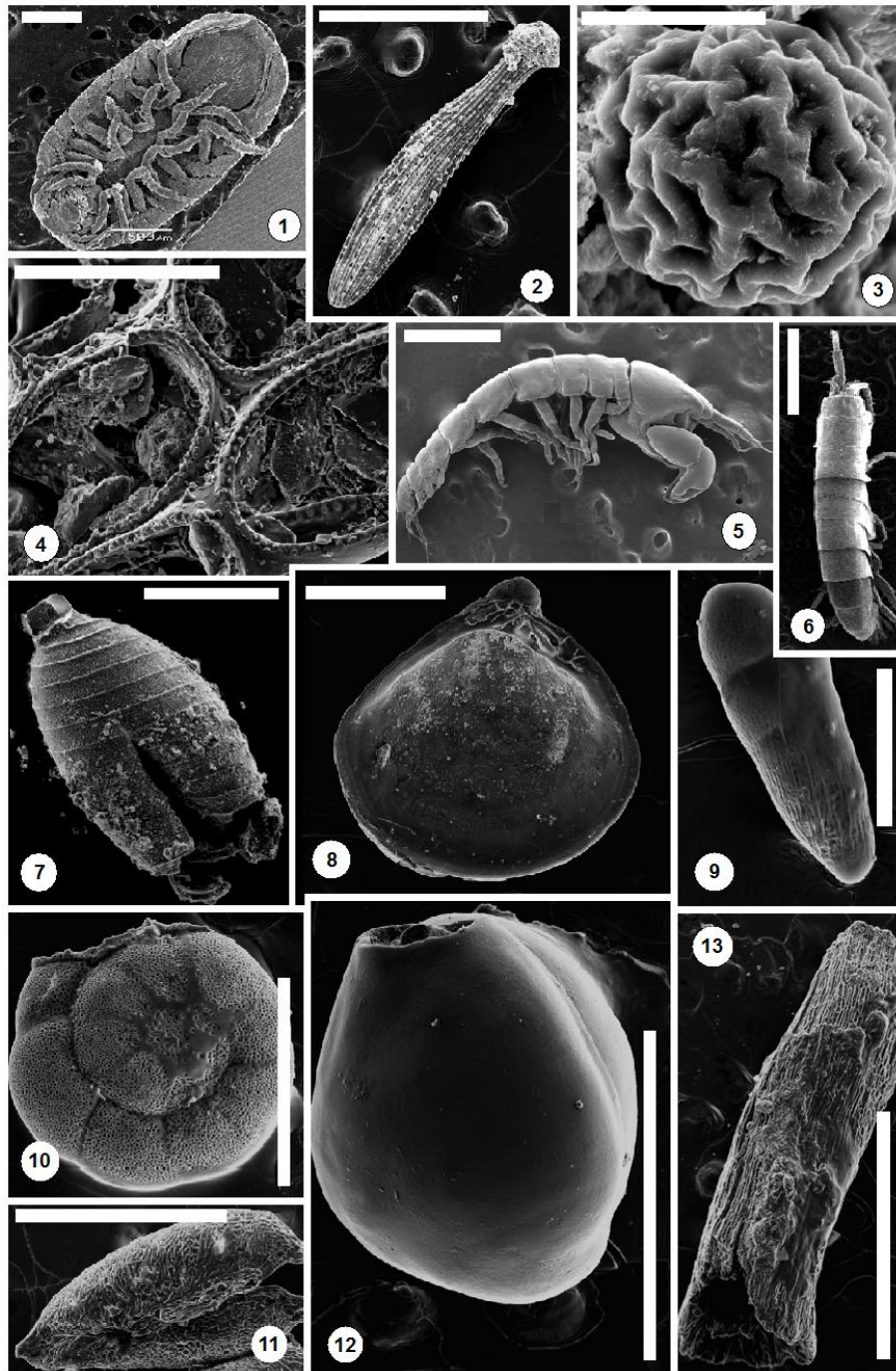


Figura 6.55: Lagoa Salgada, RJ. Micrografias eletrônicas de elementos biogênicos associados aos microbialitos. 1) Crustáceo da família Sphaeromatidae. Escala de 1 mm; 2) Espinho de ouriço-do-mar. Escala de 500 μ m; 3) Possível fungo. Escala de 20 μ m; 4) Colônia de briozóário. Escala de 200 μ m; 5) Crustáceo da ordem Tanaidacea. Escala de 500 μ m; 6) Crustáceo da superordem Gammaridae. Escala de 500 μ m; 7) Oogônio de carófito. Escala de 200 μ m; 8) Concha de bivalve com sinais de microbioerosão próximo ao umbo. Escala de 500 μ m; 9) Foraminífero do gênero *Textularia* sp. Escala de 200 μ m; 10) Foraminífero do gênero *Ammonia* sp. Escala de 200 μ m; 11) Semente. Escala de 500 μ m; 12) Foraminífero do gênero *Triloculina* sp. Escala de 200 μ m; 13) Fragmento de vegetal (caule). Escala de 500 μ m.

- elétrons retroespalhados (análise composicional)- microbialitos

Para esta análise foram utilizadas lâminas provenientes de duas amostras, uma da borda NE da lagoa (CP6/5), e outra da borda SW (CP6/17). Cada amostra teve sua base, meio e topo representado em uma lâmina, sendo, portanto, um total de 6 lâminas (3 da borda NE e 3 da borda SW).

Foram escolhidos diversos pontos em cada lâmina, compreendendo bioclastos, matriz, minerais, pelóides, entre outros. Os resultados apontaram altos índices de carbono, oxigênio e cálcio para as valvas de ostracodes e gastrópodes, assim como para a matriz. A diferença entre a composição da matriz e a composição das valvas foi o teor de magnésio, sendo este mais baixo para as valvas (figura 6.56).

O magnésio aparece geralmente subordinado ao cálcio, por vezes como calcita com baixo teor de magnésio, e por vezes como dolomita, apresentando um alto teor de magnésio. Na porção intermediária do microbialito ocorre uma alternância entre lâminas calcíticas e dolomíticas (figura 6.57). Os envelopes micrítico e microesparíticos são compostos por calcita magnésiana.

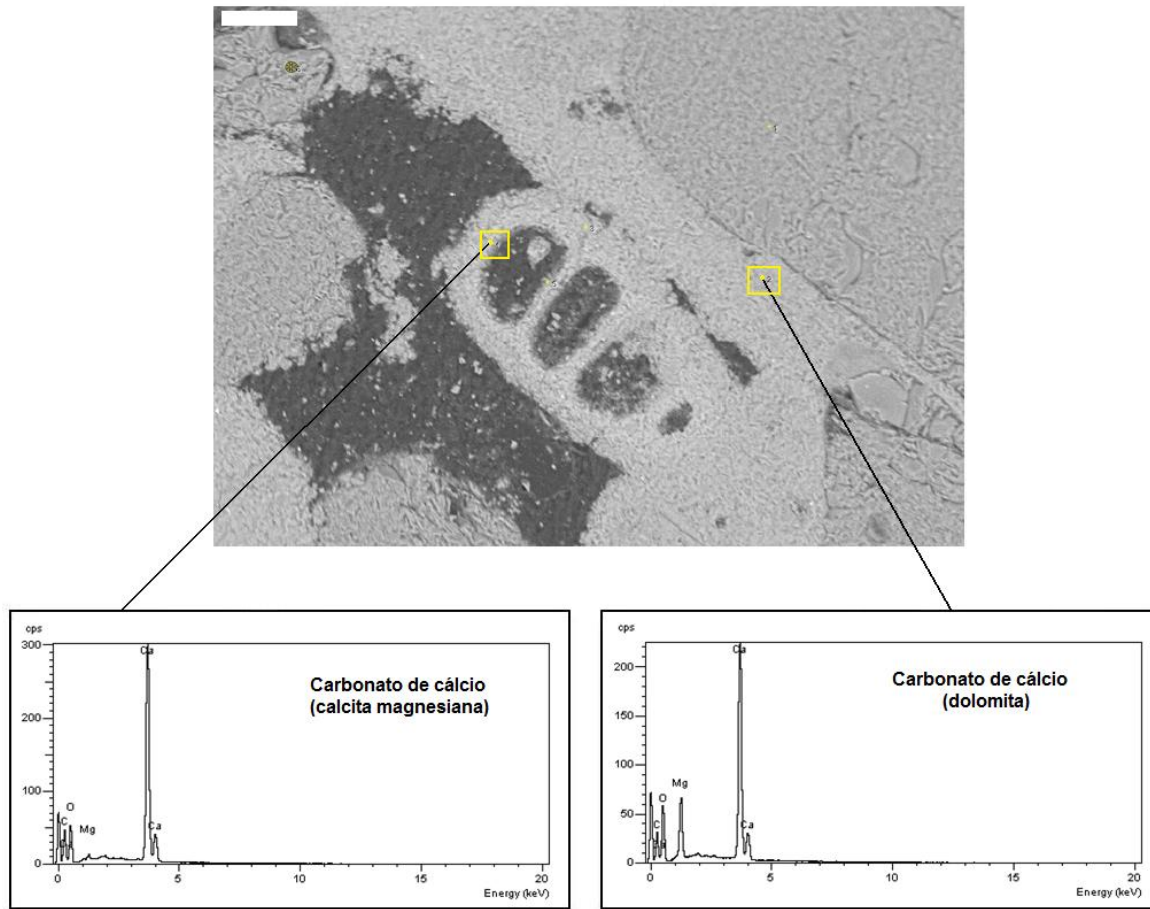


Figura 6.56: Lagoa Salgada, RJ. Micrografia eletrônica com contraste composicional da porção basal do microbialito, evidenciando pontos de composição de calcita magnesiana, correspondente a valva de microgastrópode; e ponto de composição de dolomita em região de laminação do estromatólito. CP6/5. Escala de 500 μm .

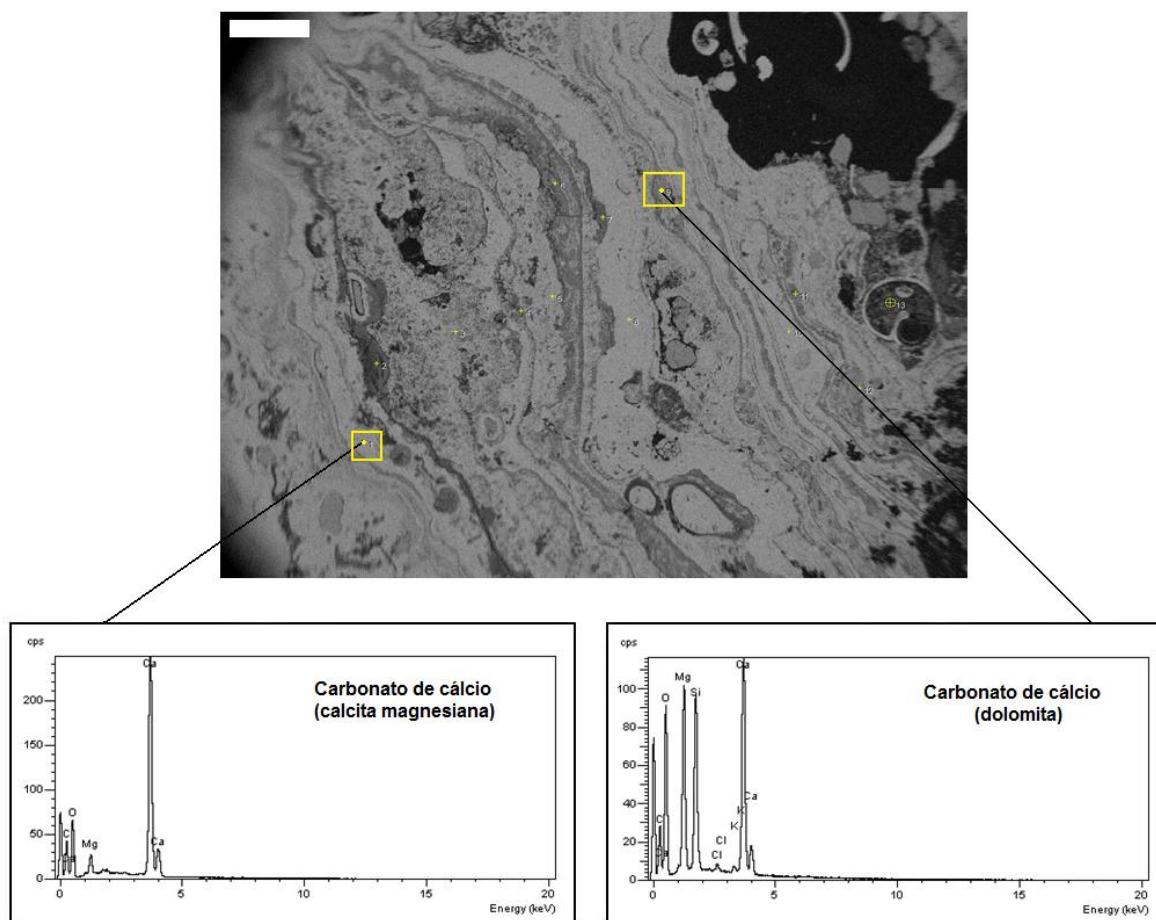


Figura 6.57: Lagoa Salgada, RJ. Micrografia eletrônica com contraste composicional da porção intermediária do microbialito, evidenciando pontos de composição de calcita magnesiana e ponto de composição de dolomita, ambos em regiões de laminação de estromatólito, mostrando a alternância destas composições. CP6/17. Escala de 500 μm .

- elétrons retroespalhados (análise composicional)- esteira microbiana

Para a borda SE, foram impregnadas com resina duas porções de esteira microbiana associada à oncóides não litificados (amostra DP7/39), para a realização da análise composicional. Foi revelada a composição de fosfato de cálcio (apatita), óxido de ferro em meio a matriz de esteira microbiana (figura 6.58), gipsita (sulfato de cálcio – figura 6.59), cloreto de sódio (halita – figura 6.60) e carbonato de cálcio, este como dolomita (alto teor de magnésio associado) em região de matriz e, possivelmente aragonita em região de teca de um foraminífero (figura 6.61).

Em meio à esteira microbiana, foram encontrados em abundância fragmentos de sementes, dentro das quais foi detectada a presença de pirita na forma framboidal (figura 6.62).

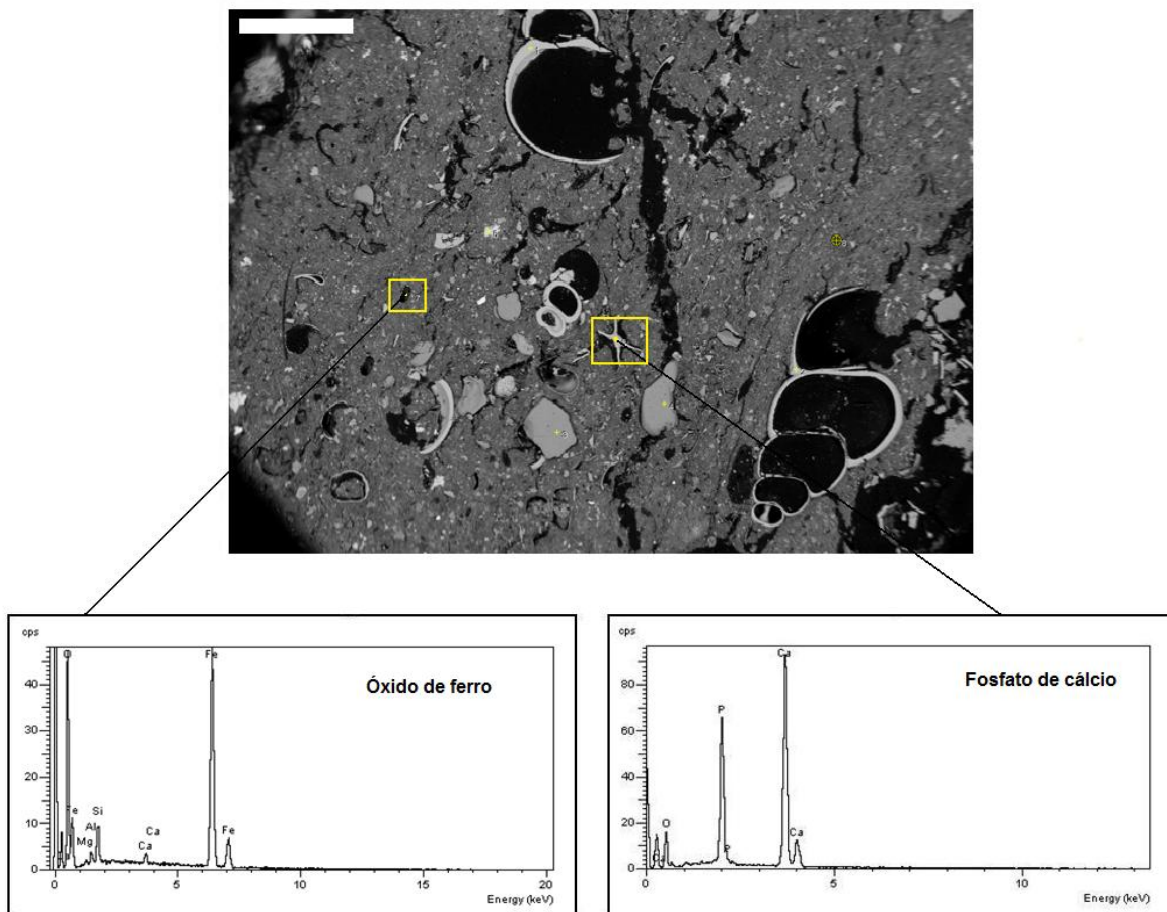


Figura 6.58: Lagoa Salgada, RJ. Micrografia eletrônica com contraste composicional de um oncóide e esteira microbiana não litificados. Ponto à esquerda evidenciando composição de óxido de ferro, e ponto de composição de fosfato de cálcio. Pontos adquiridos em região de esteira microbiana. DP7/39. Escala de 500 μm .

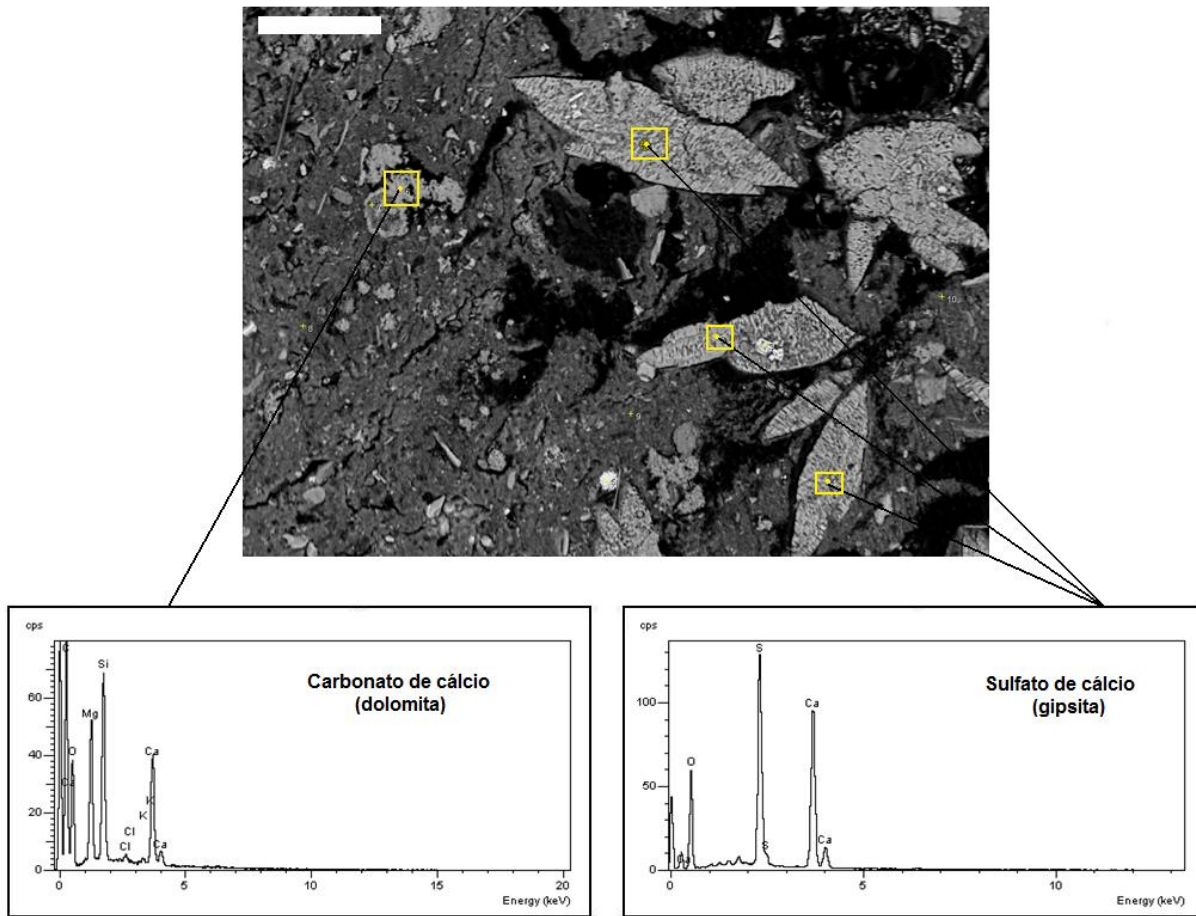


Figura 6.59: Lagoa Salgada, RJ. Micrografia eletrônica com contraste composicional de um oncóide e esteira microbiana não litificados. Ponto à esquerda evidenciando composição de carbonato de cálcio (dolomita), e ponto à direita evidenciando sulfato de cálcio (gipsita). Pontos adquiridos em região de córtex de oncóide. DP7/39. Escala de 500 μm .

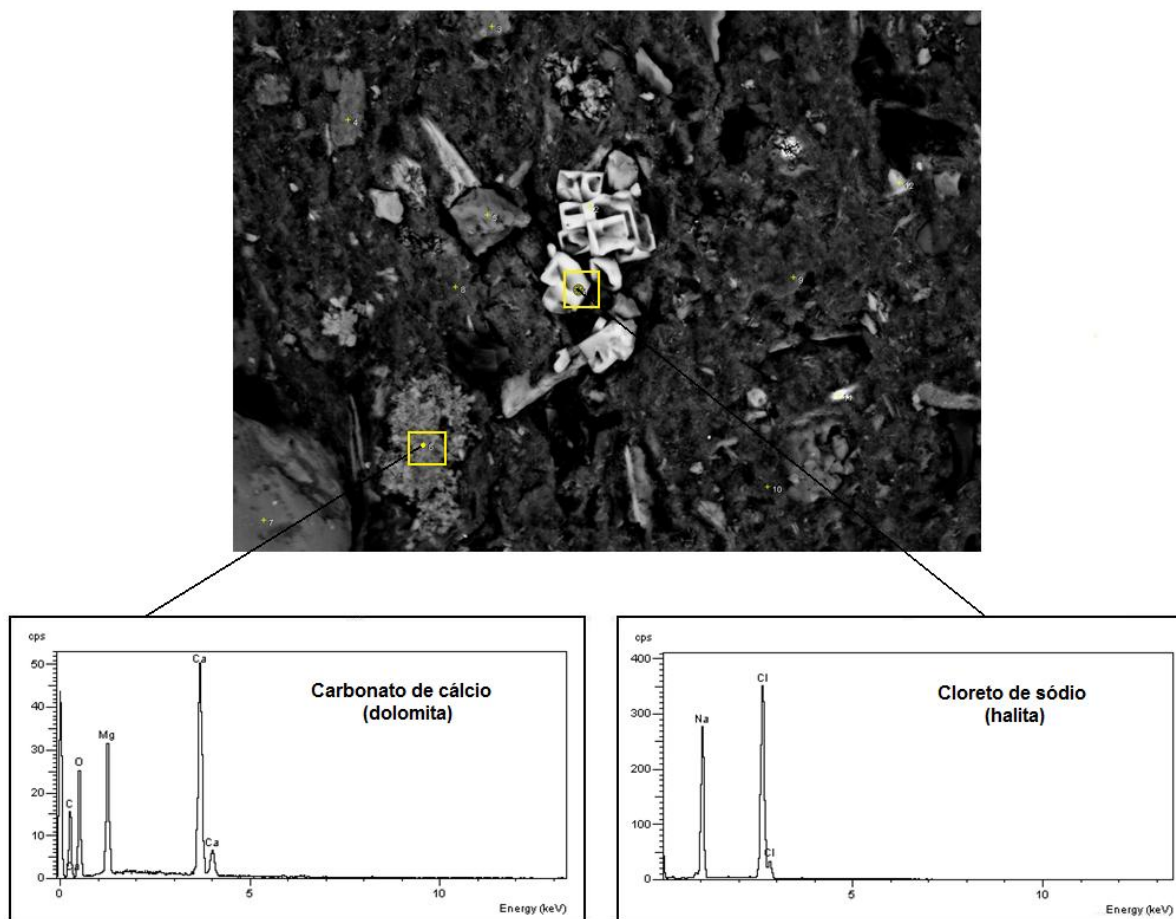


Figura 6.60: Lagoa Salgada, RJ. Micrografia eletrônica com contraste composicional de amostra contendo oncóide e esteira microbiana não litificados. Ponto à esquerda evidenciando composição de carbonato de cálcio (dolomita), e ponto à direita evidenciando cloreto de sódio (halita). Pontos adquiridos em região de esteira microbiana. DP7/39. Escala de 200 μm .

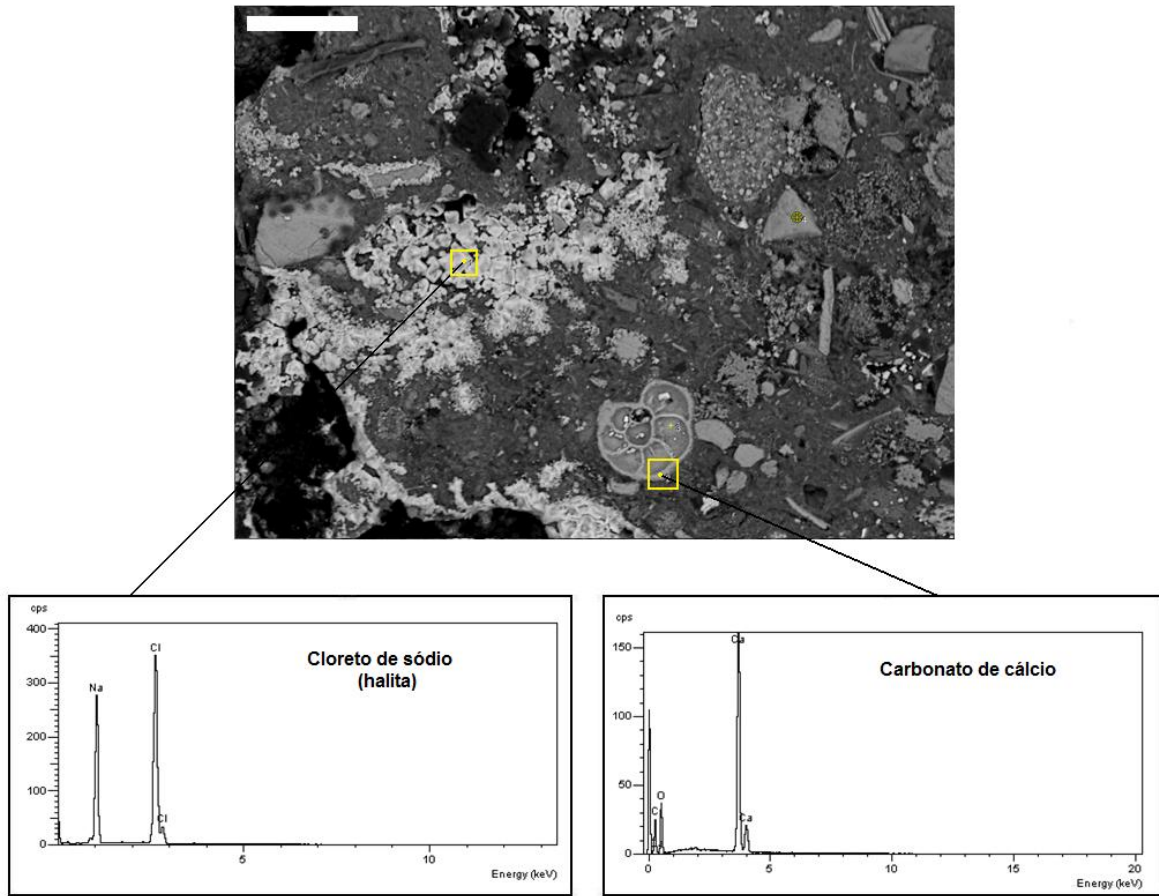


Figura 6.61: Lagoa Salgada, RJ. Micrografia eletrônica com contraste composicional de amostra contendo oncóides e esteira microbiana não litificados. Ponto à esquerda evidenciando composição de cloreto de sódio (halita), e ponto à direita evidenciando composição de carbonato de cálcio (possivelmente aragonita), em teca de foraminífero do gênero *Euphidium* sp. Pontos adquiridos em região de esteira microbiana. DP7/39. Escala de 200 μm .

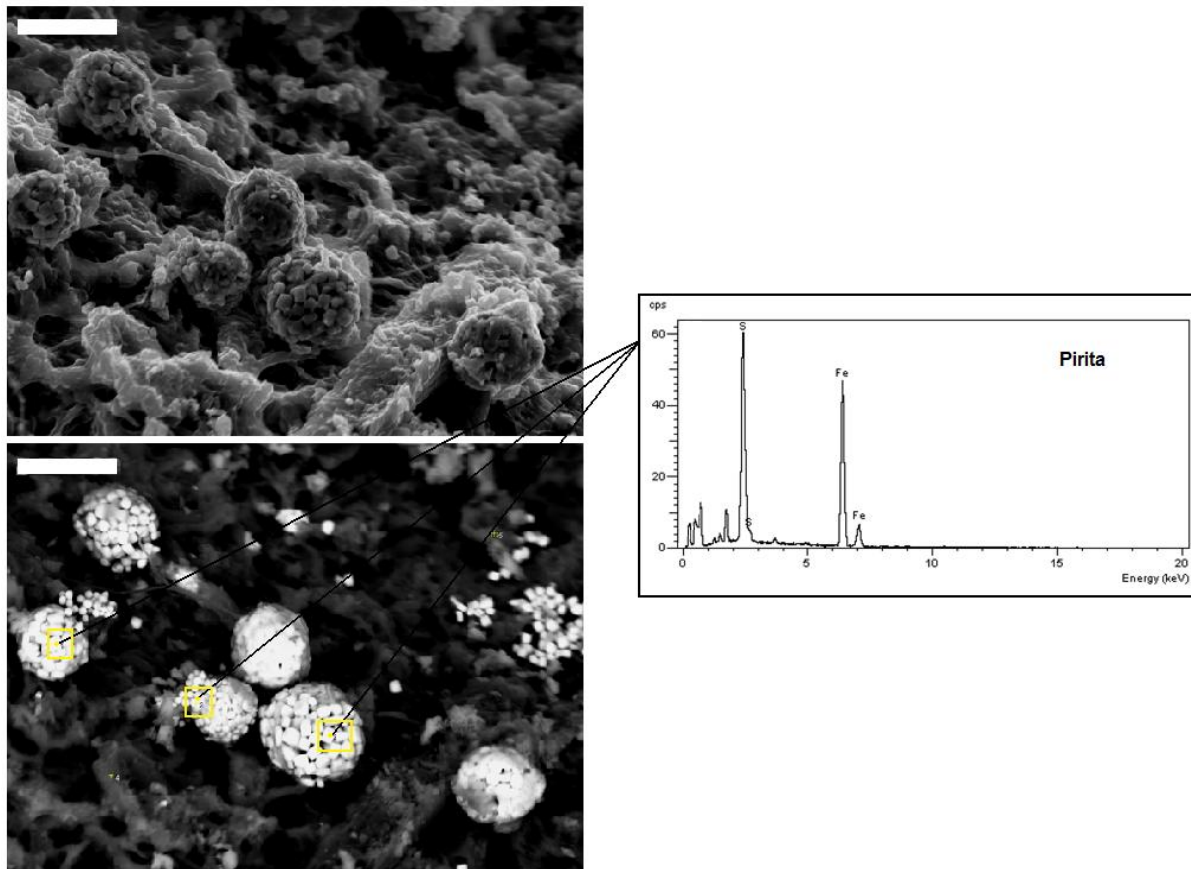


Figura 6.62: Lagoa Salgada, RJ. Micrografia eletrônica com contraste composicional de amostra de esteira microbiana contendo pirita na forma framboidal. Escala de 100 μm .

6.4 Esteiras microbianas e coquina – Lagoa Pitanguinha/RJ

As amostras são provenientes da borda SW da Lagoa Pitanguinha, parte do Sistema Lagunar de Araruama, no Rio de Janeiro. Foram coletadas amostras de coquina associada à esteira microbiana (CP6/27B e CP6/30) e uma porção de sedimentos ao redor das coquinas (CP6/27A). As esteiras microbianas não estavam litificados, porém, se apresentavam bastante ressecadas devido ao tempo de exposição fora d'água. No momento da coleta, a lagoa se encontrava com baixo nível na coluna d'água, expondo as esteiras microbianas, coquinas, sedimentos e oncóides situados em suas margens. Eram visíveis marcas de contração em esteiras microbianas, formando gretas devido ao período de estiagem da lagoa (figura 6.63).



Figura 6.63: Lagoa Pitanguinha, RJ. 1) Borda SW da lagoa com esteiras microbianas; 2) Detalhe da coquina associada a esteira microbiana.

Análise macroscópica

A amostra CP6/30 possui cerca de 3 cm de espessura e compreende uma coquina sob a qual foi desenvolvida uma esteira microbiana. A estrutura da coquina é composta principalmente de conchas desarticuladas e fragmentadas de moluscos bivalves, sendo o *Pitar* sp. um dos gêneros predominantes. Sob o substrato formado desenvolveu-se esteira microbiana, a qual recobriu toda a extensão da coquina (figura 6.64).

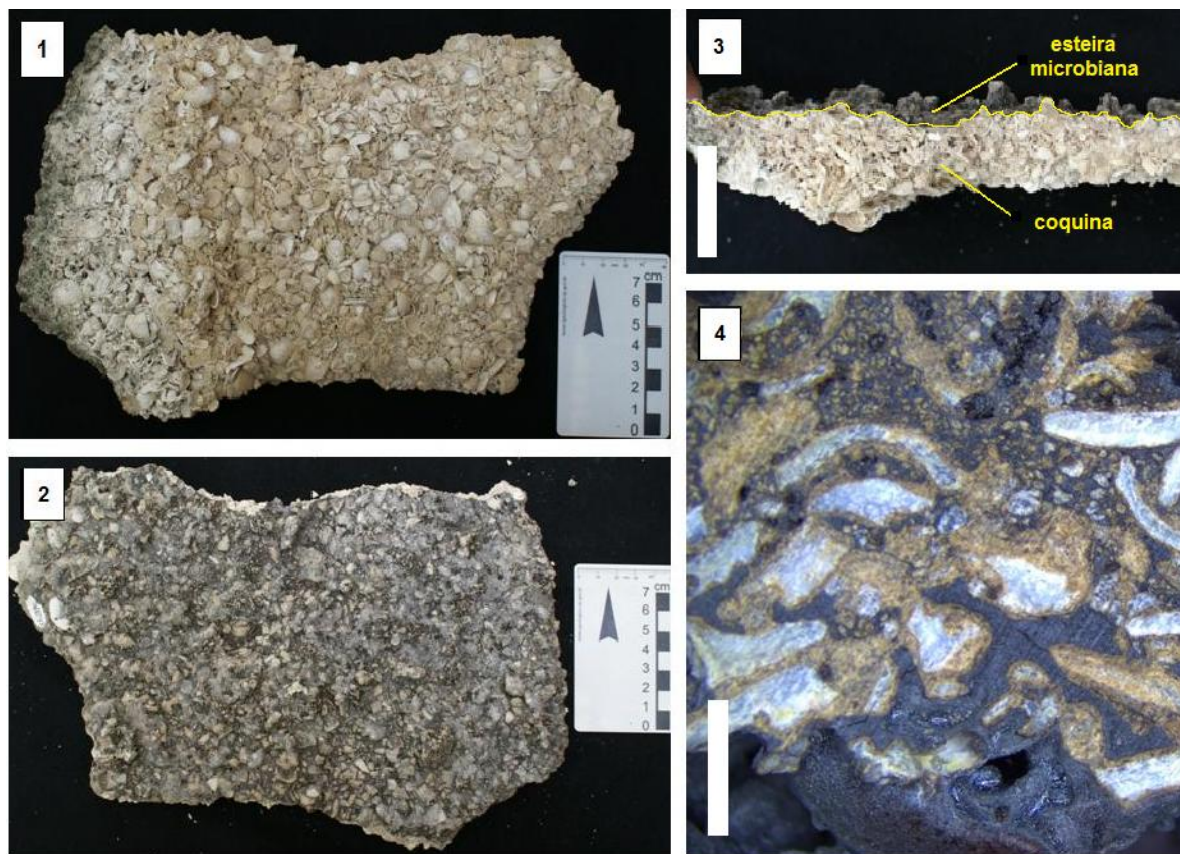


Figura 6.64 – Lagoa Pitanguinha, RJ. Esteira microbiana associada à coquina. CP6/30. 1) Porção inferior: coquina basal; 2) Porção superior: esteira microbiana; 3) Detalhe de corte transversal, mostrando porção basal constituída de coquina e porção superior constituída por esteira microbiana. Escala de 5 cm; 4) Amostra impreganada com *epoxy* azul para vizualização de espaços porosos. Escala de 5 mm.

Análise microscópica

A coquina apresenta fábrica grão-suportada, com cimento carbonático envolvendo os clastos, que na maioria são constituídos de fragmentos de valvas desarticuladas de bivalves, formando cortóides. Também entre os bioclastos foram observados conchas do gastrópode *Heleobia australis*, foraminíferos e ostracodes. A figura 6.65 mostra alguns exemplos em lâminas petrográficas.

A contagem modal resultou nas seguintes porcentagens: 60% de conchas de bivalves, 30% de porosidade, 8% de cimento carbonático e 2% de grãos (quartzo). Foi classificada como um *grainstone*.

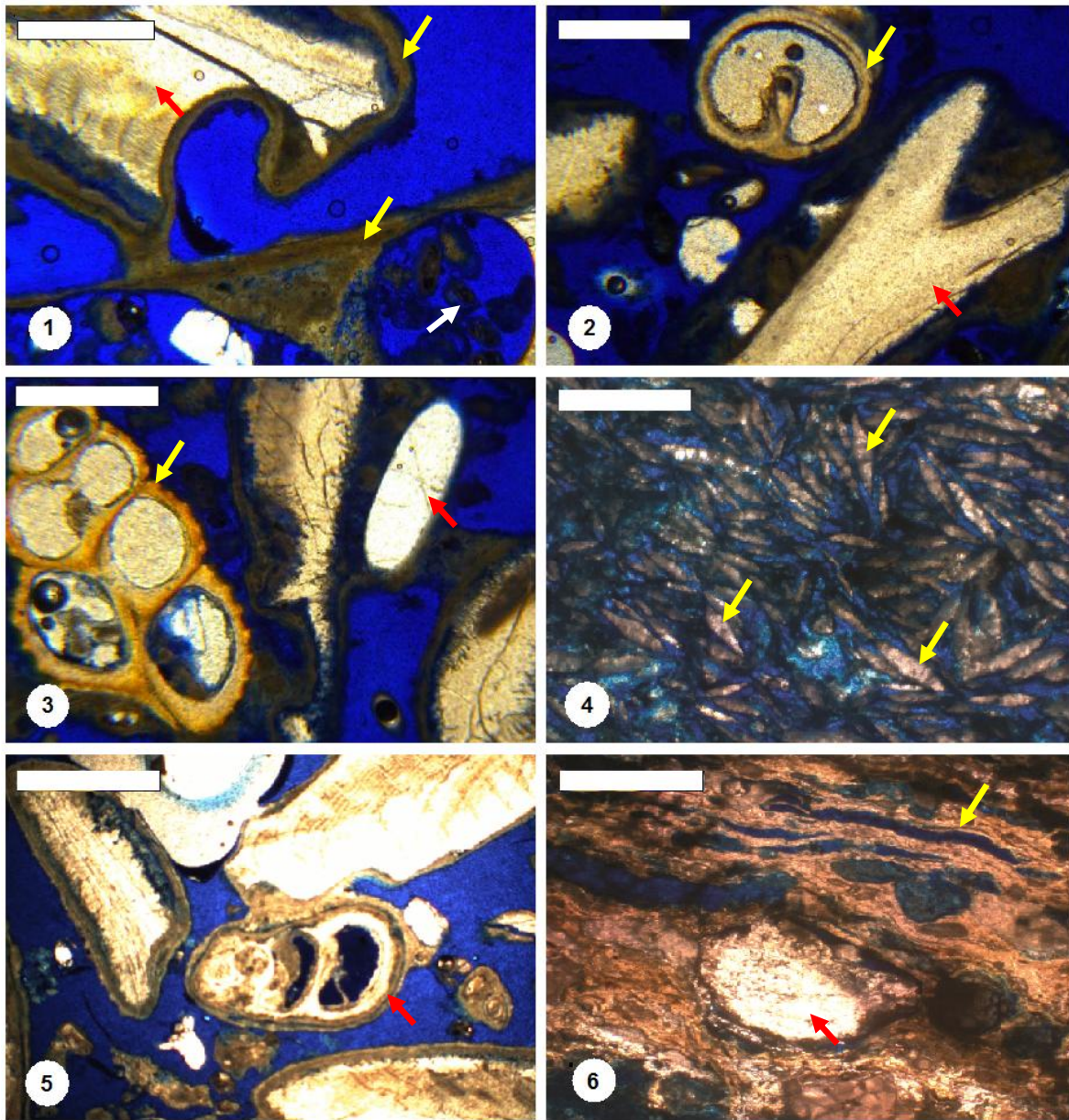


Figura 6.65: Lagoa Pitanguinha, RJ. Esteira microbiana associada à coquina. CP6/30. 1) Porção inferior; seta vermelha indicando fragmento de concha de bivalve cimentada (cortóide); seta amarela indicando cimento carbonático e seta branca indicando foraminífero; 2) Porção inferior; seta amarela indicando corte transversal de concha de gastrópode cimentada e preenchida por micrita; seta vermelha indicando fragmento de concha de bivalve cimentada; 3) Porção inferior; seta amarela indicando corte longitudinal de concha de gastrópode parcialmente preenchida por micrita; seta vermelha indicando grão de quartzo arredondado; 4) Porção inferior; setas amarelas indicando gipsita; 5) Porção inferior; seta vermelha indicando corte oblíquo de concha de gastrópode cimentada em meio a fragmentos de conchas de bivalves; 6) Porção superior (esteira microbiana); seta vermelha indicando grão de quartzo arredondado corroído pela ação de microrganismos, e seta amarela indicando laminações da esteira microbiana. Escalas de 1 mm.

Análise de sedimentos

Os elementos biogênicos encontrados entre as cavidades da coquina foram conchas de *Heleobia australis*, conchas de bivalves (inteiras, desarticuladas e fragmentadas), valvas de ostracodes e foraminíferos. O sedimento ao redor da coquina apresentou basicamente a mesma composição, sendo encontradas também espinhas de peixe (figura 6.66). A composição mineralógica é predominantemente de grãos de quartzo arredondados a subarredondados, e corroídos por ação de microrganismos.

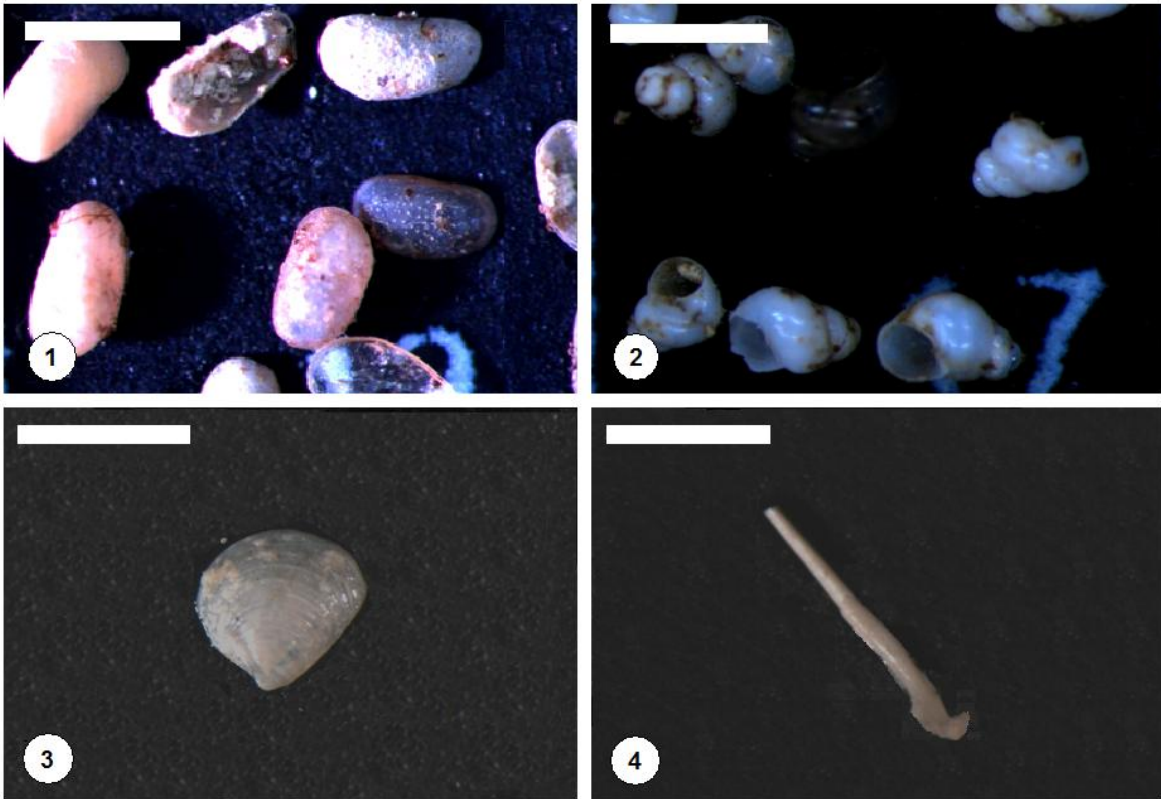


Figura 6.66: Lagoa Pitanguinha, RJ. Esteira microbiana associada à coquina. 1) Valvas de ostracodes. CP6/30. Escala de 1 mm; 2) Conchas de *Heleobia australis*. CP6/30. Escala de 2 mm; 3) Concha de bivalve. CP6/27B. Escala de 1 cm; 4) Espinha de peixe. CP6/27B. Escala de 0,5 cm.

Análise por MEV/EDS

A análise composicional revelou que os elementos mais representativos foram o carbono, oxigênio, cálcio e, em menor porcentagem, magnésio. Por ser constituída majoritariamente de conchas de moluscos, compostas de carbonato de cálcio, os resultados são coerentes e constantes para todos os tiros nestes constituintes.

O cimento apresentou composição calcítica, mostrando somente cálcio, oxigênio e carbono. O cálcio também foi encontrado associado à cristais de gipsita, esta extremamente abundante e variando de poucos micrômetros até cerca de 1 milímetro (figura 6.67).

Alguns espectros revelaram a presença de magnésio, este associado à dolomita. Também foram detectados altos teores de elementos como zircônio e estrôncio, estes provavelmente relacionados a seus sulfatos, estes sendo possíveis produtos de metabolismo de bactérias presentes na esteira microbiana (figura 6.67).

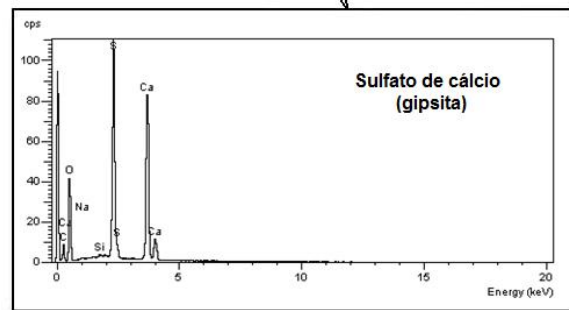
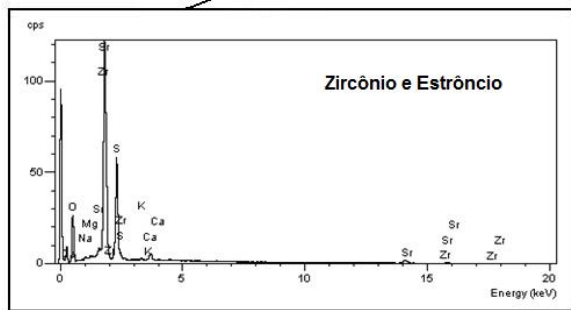
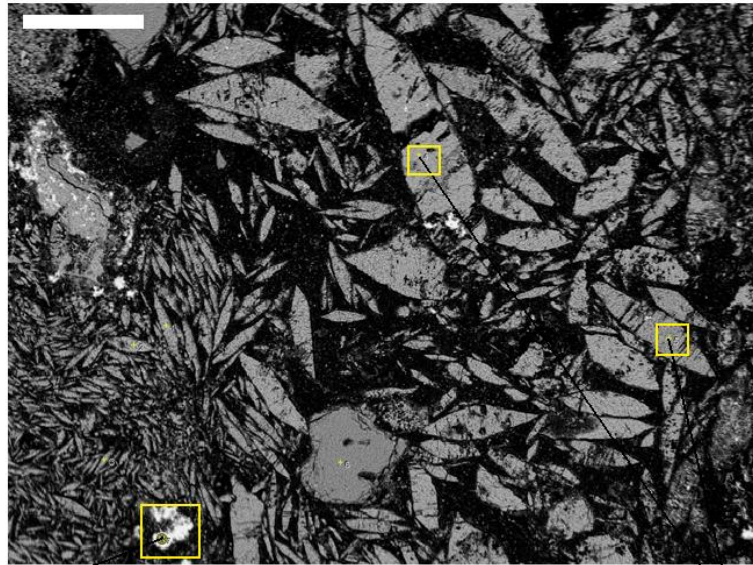


Figura 6.67: Lagoa Pitanguinha, RJ. Esteira microbiana associada à coquina. Ponto à esquerda evidenciando composição de elementos Zircônio (Zr) e Estrôncio (Sr), e ponto à direita evidenciando cristais de gipsita. CP6/30. Escala de 200 μ m.

7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As discussões sobre os resultados obtidos com a presente pesquisa estão apresentadas de modo distinto para cada local de estudo, seguindo a ordem dos mais recentes para os mais antigos. O motivo para dispor as discussões nesta sequência foi a obtenção de subsídios para o entendimento dos ambientes pretéritos (Permiano) através do que se observa nos dias de hoje nos ambientes recentes (Holoceno).

7.1 Ambientes holocênicos – Lagoas Salgada e Pitanguinha/RJ

Na Lagoa Salgada/RJ, os sedimentos associados aos microbialitos e ao redor deles, são compostos por clastos de origem orgânica e inorgânica. A participação das frações orgânica e inorgânica é semelhante para as bordas SW, NE e SE, como demonstrado nos gráficos das figuras 6.52, 6.53 e 6.54, sendo a fração inorgânica mais abundante em todas elas. A borda SE possui, em média, a maior fração orgânica, sendo esta representada principalmente por fragmentos vegetais, gastrópodes, oogônios de carófitas e foraminíferos. A fração inorgânica contém grãos de quartzo, algumas micas (muscovita e biotita) e, em maior quantidade, carbonato de cálcio. Os grãos de quartzo, em sua maioria arredondados, indicam que estes foram transportados até o local durante a evolução da lagoa e/ou que sofreram vários eventos de transporte durante o Neógeno-Quaternário.

Os clastos de origem orgânica, principalmente aqueles encontrados em meio a matriz (cimentados, como microgastrópodes, ostracodes e foraminíferos) são responsáveis por influenciar o desenvolvimento das laminações e colunas dos microbialitos. Muitos destes organismos se alimentam das comunidades microbianas responsáveis pelo desenvolvimento das estruturas. Os foraminíferos dos gêneros *Bolivina*, *Textularia* e *Triloculina*, são detritívoros, enquanto que foraminíferos dos gêneros *Ammonia*, *Elphidium*, *Miliolinella*, *Quinqueloculina* e *Rosalina* são detritívoros e/ou herbívoros. Todos estes gêneros foram encontrados em meios aos sedimentos, tanto cimentados como soltos em meio a cavidades dos microbialitos, ou em meio à esteiras microbianas e oncóides não litificados. O mesmo ocorre na Lagoa Pitanguinha, com diferença na composição dos elementos biogênicos, estes com menor diversidade biológica.

Pode-se considerar que os organismos que se encontram cimentados na matriz como sendo contemporâneos ao desenvolvimento das laminações dos microbialitos, uma vez que fazem parte de sua estrutura. Estes organismos foram incorporados às acreções no tempo no qual estas estavam acontecendo, sendo, portanto, parautóctones em relação ao ambiente de formação destas estruturas. Sofreram um curto transporte por ação de corrente ou ondas, sendo alocados e trapeados na EPS durante a formação dos microbialitos e esteiras microbianas, tornando-se grãos no arcabouço das bioconstruções.

Na Lagoa Salgada, os elementos biogênicos encontrados soltos, ocupando as cavidades e espaços entre colunas, podem ter sido transportados até o local (parautóctones) ou, mais provavelmente, ocupavam estas cavidades como meio de proteção, reprodução ou para buscar alimento (alóctones). Tanto os alóctones quanto os parautóctones, quando mortos, também foram trapeados no momento de formação da estrutura. No caso dos parautóctones, podem ter sido alocados nos interstícios e cavidades dos microbialitos posteriormente por ação de ondas, ou ainda podem ter sido redepositados e removidos em várias ocasiões antes de cimentarem. Os elementos parautóctones encontrados soltos não exerceram influência na construção das estruturas microbianas.

Os crustáceos da ordem Tanaidacea foram encontrados somente nas bordas NE e SW, onde se encontravam os microbialitos, não ocorrendo no extremo SE, onde só havia esteiras microbianas. Estes crustáceos são tubícolas, isto é, constroem tubos calcáreos, os quais servem de estrutura de reprodução e acasalamento (Johnson *et al.*, 1982), sendo estes tubos encontrados em abundância entre os sedimentos associados aos microbialitos, principalmente aos não cimentados. O motivo pelo qual não tenham sido encontrados em locais de ausência de microbialitos pode ser pela preferência destas espécies em se alojarem entre as cavidades das bioconstruções, como forma de proteção contra predadores. A influência que estes exercem no desenvolvimento de estruturas microbiais se dá por apresentarem hábito detritívoro, depositívoro ou suspensívoro, podendo se alimentar de restos orgânicos e microalgas que formam as esteiras microbianas.

Os microbialitos da Lagoa Salgada apresentam três fases de desenvolvimento: uma basal, finamente laminada; uma intermediária, com textura mais heterogênea e com abundantes cavidades, e uma superior (topo), com laminações mais onduladas e definidas, sendo estas duas

últimas porções mais susceptíveis ao intemperismo e bioturbações. A porção basal corresponde ao período de forte influência marinha, caracterizada pelas laminações mais homogêneas e estratificadas, com presença de tubos de serpulídeos.

Na porção intermediária, ocorreu intensa atividade biológica, que ocasionou processos de bioerosão por ação de microrganismos, gerando porosidade. Nesta porção, a abundância de biossedimentos de origem de organismos detritívoros, herbívoros e pastadores, como foraminíferos, ostracodes e gastrópodes, é maior do que para a primeira fase de desenvolvimento (porção basal). O crescimento em abundância e número de espécies ao longo do período de desenvolvimento das estruturas microbianas pode ter exercido influência na diferenciação de crescimento entre a fase basal e intermediária. A presença de pelóides na fase intermediária também pode estar relacionada à maior presença destes organismos em meio às laminações. De acordo com Flügel (2004), a maioria dos pelóides são excrementos orgânicos litificados produzidos por organismos que ingerem carbonato, como poliquetas, gastrópodes e alguns crustáceos. Iespa *et al.* (2012) afirma que estes pelóides estão associados à preservação de colônias de cianobactérias cocóides. Da fase intermediária para a superior, houve influência de água doce, visto que no período de construção desta porção, a lagoa já mantinha comunicação com o Rio Açu.

Na fase superior, com o maior confinamento da lagoa e aumento da salinidade, a diversidade de organismos pastadores e herbívoros diminuiu, o que influenciou na morfologia da bioconstrução. As laminações se tornaram mais homogêneas, sem muitas divisões em colunas e domos. Apesar da influência destes organismos ter cessado após o aumento da salinidade da lagoa, outros organismos, como os crustáceos tanaidáceos, gamarídeos e esferomatídeos, hoje habitam a lagoa e se alimentam das microalgas que compõem as esteiras microbianas que lá se formam.

Nas esteiras microbianas da Lagoa Salgada, os elementos encontrados como conchas de microgastrópodes, ostracodes, foraminíferos, entre outros, fazem parte de sua estrutura (parautóctones), ou seja, coexistem com sua formação e crescimento. Alguns elementos, como sementes, oogônios de carófitas (alóctones) e conchas de microgastrópodes (parautóctones), podem ter sido apenas transportados até o local de crescimento das esteiras, sendo englobados na estrutura durante seu crescimento, não exercendo influência direta em seu desenvolvimento. No

entanto, microgastrópodes e ostracodes vivos presentes em meio a estas esteiras, podem influenciar o crescimento das colônias devido seus hábitos alimentares, assim como o fazem para os microbialitos.

Os oncóides estudados na borda SE da Lagoa Salgada não estavam litificados e, de acordo com Silva e Silva *et al.* (2007), indicam um sistema lagunar com circulação aberta, com áreas pouco profundas e energia moderadamente alta, sendo cianobactérias responsáveis pela união e aprisionamento de sedimentos na formação destas construções. Segundo os mesmos autores, as laminações claras nos oncóides indicam períodos mais secos, enquanto que as escuras indicam períodos mais úmidos. Estes oncóides situam-se em meio à esteira microbiana, com intensa atividade dos microrganismos. Resultados de MEV/EDS revelaram a presença de óxido de ferro, dolomita, gipsita, halita e fosfato de cálcio. A presença de óxido de ferro e gipsita sugerem condições evaporíticas e tempo de exposição dos sedimentos. O fosfato de cálcio pode ter sido resultado de atividade microbiana, uma vez que o excesso de matéria orgânica, quando degradado, permite a formação bioinduzida de apatita (Compton *et al.*, 1993), assim como a dolomita.

Na Lagoa Pitanguinha, os sedimentos associados à esteira microbiana e sedimentos ao redor, são compostos por clastos e bioclastos. Os elementos biogênicos são constituídos por ostracodes, microgastrópodes *Heleobia australis*, foraminíferos e bivalves, biota semelhante à encontrada na Lagoa Salgada. De acordo com Damazio *et al.* (2005), a presença de ostracodes sugere limitar a proliferação de alguns gêneros de cianobactérias. As relações ecológicas existentes na Lagoa Pitanguinha são, portanto, correspondentes às mantidas na Lagoa Salgada, com relação aos biogênicos e a microbiota que compõe as esteiras microbianas.

O estudo tafonômico da coquina associada à esteira microbiana da Lagoa Pitanguinha relaciona sua origem com eventos que se alternaram por colonização de organismos e formação de substrato. Inicialmente, ocorreu a colonização do ambiente por bivalves, gastrópodes, ostracodes e foraminíferos que constituíram um depósito de conchas, valvas e tecas. Eventos de alta energia ocasionaram o retrabalhamento deste depósito. Evidências como o arredondamento dos grãos observados em lâminas indicam intenso transporte. A fragmentação da maioria das conchas, e o arredondamento de suas bordas e marcas de abrasão, sugerem que houve retrabalhamento por ondas na região, estas possivelmente associadas a tempestades. Com o fim

do período de tempestades e predomínio de águas calmas, ocorreu a sedimentação da coquina, com posterior colonização da microbiota que deu origem a esteira microbiana que recobriu o substrato formado. As condições se tornaram ideais para a recolonização por ostracodes e foraminíferos, os quais se alimentam da microbiota da esteira.

A presença de cristais de gipsita em meio às esteiras microbianas da Lagoa Pitanguinha, indica períodos de alta taxa evaporação e clima semi-árido, característicos do presente da lagoa. O ressecamento das esteiras e a presença de halita corroboram com o clima. Thompson *et al.* (1990) demonstraram a habilidade da cianobactéria *Synechococcus*, Nägeli, 1849 de precipitar calcita, magnesita e gipsita. Este gênero de bactérias foi encontrado na Lagoa Pitanguinha por Damazio *et al.* (2005), inclusive com proliferação limitada pela presença de pastadores seletivos, como os ostracodes.

Os resultados de MEV/EDS revelaram presença de zircônio, este possivelmente associado ao silício e oxigênio, formando o mineral zircão ($ZrSiO_4$). A presença de pirita framboidal, esta encontrada dentro de um fragmento de semente em meio à esteira microbiana, indica atividade de bactérias redutoras de sulfato. A formação do mineral em meio a estes sedimentos está associada a processos químicos resultantes da decomposição de matéria orgânica por ação de bactérias redutoras de sulfato (Yanko *et al.*, 2003).

Na Lagoa Pitanguinha, a dolomita foi encontrada em meio à esteira microbiana. Na Lagoa Salgada, a dolomita ocorre por entre as laminações dos microbialitos e por entre as camadas das esteiras microbianas. Nos microbialitos há alternância entre laminações com precipitação de dolomita e de calcita magnesiana. De acordo com Bahniuk (2013), ocorre um enriquecimento progressivo em Ca-dolomita, da porção basal para a superior, com um decréscimo na porção superior. Este decréscimo possivelmente está relacionado com as mudanças na dinâmica da lagoa, como o aumento da salinidade e aporte de água doce, bem como está relacionado com a diminuição da atividade microbiana em relação à fase intermediária.

A dolomita de origem primária frequentemente é associada atividade microbiana, mas raramente é encontrada precipitando em ambientes modernos (Vasconcelos *et al.*, 1997), como nas lagoas hipersalinas fluminenses. A salinidade elevada e redução de sulfato são os principais fatores que induzem a precipitação de dolomita nessas lagoas, confirmando a teoria de formação

de dolomita por ação microbiana (van Lith *et al.*, 2012). Vasconcelos *et al.* (2012), através de experimentos com cepas isoladas de microrganismos aeróbicos, demonstrou que estes são capazes de induzir a precipitação de dolomita através da alteração metabolicamente mediada do pH do meio, com aumento da alcalinidade, o que gera a precipitação do mineral dentro da matriz EPS.

7.2 Ambientes permianos – Santa Rosa do Viterbo/SP

Em Santa Rosa do Viterbo, observa-se uma sequência na evolução do paleoambiente, iniciada com a formação de brecha intraformacional intercalada com esteiras microbianas, seguida do desenvolvimento de estromatólitos domais gigantes.

A brecha, localizada no chão da pedreira, é intraformacional, isto é, formada por clastos que se originaram dentro da própria bacia de deposição, uma vez que em sua composição se encontram fragmentos de esteiras microbianas, estes possivelmente gerados por ressecamento, desprendimento e transporte por curta distância até a região de formação da brecha. Outros clastos que compõem a estrutura são grãos de quartzo de forma predominantemente angular, o que também é um fator indicador de curto transporte. As esteiras microbianas encontram-se ora abaixo, ora acima e ora intercalada à brecha, o que indica que a estrutura pode ter sido formada ao mesmo tempo em que predominavam as esteiras no local num ambiente litorâneo.

Nas lâminas petrográficas relacionadas à brecha é comum a presença de sílica precipitada de maneira disseminada em meio à matriz calcítica (micrita), e não em nódulos, como geralmente ocorre quando há precipitação de carbonato de cálcio. Esta textura da sílica, chamada de sacaroidal, pode ser interpretada como um produto da substituição da calcita por sílica (Lovering, 1972), com a nucleação de cristais de quartzo dispersos aleatoriamente por entre os cristais de carbonato (Dong *et al.*, 1995). Assim, no caso estudado, a sílica em solução possivelmente se precipitou ao entrar em contato com o ambiente ácido provocado pela ação dos microrganismos que compunham as esteiras microbianas.

Os bioclastos associados às esteiras microbianas e à brecha intraformacional, consistem de conchas de bivalves, valvas de ostracodes e fragmentos de ossos de mesossaurídeos. As valvas de ostracodes foram encontradas inteiras, porém desarticuladas, o que indica que sofreram pouco

transporte dentro de seu próprio local de origem, sendo, portanto parautóctones. A maioria das espécies destes crustáceos são de hábito detritívoro, e se alimentam de matéria orgânica em decomposição (Coimbra & Bergue, 2004). O substrato de esteiras microbianas é um ambiente ideal para a proliferação destes organismos. As conchas de bivalves foram encontradas desarticuladas e fragmentadas, possivelmente sendo alóctones em relação ao ambiente das esteiras microbianas.

Os ossos de mesossaurídeos foram encontrados, em sua maioria, desarticulados, porém bem preservados, podendo-se distinguir vértebras, fêmures e costelas. Estes podem ser considerados parautóctones e, de acordo com Hachiro & Coimbra (1992), podem corresponder a *bone beds* tempestíticos depositados em planície de maré. Os mesmos foram encontrados em meio às laminações e entre as colunas dos estromatólitos domais, indicando, segundo Ricardi-Branco *et al.* (2006), que ambas comunidades existiram sincronicamente. Também segundo os autores, estes estromatólitos foram formados em condições praianas durante o Guadalupiano (Permiano Médio). Pela existência de ossos ainda articulados em meio a estas estruturas, pode-se inferir que, apesar das tempestades, não houve grande retrabalhamento, e o transporte sofrido não foi intenso. O fato de terem sido transportados até o local de formação dos estromatólitos e terem sido integrados nas laminações dos mesmos, ajudou na preservação dos ossos.

Resultados de MEV/EDS apontaram carbonato de cálcio com alto teor de magnésio para amostras da brecha. Com a Espectroscopia Raman, foi revelado que este carbonato constituía-se de dolomita, que apresenta assinatura espectral caracterizada por bandas com frequência de 1099 cm^{-1} , diferente de seu isomorfo, a calcita, esta por bandas com frequência de 1086 cm^{-1} (Boeyens, *et al.*, 2008).

Com relação à dolomita presente tanto na brecha, quanto nas esteiras e estromatólitos de Santa Rosa do Viterbo, esta pode ter sido produto do processo de substituição da calcita (dolomita secundária), mas a hipótese de que sua gênese pode estar associada à atividade microbiana pode ser considerada, pois o paleoambiente fornecia todas as condições necessárias para este tipo de precipitação. De acordo com Amaral (1971), a dolomita primária existente na Formação Irati indica ter havido condições de alta salinidade e, devido aos processos de evaporação, ocorreu a concentração de magnésio, que reagiu com o calcário presente dando origem às rochas dolomíticas. Segundo o mesmo autor, a dolomitização processou-se após a

deposição de lama carbonática, e ainda citou que, em amostra pertencente a uma pedreira em Laranjal, observou-se a dolomitização em áreas de concentração de carapaças do crustáceo *Liocaris*, e que o eventual aumento de CO₂ produzido pela decomposição destes organismos influenciou no processo de reação entre as soluções magnesianas e o carbonato de cálcio precipitado anteriormente.

Em Santa Rosa do Viterbo não foram encontrados evaporitos ou gipsita, que normalmente são associados aos dolomitos primários (como ocorre nas lagoas fluminenses, como as Lagoas Pitanguinha e Vermelha), como também observado pelo autor. Segundo o mesmo, este fato indica o suprimento contínuo de água do mar que, paulatinamente se concentrava, fornecendo o magnésio ativo na dolomitização. Por outro lado, Vasconcelos *et al.* (1997) propuseram um modelo para a precipitação de dolomita mediada por atividade microbiana na Lagoa Vermelha, RJ, no qual o nível de água é diminuído pela intensa evaporação, aumentando a salinidade, o que causa a concentração de íons SO₄²⁻ pelas bactérias redutoras de sulfato, e íons Mg²⁺ para a formação de Mg-calcita e dolomita, mediadas pela ação destes microrganismos dentro de uma lama rica em matéria orgânica. Em Santa Rosa do Viterbo, no período de formação das esteiras microbianas e brecha intrafomacional, o ambiente se assemelhava com os destas lagoas hipersalinas, com grande concentração de matéria orgânica produzida pelos tapetes microbiais. Resultados de Espectroscopia Raman revelaram bandas entre 1200 a 1400 cm⁻¹, características de grupos -CH, possivelmente relativos à matéria orgânica preservada, o que indica sua concentração em áreas de esteiras microbiana.

A ocorrência de estiólitos, tanto nas esteiras microbianas quanto nos estromatólitos, indica compactação mecânica após a deposição dos mesmos. De acordo com Flüglél (2004), a estiolitização contribui para a redução do volume em massa, alterando a altura original da unidade carbonática. Estes estiólitos, formados pela dissolução do carbonato, são observados em outras áreas da Formação Irati, como relatado por Amaral (1971), em faixas situadas entre os municípios de Rio Claro, Piracicaba e Laranjal.

As esteiras microbianas e estromatólitos apresentam fábrica fenestral, esta podendo ser resultado de diversos processos, como desprendimento de gás proveniente de matéria orgânica em decomposição, umidificação e desidratação de lama carbonática, ou por desidratação da

superfície da esteira, gerando rugas, com posterior levantamento e desprendimento do sedimento adjacente (Flügel, 2004).

A composição de bioclastos dos estromatólitos, exceto as conchas de bivalves, é a mesma das esteiras microbianas e brecha intraformacional. As análises macro e microscópicas dos estromatólitos mostraram que as laminações são muito homogêneas, apresentam estrutura de aspecto maciço e clastos, como grãos de quartzo, raramente são encontrados. Bahniuk (2013), em estudo de fácies microbialíticas da Formação Codó (Cretáceo, Bacia do Parnaíba, Nordeste brasileiro), descreve, para uma destas fácies, características visualmente parecidas com estas de Santa Rosa do Viterbo, mais maciças, formadas através de um processo sem trapeamento e aglutinação de sedimentos (Reid *et al.*, 2000), mas através de um processo de “amalgamação” (Vasconcelos *et al.*, 2013), no qual a precipitação ocorre *in situ*, com subsequente coalescência das camadas que formam as lâminas. As estruturas descritas não apresentam grãos detríticos entre as laminações, se assemelhando com o observado nos estromatólitos de Santa Rosa do Viterbo, sugerindo que estes podem ter sido resultado da precipitação carbonática seguindo o modelo de amalgamação. A autora também descreveu fácies laminadas, com intercalações de laminações contendo calcita, dolomita e quartzo, bem como observado na porção superior dos estromatólitos de Santa Rosa do Viterbo. O paleoambiente foi interpretado, para a fácies maciça, apresentando intensa evaporação, o que resultou em condições hipersalinas ideais para o desenvolvimento da estrutura estromatolítica, assemelhando-se às condições do período de crescimento das estruturas de Santa Rosa do Viterbo. Para as fácies laminadas, as águas apresentavam maior profundidade, com equilíbrio na entrada e saída de água, num período de expansão do corpo d'água.

A evolução paleoambiental da frente de lavra estudada em Santa Rosa do Viterbo indica que ocorreu uma elevação paulatina do nível relativo do mar desde a formação da brecha intraformacional com as esteiras microbianas, até o desenvolvimento dos estromatólitos. Durante a deposição da brecha carbonática, o ambiente se caracterizava por águas rasas e sujeito a períodos de seca, ou pequenas oscilações no nível do mar, indicados pelos fragmentos de esteiras microbianas em meio à brecha, resultantes de ressecamento e desprendimento do tapete microbial. Posteriormente, houve o estabelecimento de condições mais estáveis, com águas calmas, rasas e com maior salinidade, propício ao desenvolvimento do nível de esteiras

microbianas acima da brecha. Com a elevação do nível do mar, se desenvolveram os estromatólitos domais gigantes.

7.3 Ambientes permianos – Taguaí/SP

O afloramento de Taguaí se caracteriza como um ambiente com alternância de fases climáticas secas com outras mais úmidas, e também por alternância na energia envolvida no sistema, tendo ciclos de águas calmas e ciclos de tempestades. Esta ciclicidade se encontra evidenciada nos litotipos apresentados nas susseções das camadas estudadas, como também apresentado por Andreis *et al.* (2001).

A primeira deposição de carbonatos e esteiras microbianas visível no afloramento, o Nível 1, ocorreu em um sistema marinho hipersalino com águas rasas e calmas, no qual extensas áreas foram cobertas por esteiras microbianas. Da base ao topo das amostras, observa-se uma sequência composta inicialmente por oncóides, seguida de uma maior concentração de oóides (indicando aumento de energia do sistema), terminando novamente com maior concentração de oncóides, todos associados à esteira microbiana. Pode-se inferir que, no ambiente inicial (porção basal), acima de arenito oolítico (característicos de alta energia), o nível d'água se tornou baixo, com pouca energia envolvida (águas calmas), o que proporcionou condições para o desenvolvimento das esteiras microbianas e, conseqüentemente, a colonização de organismos detritívoros, como os ostracodes. Com a volta do aumento da energia associada a eventos de tempestades, foram transportados até as esteiras oncóides, oóides e intraclastos (porções intermediária e superior). A forma elíptica do córtex dos oncóides indica que estes podem ter sofrido um rápido soterramento quando ainda não estavam totalmente litificados. Outro fator que corrobora com a hipótese do rápido soterramento é o fato de as valvas de ostracodes encontradas estarem compactadas, o que provavelmente ocorreu antes da substituição de sua composição original por calcita, visto que esta substituição poderia conferir uma maior resistência ao peso do pacote acima. A presença de pelóides pode estar associada à preservação de colônias de microrganismos.

A sequência continuou com a deposição de camadas siliciclásticas associadas com a elevação do nível do mar, com um clima mais úmido, tornando-se gradativamente mais seco, com conseqüente aumento da salinidade, até a deposição da seguinte camada carbonática (Nível 2), na qual novamente aconteceu a deposição de carbonatos. No Nível 2 há evidências de eventos de tempestade e alta energia envolvendo o transporte de clastos. A abundância de intraclastos em meio ao carbonato é alta, o que indica maior transporte e maior energia envolvida do que a de outros níveis. Os oóides deste nível apresentam uma coloração escura, relativa à concentração de matéria orgânica, bem como o córtex dos oncóides, a maioria de núcleo quartzoso e arredondado, o que indica que estes foram bem transportados antes de serem alocados até as esteiras microbianas. A deposição deste nível, de modo geral, se iniciou com períodos mais calmos na deposição do *wackstone* (porção basal), seguido de eventos de tempestade na deposição do *packstone* (porção intermediária), tornando o ambiente mais calmo na deposição do *wackstone* da porção superior.

A deposição de siltitos acima do nível carbonático 2 indica uma nova mudança ambiental, na qual houve aumento do nível do mar, este com águas calmas. Com a posterior diminuição do nível d'água, surgiram porções emersas, as quais ficaram expostas à ação de ventos, como evidenciado no oosparito com estratificações cruzadas situado abaixo do nível carbonático 3. Com a posterior elevação do nível do mar, porém ainda com águas rasas, novamente ocorreu deposição de carbonatos (Nível 3). Novamente surgem evidências de esteiras microbianas, estas periodicamente soterradas por aporte de oóides e oncóides, estes transportados por tempestades, caracterizando novos períodos de alta energia. A presença de oóides e oncóides de córtex de aragonita indica que em sua formação não teve influência de água doce. Por estes estarem bem preservados, significa que sua diagênese foi muito rápida (Flügel, 2004).

De acordo com Ng *et al.* (2012), em estudo de níveis microbiais no bairro Bocaina, em Taguaí, o início da deposição dos carbonatos se deu a partir do momento em que o aporte de siliciclastos diminuiu e a salinidade do ambiente aumentou, com a diminuição da pluviosidade. Segundo os autores, os níveis de oncólitos apresentam episódios de deposição rápida, por eventos de alta energia, como ação de ondas de tempestades, com erosão e redeposição desordenada dos oncóides, estes alóctones ou parautóctones, em condições de águas rasas, conclusões que corroboram com as observações feitas nesta pesquisa.

As análises de MEV/EDS revelaram, para os níveis 1 e 3, a presença de sulfato de bário (barita), este possivelmente com formação mediada por ação biológica, junto à precipitação de dolomita em esteiras microbianas. De acordo com Sanz-Montero *et al.* (2009), a co-precipitação de barita com dolomita envolve complexas interações entre diferentes microrganismos, e reforça a idéia de formação de dolomita por ação biológica. A intempérie de feldspatos pode ter sido a fonte de bário a ser ligada com o sulfato. Microrganismos metabolizantes de enxofre são capazes de mediar a saturação de bário (Senko *et al.*, 2004), porém, a sua influência sobre o desenvolvimento estrutural da barita é mal compreendida (Bonny & Jones, 2007). De acordo com Bonny & Jones (2008), bactérias oxidantes de enxofre e EPS associado são substratos adequados para a precipitação de barita, e que este processo pode ser melhor desenvolvido sob condições anóxicas. Uma vez que as esteiras microbianas dos níveis carbonáticos 1 e 3 foram soterradas pelo aporte de oncóides, oóides, clastos e lama carbonática, o ambiente se tornou ideal para a precipitação de barita de origem biogênica.

A aplicação da técnica de Espectroscopia Raman permitiu obter informações sobre a composição molecular das amostras dos níveis carbonáticos, como a detecção de calcita e dolomita, tanto na matriz quanto nos oncóides, a detecção de hematita em meio ao córtex dos oncóides, e concentrações de matéria orgânica em meio à matriz. Associados a estas análises, foram realizados mapeamentos de distribuição de minerais em áreas de interesse nas amostras estudadas, como, por exemplo, regiões de matriz, revelando que a dolomita apresenta-se de forma aleatória em meio à calcita; oncóides, cujo mapeamento possibilitou delimitar núcleo quartzoso e córtex calcítico, e áreas de concentração de matéria orgânica em meio à esteira microbiana.

De acordo com Suguio (1974), as porções argilosas indicam períodos de deposição siliciclásticas concomitantes à deposição dos carbonatos, o que está de acordo com o observado nos níveis 2 e 3, nos quais a argila ocorre em meio a matriz carbonática. A presença de óxido de ferro como hematita, detectada pelas análises de MEV/EDS e corroboradas pela Espectroscopia Raman, indica períodos de exposição subaérea do sistema.

As análises de MEV/EDS também detectaram a presença de óxido de titânio (possivelmente relacionado ao rutilo) em diversos pontos relacionados aos intraclastos em meio à matriz carbonática. Este mineral é comum em ambientes sedimentares, devido sua resistência a processos químicos e físicos.

7.4 Comparações entre os ambientes antigos e atuais

Há similaridades nos ambientes de formação das esteiras microbianas, sendo estes rasos, hipersalinos e de clima quente e seco, como os sugeridos para o Subgrupo Irati (Hachiro, 1996) e para a Formação Teresina (Rohn, 1994). Por outro lado, resultados como a presença de sulfato de bário (barita) nas amostras permianas de Taguaí, indicam que neste paleoambiente houve a presença de sulfobactérias, estas ativamente presentes nas lagoas Salgada e Pitanguinha, bem como em outras lagoas fluminenses. Nesta pesquisa, foram apontadas evidências do metabolismo destes microrganismos, como a pirita framboidal na Lagoa Salgada. Diversos autores confirmam a presença de bactérias redutoras de sulfato através da identificação taxonômica, como apresentado por Damazio *et al.* (2005) para a Lagoa Pitanguinha, e por Silva e Silva (2002).

A presença de elementos biogênicos comuns, como ostracodes e moluscos bivalves, correlaciona a biota dos dois períodos devido aos ambientes permianos terem sido semelhantes ao atual encontrado nas lagoas Salgada e Pitanguinha. Nas amostras permianas, a presença de óxido de ferro indica período de exposição do sistema, assim como ocorre com as esteiras em formação das amostras holocênicas. Diferenças podem ser exemplificadas pela maior diversidade de biogênicos nas amostras recentes, e por associações de certos organismos às suas esteiras, como foraminíferos na Lagoa Pitanguinha, e microgastrópodes na Lagoa Salgada, sendo estes extremamente abundantes e de substancial influência no desenvolvimento dessas esteiras. Esta diferença na biodiversidade dos sedimentos biogênicos entre as amostras holocênicas e permianas pode ser explicada pelo fato de que, nesse período, a Bacia do Paraná havia perdido a conexão com o oceano (Milani *et al.*, 2007; Rohn, 1994) durante a deposição do Subgrupo Irati, se encontrando em fase de franca continentalização.

Outra diferença marcante é a presença de restos de grandes vertebrados, como os mesossaurídeos, em meio aos estromatólitos de Santa Rosa do Viterbo, sendo que nos estromatólitos da Lagoa Salgada, em meio à sua matriz, a fração de biogênica se limitou a invertebrados e microrganismos. A coexistência destes estromatólitos (no período em que estavam em formação) com os vertebrados pode ser inferida, uma vez que os ossos são encontrados em meio às laminações e domos da estrutura. Porém, é difícil afirmar que ambos

ocupavam o mesmo ambiente (Ricardi-Branco *et al*, 2006). A fragmentação dos ossos encontrados em meio aos estromatólitos permianos sugere alta energia envolvida no transporte e deposição destes fragmentos no local onde cresciam as estruturas microbianas.

O afloramento de Taguaí caracteriza um ambiente com alternância de ciclos, apresentando fases mais secas e mais úmidas ao longo de sua deposição, assim como em Santa Rosa do Viterbo, este local, porém, com menor taxa de sedimentação. Como na Lagoa Salgada, suas esteiras microbianas sofriam a ação de detritívoros, como ostracodes e bivalves. Os ciclos nos quais são evidentes a ação de tempestades, como o Nível 2, que apresenta maiores indícios de transporte e retrabalhamento de sedimentos, são análogos ao regime da Lagoa Pitanguinha, no qual também ocorrem indícios de períodos de alta energia envolvida. Ng *et al.* (2012) aponta, em trabalho com níveis microbiais no bairro Bocaina, em Taguaí, a presença de carófitas, também encontradas no extremo SE da Lagoa Salgada. As carófitas são algas verdes que podem, inclusive, habitar lagunas hipersalinas (Feist, 2005), são resistentes a ambientes estressantes e com variação em suas condições físico-químicas, como a salinidade, o que foi observado tanto na Lagoa Salgada, ao longo de sua evolução, como na história deposicional dos níveis carbonáticos de Taguaí.

Em Santa Rosa do Viterbo, o paleoambiente consistia de um sistema clássico de desenvolvimento de estruturas microbiais costeiras em ambiente marinho restrito (fechado), assim como a Lagoa Salgada. Em ambos paleoambientes ocorria certo endemismo de espécies: o *Mesosaurus brasiliensis* no Permiano, e a espécie de crustáceo da ordem Tanaidacea, ainda não identificado (sendo considerada até então como uma possível espécie ainda não descrita). Outra relação que pode ser estabelecida para os dois locais de estudo é que, em ambos, os microbialitos apresentaram bioclastos em meio às suas laminações, sendo estes bem preservados devido ao trapeamento ocorrido no desenvolvimento das estruturas microbianas, e posterior cimentação pelo carbonato precipitado. Os principais bioclastos preservados nos microbialitos da Lagoa Salgada foram os microgastrópodes e foraminíferos, enquanto que nos estromatólitos de Santa Rosa do Viterbo foram os ossos de mesossaurídeos.

Os ostracodes foram os elementos comuns a todos os ambientes estudados, visto que as esteiras microbianas são ótimos habitats para estes organismos devido a grande produção de matéria orgânica e decomposição da mesma.

8. CONCLUSÕES

1 – Na Lagoa Salgada, organismos pastadores, detritívoros e herbívoros influenciaram no desenvolvimento dos microbialitos por se alimentarem de microalgas, microrganismos e matéria orgânica associada. Tal influência continua até os dias de hoje nas esteiras microbianas que crescem no local, bem como na Lagoa Pitanguinha;

2 – Organismos cimentados nos microbialitos da Lagoa Salgada são contemporâneos ao crescimento destes. Àqueles considerados parautóctones, como ostracodes, microgastrópodes e foraminíferos, exerceram influência direta no desenvolvimento das bioconstruções;

3 – Os microbialitos da Lagoa Salgada apresentam três fases de desenvolvimento: uma basal, que sofreu forte influência marinha; uma intermediária, com intensa atividade biológica microbiana e predação por pastadores e detritívoros; e uma superior, com aumento na salinidade e diminuição da influência dos predadores;

4 – A coquina associada à esteiras microbianas da Lagoa Pitanguinha teve sua gênese relacionada a eventos marcados por alternância de colonização de organismos e sedimentação do substrato, e também com alternância de eventos de alta energia e períodos de águas calmas, similar à ciclicidade observada no afloramento de Taguaí;

5 – A presença de gipsita nas Lagoas Salgada e Pitanguinha indica períodos de intensa evaporação e aridez, como no período antecedente à formação da brecha intraformacional de Santa Rosa do Viterbo, no qual houve o ressecamento e desprendimento dos fragmentos de esteiras microbianas;

6 - O afloramento de Santa Rosa do Viterbo, em sua evolução, teve a elevação do nível do mar da formação da brecha até o desenvolvimento dos estromatólitos. Na deposição da brecha, as águas eram rasas, com períodos de seca e oscilações no nível d'água, que posteriormente se tornaram calmas e mais salinas, período o qual se desenvolveram as esteiras microbianas acima da brecha. Os estromatólitos se desenvolveram após o aumento do nível do mar;

7 – As relações ecológicas desenvolvidas nos afloramentos de Santa Rosa do Viterbo e Taguaí apresentam correlação com as relações observadas nas lagoas Salgada e Pitanguinha, tendo como elementos comuns à todas as áreas estudadas as esteiras microbianas e ostracodes. Também são comuns aos ambientes a presença de sulfobactérias, evidenciada pelos traços metabólicos como pirita (Lagoa Salgada) e a barita (Taguaí);

8 – Os microbialitos da Lagoa Salgada sofreram maior influência de atividade de predação e herbivoria por parte de invertebrados, o que pode ter sido um fator relevante para a limitação do crescimento destas estruturas em sua fase intermediária, em comparação com os estromatólitos de Santa Rosa do Viterbo;

9 – O afloramento de Santa Rosa do Viterbo, no momento do desenvolvimento dos estromatólitos gigantes, apresentava um paleoambiente semelhante ao período de desenvolvimento da porção superior dos microbialitos da Lagoa Salgada, porém, sem o processo de trapeamento e aglutinação de sedimentos. O afloramento de Taguaí tem história deposicional similar com a história da Lagoa Pitanguinha, marcada pela ciclicidade climática e pela colonização e recolonização de organismos;

10 – A origem da dolomita para todas as áreas de estudo pode ser primária, uma vez que todos os ambientes apresentaram, em determinados momentos da deposição dos sedimentos, as condições físico-químicas e biológicas ideais para a precipitação do mineral, como a presença dos microrganismos mediadores, alta salinidade, intensa evaporação e condições anóxicas;

11 – A técnica de Espectroscopia Raman, juntamente com o mapeamento de áreas das amostras, associada à técnica de MEV/EDS, é uma ótima ferramenta para a caracterização composicional de microbialitos e esteiras microbianas fósseis, podendo ser muito útil na compreensão do desenvolvimento destes.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adams, A.E.; Mackenzie, W.S. 2011. *A Colour Atlas – Carbonate Sediments and Rocks Under the Microscope*. Mason Publishing, 180 p.
- Almeida, F.F.M. 1980. Tectônica da Bacia do Paraná, Brasil. Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), Relatório, 14091.
- Amaral, S.E. 1971. Geologia e petrologia da formação Irati (Permiano) no estado de São Paulo. Boletim IGA, **2**:03-81.
- Andreis, R. R., Carvalho, I. S. 2001. A Formação Corumbataí (Permiano Superior -Triássico Inferior, Bacia do Paraná) na Pedreira Pau Preto, Município de Taguaí, São Paulo, Brasil: Análise Paleoambiental e das Pegadas Fósseis. Revista Brasileira de Geociências, **2**:33 – 46.
- Bahniuk, A. M. 2013. *Coupling Organic and Inorganic Methods to Study Growth and Diagenesis of Modern Microbial Carbonates, Rio de Janeiro State, Brazil: Implications for Interpreting Ancient Microbialite Facies Development*. Tese de Doutorado, Instituto Federal Suíço de Tecnologia – ETH Zürich, 170 p.
- Boeyens, J.C.A., Ogilvie, J.F. 2008. *Models, Mysteries and Magic of Molecules*. Springer. p.10-11.
- Bonny, S., Jones, B. 2007. *Barite (BaSO₄) biomineralisation at Flybye Springs, a cold sulphur spring system in Canada's Northwest Territories*. Canadian Journal of Earth Sciences, **44**:835–856.
- Bonny, S., Jones, B. 2008. *Experimental precipitation of Barite (BaSO₄) among streamers of sulfur-oxidizing bacteria*. Journal of Sedimentary Research, **78**:357–365.
- Burne, R.V. & Moore, L.S. 1987. *Microbialites: organosedimentary deposits of benthic communities*. Palaios, **2**:241-254.

- Caires, E.T. 2005. Tratamento espacial dos dados paleontológicos do Subgrupo Irati no Estado de São Paulo – Brasil. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 59 p.
- Cangemi, M., Bellanca, A., Borin, S., Hopkinson, L., Mapelli, F., Neri, R. 2010. *The genesis of actively growing siliceous stromatolites: Evidence from Lake Specchio di Venere, Pantelleria Island, Italy*. *Chemical Geology*, **276(3)**: 318-330.
- Choquette, P.W., James, N.P. 1987. *Diagenesis, 12, Diagenesis in limestones, 3, The deep burial environment*. *Geoscience Canada*, **14**: 3-35.
- Cloud, P. & Dardenne, M. 1973. *Proterozoic age of the Bambuí Group in Brazil*. *Geological Society of America Bulletin*, **84**:1673-1676.
- Coimbra, J.C., Bergue, C.T. 2004. Ostracodes. In: Carvalho, I.S. *Paleontologia*. Rio de Janeiro, Interciência, p. 719-732.
- Cope, E.D. 1886. *A contribution to the Vertebrate Paleontology of Brazil*. *Proceedings of the American Philosophical Society*. **23**:7-15.
- Cortez, I. 2008. Briófitas e Carófitas da Formação Teresina da Bacia do Paraná, Brasil. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto de Geociências, Universidade de Campinas, 100 p.
- Damazio, C.M., Silva e Silva, L.H., 2006, Cianobactérias em esteiras microbianas coloformes da lagoa Pitanguinha, Rio de Janeiro, Brasil: *Revista Brasileira de Paleontologia*, **9**: 165-170.
- Damazio, C.M., Silva e Silva, L.H., Iespa, A.A.C, Senra, M.C.E. 2005. Correlações entre cianobactérias endolíticas e esteiras microbianas hipersalinas da Lagoa Pitanguinha, Neocaraternário do Rio de Janeiro, Brasil. *Revista da Universidade de Guarulhos*, **6**: 11-16.

- Decho, A.W. 2002. *Extrapolymer microdomains as a structuring agent for heterogeneity within microbial biofilms*. In: Riding, R.E., Awramik, S.M. (Eds.), *Microbial Sediments*. Springer-Verlag, Berlin, p.1-9.
- Dong, G., Morrison, G., Jaireth, S. 1995. *Quartz texture in epithermal veins, Queensland – Classification, origin and implication*. *Economic Geology*, **90**:1841-1856.
- Dunham, R. J. 1962. *Classification of carbonate rocks according to depositional texture*. In Ham, W. E.. *Classification of carbonate rocks*.
- Dupraz, R.C., Reid, P., Braissant, O., Decho, A.W., Norman, R.S., And Visscher, P.T. 2008. *Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats*. *Earth-Science Reviews*, **96**: 141-162.
- Embry, A. F.; Klovan, J. E. 1971. *A Late Devonian Reef Tract on Northeastern Banks Islands, Northwest Territories*. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, **19**:730-781.
- Fairchild, T.R. 1977. *Conophyton and other columnar stromatolites from the Upper Precambrian Açungui Group near Itapeva, SP, Brazil*. I Simpósio Regional de Geologia, São Paulo, SP, Atas, p.179-198.
- Faria, R.S., Ricardi-Branco, F. 2010. *Lepidophylloides corumbataensis sp. nov. from Guadalupian in the Paraná Basin, Southern Brazil*. *Review of Paleobotany and Palynology*, **160**, p. 135-142.
- Feist, M. 2005. Charophyta. In: Moore, R.C & Kaesler, Roger L. (eds). *Treatise on Invertebrate Paleontology, Part B Protoctista I*. The Geological Society of America and The University of Kansas, Boulder and Lawrence, 170p.
- Flemming, H, Neu, T., Wozniak, D. 2007. *The EPS matrix: The 'house of biofilm cells'*. *Journal of Bacteriology*, **189**:7945–7947.

- Flügel, E. 2004. *Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application*. Springer, Heidelberg, 976 p.
- Compton, J.S., Hodell, D.A., Garrido, J.R., Mallinson, D.J. 1993. Origin and age of phosphorite from the south-central Florida Platform: Relation of phosphogenesis to sea-level fluctuations and (δ) ^{13}C excursions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **57**:131-146.
- Friedman, G.M.; Ali, S.A. 1981. *Diagenesis of carbonate rocks - Cement-porosity relationships*. S.E.M.P., Reprint series, 10.295 p.
- Hachiro, J., Coimbra, A. M., Matos, S.L.F. 1993. O Caráter cronoestratigráfico da Unidade Irati. In: SBG, Simpósio sobre Cronoestratigrafia da Bacia do Paraná, 1, Resumos, IG-UNESP, p. 62-63.
- Hachiro, J., Coimbra, A. M., 1992. *Bone beds e shell beds* como feições diagnósticas de tempestitos da Formação Irati no Estado de São Paulo. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 37, São Paulo. Anais: 511-512.
- Hachiro, J. 1996. O Subgrupo Irati (Neopermiano) da Bacia do Paraná. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 196 p.
- Hazen, R.M., Papineau, D. 2008. Mineral evolution, *American Mineralogist*, 93, pp. 1693-1720.
- Iespa, A.A.C., Iespa, C.M.D., Borghi, L. 2012. Evolução paleoambiental da Lagoa Salgada utilizando microbialitos, com ênfase em microfáceis carbonáticas. *Revista Geociências, UNESP*, **31**:371-380.
- Johnson, S.B., Attramadal, Y.G. 1982. A functional-morphological model of *Tanais cavolinii* Milne-Edwards (Crustacea, Tanaidacea) adapted to a tubicolous life-strategy. *Sarsia*, **67**: 29-42.
- Konhauser, K. (Eds.) 2007. *Introduction to Geomicrobiology*. Blackwell Publishing, Inglaterra, 425 p.

- Lawrence, J.R., Swerhone, G.D.W., Leppard, G.G., Araki, T., Zhang, X., West, M.M., Hitchcock, A.P. 2003. *Scanning Transmission X-Ray, Laser Scanning, and Transmission electron microscopy mapping of the exopolymeric matrix of microbial biofilms*. Applied and Environmental Microbiology, **69**:5543-5554.
- Lemos, R.M.T. 1996. Estudo das fácies deposicionais e das estruturas estromatolíticas da lagoa Salgada, Rio de Janeiro. Programa de Pós-graduação em Geofísica Marinha Geoquímica, Universidade Federal Fluminense, Dissertação de Mestrado, 126 p.
- Lovering, T.G. 1972, *Jasperoid in the United States -its characteristics, origin, and economic significance*. U.S. Geological Survey Professional Paper 710, 164 p.
- Mac Gregor, J. H. 1908. *Mesosaurus brasiliensis* nov. sp., Parte II. In: Relatório final da Comissão de Estudos das Minas de Carvão de Pedra do Brasil. Rio de Janeiro: DNPM, 1988. p. 303-617.
- Martin, L., Suguio, K., Dominguez, J.M.L., Flexor, J.M., Azevedo, A.E.G. 1984. Evolução da planície costeira do Rio Paraíba do Sul (RJ) durante o Quaternário: Influência do nível do mar. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 33, Rio do Janeiro, 1984, SBG. Anais, **1**: 84 - 97.
- Mezzalira, S. 1980. Bioestratigrafia do Grupo Passa Dois no Estado de São Paulo. Revista do Instituto Geológico, **1**:15-34.
- Milani, E.J.; Melo, J.H.G.; Souza, P.A.; Fernandes, L.A. e França, A.B. 2007. Bacia do Paraná. In: Cartas Estratigráficas: Boletim de Geociências da Petrobrás. **15(2)**:265-287.
- Ng, C., Rohn, R., Fairchild, T. R., Maranhão, M. S. A. S. 2012. Microbialitos permianos da Formação Teresina em Bocaina (Município de Taguaí, SP, Bacia do Paraná). In: 46º Congresso Brasileiro de Geologia e 1º Congresso de Geologia dos Países de Língua Portuguesa, Santos. Anais, 2012.

- Noffke, N. 2010. *Geobiology Microbial Mats in Sandy Deposits from the Archean Era to Today*. Springer-Verlag, Berlin, 194 p.
- Papaterra, G.E.Z. 2010. Pré-Sal: Conceituação Geológica sobre uma nova fronteira exploratória no Brasil. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (RJ), Dissertação de Mestrado, 81p.
- Petri, S., Fúlfaro, V.J. 1983. *Geologia do Brasil*. EDUSP, São Paulo, 631p.
- Raja Gabaglia, G.P. & Milani, E.J., 1990. Origem e Evolução de Bacias Sedimentares. Petrobrás, Rio de Janeiro, p.115-126.
- Reid, R.P., Visscher, P.T., Decho, A.W., Stolz, J.F., Beboutk, B.M., Dupraz, C., Macintyre, I.G., Paerl, H.W., Pinckney, J.L., Prufert-Beboutk, L., Steppe, T.F.; DesMarais, D.J. 2000. *The role of microbes in accretion, lamination and early lithification of modern marine stromatolites*. *Nature*, **406**:989-992.
- Ricardi-Branco, F.; Caires, E.T.; Silva, A.M.. 2006. Campo de Estromatólitos Gigantes de Santa Rosa de Viterbo, SP - Excelente registro do litoral do mar permiano Irati, Bacia do Paraná, Brasil. In: Winge,M.; Schobbenhaus,C.; Berbert-Born,M.; Queiroz,E.T.; Campos, D.A.; Souza,C.R.G.; Fernandes,A.C.S. (Edit.) *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*. Publicado na Internet em 24/11/2006 no endereço <http://www.unb.br/ig/sigep/sitio125/sitio125.pdf>.
- Riding, R. 1991. *Classification of microbial carbonates*. In: *Calcareous Algae and Stromatolites*. Springer-Verlag, New York, p. 21-51.
- Riding, R. 2011. *The nature of Stromatolites: 3,500 Million Yers of History and a Century of Research*. In: Reitner, J., Quéric, N.-V., and Arp. G. (eds), *Advances in Stromatolite Geobiology*. Springer, Heidelberg, *Lecture Notes in Earth Sciences*, **25**: 29-74.

- Rodrigues, M.A., Carvalho, M.G.P., Dias, G.T.M. 1981. Interpretação Paleoambiental das Lagoas Salgadas e das Ostras (RJ) Brasil, Com Base em Foraminíferos. In: Congresso Latino-Americano de Paleontologia, 2. Porto Alegre, UFRGS, p.893-906.
- Rohn, R. 1994. Evolução Ambiental da Bacia do Paraná durante o Neopermiano no leste de Santa Catarina e do Paraná. São Paulo, Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2v., 327p.
- Sallun Filho, W.; Fairchild, T. R.; Almeida, F.F.M.; França, D.R. 2010. Estromatólitos de Nova Campina e Iteva, SP – Primeiros estromatólitos descritos na América do Sul. *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*, **3**:1-16.
- Sanz-Montero, M.E., Rodríguez-Aranda, J.P., García del Cura M.A. 2009. *Bioinduced precipitation of barite and celestite in dolomite microbialites - Examples from Miocene lacustrine sequences in the Madrid and Duero Basins, Spain*. *Sedimentary geology*, **222**:138-148.
- Senko, J.M., Campbell, B.S., Henriksen, J.R., Elshahed, M.S., Dewers, T.A., Krumholz, L.R. 2004. *Barite deposition resulting from phototrophic sulfideoxidizing bacterial activity*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **68**:773–780.
- Silva e Silva, L.H. 2002. Contribuição ao conhecimento da composição microbiana e química das estruturas estromatolíticas da lagoa Salgada, Quaternário do Rio de Janeiro, Brasil. Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, 176p.
- Silva e Silva, L.H.; Senra, M.C.E., Faruolo, T.C.L.M.; Carvalhal, S.B.V., Alves, S.A.P.M.N.; Damazio, C.M.; Shimizu, V.T.A.; Iespa, A.A.C. 2003. Distinção entre as esteiras microbianas da Lagoa Pitanguinha, Rio de Janeiro, Brasil. *Paleontologia em Destaque*, **44**:23.

- Silva e Silva, L.H.; Senra, M.C.E.; Faruolo, T.C.L.M.; Carvalhal, S.B.V.; Alves, S.A.P.M.N.; Damazio, C.M.; Shimizu, V. T.; Santos, R.C.; Iespa, A.A.C. 2004. Composição paleobiológica e tipos morfológicos das construções estromatolíticas da Lagoa Vermelha, Rio de Janeiro, Brasil. *Revista Brasileira de Paleontologia*, **7** (2): 193-198.
- Silva e Silva, L. H.; Iespa, A.A.C; Iespa, C. M. D. 2007. Considerações sobre Estromatólito do Tipo Domal da Lagoa Salgada, Estado do Rio de Janeiro, Brasil. In: *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, **30**:50-57.
- Silva e Silva, L.H., Srivastava, N.K., Iespa, A.A.C., Iespa, C.M.D. 2007. Evidência de oncóides na Lagoa Salgada, Norte do Estado do Rio de Janeiro, sudeste brasileiro. *Revista UnG – Geociências*, **6**:201-206.
- Schneider, R. L.; Mühlmann, H.; Tommasi, E.; Medeiros, R. A.; Daemon, R. F.; Nogueira, A. A. 1974. Revisão Estratigráfica da Bacia do Paraná. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 28, Porto Alegre, Anais, **4**:41-65.
- Spadafora, A., Perri, E., Mckenzie, J.A., And Vasconcelos, C. 2010. *Microbial Biomineralization Processes Forming Modern Ca:Mg Carbonate Stromatolites*. *Sedimentology*, **57**: 27-40.
- Srivastava, N.K. 1999. Estromatólitos Recentes, Lagoa Salgada, RJ. SIGEP 41.
- Stanley, S.M. 2006. *Influence of seawater chemistry on biomineralization throughout phanerozoic time: Paleontological and experimental evidence*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **232**:214–236.
- Stoodley, P.; Sauer, K.; Davies, D.G.; Costerton, J.W. 2002. *Biofilms as complex differentiated communities*. *Annual Review of Microbiology*, **56**:187–209.
- Sugio, K. & Mello e Souza, S.H. 1985. Restos de mesossaurídeos na Formação Corumbataí, Permiano da Bacia do Paraná, no Estado de São Paulo. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **57**:339-347.

- Suguio, K., Salati, E., Barcelos, J.H. 1974. Calcários oolíticos de Taguaí (SP) e seu possível significado paleoambiental na deposição da Formação Estrada Nova. *Revista Brasileira de Geociências*, **4**:142-166.
- Tebbutt, G.E., Conley, C.D., Boyd, D.W. 1965. *Lithogenesis of a carbonate rock fabric*. *Contrib. Geol.* **4**:1-13.
- Thompson, J.B., Ferris, G.F. 1990. *Cyanobacterial precipitation of gypsum, calcite and magnesite from natural alkaline lake waters*. *Geology*, **18**:995- 998.
- Tucker, M.E. 1991. *Sedimentary Petrology*. London, Blackwell Science Ltd, 252 p.
- Tucker, M.E. 2001. *Sedimentary Petrology: an introduction to the origin of sedimentary rocks*. Editor Blackwell Science, London, 260 p.
- Van Gemerden, H. 1993. *Microbial mats: a joint venture*. *Marine Geology*, **113**:3-25.
- Vasconcelos, C., Warthmann, R., Rivadeneyra, M., McKenzie, J.A. 2012. *Microbial Dolomite Precipitation under Aerobic Conditions: Results from Brejo do Espinho Lagoon (Brazil) and Culture Experiments*. In *Perspectives in Carbonate Geology: A Tribute to the Career of Robert Nathan Ginsburg*.
- Vasconcelos, C., Warthmann, R., Mckenzie, J., Visscher, P.T., Bittermann, A.G., And Van Lith, Y. 2006. *Lithifying microbial mats in Lagoa Vermelha, Brazil: Modern Precambrian relics?*. *Sedimentary Geology*, **185**:175–183.
- Vasconcelos, C., Mackenzie, J.A., Bernasconi, S., Grujic, D., And Tiens, A.J. 1995. *Microbial mediation as a possible mechanism for natural dolomite formation at low temperatures*. *Nature*, **377**:220–222.

- Vasconcelos, C., McKenzie, J.A. 1997. *Microbial mediation of modern dolomite precipitation and diagenesis under anoxic conditions (Lagoa Vermelha, Rio de Janeiro, Brazil)*. Journal of Sedimentary Research, **67**:378-390.
- Vasconcelos, C., Dittrich, M. and McKenzie, J.A., 2013. *Evidence of microbiocenosis in the laminae formation process of modern stromatolites*. Facies, in press.
- Vieira, P.C. 1980. Contribuição da Morfologia dos Fósseis para a Dedução de Paleoambientes. Revista do Instituto Geológico, **1(2)**:33-38.
- Visscher, P.T., Stoltz, J.F. 2005. *Microbial Mats as bioreactors: populations, processes and products*. Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology, **219**:87-100.
- Yanko, V., Arnold, A.J., Parker, W.C. 2003. *Effect of marine pollution on benthic foraminifera*. In Modern Foraminifera, Kluwer Academic Publishers. London. Barun K. SenGupta (ed). p 217-235.
- Van Lith, Y., Vasconcelos, C., Warthmann, R., Martins, J.C.F., McKenzie, J.A. 2012. *Bacterial sulfate reduction and salinity: two controls on dolomite precipitation in Lagoa Vermelha and Brejo do Espinho (Brazil)*. Hydrobiologia, **485**:35-49.

APÊNDICE A – Artigo “Temporal and spatial distribution of sediments associated with microbialites from the Salgada Lagoon, Rio de Janeiro, Brazil.”

TEMPORAL AND SPATIAL DISTRIBUTION OF SEDIMENTS ASSOCIATED WITH MICROBIALITES FROM THE SALGADA LAGOON, RIO DE JANEIRO, BRAZIL.

FRESIA RICARDI –BRANCO^{1*}, FLAVIA CALLEFO², RAFAEL A. CATALDO², LUIZ CARLOS R. PESSEDA³
FABIO CARDINALE BRANCO⁴ and ALEXANDRE C. VIDAL¹

¹*Departamento de Geologia e Recursos Naturais, Instituto de Geociências, Rua J. Pandia Calogeras, 51. Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 13083 -870, Campinas, SP, Brazil, fresia@ige.unicamp.br; vidal@ige.unicamp.br;*

²*Programa de pós-graduação em Geociências, Rua J. Pandia Calogeras, 51. Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 13083 -870, Campinas, SP, Brazil flacallefo@yahoo.com.br, rafaelcataldo@gmail.com*

³*Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Avenida Centenário, 303. Universidade de São Paulo – USP, 13416-000, Piracicaba, SP, Brazil, pessenda@cena.usp.br;*

⁴*Environmentality, rua Michigan, 177, 04566-000, São Paulo, SP, Brazil, fabio.tcl@uol.co.br*

* *Corresponding author e-mail: fresia@ige.unicamp.br*

RRH: MICROBIALITES FROM SALGADA LAGOON, BRAZIL.

LRH: RICARDI-BRANCO ET AL.

Keywords: bioconstructions, hypersaline, biogenics, taphonomy and Quaternary.

ABSTRACT

Microbial communities developed in many places during the Holocene and one of this was Salgada lagoon. The sediments associated with these communities were studied to know its vertical and spatial distribution and their influences on the development of communities, as well. The microbial reefs and mats were found on both sides and microbial mats and oncoids were distributed throughout the lagoon. ^{14}C dating shows that the establishment of the microbialites took place $\sim 3,020 \pm 80$ cal yr B.P., on firm ground of polychaetes along the NE edge and coquinas along the SW edge, suggesting a greater marine influence than currently found. The biogenic elements consist of microgastropod and bivalve shells, carapaces of Malacostraca and Ostracoda, foraminifers, fish scales, sea urchin spines, gyrogonites, stems, seed and unidentified elements. The most abundant biogenic were microgastropods and ostracods. The minerals consist mainly in quartz and calcite. The vertical distribution of cemented bioclasts that form part of the microbialite laminations showed homogenous in diversity, and similar to that found in sediments near these structures. Compared the bioclasts associated with microbial, currently active, they also present forms in common. Researches on microbial communities and associated bioclasts contribute to the environment reconstruction where these structures developed.

Keywords: bioconstructions, hypersaline, biogenics, taphonomy and Quaternary.

INTRODUCTION

The calcified microbial constructions studied here are called microbialites (Burne and Moore, 1987; Riding, 2011), since they cannot be classified as either stromatolites nor as thrombolites, because characteristics of the two are present in the same entities. These structures were constructed by benthic microbial communities, complex associations of prokaryote organisms (such as cyanobacteria and sulphobacteria), and eukaryote microalgae (diatoms and filamentous green algae). These communities interact with detritic sediments (Burne and Moore, 1987; Riding, 2011) and form microbial mats encompassing extracellular polymeric substance. From the microbial mats rise the formation of microbialites by trapping and binding sediments followed by calcification, or by direct precipitation of carbonate layers (e.g., Vasconcelos *et al.*, 1995; Dupraz *et al.*, 2009; Spadofora *et al.*, 2010; Riding, 2011, Reid *et al.*, 2011; Southam, 2012). The microbialites provide a fossil record furnishing information about the oldest forms of life on earth. Moreover, the compositional changes in the atmosphere and the chemical composition of marine water. They also provide information about the evolution of the microbial mats and the biotic interactions involved in their development (e.g., Riding, 2002, 2009, 2011; Vasconcelos *et al.*, 2006; Dupraz *et al.*, 2009).

These microbialites developed in few locations around the planet during the Holocene. Shark Bay in Australia and Exuma Cays in the Bahamas are world famous and have been studied for decades (e.g., Reid *et al.*, 1991, 1995, 2003, 2011; Dupraz *et al.*, 2004; Macintyre *et al.*, 2000; Andres and Reid, 2006; Eckman *et al.*, 2008).

In Brazil, the microbialites that developed during the Holocene in a hyper-saline lagoon are located in Salgada Lagoon, on the Cape of São Tome, in the northern part of the state of Rio de Janeiro, along the coast of the municipality of Campos. It is part of the deltaic system of the Paraíba do Sul River (Lemos, 1996; Srivastava, 2002). The lagoon has approximately 7 km long and 1.5 km wide, with a maximum depth of 1-1.5 m at the time of the present study (Fig. 1). The physico-chemical characteristics of the lagoon (Silva-e-Silva, 2002; Srivastava, 2002; Silva-e-Silva *et al.*, 2008) include the following: air temperature (between 28° and 31° C); water temperature (~26.9 °C); pH (8.2 to 9.7); electrical conductivity (52,000 to 86,200 ms/cm); salinity (4.2-6.4 ‰); total CO₂ (233.6 mg/l); dissolved O₂ (3.2 to 3.7 mg/l) and the water content

of calcium (71.8 ppm); magnesium (664 ppm); sodium (8,846 ppm) and silica dioxide (Si 1.3 mg/l).

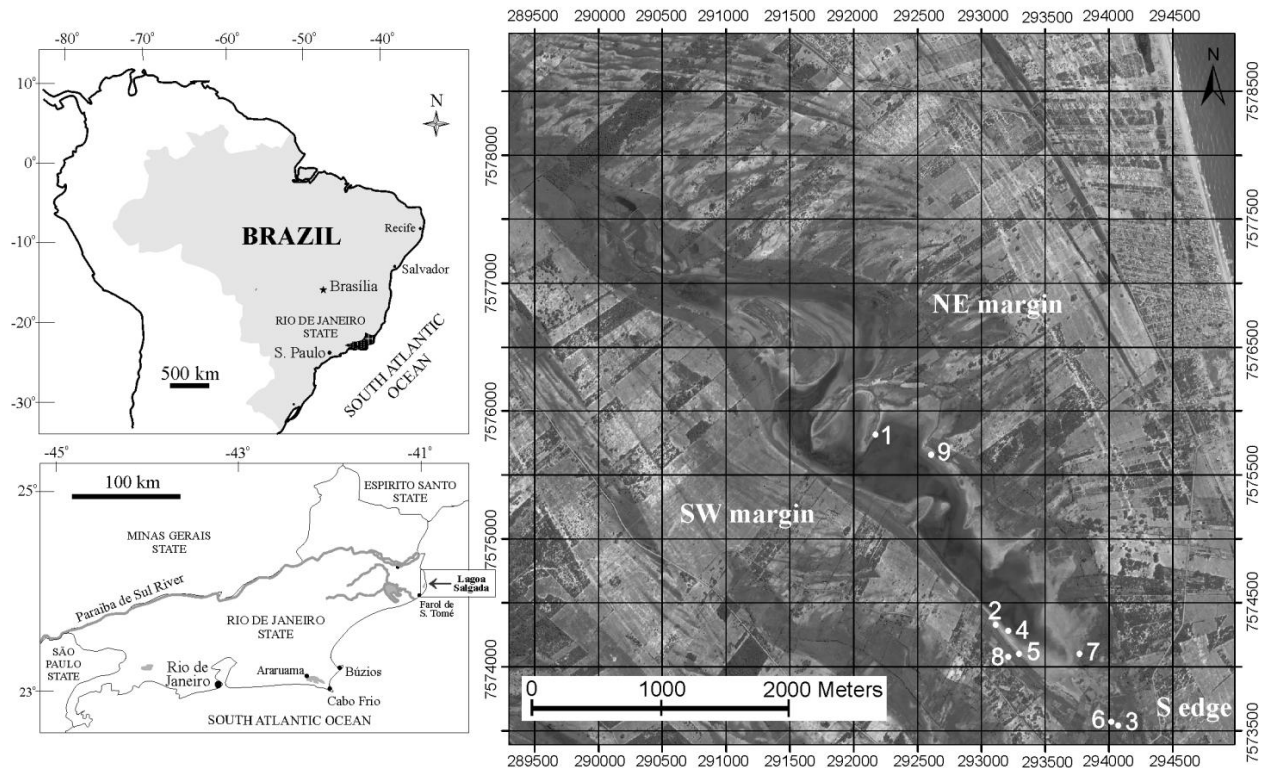


FIG.1. Map showing the location of Salgada Lagoon and sampling sites around it (QuickBird image - March 26th, 2004).

Quaternary Evolution

The development of Salgada Lagoon is related to the evolution of Paraiba do Sul river during the Holocene, and sea level variations during the past 7,000 years (Martin *et al.*, 1993; Dias and Kjerfve, 2009). These variations provoked a change in the mouth of the river, from a system of lagoons to the present system, where the river feeds directly into the Atlantic Ocean, depositing sand in parallel barriers along the coast; these barriers dam the seawater forming four consecutive lagoons known as Mololô, Ostras, Flecha and Salgada. These barriers also modify the morphology of the nearby coast of the cape of São Tomé. Some 3,600 cal yr B.P., the Salgada Lagoon already existed, and the development of the microbialites seems to have initiated soon after its formation (Coimbra *et al.*, 2000); this development may be related to a period of drier climate than what it is today (Toledo *et al.*, 2009).

The microbialites and microbial mats of the Salgada Lagoon have been described by various authors (Rodrigues *et al.*, 1981, Lemos 1996; Srivastava, 2002; Silva-e-Silva, 2002; Silva-e-Silva *et al.*, 2005, 2007a, 2007b, 2008; Silva-e-Silva and Senra, 2000; Senra *et al.*, 2006; Iespa *et al.*, 2011a). Similar structures are also found in other coastal lagoons of the state of Rio de Janeiro, such as those of the lagoons system of Araruama (Vermelha, Pitanguinha, and Pernambuco lagoons, Pau Fincado swamp, etc.), all with similar physico-chemical characteristics (Damazio and Silva-e-Silva, 2006; Iespa and Damazio-Iespa, 2009; Spadofora *et al.*, 2010; Delfino *et al.*, 2012). The literature review shows that most of the studies of microbialites and microbial mats in Rio de Janeiro state were designed to classify the cyanobacteria that form them (e.g., Silva-e-Silva *et al.*, 2004, 2005, 2006b, 2007c, 2007d, 2007e; Silva-e-Silva and Senra, 2000; Silva-e-Silva and Carvalhal, 2005; Damazio and Silva-e-Silva, 2006; Iespa *et al.*, 2009). Studies of their diagenesis during the Holocene are less frequent (Silva-e-Silva, 2002; Silva-e-Silva *et al.*, 2007b; Senra *et al.*, 2006; Iespa *et al.*, 2011b; McKenzie and Vasconcelos, 2009; Spadofora *et al.*, 2010). This paper aimed to provide information about the sediments (biogenic and minerals) associated with microbial communities (microbialites and microbial mats) of the Salgada Lagoon, and to establish the relationship between these structures and biogenic, once the bio-sedimentary structures and sediments associated fossilize together in the same layer. In order to reach these objectives, we used: (1) The analysis of the spatial distribution of microbial communities (microbialites and microbial mats), for better establish the sampling sites. We used remote sensing and verification in the field to establish the distribution; (2) ^{14}C dating and $\delta^{13}\text{C}$, to know the microbialite ages and possible environmental changes that have influenced the sedimentation; (3) Description and interpretation of organic and inorganic sediments associated with laminations and interstices of microbialites, microbial mats and their surroundings; (4) Comparison with other microbialite modern sites.

MATERIALS AND METHODS

Mapping by remote sensing and the distribution of the microbial communities in the Salgada Lagoon.

The pre-mapping of microbialite and mat distribution present in the Salgada Lagoon was based on two QuickBird images taken at different times; one in a dry period (March 26th, 2004) and another when the lagoon was full (August 8th, 2009). We used ERDAS Image® and ArcGIS® software to treat the images, and by following the procedures below, we could show where photosynthesis was taking place.

1. Linear highlighting of contrasts in the panchromatic image, which presents the best spatial resolution. Images in tones of grey were then constructed, and used for visualizing the details of the land.
2. Elaboration of the Normalized Division Vegetation Index (NDVI), using the formula $(NIR-R)/(NIR+R)$. Where: NIR = Near-Infrared and R = Red
3. Portrayal of the images in false color, using NDVI images in red, the red band in green, and the green band in blue. All of the images were subjected to linear contrast highlighting, so that the areas where photosynthesis was taking place were highlighted in red.
4. Verification in the field, matching the images generated by ArcGIS®. In the field, we worked half portion of the lagoon, because the access was easier and the area was best preserved. Altogether, 60 points were verified.

Sampling

Four trips were made to the field to collect samples, and make the remote sensing analyses— in October 2009, in May and in September 2010 and in October 2011. Figure 1 and Table 1 show the sampling sites, the types of samples, and the processing. We collected twenty-four microbialites, eight samples of sediments, and three samples of microbial mats and oncoids. Live specimens of invertebrates inhabiting the margins of the lagoon were also collected to compare with the biogenetic species found in the matrix of the microbialites, and to classify the microgastropods and crustaceans. All the samples collected (Table 1) are included in the Paleontological Archives of the Institute of Geosciences of the State University of Campinas (UNICAMP).

Table 1. Samples studied in Salgada Lagoon, sampling sites, and treatment.

| Position / Samples | NE | SE | South Edge | Number of sampling areas in Fig 1 | Collected seeds. by shaking | Microbialites Cut in half (A and B). | Cemented material scraped out | Thin sections | Sediments | ¹⁴ C | UTM Coordinates (Zone 24K) |
|----------------------------|----|----|---------------|--|-----------------------------------|--|-------------------------------------|------------------|-----------|-----------------|-------------------------------|
| MICROBIALITES | | | | | | | | | | | |
| CP6/3 | X | | | 1 | X | | | | | | 292179 N / 7575800 W |
| CP6/4 | X | | | 1 | X | | | | | | 292179 N / 7575800 W |
| CP6/5 | X | | | 1 | X | X | X | X | | | 292179 N / 7575800 W |
| CP6/6 | X | | | 1 | X | X | X | X | | X | 292179 N / 7575800 W |
| CP6/7 | X | | | 1 | X | | | | | | 292179 N / 7575800 W |
| CP6/ 8 | X | | | 1 | X | | | | | | 292179 N / 7575800 W |
| CP6/9 | X | | | 1 | | | | | | | 292179 N / 7575800 W |
| CP6/10 | X | | | 1 | X | X | | | | X | 292179 N / 7575800 W |
| CP6/11 | X | | | 1 | X | X | | | | | 292179 N / 7575800 W |
| CP6/12 | X | | | 1 | X | X | | | | | 292179 N / 7575800 W |
| CP6/13 | X | | | 1 | X | X | | | | | 292179 N / 7575800 W |
| CP6/14 | X | | | 1 | X | X | X | X | | | 292179 N / 7575800 W |
| CP6/15 | X | | | 1 | X | X | | | | | 292179 N / 7575800 W |
| CP6/16 | X | | | 1 | X | | | | | | 292179 N / 7575800 W |
| CP6/17 | | X | | 2 | X | X | X | X | | | 293081 N/ 7574336 W |
| CP6/18 | | X | | 2 | X | | | | | | 293081 N/ 7574336 W |
| CP6/19 | | X | | 2 | X | | | | | | 293081 N/ 7574336 W |
| CP6/20 | | X | | 2 | X | X | | | | | 293081 N/ 7574336 W |
| CP6/21 | | X | | 2 | X | X | X | X | | | 293081 N/ 7574336 W |
| CP6/22 | | X | | 2 | | | | | | X | 293081 N/ 7574336 W |
| CP6/23 | | X | | 2 | | | | | | X | 293081 N/ 7574336 W |
| CP6/24 | | X | | 2 | | | | | | X | 293081 N/ 7574336 W |
| CP6/25 | | X | | 2 | X | X | X | X | | | 293081 N/ 7574336 W |
| CP6/26 | | X | | 2 | X | | | | | | 293081 N/ 7574336 W |
| MICROBIAL MATS AND ONCOIDS | | | | | | | | | | | |
| DP7/12A | | | X | 3 | | | X | | | | 294078 N / 7573534 W |
| DP7/12B | | | X | 3 | | | X | | | | 294078 N / 7573534 W |
| DP9/337B | | | X | 4 | | | X | | | | 293120 N / 7574301 W |

| | | | | | | | |
|-----------|---|---|---|---|---|---|----------------------|
| DP7/39 | X | | 5 | | X | | 293271 N / 7574114 W |
| SEDIMENTS | | | | | | | |
| DP7/13 | | X | | 6 | | X | 294034 N / 7573577 W |
| DP7/16E | X | | | 7 | | X | 293747 N / 7573905 W |
| DP7/16F | X | | | 7 | | X | 293747 N / 7573905 W |
| DP9/309 | | X | | 2 | | X | 293081 N / 7574336 W |
| DP9/314 | | X | | 2 | | X | 293081 N / 7574336 W |
| DP9/335 | | X | | 8 | | X | 293229 N / 7574157 W |
| DP9/336 | X | | | 9 | | X | 292602 N / 7575739 W |
| DP9/ 337A | | X | | 4 | | X | 293120 N / 7574301 W |

14C Dating

Three samples (CP6/ 22, 23 and 24) collected from the southeastern margin (Fig. 1 and Table 1) of the lagoon, and two (CP6/6 and 10) from the northeastern edge were dated in the 14C CENA Laboratory of the University of São Paulo in Piracicaba, SP, Brazil. After physical and chemical pretreatment of the samples, benzene synthesis and the detection of 14C by low level liquid scintillation counting (Pessenda and Camargo, 1991). The $\delta^{13}\text{C}$ was obtained by using mass spectrometry in the Chemistry Laboratory of ICP/MS of the Institute of Geosciences of USP in São Paulo, Brazil.

Samples study

To study the microfacies, 18 thin sections of microbialite samples were made and analyzed using petrographic microscope and SEM (Fig. 1 and Table 1). The slides were photographed. Thin sections were made of the basal, intermediate, and upper portion levels of the microbialites in the Slide laboratory of the Institute of Geosciences of UNICAMP.

Free grains of sediment found in association with 20 microbialites (13 for NE edge and 7 for SW, Fig. 1 and Table 1) were first removed, by shaking in separate plastic bags. Samples of 11 sediments surrounding the microbialites and microbial mats were also studied and 10 cm³ of all sediments were separated for analysis. (Table 1). For three samples of microbial mats and one oncolid obtained from south edge after remove humidity in an oven at 60°C during 24hrs, the sediments associated with layers of them were scraped out and studied together with the other sediments. Each of 35 sediment samples were sieved and separated into three portions, according to the Wentworth scale: larger than 1 millimeter, between 1 and 0.5 mm, and less than 0.5 mm. In this phase, 105 fractions were obtained and weighted to make the graphs.

Six microbialites (Fig. 1 and Table 1) were then cut in two to let us study their internal structure. Each microbialite was found to consist of three levels (basal, intermediate and upper). For cemented sediments of microbialites were scraped out from different beds from each of these levels from three half-microbialites from the northeastern margin of the lagoon (Fig. 1 and Table 1) and three from the southwestern margin. Eighteen samples were obtained from the internal beds.

All of the 123 sediment samples (both free grains and those scraped) were separated into biogenic (skeletal) grains and inorganic minerals. The biogenic grains further separated into microgastropod shells (because they were extremely abundant), and other biogenic elements. We used ZEISS stereoscopic microscope and SEM to analyze the samples, and the result is represented in percentage.

RESULTS

Distribution of microbial communities around Salgada Lagoon determined by orbital remote sensing.

The QuickBird images were used to determine the spatial distribution of microbial communities. The QuickBird images consist of various bands. The near infrared band records the radiation reflected by materials on the earth by a wavelength from 760 to 900 m, a wavelength strongly reflected by vegetation (Figs. 2 and 3). The red, on the other hand, is strongly absorbed by the process of photosynthesis. In an NDVI, areas with more vegetation are highlighted in lighter colors (red), whereas the absence of vegetation, in darker colors (blue). Figure 3, which highlights the NDVI information, shows intense photosynthetic activity (red) around the entire lagoon reflecting the presence of microbial communities that occupy the edges of the lagoon and shallow water.

The microbial communities identified by QuickBird images were visited in situ. The microbial reefs and mats were found on both the southwestern and northeastern parallel sides of the lagoon margins, and microbial mats and oncoids were distributed throughout the lagoon. The so-thinly laminated microbial mats and oncoids occupy today a larger area of distribution than the microbialites, being more abundant in the Salgada Lagoon and present even in the extreme south and inside of it, where microbialites are scarce or not present. In this way, the microbial reefs were found on both the southwestern and northeastern parallel sides of the lagoon margins, and microbial mats and oncoids were distributed throughout the water surface of the lagoon.

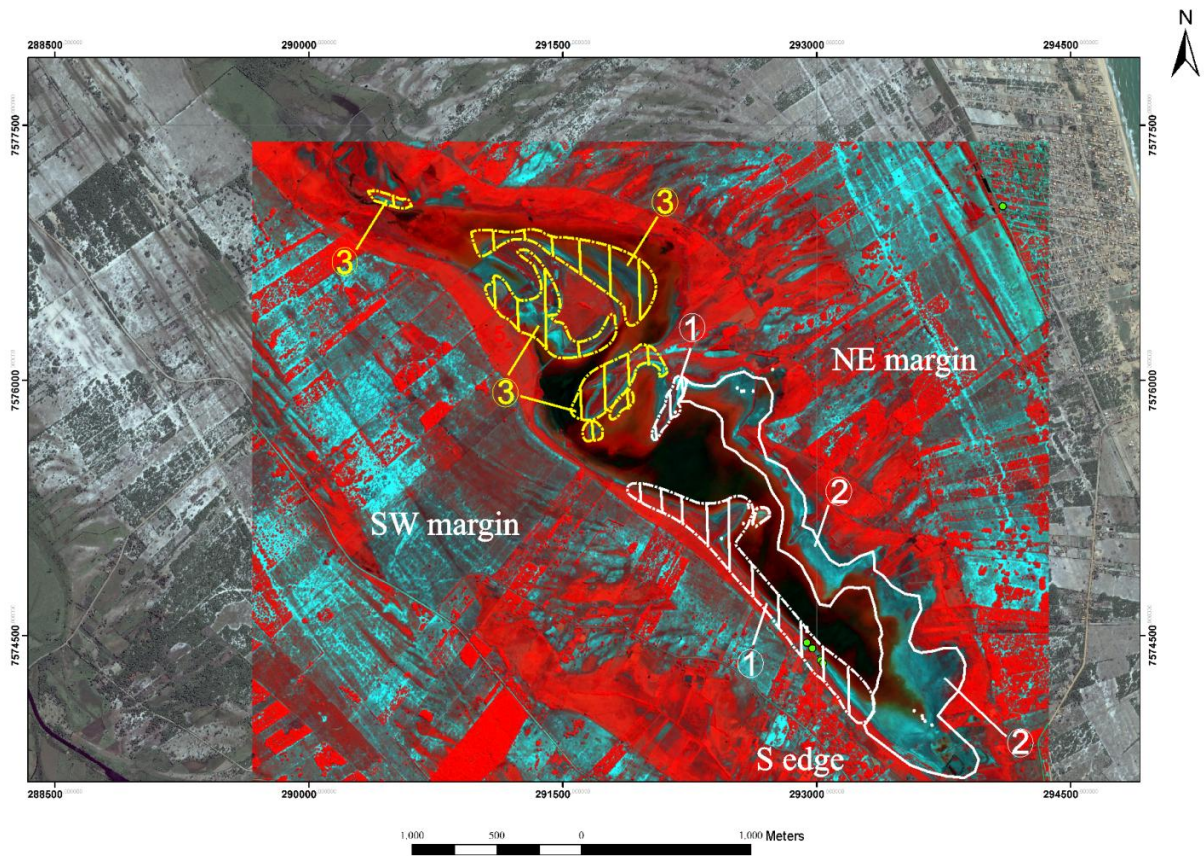


FIG.2. Areas mapped in the field, as well as those inferred from the texture observed in QuickBird image – March 26th, 2004. Legend. 1. Microbialite reefs; 2. Microbial mats and calcified crust with oncoids and few microbialites; 3. Inferred distribution of microbial communities form northern portion of the Salgada Lagoon.

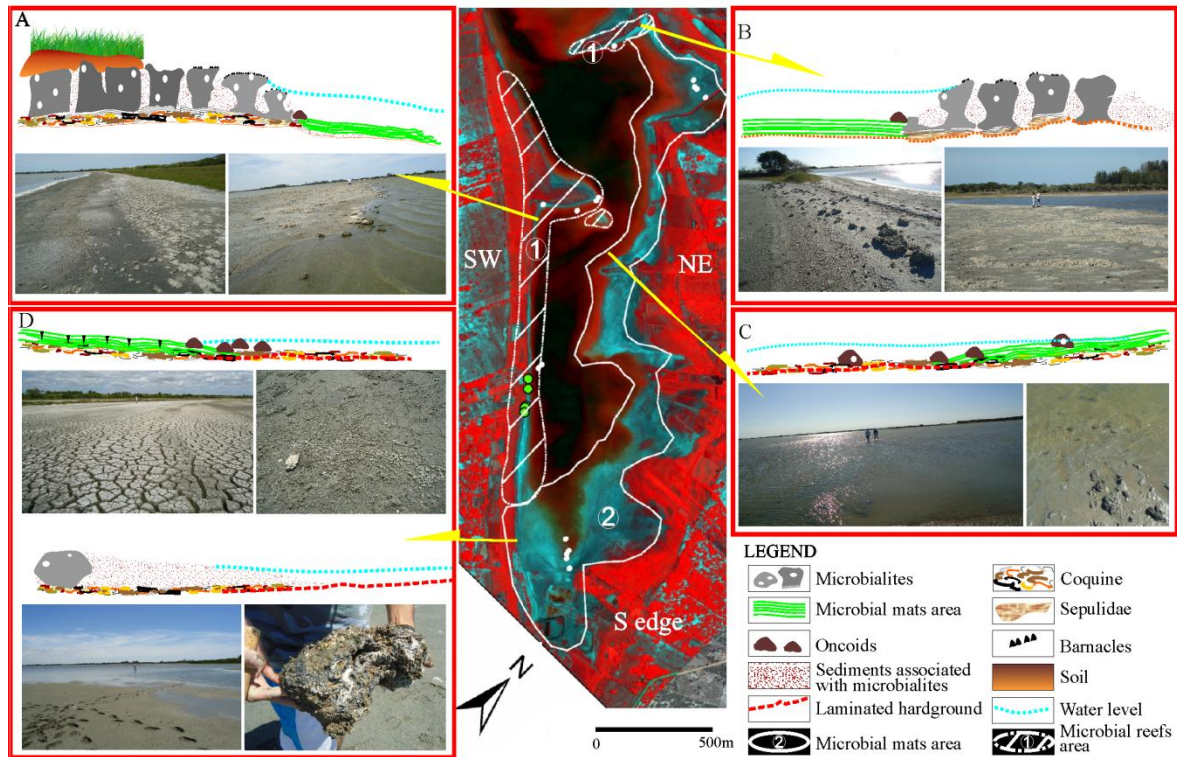


FIG.3. Schematic reconstruction of the succession of microbial communities in the Salgada Lagoon: (A) and (B) development of reefs sequence of microbialites; (C) and (D) sequence along southern margin of the lake, composed mainly of microbial mats, oncoids, and scattered microbialites. 1. Microbialite reefs; 2. Microbial mats, calcified crust and oncoids (Quickbird image from 26/03/2004).

Microbial reefs (Area 1, Figs. 2 and 3) are mostly distributed in the margins of the middle portion of the lagoon, and parallel to the coastal line. The reef located on the SW edge of the Salgada Lagoon, is 1,600 meters long, and various microbialites were present along it, both in the water and along the shore to a distance shorter than 150m inland, largely buried by sandy sediments, with only some 5 to 0 cm emerging above de water. Those structures when located inland are frequently covered with grass (Area 1, Fig. 3A-B). The reef on the NE edge of the lagoon (Area 1, Fig. 3B), is at least 400 m long, and some 100 m wide. Although most of it is submerged during the wet season (November to April) when the level of the lagoon is higher. The two reefs extended from one margin to the other in this part of the lagoon. The microbialite reefs developed from $\sim 3,020 \pm 80$ cal yr B.P., when the lagoon environment conditions presented higher marine influence than nowadays, because it was open to the sea. In this period of development, microbialites were covered with sediments, and these were incorporated into its

layers. Later, with the gradual drop of sea level and the establishment of a closed lagoon system led to environmental changes, which affected the maintenance and growth of these structures (Rumbelsperger 2013). In the field, was found microbialites up to 150 meters far from the shallow water covered by soil, and can be interpreted as an evidence of strong past marine influences. With the drop of sea level (Angulo et al., 2006) and the reduced energy level the place was colonized by microbial mats, less calcified and more resistant to physico-chemical changes, and changes in the water level of the lagoon, because it is a closed system under the influence of dry climate (Toledo et al., 2009). Currently, the mats are widely distributed on the margins of the lagoon, also among microbial reefs, and are responsible for the intense photosynthetic activity observed within the water images and highlighted in red in figures 2 and 3.

Microbial mats, calcified crust and oncoids, and few microbialites (Area 2, Figure 2 and 3C and 3D). Microbial mats, oncoids and thin 2cm laminated calcified crust were also found (Area 2) interspaced with occasional thrombolites. The laminated carbonate crusts (possibly microbialites) were found in areas covered with 10 cm of water and extended over 200 m into the lagoon. Their morphology was similar to that observed at the basal level of the microbialites found in Areas 1 and 2, which were associated with a coquina as firm ground. It seems that this is the type of structure described by Silva-e-Silva et al. (2008).

In this area, we found cracked thick microbial mats (Fig. 3D) out of the water line. In other nearby locations where the mats were still covered by 10 cm of water, oncoids were also present. Next to the mats, we found a calcified crust possibly associated with microbialites (Fig. 3C) and related to past conditions of the lagoon when it had a direct connection to the sea. Nowadays, as it can be seen in Fig 3A, the coastline is located approximately at 1,000 m away and separated by ridges resulting from marine regression (Martin et al., 1993;. Dias and Kjerfve, 2009).

Inferred distribution of microbial communities from northern portion of the Salgada Lagoon (Areas 3, Figure 2). The distribution of microbial communities was inferred on the base of the texture, and spectral responses observed in QuickBird images, as well as the mapping in the field. Area 1 was compared to Area 3, using composition in true color and false color with NDVI in red. Other main areas were identified (Figs. 2) and predictions were made as to the type of

microbial communities to be found. These areas 3 correspond to locations where the spectral response would suggested a predominance of active microbial photosynthesis, such as those described in areas 1 and 2. Remote sensing was also used with excellent results to describe environments with the presence of microbialites in the Bahamas (Louchard et al., 2003).

Macrostructure description of microbialites from the Salgada Lagoon (Figure 4). The twenty-four microbialites collected varied in size from 11.5 to 56 cm in length and 8.5 to 30 cm in width. The height varied between 14 and 16.5 cm. On the northeastern margin of the lagoon, these microbialites generally developed on firm ground, densely packaged with groups of polychaetes of the Serpulidae family (Phylum Annelida – Class Polychaeta), whereas on the southwestern margin, the microbialites generally developed on firm ground composed of coquinas. Despite the large number of macroscopic structural variables, the microbialites all showed alternation from darker to lighter layers (Figs. 4A -D), as well as common patterns in macrostructure, such as the following:

1) The basal level portion revealed continuous, finely laminated layers, at times presenting small voids or pores. In general, the lower portion was about 0.7 to 30 mm thick.

The intermediate level abruptly replaces the lower level. This level is more friable and in some cases poorly preserved. It is comprised of columns or domes separated by broad vugs partially or completely filled with grains of quartz and bioclasts. In this level, the origin of much of the poor preservation is due to the dissolution of carbonate and bio-erosion by grazers and/or raspers, (microgastropods, crustaceans, etc.), drillers (polychaetes) and encrusters (e.g. barnacles, bryozoans, and polychaetes). This level was generally some 49 to 150 mm thick.

3) The upper level, considered to start where the columns of the intermediate portion grow thicker towards the top and join to form more or less continuous layers with few voids. Bio-erosion was also found, but less frequent than in the intermediate level. The high density of the encrusters generally concealed the pustular morphology associated with the top of the microbialites. This portion varied from 20 to 30 mm in thickness.

Authors such as Silva-e-Silva et al. (2007a) also describe the microbialites from the Salgada lagoon, noting the clear distinction between levels; Iespa et al. (2009, 2011a) later suggest even

further division, although in the present study the more general description of the microbialites has been maintained, since it is sufficient for the examples studied.

In the field, we studied an extensive coverage of external encrusters, *sensu* Riding, (2002), which use the microbialites as a substrate on top, as well portions not covered by sediments. The fixation of these encrusters does seem to be recent, since Pet bottles covered with similar organisms were also found (Fig. 4E).

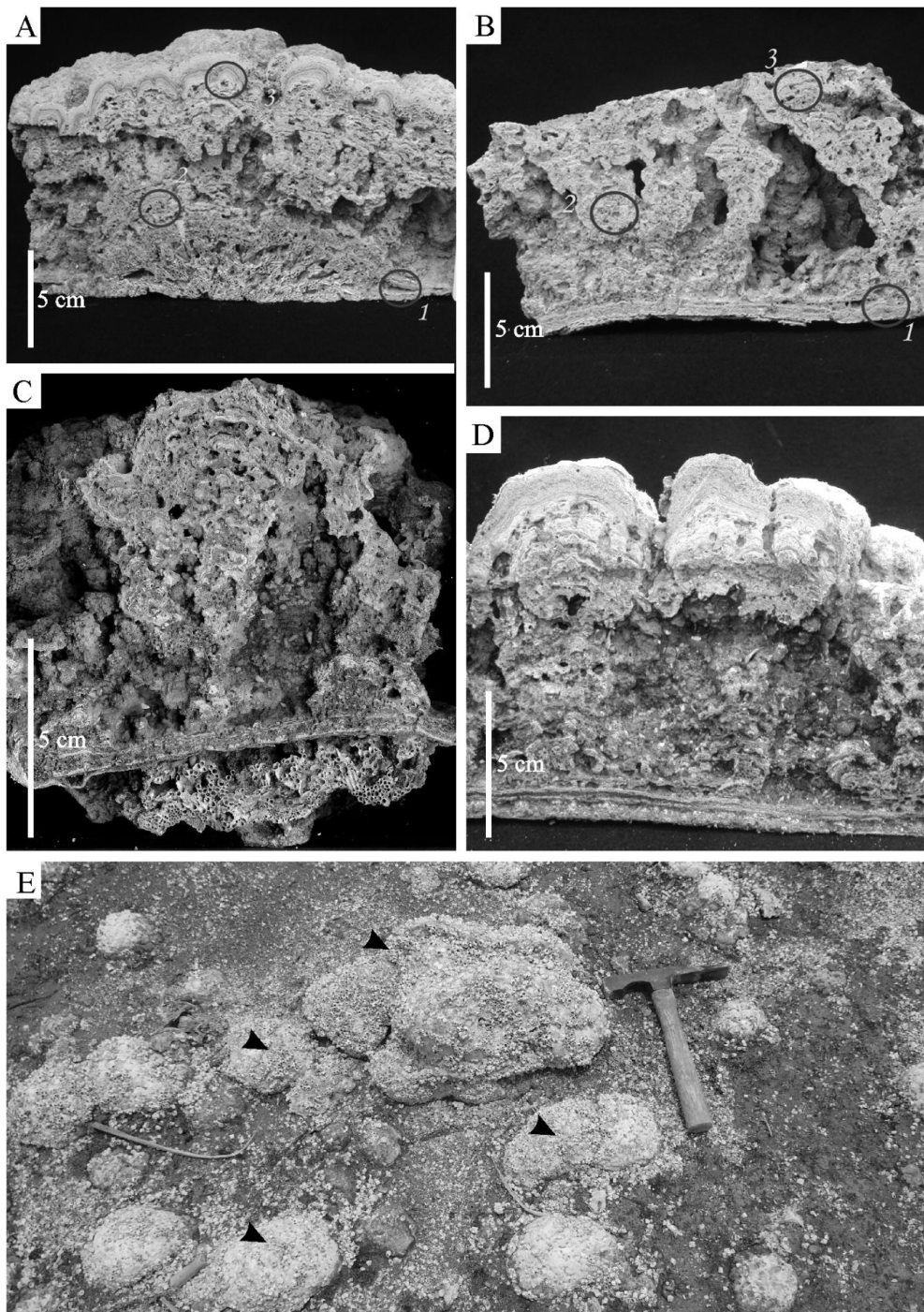


FIG.4. Kinds of microbial communities found along the shores of the Salgada Lagoon. (A) and (C) Microbialites along the NE margin, showing basal level supported by serpulideans communities; (B) and (D) Microbialites along the SW margin and (E) Microbialites covered with sediments and heavily encrusted with barnacles, SW margin.

Microfacies (Figure 5)

The investigation of the internal structures of the microbialites was based on an 18-thin section study to identify the biogenic elements and minerals associated with the laminations. The thin sections characterized the porosity, texture and presence of diagenetic agents. The results are first presented in general and then separated according to level site where the microbialites were found.

In general, the slides of thin sections revealed similar biogenic and mineral. The minerals were quartz, calcite, mica (both muscovite and biotite), microcline, and plagioclase. However, only quartz and calcite were abundant in every slide. The quartz occurred mainly in the form of monocristaline grains, varying from straight to wavy.

They varied in shape from sub-angular to sub-rounded, with the latter being more common; rounded grains were rare. Other grains of quartz were cemented together. Both the microcline and plagioclase grains were anhedral, and only occasionally found on the slides. The micas were also rare, generally consisting of euhedral grains. In some cases, these minerals were badly deformed (slide CP6/25B from the base of a microbialite).

The biogenetic elements consisted of microgastropod and ostracod shells (Figs. 5A-B), tests of foraminiferans, bivalve shells and peloids, and the matrix was mainly microsparry calcite (Fig. 5C). The basal level- The thin layers of the lower beds of microbialites had a heterogeneous fenestral fabric, although they were tightly cemented by micrite and microsparry calcite. This cement made it difficult to see the bioclasts, although frequent peloids encased in micrite (Fig. 5C) were clearly visible. Growth structures and bio-erosion were also observed in the lower level (Fig. 5D), as well as vestiges of polychaetes activities (Figs. 5E, G), which suggests a high degree of intra-particle porosity. The presence of closed bivalve shells indicates little post-death transport.

Intermediate level - The layers in this portion were more heterogeneous, with many cavities. Bioclasts such as the shells of microgastropods and the tests of foraminiferans (Fig. 5F) and shells of ostracods were easily observed, since the layering was only incipient, or even absent, skeletal grains, peloids and minerals encased by micritic and microsparry cements were found in isolated pockets.

Upper level- The upper portion is more coherent and less friable than the lower ones; it is strongly cemented, with easily distinguishable biogenic elements and texture. The layers are wavy, with fenestral fabric and generally reveal lateral continuity (Fig. 5H). The bioclasts, such as shells of ostracods (Fig. 5B) are well preserved and easily identified. The peloids are concentrated and seem to be less frequent than in lower levels. This portion has strong cementing, the presence of ostracods, and reveals constructional depressions in microbialite accretion (Fig. 5G).

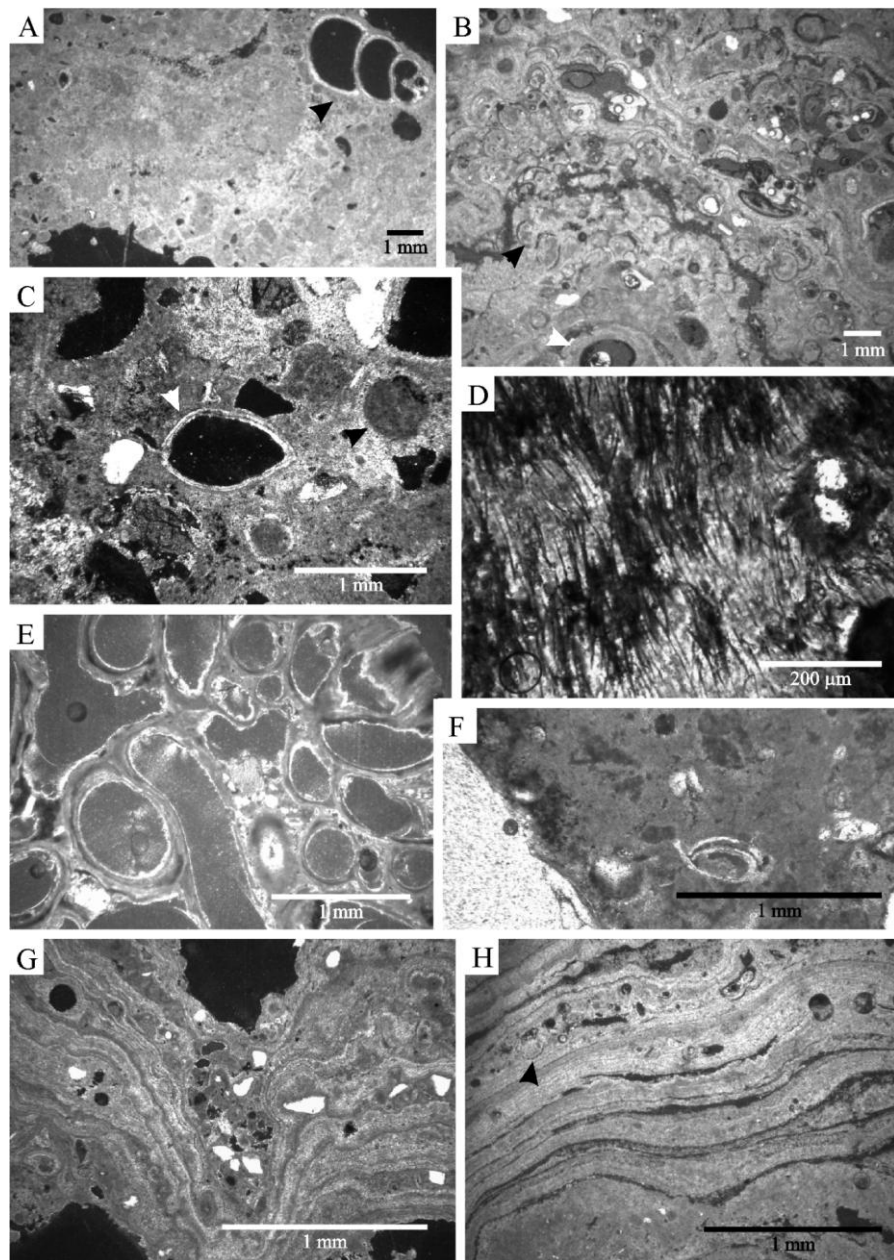


FIG.5. Microfacies observed in microbialites in the Salgada Lagoon. (A) Shell of *Heleobia australis* in longitudinal section (upper part of CP6/25); (B) Abundant ostracod fragments in the upper level of the microbialite (black arrow), showing thin laminations and polychaetes perforation (white arrow) (CP6/21); (C) Ostracod carapaces (white arrow) and peloid with micrite envelope (black arrow) (basal level of CP6/25); (D) Bio-erosion caused by cyanobacteria (from basal level of CP6/6); (E) Image showing hardground at the base of a microbialite on the NE margin (CP6/14); (F) Test of a foraminiferan of the genus *Quinqueloculina* from the intermediate portion of a microbialite (CP6/25); (G) Sediments of an unconsolidated microbial layer from the upper level (CP6/17) and (H) Fenestral fabric; ostracod carapace indicated by black arrow (upper level of CP6/25).

Sediment associated (Figures 6 and 7 and Table 2)

123 sediment samples were studied to determine their mineral and organic composition, which varied from <0,25mm to 2mm.

Mineral fraction - On both margins of the lake, the minerals found were mostly quartz, micas (mainly biotite, but also some muscovite) and calcite, as described by Silva-e-Silva *et al.* (2008). No feldspars were identified during this part of the analysis. The grains of quartz, at times with inclusions, varied from sub-rounded to sub-angular. Only a small number of grains were well rounded, although those of samples CP6/14 (fractions from >1mm to 1 mm) and CP6/16 (fraction > 1mm) revealed grains varying from very rounded to sub-rounded. The absence of feldspars in the mineral fraction, in conjunction with the greater presence of rounded grains of quartz (absence of angular grains) suggests high mineralogical maturity and high to medium textural maturity, indicative of significant transport of the grains prior to deposition.

Organic fraction - Every biogenic sediment was similar for all samples (microbialites, microbial mats, oncoïd, and all surrounded sediments). The results were used to construct Table 2. The following biogenic elements were found (Figs. 6 and 7):

1. Foraminifers (Figs. 6A-B): Quinqueloculina sp., Ammonia sp., Elphidium sp., Rosalina sp., Triloculina sp., Bolivina sp., Miolliolinella sp., Rotallina sp., Textularia sp., Cibicides sp. and Pseudonimion sp.;
2. The remains of metazoans (Figs. 6C-G, I), including shells of microgastropods (*Heleobia australis* d'Orbigny, 1835), and the bivalve Verenidae; the carapaces of various crustaceans, such as the Tanaidaceae Order and their semi-circular tubular secretions, the Ostracoda Class (?Cipreïdes), and the Amphipoda Order (Suborder Gammaridae, genus *Orchestia* sp.); carapaces and appendices of other arthropods; the spines of sea urchins (Fig. 7G), and fish scales of *Tilapia* sp., as well as fragments of undetermined animal origin;
3. Plant material (Figs. 6D, H), such as gyrogonites and portions of charophytes stems, as well as seeds of *Talinum* sp. (Portulacaceae, (Fig. 7B).

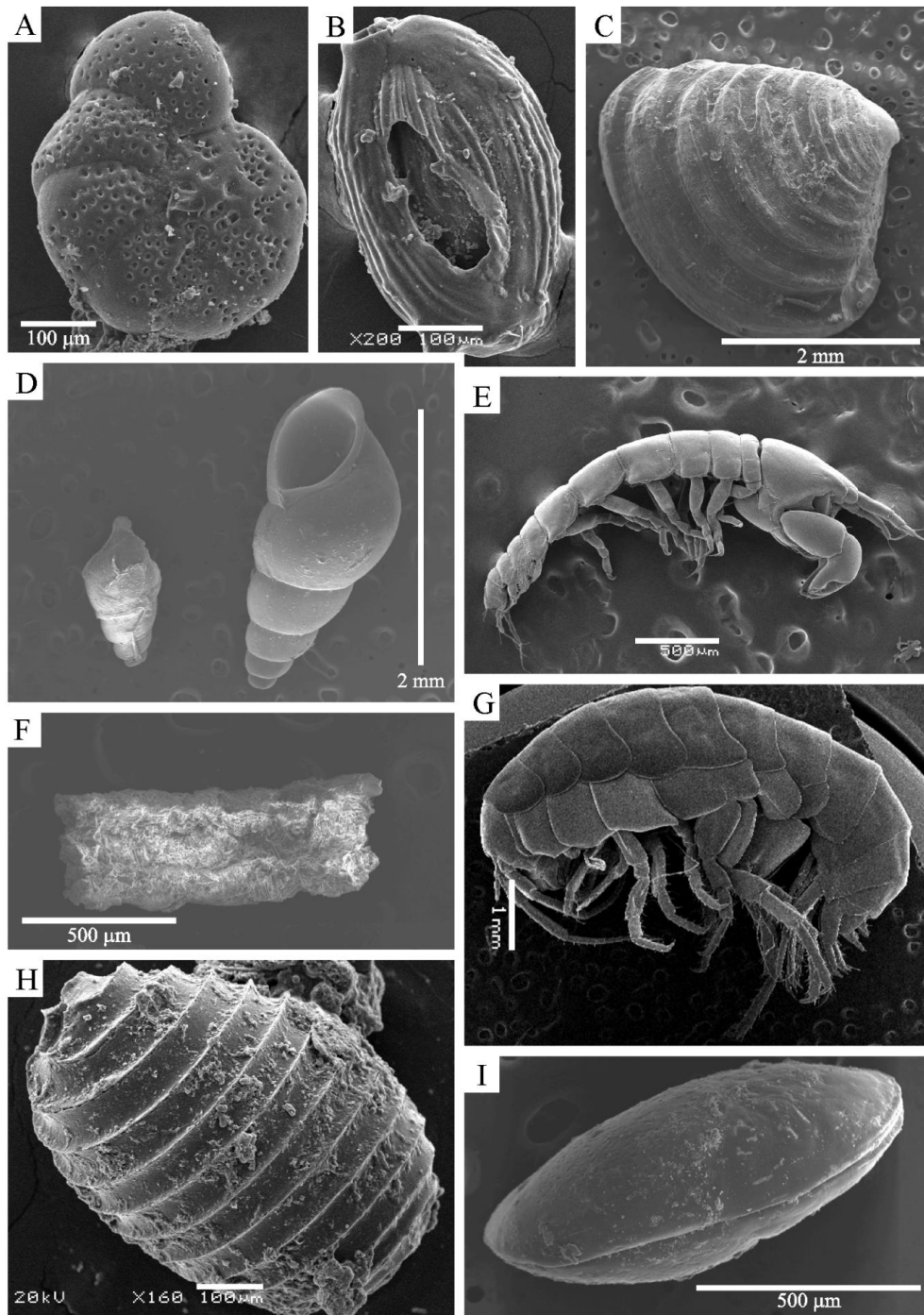


FIG.6. Main skeletal grains observed in the microbialites in the Salgada Lagoon. (A) *Quinqueloculina* sp.; (B) *Elphidium* sp.; (C) Shell of *Verenidae*; (D) Shell of *H. australis*; (E) *Tanaidaceae*; (F) Tubes secreted by *Tanaidaceae*; (G) *Gammaridae*; (H) Charophyte gyrogonites and (I) Ostracod carapace.

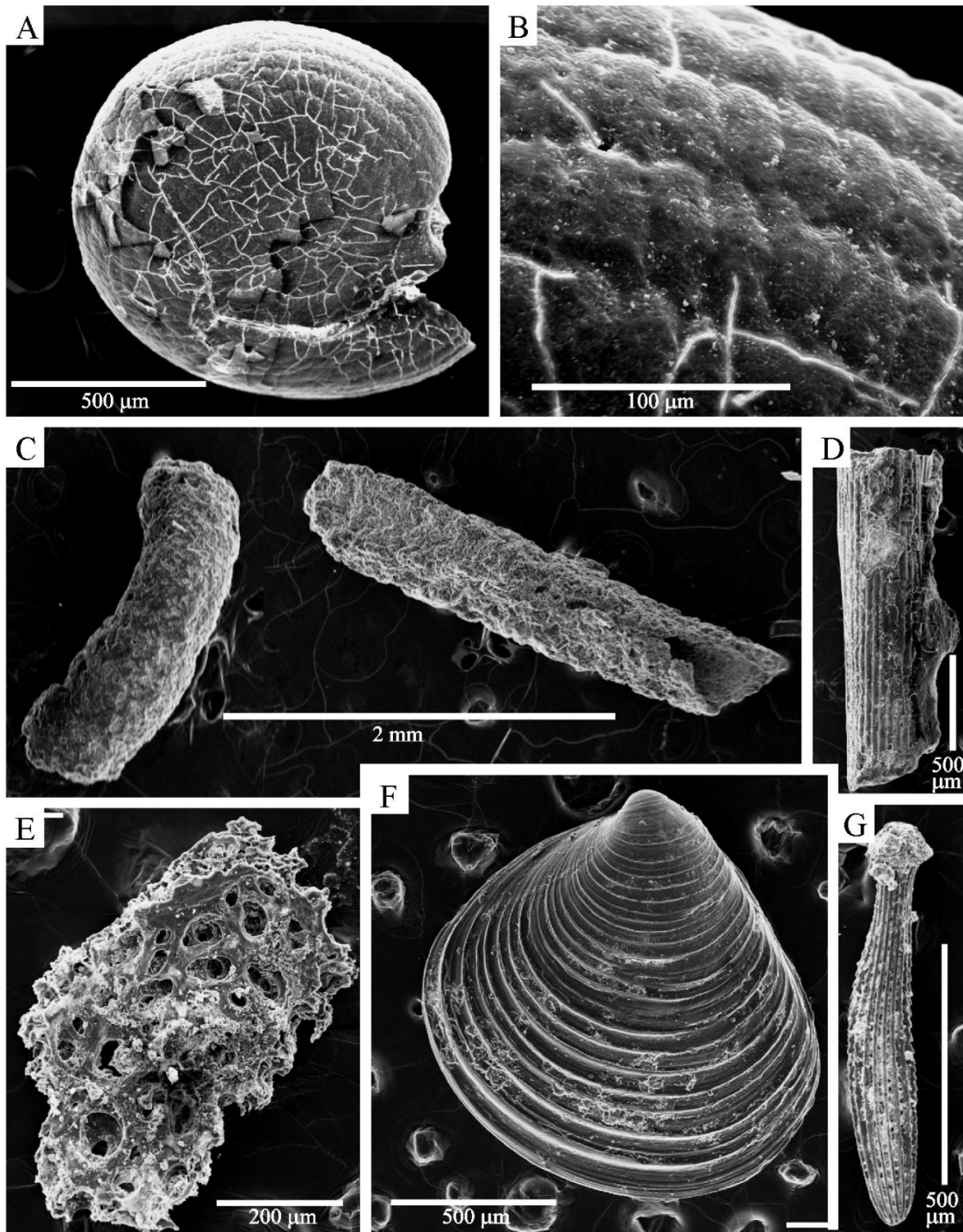


FIG.7. Main skeletal grains observed in the microbial mats in the Salgada Lagoon. (A) *Talinum* sp.; (B) Detail showing an outer surface of *Talinum* sp. (C) Tubes secreted by polychaetes; (D) Stem fragment of Charophyte; (E) Bryozoan; (F) Shell of Verenidae and (G) Spine of sea urchin.

The microgastropod shells were mostly white, although translucent (nearly transparent) variants, as well as darker ones, varying from black to tones of grey, since the feeding of these animals determines the color of the shell. They were found in all of the sediments studied in whatever the granulometry. Although various authors, including Silva-e-Silva *et al.* (2005a, 2007a), Senra *et al.* (2006) and Iespa *et al.* (2011b), have reported the presence of numerous *H. australis* shells in the microbialites. The ostracods, in shades of grey, were found mainly as particles smaller than 0,5mm. Both ostracod and microgastropod shells showed signs of predation, as well as bio-erosion, the latter as the result of cyanobacteria action, as reported by Senra *et al.* (2006).

The most prevalent biogenic element consisted of microgastropod shells, followed by the tubes of Tanaidaceae and ostracod shells (Table 2, Figs. 6C-G, I); fragments of arthropods and plant remains were also quite common. Elements such as the carapaces of crustaceans of the Sphaeromatidae family, tests of foraminiferans, bivalve shells of Verenidae, and parts of Tanaidaceae exoskeletons also occurred, but only in some of the samples (Table 2).

The biota found among the microbialite interstices, and the biota embedded in laminations may or may not have direct relationship with the development of the structures. We can consider that the biota (parautochthonous) bonded to the matrix have contemporary development of laminations, since part of the structure, and incorporated into accretions at the time they were developing. However, those found occupying the cavities may have been transported to the location (allochthonous), or more likely, occupied the cavities as a mean of protection, breeding or foraging for food, as in the case of Tanaidaceae.

In microbial mats and oncoids, the microgastropod shells, ostracods, foraminifera, among others, are part of their structure, and co-exist with their formation and growth. Some elements such as seeds and gyrogonites may have been transported to the site where mats grew and encompassed in the structure during its growth, not directly influencing on its development. However, microgastropods and living ostracods present in the midst of these mats can influence the growth of the colonies, since they feed on the microorganisms responsible for the formation of mats.

Table 2. Biogenic elements found in the Salgada Lagoon.

| Biogenics elements | Microbialite voids | Microbialites laminations | Microbial mats Laminations | Sediments around microbialites/ microbial mats | Oncoids |
|------------------------------------|--------------------|---------------------------|----------------------------|--|---------|
| Foraminifers | | | | | |
| <i>Quinqueloculina</i> | X | X | X | X | |
| <i>Ammonia</i> | X | X | X | X | |
| <i>Elphidium</i> | X | | X | | |
| <i>Rosalina</i> | X | | | | |
| <i>Triloculina</i> | X | X | | | |
| <i>Bolivina</i> | X | | X | | |
| <i>Mioliolinella</i> | X | | | | |
| <i>Rotallina</i> | X | | | | |
| <i>Textularia</i> | X | | | | |
| <i>Cibicides</i> | X | | | | |
| <i>Pseudonimion</i> | | | X | | |
| Metazoans | | | | | |
| <i>Helobia australis</i> | X | X | X | X | X |
| Bivalve shells | X | X | X | | |
| Ostracods | X | X | X | X | X |
| Carapaces of crustaceans | X | | X | X | |
| Tanaidaceae tubular secretions | X | | | | |
| Gammaridae carapaces | X | | | | |
| Tanaidaceae carapaces | X | | | | |
| Plants | | | | | |
| Carophytes (gyrogonites and twigs) | X | | X | | |
| <i>Talinum</i> sp (seeds) | | | X | X | |
| Encrusters | | | | | |
| Serpulids tubes | X | X | | | |
| Barnacles | X | X | | | |
| Bryozoan | X | X | X | | |

DISCUSSION

Around our planet, there are several occurrences of lagoons with the physico-chemical characteristics and development of microbial communities similar to the Salgada Lagoon (e.g., Palinska *et al.* 2009; Gischler *et al.*, 2011). However, few studies address the sediments associated with them. Thus, comparisons between the results reported here and elsewhere will be mainly conducted with marine coastal environments (open system), where there are sediment references of associated microbial communities.

For closed lagoon systems, such as the Salgada Lagoon, there are very scarce references of sediments associated with microbialites or microbial mats. Gischler *et al.*, (2011) for Laguna Bacalar, Yucatan Peninsula, Mexico, has been described the occurrence of mytilid bivalve within the stromatolites columnar cavities. Palinska *et al.* (2009) reported a presence of bryozoan in close association with microbial mats, but did not comments about the other encrusters or sediments associated.

In other open system areas of the world, such as in the Bahamas and Shark Bay in Australia, microbialites partially covered by sediments have also been described. Various studies of the Bahamas (Reid and Browne, 1991; Reid *et al.*, 1995, 2003, 2011; Dupraz *et al.*, 2004; Macintyre *et al.*, 2000; Andres and Reid, 2006; Eckman *et al.*, 2008) (e.g. Exuma cays, Eleuthera Island and Highborne Cay) have investigated reefs composed of microbialites and calcareous algae, and their distribution has been described in relation to the movement of the tides. These authors suggest that sediments periodically bury microbialites developing in inter-tidal zones, occasionally remaining so for up to 100 days (Reid *et al.*, 1991; Andres and Reid, 2006), although they tend to be exposed during low tide. The burial helps to minimize the impact of the superficial algae growth on the surface of the microbialite, as well as foraging, and perforation by invertebrates; it also promotes the vertical development of the bioherms (Eckman *et al.* 2008). In Shark Bay - Australia (Logan *et al.*, 1974; Reid *et al.*, 2003; Jahnert and Collins, 2012), the spatial distribution of the microbialites has also been found to be related to the tidal zones and the same is probably true to the microbialites in the Salgada Lagoon when the marine influence was more strong than today. Moreover, in all three places, the microbialites are partially covered by sediments for long periods. The microbialite reefs in all of these locations are also similar in respect to their pustular surface.

As previously mentioned, there is an intimate interrelationship between microbialites and microbial mats and the sediments surrounding them. The microbialites in the Bahamas and Shark Bay are also full of bioclasts, such as gastropods, bivalve shells, ostracod carapaces, foraminifers, and polychaetes (Reid *et al.*, 1991, 1995, 2003, 2011; Plasnavsky and Ginsburg, 2009; Jahnert and Collins, 2012). Plasnavsky and Ginsburg (2009) classified the organic sediments forming the microbialites in the Bahamas, as fragments of metazoa and coralline algae and found that these bioclasts were largely between the layers and in the interstices; a similar distribution was found in the Salgada Lagoon microbialites and microbial mats.

The original internal structure of the microbialites in both the Bahamas and the Salgada Lagoon are bioturbated. In the Salgada Lagoon, the bioturbation has been caused by perforating organisms that feed on the microorganisms of the microbial communities layers, including polychaetes and graspers, such as microgastropods, crustaceans (Grammaridae, ostracods), and possibly foraminiferans. In this scenario, only the most resistant parts are preserved such as the carapaces of the ostracods and shells of the microgastropods.

We also found crustaceans of the Tanaidaceae Order that live and reproduce inside the microbialites and may generate peloids when incorporated into the layers. The mollusk shells, and plant fragments are present in the samples studied, although they do not interact with the microbial communities. Encrusters such as serpulids, barnacles and bryozoan, are also present. They seem to be related to various events of colonization, possibly related to variations in the water level of the Salgada Lagoon in the past; whereas the barnacles currently occupy only the tops of most of the outcropping microbialite reefs.

¹⁴C dating of the microbialites suggests that the development of many of them probably from $\sim 3,020 \pm 80$ cal yr B.P. (Table 3). At that time, the lagoon was probably larger, and deeper, since microbialites are today found inland (~ 150 km from the present edge, 23 K 293251 N/ 7574005 W). The presence of firm grounds consisting of reefs of serpulids and coquinas suggests a preponderance of marine conditions at the time of formation. Previous dating of the microbialites (Coimbra *et al.* 2000) suggest more recent ages for the initiation of their development (between 2,540-2,260 cal yr B.P.) and some of our samples are in agreement to this period. As these structures developed, their growth changed. It is possible that changes in the metabolic function of the microbial communities indicated by variations in $\delta^{13}\text{C}$ may be responsible for the

variations in the external morphology of the microbialites. On the other hand, the enriched $\delta^{13}\text{C}$

| Samples | Laboratory Identification | Age (years BP) | Age Calibration (yr 2σ) | $\delta^{13}\text{C}$ (‰) |
|------------------------|---------------------------|----------------|---------------------------------|---------------------------|
| CP6/ 10B | CEN1189 | 2340 ± 80 | 2290 – 2548 | 0,47 |
| CP6/ 22 - upper | CEN1188 | 1990 ± 80 | 1771 – 2145 | 17,84 |
| CP6/ 22 - Intermediate | CEN1186 | 2250 ± 80 | 2038 – 2370 | 12,96 |
| CP6/ 22 - basal | CEN1187 | 3020 ± 80 | 2973 – 3383 | 2,08 |
| CP6/ 23 | CEN1185 | 2000 ± 80 | 1771 – 2151 | 13,41 |
| CP6/ 24 | CEN1184 | 1970 ± 80 | 1726 – 2120 | 10,11 |

values of up to + 18‰ may be associated with methanogenesis (Rumbelsperger, 2013) that in samples CP6/22, 23 and 24 occurs at a significant level, similar to those reached by Coimbra *et al.* (2000) for the Salgada Lagoon. Another interpretation is related to variations in the sea level, and has been dropping since the Upper Holocene (Angulo *et al.*, 2006) affecting the Salgada Lagoon with seasonal variations.

The results obtained from the present study and observations in the field were integrated into a proposed model of microbial communities' distribution in the Salgada Lagoon (Fig.3). The observations of other researchers in the area such as Rodrigues *et al.* (1981), Lemos (1996), and Silva-e-Silva (2002), who studied cores removed from the lagoon, were also considered in its development. Finally, the proposal was compared with others developed for Australia (Reid *et al.*, 2003; Jahnert and Collins, 2012) and the Bahamas (Mann and Nelson, 1989; Reid *et al.*, 1995, 1999, 2011; Macintyre *et al.*, 2000; Dupraz *et al.*, 2004; Andres and Reid, 2006; Eckman *et al.*, 2008; Jahnert and Collins, 2012). This proposal describes the spatial distribution of the microbial communities along the margins of the lagoon. The succession within the waters of the lagoon also shows that in favorable locations, microbial reefs accompanied by microbial mats,

which extend out 130 m from the coast, where the depth of the layer of water reaches 26 cm (Area 1, Fig. 2). At the extreme southern end of the lagoon, the microbialites (thrombolites) are more diffusely distributed with a predominance of laminate microbial mats and oncoids, as well as thinly stratified carbonates crusts similar to those present at the base of the microbialites (Area 2, Fig. 2).

In all locations studied, the sediment associated with microbial structures show a very similar composition. Thus, most metazoan identified, are cemented and form part of the microbialites from its basal level to the upper. Currently, they are also found in the upper layers of microbial mats for being resistant species to stressful environments as ponds. The vegetable fragments—carophytas and seeds of the *Tallinum* sp. genus— are related to the continentalizing process of the Salgada Lagoon since the plants live near the water and/ or are part of the coastal vegetation of southeast Brazil.

In this way, we conclude that the sediments of biological origin associated with microbial communities of the Salgada Lagoon represent the coastal origin of these structures and show little variation in composition since the settling of microbial communities at $3,020 \pm 80$ cal yr B.P.

CONCLUSIONS

The sediments located inside microbial communities (microbialites, microbial mat and oncoids) and in the surrounding area have proved to be composed of grains of biogenic and mineral origin. The mineral fraction is composed of quartz, followed by micas (muscovite and, mainly, biotite) and calcite. The organic fraction is composed of microgastropod *Helobia australis* shells, Tanaidaceae tubes, and ostracods carapaces, little proportion of foraminiferans tests, plant remains, fragments of sea urchins spines and fish scales. Organisms such as crustaceans and other microgastropods had direct influence on the growth of microbial structures, as they currently do with the mats growing on the site. The vertical distribution of cemented bioclasts that form part of the microbialite laminations showed fairly homogenous in terms of diversity, and similar to that found in sediments near these structures. Compared with the bioclasts associated with microbial, currently active, they also present forms in common. The bioclast association reproduces the environmental characteristics of the Salgada Lagoon, showing a more strong marine influence at $\sim 3,020 \pm 80$ cal yr B.P. when settling the first microbialites in the lagoon than currently. Researches on microbialite fossils and associated bioclasts are essential, because contribute to the environment reconstruction where these structures developed, as well as how to influence their development.

ACKNOWLEDGEMENTS

The research team thanks to Fosca Pedini Pereira Leite from the Department of Zoology of the Institute of Biology at UNICAMP for helping to identify the arthropods; Silvia Helena de Mello e Sousa from the laboratory of Bioenvironmental indicators of the Institute of Oceanography at USP for helping to identify the foraminifers; Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) for the grants provided to the researchers, and PETROBRAS for the financial assistance (research Project PETROBRAS-CARMOD “Modeling dynamic parameters in the description of reservoirs”).

Disclosure statement. No competing financial interests exist.

REFERENCES

- Andres, M.S. and Reid, R.P. (2006) Growth morphologies of modern marine stromatolites: a case study from Highborne Cay, Bahamas. *Sedimentary Geology* 185: 319-328.
- Angulo, R.J., Lessa, G.C., and Souza, M.C. de (2006) A critical review of mid- to late-Holocene sea-level fluctuations on the eastern Brazilian coastline. *Quaternary Science Reviews* 25: 486–506.
- Burne, R. and Moore, L.S. (1987) Microbialites: organo-sedimentary deposits of benthic microbial communities. *Palaios* 2: 241-254.
- Coimbra, M.M., Cleveson, G.S., Barbosa, C.F. and Mueller, K. (2000) Radiocarbon measurements stromatolites heads and crust at the Salgada lagoon, Rio de Janeiro State, Brazil. *Physics Research B* 172: 592-596.
- Damazio, C.M. and Silva-e-Silva, L.H. (2006) Cianobactérias em esteiras microbianas coliformes da lagoa Pitanguinha, Rio de Janeiro, Brasil. *Revista Brasileira de Paleontologia* 9: 165-170.
- Delfino, D.O., Wanderley, M.D., Silva-e-Silva, L.H., Feder, and Lopes, F.A.S. (2012) Sedimentology and temporal distribution of microbial mats from Brejo do Espinho, Rio de Janeiro, Brazil. *Sedimentary Geology*, 263–264: 85-95.
- Dias, G.T.M. and Kjerfve, B. (2009) Barrier and beach ridge systems on the Rio de Janeiro coast. In *Geology and geomorphology of the Holocene coastal barriers of Brazil*, edited by S. Dillenburg and P. Hesp, Springer, pp. 225-252.
- d'Orbigny, A. (1835) Synopsis terrestrium et fluviatilium molluscorum, in suo per Americam meridionalem itinere. *Magasin de Zoologie* 5: 1-44.
- Dupraz, C., Visscher, P.T., Baumgartner, L.K., and Reid, R.P. (2004) Microbe-mineral interactions: early carbonate precipitation in a hypersaline (Eleuthera Island, Bahamas). *Sedimentology* 51: 745-765.
- Dupraz, R.C., Reid, P., Braissant, O., Decho, A.W., Norman, R.S., and Visscher, P.T. (2009). Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats. *Earth-Science Reviews* 96: 141-162.

- Eckman, J.E., Andres, M.S., Marinelli, R.L., E. Bowlin, R.P., Aspen, R.J., Reid, R.P., and Patherson, D.M. (2008) Wave and sediment dynamics along a shallow subtidal sandy beach inhabited by modern stromatolites. *Geobiology* 6: 21-32.
- Gischler, E., Golubic, S., Gibson, M.A., Oschmann, W., and Hudson, J. (2011) Microbial Mats and Microbialites in the Freshwater Laguna Bacalar, Yucatan Peninsula, Mexico. In *Advances in Stromatolite Geobiology*, edited by J. Reitner, N. Quéric and A. Gernot, Springer-Verlag, pp. 187- 205.
- Jahnert, R.J. and Collins, L. (2012) Characteristics, distribution and morphogenesis of subtidal microbial systems in Shark Bay, Australia, *Marine Geology* 303-306: 115-136.
- Iespa, A.A.C. and Damazio-Iespa, C.M.D. (2009) Cyanobacterial and sedimentary composition in Polygonal Microbial Mats from Pernambuco lagoon, Rio de Janeiro, Brazil. *Gaea* 5: 35-41.
- Iespa, A.A.C., Iespa, C.M.D., and Borghi, L. (2009) Microestratigrafia do Complexo Estromatólito, Trombólito e Oncoide Holocênico da Lagoa Salgada, Estado do Rio de Janeiro, Brasil. *Revista de Geologia* 22: 7-14.
- Iespa, A.A.C., Borghi, L., and Iespa, C.M.D. (2011a) O plexo estromatólito-trombólito-oncoide, Lagoa Salgada, RJ, Brasil. In *Paleontologia: Cenários de Vida*, edited by S. Carvalho, Interciência, v. 3, pp. 69-77.
- Iespa, C.M.D., Iespa, A.A.C., and Borghi, L. (2011b) Microfacies microbianas das estruturas estromatolíticas da Lagoa Pitanguinha, Rio de Janeiro, Brasil. In *Paleontologia: Cenários de Vida*, edited by S. Carvalho, Interciência, v. 3, pp. 57-67.
- Lemos, R.M.T. (1996) Estudo das fácies deposicionais das estruturas estromatolíticas da Lagoa Salgada – Rio de Janeiro. Unpublished thesis, Universidade Federal Fluminense, pp.121.
- Logan, B.W., Hoffman, P., and Gebelein, C.D. (1974) Algal Mats, Cryptalgal Fabrics, and structures, Hamelin Pool, Western Australia. In *Evolution and Diagenesis of Quaternary Carbonate Sequences, Shark Bay, Western Australia*, edited by B.W.
- Logan, J.F. Read, G.M. Hagan, P. Hoffman, R.G. Brown, P.J. Woods and C.D. Gebelein, *American Association of Petroleum Geologists, Memoir* 22, pp.140–194.

- Louchard, E.M., Reid, R.P., Stephens, F.C., Davis, C.O., Leathers, R.A., and Downes, T.V. (2003) Optical remote sensing of benthic habitats and bathymetry in coastal environments at Lee Stocking Island, Bahamas: A comparative spectral classification approach. *Limnology and Oceanography* 48: 511-521.
- Macintyre, I.G., Prufert-Bebout, L., and Reid, R.P. (2000) The role of endolithic cyanobacteria in the formation of lithified laminae in Bahaminan stromatolites. *Sedimentology* 47: 915-921.
- McKenzie, J.A. and Vasconcelos, C. (2009) Dolomite Mountains and the origin of the dolomite rock of which they mainly consist: historical developments and new perspectives. *Sedimentology* 56: 205-219.
- Mann, C.J. and Nelson, W.M. (1989) Microbialitic structures in Storr's Lake, San Salvador Island, Bahamas Islands. *Palaios* 4: 287-293.
- Martin, L., Suguio, K., and Flexor, J.M. (1993) As flutuações do nível do mar durante o Quaternário superior e a evolução geológica de deltas brasileiros. *Boletim IG-USP, publicação especial* 15: 1- 173.
- Pessenda, L.C.R. and Camargo, P.B. (1991) Datação radiocarbônica de amostras de interesse arqueológico e geológico por espectrometria de cintilação líquida de baixa radiação de fundo. *Química Nova* 14: 98-103.
- Plasnavsky, N. and Ginsburg, R.N. (2009) Taphonomy of modern marine bahamian microbialites. *Palaios* 24: 5-17.
- Palinska, K. A., Scholz, P.J.; Sterflinger, K.; Gerdes, G., and Adelaide, Y.B. (1999) Microbial Mats Associated with Bryozoans (Coorong Lagoon, South Australia). *Facies* 41: 1-14.
- Reid, R.P. and Browne, K.M. (1991) Intertidal stromatolites in a fringing Holocene reef complex, Bahamas. *Geology* 19: 15-18.
- Reid, R.R., Macintyre, I.G., Browne, K.M., Steneck, R.S., and Miller, T. (1995) Modern Marine Stromatolites in the Exuma cays, Bahamas: uncommonly common. *Facies* 33: 1-7.
- Reid, R.P., Macintyre, I.G., and Steneck, R.S. (1999) A microbialite/algal ridge fringing reef complex, Highborne Cay, Bahamas. *Atoll Research Bulletin* 466: 1-18.
- Reid, R.P., James, N.P., Macintyre, I.G, Dupraz, C.P., and Burne, R.V. (2003) Shark Bay stromatolites: microfabrics and reinterpretation of origins. *Facies* 49: 45-53.

- Reid, R.P., Foster, J.S., Radtke, G., and Golubic, S. (2011) Modern marine stromatolites of Little Darby, Exuma Archipelago, Bahamas: environmental setting, accretion mechanisms and role of euendoliths. In *Advances in Stromatolite Geobiology*, edited by J. Reitner, N. Quéric and Gernot, Springer-Verlag, Berlin, pp. 77- 89.
- Riding, R. (2002) Structure and composition of organic reefs and carbonate mud mounds: concepts and categories. *Earth-Sciences Reviews* 58: 163-231.
- Riding, R. (2009) An atmospheric stimulus for cyanobacterial bioinduced calcification ca. 350 million years ago? *Palaios* 24: 685–696.
- Riding, R. (2011) The nature of Stromatolites: 3,500 Million Years of history and a Century of research. In *Advances in Stromatolite Geobiology*, edited by J. Reitner, N. Quéric and Gernot, Springer-Verlag, Berlin, pp. 29-74.
- Rodrigues, M.A., Carvalho, M.G.P., and Dias, G.M.M. (1981) Interpretação paleoambiental das lagoas Salgada e das Ostras (RJ) Brasil, com base em foraminíferos. In *Anais do II Congresso Latino-americano de Paleontologia*, CNPq/PETROBRAS/FAPERGS, Porto Alegre, p. 893- 906.
- Rumbelsperger, A.M.B. (2013) Coupling Organic and Inorganic Methods to Study Growth and Diagenesis of Modern Microbial Carbonates, Rio de Janeiro State, Brazil: Implications for Interpreting Ancient Microbialite Facies Development. Unpublished thesis, ETH ZURICH, pp.170
- Senra, M.C.E., Conde, J.N., and Silva-e-Silva, L.H. (2006) Microbioerosion on shells of *Heleobia australis* (Gastropoda; Rissosoidea) from lagoa Salgada, Rio de Janeiro State, Brazil. *Anuário do Instituto de Geociências*, 29: 199-209.
- Silva-e-Silva, L.H. (2002) Contribuição ao conhecimento da composição microbiana e química das estruturas estromatolíticas da lagoa Salgada, Quaternário do Rio de Janeiro, Brasil. Unpublished thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, pp.176
- Silva-e-Silva, L.H., and Senra, M.C.E. (2000) Estudo comparativo de esteiras microbianas presentes em duas lagoas hipersalinas. *Revista Universidade Guarulhos* 2: 225-227.
- Silva-e-Silva, L.H., and Carvalhal, S.B.V. (2005) Biolaminóides calcários holocênicos: o caso da lagoa Vermelha, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências* 28: 63-75.

- Silva-e-Silva, L.H., Carvalhal, S.B.V., Alves, S.A.P.M.N., Shimizu, V. T., Santos, R.C., Iespa, A.A.C., and Senra, M.C.E. (2004) Composição microbiana das estruturas estromatolíticas da lagoa Vermelha (Rio de Janeiro) Brasil. *Revista Brasileira de Paleontologia* 7: 189-192.
- Silva-e-Silva, L.H., Iespa, A.A.C., Damazio-Iespa, C.M., Carvalhal, S.B.V., and Alves, S.A.P.M.N. (2005a) Confronto entre estruturas estromatolíticas domais (composição cianobacteriana) das lagoas Pernambuco e Salgada. *Revista de Geologia* 18:159-165.
- Silva-e-Silva, L.H., Lopes, F.A.S., Iespa, A.A.C., Damazio-Iespa, C.M., and Delfino, D.O. (2006b) Cianobactérias em esteiras microbianas lisas do brejo do Pau Fincado, Rio de Janeiro, Brasil. *Revista Universidade Guarulhos* 10: 111-121.
- Silva-e-Silva, L.H., Iespa, A.A.C., and Damazio-Iespa, C.M. (2007a) Considerações sobre os estromatólitos do tipo domal da lagoa Salgada, Estado do Rio de Janeiro, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências* 30: 50-57.
- Silva-e-Silva, L.H., Srivastava, N.K., and Damazio-Iespa, C.M. (2007b) Evidência de oncóides recentes na lagoa Salgada, norte do estado do Rio de Janeiro, sudeste brasileiro. *Revista Universidade Guarulhos* 5: 201-206.
- Silva-e-Silva, L.H., Iespa, A.A.C., and Damazio-Iespa, C.M. (2007c) Estromatólitos estratiformes da lagoa Pernambuco, Rio de Janeiro, Brasil. *Gaea* 3: 87-92.
- Silva-e-Silva, L.H., Lopes, F.A.S., Delfino, D.O., and Feder, F. (2007d) Chroococcales em esteiras microbianas em bolha do brejo do Pau Fincado, Rio de Janeiro, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências* 30: 182-187.
- Silva-e-Silva, L.H., Damazio-Iespa, C.M., and Iespa, A.A.C. (2007e) Estudo sedimentológico e geomicrobiológico das esteiras microbianas tipo filme da lagoa Pitanguinha, região dos lagos, estado do Rio de Janeiro, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências* 31: 61-66.
- Silva-e-Silva, L.H., Iespa, A.A.C., and Damazio-Iespa, C.M. (2008) Composição dos estromatólitos estratiformes da lagoa Salgada, Rio de Janeiro, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências* 31: 42-49.
- Spadafora, A., Perri, E., McKenzie, J.A., and Vasconcelos, C. (2010) Microbial biomineralization processes forming modern Ca:Mg carbonate stromatolites. *Sedimentology* 57: 27-40.

- Southam, G. (2012) Minerals as Substrates for Life: The Prokaryotic View. *Elements* 8: 101–106.
- Srivastava, N.K. (2002) Lagoa Salgada, RJ - Estromatólitos recentes. In *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*, edited by C. Schobbenhaus, D.A. Campos, E.T. Queiroz, M. Winge, M.L.C. Berbert-Born, DNPM/CPRM - Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP), Brasília, v. 1, pp. 203-209.
- Toledo, M.B., Barth, O.M., Silva, C., and Barros, M.A. (2009) Testing multivariate analysis in paleoenvironmental reconstructions using pollen records from Lagoa Salgada, NE Rio de Janeiro State, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 81: 757-768.
- Vasconcelos, C., McKenzie, J.A., Bernasconi, S., Grujic, D., and Tiens, A.J. (1995) Microbial mediation as a possible mechanism for natural dolomite formation at low temperatures. *Nature* 377: 220–222.
- Vasconcelos, C., Warthmann, R., McKenzie, J.A., Visscher, P.T., Bittermann, A.G. and van Lith, Y. (2006) Lithifying microbial mats in Lagoa Vermelha, Brazil: Modern Precambrian relics? *Sedimentary Geology* 185:175-183.