



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

BRUNO CAETANO DOS SANTOS

**Evaporitos da Formação Codó: estratigrafia, evolução e paleogeografia**

Recife  
2023

BRUNO CAETANO DOS SANTOS

**Evaporitos da Formação Codó: estratigrafia, evolução e paleogeografia**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Geologia da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Mário Ferreira de Lima Filho.

Coorientador (es): Prof. Dr. João Adauto de Souza Neto e Dr. Thales Lúcio Santos da Silva.

Recife

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através  
do programa de geração automática do SIB/UFPE

Santos, Bruno Caetano dos.

Evaporitos da Formação Codó: estratigrafia, evolução e paleogeografia /  
Bruno Caetano dos Santos. - Recife, 2023.

124 p : il., tab.

Orientador(a): Mario Ferreira de Lima Filho

Coorientador(a): João Aduino de Souza Neto

Coorientador(a): Thales Lúcio Santos da Silva

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal  
de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Geologia -  
Bacharelado, 2023.

Inclui referências, anexos.

1. Formação Codó. 2. Bacia de São Luís-Grajaú. 3. Evaporitos. 4. Sequências.  
I. Lima Filho, Mario Ferreira de. (Orientação). II. Souza Neto, João Aduino de.  
(Coorientação). III. Silva, Thales Lúcio Santos da. (Coorientação). VI. Título.

550 CDD (22.ed.)

BRUNO CAETANO DOS SANTOS

**Evaporitos da Formação Codó: estratigrafia, evolução e paleogeografia**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Geologia da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Aprovado em: 30/10/2023

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Mário Ferreira de Lima Filho (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Virginio Henrique de Miranda Lopes Neumann (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Dr. Thales Lúcio Santos da Silva (Examinador Externo)  
Reminera Brasil

Dedico este trabalho a Deus, aos meus pais Albani Caetano e Sueli Gabriel, a minha irmã Maria Eduarda, e por fim, a todos os familiares, orientadores, amigos e amigas que durante esta pequena caminhada, contribuíram tanto no crescimento, amadurecimento profissional e pessoal.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a Nossa Senhora de Aparecida, por ampararem e sustentar em alguns momentos de muitos questionamentos e pelo dom da vida.

Agradeço aos meus pais, Albani Caetano e Sueli Gabriel, e a minha irmã, Maria Eduarda, por todo o esforço que incansavelmente em todos esses anos, nesta breve caminhada me ajudaram, aconselharam, ampararam, amaram sempre, obrigado por tudo, amo vocês.

Agradeço a três mestres que no segundo ano do ensino médio (2013) e no cursinho (2015), me ajudaram a escolher este belíssimo curso, a professora de geografia Geiviane e aos professores Luís Carlos (Física), hoje na UFRPE de Serra Talhada, e Gustavo Borges, grande professor de geografia.

Ao meu orientador, prof Mário de Lima Filho, por todo apoio, conselhos, orientação, ajuda e pela confiança que depositou em mim, nesse trabalho.

A professora, Thais Carrino por toda orientação nos dados de espectroscopia de reflectância, sensoriamento remoto (conjuntamente com meu amigo Daniel Barbosa), os conselhos e toda ajuda.

Aos meus co-orientadores, prof Adauto Souza Neto, em que, no ano de 2018, me acolheu tão bem nessa caminhada de iniciação científica/projetos, e com conselhos, dicas, correções, a Thales Lúcio, que me aturou com tantas inquietações e dúvidas, e na sua tranquilidade me ajudou tanto.

Aos professores do departamento de geologia que contribuíram para o meu amadurecimento e conhecimento na área. Aos professores, Adauto Souza Neto, Mário de Lima Filho, Virgínio Neumann, Antônio Barbosa, Almany Santos, Thais Carrino, Sergio Pacheco, e Gorki Mariano, muito obrigado.

Aos amigos e amigas que desde o início dessa caminhada me ensinaram, ajudaram e aconselharam tanto, são eles/elas: Aline Naira, Elaine Lourenço, Jefferson Alves (Jeff), Nilson Fernandes, Pedro Guedes, Thamara Welle, Daniel Barbosa (Selva), Felipe Tenório, Osvaldo Correia, Marcio Alencar, Vicente Silvestre, Daniel Fonseca, Victor Silva, Erick Botelho, Gabriel Nassau, Carol Cazarín (*in memoriam*), Bruna Camila, Iwara Elisa, Thamires Albuquerque, Tâmara Barros, Steffany Pergentino, Flávia Kamilla, Rayane Vieira, Rayane Reis, Renato Mariano, Mariana Morais, Pe. Kaio Duarte, Gustavo Delfino, Juliana Vieira e sua tia Auxiliadora Vieira (Geóloga da Vale, hoje, aposentada), Natalia Almeida e Bruno Arruda.

Aos compesianos, a minha primeira experiência na geologia não poderia ser em um ambiente tão maravilhoso e com pessoas que sou grato por ter aprendido, admirado e sido tão bem acolhido.

Agradecimento especial a Gerência de Obras Especiais (GOE), formado por Rodrigo, Thiago Florêncio, Augusto Rodrigues (Nobre), Bruna Alencar, Solón (nosso mentor de investimento), Maxhanrry, Alex Marques, Iago Travassos, Rodrigão, Plácido, Michelline Paes, Seu Elias e Arthur.

E como parte da GOE, a Coordenação de Águas Subterrâneas – CAS, tem um lugar especial para mim, os grandes geólogos e geóloga que pude viver manhãs, tardes e até noites juntos, seja no escritório ou pátio de obra, me ensinaram, aconselharam e proporcionaram experiências marcantes na minha vida. Um agradecimento especial aos meus mestres na hidrogeologia, Robson Xavier (Robgol), Mariza Brandão, João Maria e a seu Marcilio Pacheco.

Aos amigos de LGAPE, Gabriel Albuquerque, Thales Lúcio, Manu e Aline Naira, muito obrigado pelos momentos de muita geoquímica.

Agradeço ao PRH 47.1, no qual, tenho a grande honra de ter sido bolsista, coordenado pelo professor Mário, com a grande ajuda e apoio de um coração imenso da nossa querida e amada Sônia Agostinho, me proporcionou vivências e experiências incríveis.

Ao convênio ANP/FADE por todo apoio financeiro com a bolsa do programa.

A Rosa Elvira Pabón, pelas análises das amostras para espectroscopia de reflectância, feitas no ITV-VALE.

Ao PALEOLAB, com as análises paleontológicas de nanofósseis. E as Dras Flávia Pedrosa e Emilia Tomé, com as discussões sobre a seção de bioestratigrafia.

A mineração GESSO INTEGRAL, representada por Seu Marcos Vasconcelos, e pela geóloga /amiga, Gabriela Angelim, por terem disponibilizado o acesso à área da mina de gipsita para coleta das amostras aqui analisadas e por ter doado ao LAGESE o testemunho de sondagem aqui descrito e amostrado, além de toda a atenção durante o trabalho de campo.

Por fim, agradeço a Universidade Federal de Pernambuco e ao Departamento de Geologia (DGEO/CTG) por ter me concedido todo ensinamento e suporte durante toda a graduação.

“É justo que muito custe o que muito vale “

D'ávila, Teresa.

## RESUMO

Os depósitos cretáceos da Formação Codó da Bacia de São Luís-Grajaú localizados próximos a cidade de Grajaú-MA, na Mina Chorado, constituem sequências formadas por: folhelhos e argilitos ricos em matéria orgânica, calcilutitos, calcarenitos, evaporitos e argilitos, descritos através da estratigrafia, conteúdo fóssilífero e paragênese mineral. Dessa forma, novos estudos têm como objetivo elucidar a distribuição dessas rochas na região, caracterizando os sistemas deposicionais dessas sequências, através da integração de dados a partir de estudos sedimentológicos, estratigráficos, bioestratigráficos, petrográficos, espectroscopia de reflectância, aerolevantamento de ALOS-PALSAR e dados de campo. Os evaporitos aqui estudados possuem origem eodiagenética, definidos em quatro fases distintas: primária, com resquícios de gipsita *chevron*; secundária, com gipsita acicular (fibrosa) e nodular; terciária, com gipsita alabastrina; quaternária, com gipsita acicular (fibrosa, variação Selenita) - que compõem os veios intrasedimentos e planos de fraturas. As análises de sequências permitiu a divisão em três seções: Sequência 1 (basal), representada por dois sistemas deposicionais (marinho raso e lacustre de baixa energia com pequenas perturbações com níveis anóxicos e óxicos); Sequência 2 (intermediária), representada por um sistema deposicional (*saline pan/sabkha*); Sequência 3 (topo), representada por três sistemas deposicionais (lacustre com condições euxínicas a óxicas com influxo terrígeno, marinho plataformar, seguido por um sistema lacustre de baixa energia com influxo terrígeno). A partir das análises de espectroscopia de reflectância foram descritas feições de absorções intensas com maiores profundidades na gipsita com textura acicular (fibrosa) quando comparada as outras texturas observadas. Nas rochas carbonáticas, observa-se as feições típicas do mineral constituinte (calcita) e a presença de argilominerais (esmectita ou illita). Nos folhelhos e argilitos ricos em matéria orgânica, as feições típicas (O-H) foram identificadas, além de argilominerais (esmectita e/ou illita). Os lineamentos estruturais permitiram a identificação de dois *trends* principais: NE-SW e NW-SE, seguidos de dois *trends* secundários de WNW-ESE e ENE-WSW, correspondentes aos *trends* regionais que afetaram a bacia.

Palavras-chave: Formação Codó, Bacia de São Luis-Grajaú, Evaporitos, Sequências.

## ABSTRACT

The Cretaceous deposits of the Codó Formation of the São Luís-Grajaú Basin located near the city of Grajaú-MA, Chorado Mine, constitute sequences formed by: shales and mudstones rich in organic matter, calcilutites, calcarenites, evaporites and mudstones, described through stratigraphy, fossil content and mineral paragenesis. Therefore, new studies aim to elucidate the distribution of these rocks in the region, characterizing the depositional systems of these sequences, through the integration of data from sedimentological, stratigraphic, biostratigraphic, petrographic studies, reflectance spectroscopy, ALOS-PALSAR aerial survey and field data. Evaporites have an eodiagenetic origin, defined in four distinct phases: primary, with remains of chevron gypsum; secondary, with acicular (fibrous) and nodular gypsum; tertiary, with alabastrine gypsum; quaternary, with acicular gypsum (fibrous, Selenite variation) - which make up the intrasedimentary veins and fracture planes. Sequences analyzed allowed division into three sections: Sequence 1 (basal), represented by two depositional systems (shallow marine and low-energy lacustrine with small disturbances at anoxic and oxic levels); Sequence 2 (intermediate), represented by a depositional system (saline pan/sabkha); Sequence 3 (top), represented by three depositional systems (lacustrine with euxinic to oxic conditions with terrigenous influx, marine shelf, followed by a low-energy lacustrine system with terrigenous influx). Based on the reflectance spectroscopy analyses, intense absorption features with greater depths were described in gypsum with acicular (fibrous) texture when compared to the other textures observed. In carbonate rocks, the typical features of the constituent mineral (calcite) and the presence of clay minerals (smectite or illite) are observed. In shales and claystones rich in organic matter, typical features (O-H) were identified, in addition to clay minerals (smectite and/or illite). The structural lineaments allowed the identification of two main trends: NE-SW and NW-SE, followed by two secondary trends of WNW-ESE and ENE-WSW, corresponding to the regional trends that affected the basin.

Keywords: Codó Formation, São Luís-Grajaú Basin, Evaporites, Sequences.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – a) Mapa de localização da área mapeada, localização da cidade de Grajaú; e b) área do mapeamento nas minas: Chorado e Barreirinhas, com as principais vias de acesso. ....	20
Figura 2 – a) Mapa de localização geográfica; e b) as principais formações e os afloramentos descritos. ....	24
Figura 3 - Sondagem geológica com os níveis de gipsita que foram confeccionadas as lâminas: A1, F2 e J3, com respectivas profundidades de 0,15 m, 5,95 m e 9,01 metros. ....	26
Figura 4 - Relação entre ambientes evaporíticos e as respectivas texturas presentes. ....	27
Figura 5 - Classificação das rochas carbonáticas com base na textura e a relação entre grão e matriz. ....	28
Figura 6 - Imagem de ALOS-PALSAR sombreadas de acordo com os ângulos de iluminação da área mapeada (losango em amarelo): a) 0° Az; b) 45° Az; c) 90° Az; d) 315° Az. ....	31
Figura 7 - Mapa da Província do Parnaíba, seus limites estruturais com a área de estudo. ....	32
Figura 8 - Bacias da Província da Parnaíba e seus principais limites associados. ....	34
Figura 9 - Sequências deposicionais da Bacia do Parnaíba. ....	35
Figura 10 – a) Localização da Bacia São Luís-Grajaú com seus limites geográficos e tectônicos, a Província da Parnaíba, em destaque (em laranja); b) estratigrafia e principais limites tectônicos que limitam a bacia de São Luís-Grajaú. ....	39
Figura 11 - Carta tectonoestratigráfica da Bacia de São Luís-Grajaú. Legenda: BEQ - Fm Bequimão; PIM - Fm Pimenteiras; GRA – Fm Grajaú; COD – Fm Codó; ITA – Fm Itapecuru; PIR – Pirabas; BAR – Fm Barreiras. ....	41
Figura 12 - Principais minerais evaporíticos de ambientes marinhos e continentais. ....	46
Figura 13 - Ordem do ciclo ideal na deposição de uma sequência evaporítica. ....	48
Figura 14 - Modelos de bacias evaporíticas com barreiras em uma das entradas. a) bacia profunda - água profunda; b) bacia rasa – água rasa e c) bacia profunda – água rasa. ....	52
Figura 15 - Modelo de distribuição de fácies "olho de touro", associado a bacias completamente fechadas, exibindo um zoneamento de sais com diferentes solubilidades. ....	53
Figura 16 - Modelo de distribuição de fácies "gota de lagrima", típico de bacias restritas com um canal de entrada. A associação de fácies é assimétrica onde os sais mais concentrados se depositam nas porções afastadas da bacia. ....	54
Figura 17 - Mares epicontinentais, com grandes áreas continentais e águas rasas com áreas de centenas a milhares de quilômetros. ....	55
Figura 18 - Evaporitos em rampas e plataformas. Em a) rampa com inclinação suave com restrição causada pela zona Y; b) plataforma protegida com restrição pela exposição de recifes;	

c) plataforma protegida, com margem profunda e bancos do centro da plataforma que restringem a exposição. ....	56
Figura 19 - Classificação e contexto deposicional dos tipos de sabkha. ....	58
Figura 20 - Sabkha continental com suas várias fácies e processos de fornecimento de sais para este ambiente. ....	59
Figura 21 - Estágios de evolução de um ciclo deposicional de um lago efêmero continental ( <i>saline pan</i> ). ....	60
Figura 22 – a) Perfis estratigráficos: A-A’ e B-B’ da seção basal e intermediária do afloramento BC_01, estruturas em formatos de bolsões (retângulo em azul) compostos por gipsita acicular (fibrosa) e folhelhos (retângulo azul); b) perfil composto da seção basal e intermediária.....	63
Figura 23 – a) Fácies Siltito maciço de coloração verde clara, com espessura de 0,53 metros, porção basal do afloramento BC_01, e o contato com a fácies Co, no topo (linha tracejada em vermelho); b) amostra litológica.....	64
Figura 24 – a) Fácies Sm, descrita petrograficamente como um siltito com moderado teor de matéria orgânica, (b) composto essencialmente de matéria orgânica (círculo pontilhado em amarelo) e quartzo anédricos (setas brancas). Fotos em nicóis paralelos (a e c) e nicóis cruzados (b e d).....	64
Figura 25 – a) Fácies Calcário ostracodal com seu contato no topo com a fácies Fn (linha tracejada em amarelo) com sua laminação plano-paralela e tapetes microbiais (linha contínua em azul); b) zoom na porção basal para confecção da lâmina petrográfica, em que, se observa os tapetes microbiais (linha contínua em azul) e ostracodes (setas em branco) em formas ovaladas a esféricas. ....	65
Figura 26 – a) e b) Fácies Co, descrita como um <i>packstone</i> de matriz micrítica e cimento composto por calcita espática (seta amarela); c) ostracodes de formas monoespecíficas formando os tapetes microbiais (retângulo pontilhado em branco); d) níveis piritizados (seta vermelha) e oxidados (círculos em azul). Fotos em nicóis paralelos (a e c) e nicóis cruzados (b e d), com objetiva de 20x.....	66
Figura 27 – a) Fácies Calcário ostracodal (Co) composta essencialmente por ostracodes que perfazem 70% da rocha, com granulometria fina a média, estrutura maciça, observa-se o contato basal com a fácies Al (linha tracejada em azul) e no topo o contato com fácies Al (linha tracejada em amarelo); b) amostra com presença de ostracodes (elipse laranja).....	67
Figura 28 – a) Fácies Co com presença de pirita (círculo azul); descrita como um <i>packstone</i> de matriz micrítica e (b) cimento composto por calcita espática (seta amarela) com ostracodes bem	

e mal-formados e níveis de oxidação (retângulo pontilhado em branco), em c), d), e) e f). Fotos em nicóis paralelos (a, c, e) e nicóis cruzados (b, d, f), com objetiva de 20x. ....	68
Figura 29 – a) Fácies Folhelho Negro (Fn) composta essencialmente por matéria orgânica, sobreposta a esta, observa-se o contato desta com a fácies Al (linha tracejada em laranja) e o contato da fácies Al e Co (linha tracejada em amarelo); b) estrutura de fissilidade e em c) amostra de mão. ....	69
Figura 30 – a) Fácies Fn composta essencialmente por matéria orgânica e quartzo; b) quartzo se apresenta de forma anédrica (setas em amarelo) e granulometria fina; c) e d) matéria orgânica que perfaz mais de 60% da composição da rocha. Fotos em nicóis paralelos (a e c) e nicóis cruzados (b e d), com objetiva de 20x. ....	70
Figura 31 – a) Fácies Argilito laminado (Al) composta essencialmente por matéria orgânica, sobreposta a esta, observa-se o contato desta com a fácies Co (linha tracejada em vermelho) e o contato da fácies Al e Fn (linha tracejada em amarelo), estrutura laminada e a presença de macro fósseis (invertebrados) (círculo tracejado e setas em branco); b) amostra do argilito com presença de ostracodes (pontinhos em branco). ....	71
Figura 32 – a) Fácies Argilito laminado (Al) composta essencialmente por matéria orgânica, com granulometria fina, sobreposta a esta, observa-se o contato desta com a fácies Gm que representa a seção intermediária do afloramento BC_01, estrutura maciça e os contatos com a fácies; b) amostra com presença de ostracodes (retângulo amarelo). ....	72
Figura 33 – I) Fácies Argilito maciço (Amm) com 10,7 metros de espessura com seus respectivos níveis argilosos: a) e b) argilito de cor bege; c) argilito de cor vermelho claro com gipsita acicular; d) argilito de cor marrom com grãos de quartzo e presença de óxidos; e) argilito de cor vermelha com grãos de quartzo; f) horizonte O; II) Perfil estratigráfico. ....	74
Figura 34 – a) Fácies Calcário maciço fino (Cmf) com 1,15 metros, formada por um calcilito de estrutura maciça e cor marrom claro; b) presença de raízes também é observada. ....	75
Figura 35 – a) e b) Fácies Cmf, descrita como um <i>wackestone</i> de matriz micrítica; c) e d) porosidade sendo substituída por pirita (seta azul); e) e f) resquícios de valvas desarticuladas (setas em amarelo) sendo preenchidas por calcita espática (retângulo vermelho). Fotos em nicóis paralelos (a, c, e) e nicóis cruzados (b, d, f), com objetiva de 10x. ....	76
Figura 36 – Fácies Calcário laminado (Cl/Clo) e Calcário maciço fino (Cmf) (contato das fácies, linha tracejada em vermelho) com 0,40 m e 1,40 metros, respectivamente; a) Fácies Cl/Clo formada por um calcarenito com estrutura laminar, com alternâncias de camadas marrom claro e cinzas; b) a Fácies Cmf formada por um calcilito de estrutura maciça e cor marrom claro. ....	77

Figura 37 – a) Fácies Cl/Clo, com estrutura maciça, com coloração marrom clara, presença de vênulas de óxidos de cor preta com direções transversais (setas em amarelo) e verticais (seta azul); b) <i>wackestone</i> com matriz micrítica (seta vermelha) preenchendo (c e d) valvas de ostracodes e porosidade fenestral e vugular; e) e f) presença de pirita framboidal. Fotos em nicóis paralelos (c, e) e nicóis cruzados (d, f), com objetiva de 20x. ....	78
Figura 38 - Afloramento BC_05 com espessura de 4 metros e direção NW-SE, dividido em seis níveis e suas respectivas fácies. ....	79
Figura 39 – a) e c) Afloramento BC_05 com espessura sedimentar de 3,1 metros; b) acamamento mergulhando para SW, representado no estereograma. ....	80
Figura 40 - Afloramento BC_05 com espessura de 3,1 metros. a) Fácies Cmf, seção basal do afloramento, composta por um calcilutito com estrutura maciça e cor marrom escuro (contato no topo com a fácies Cl, linha tracejada em amarelo); b) Fácies Cl/Clo, composta por um calcarenito de granulometria fina a média, com laminações plano-paralela, cor variando entre cinza-escuro/marrom-claro a bege (alternância marcada pela linha tracejada em azul) com presença de óxidos (setas pretas); c) Fácies Cf, composta por um calcilutito, estrutura físsil e cor marrom escuro (contato no topo com a fácies Cl/Clo, linha tracejada em vermelho). ....	82
Figura 41 - Afloramento BC_05 com espessura de 3,1 metros. a) Fácies Cl/Clo, composta por um calcarenito de granulometria média a fina, com laminações plano-paralela, cor variando entre cinza-escuro/marrom-claro a bege; b) Fácies Cf, composta por um calcilutito, estrutura físsil, cor marrom escuro e presença de vênulas de gipsita acicular (fibrosa) (setas em azul); c) Fácies Cm, composta por um calcarenito de granulometria média, estrutura maciça e cor marrom clara (contato basal com a fácies Cf, linha tracejada em amarelo). ....	83
Figura 42 – a) Fácies Gipsita maciça (Gm) composta essencialmente gipsita, com granulometria média, sobreposta a esta, observa-se o contato desta com a fácies Amm que representa o topo do afloramento BC_01, inclusões (em vermelho e amarelo) formados por folhelhos negros e gipsita acicular (fibrosa), contatos com a fácies sobreposta (linha tracejada em preto); b) perfil estratigráfico B-B' . ....	84
Figura 43 – a) Inclusão com largura (Li) de 2,35 m formado por folhelho negro e gipsita acicular (fibrosa); b) zoom das principais litologias que compõem a estrutura; c) comportamento reológico dos folhelhos (Flh) e da gipsita (Gi) essas intrudem em formas de diques sem direções preferenciais. ....	85
Figura 44 – a) Geometria em formato de bolsão, em detalhe, composto por gipsita acicular (fibrosa) e argilitos com laminação plano-paralela ricos em matéria orgânica, notável, a espessura da gipsita (Eg) de 10 cm; b) zoom, retângulo em amarelo da figura a), uma alternância	

de camadas mili a centimétricas dessas duas litologias (linha vermelha); c) Veios intrassedimento formados por gipsita acicular (fibrosa), variação Selenita, que intrudem o argilito (parte superior).....	86
Figura 45 - Gipsita acicular (fibrosa) com hábito fibroso, com coloração marrom escuro, em a), b), c) e d). Fotos em nicóis paralelos (a e c) e nicóis cruzados (b e d), com objetiva de 20x. .	87
Figura 46 - Argilito composto por quartzos anédricos com extinção ondulante, relevo baixo (pontos em branco) e matéria orgânica amorfa. A presença de carapaças preenchidas por matéria orgânica (setas em branco), em a) a d). Fotos em nicóis paralelos (a e c) e nicóis cruzados (b e d), com objetiva de 20x. ....	88
Figura 47 – a) Fraturas preenchidas por gipsita acicular (fibrosa), variação Selenita e folhelhos, em meio a fácies de gipsita maciça (Gm); b) estereograma com as principais atitudes dos planos de fratura, com mergulho para norte-nordeste.....	89
Figura 48 - Fácies Gipsita laminada (Gl) composta essencialmente por gipsita, de granulometria média com laminação plano paralela, formadas por uma alternância de camadas cinza claro a cinza escuro, formadas por gipsita e folhelhos negros, respectivamente. a) Visão panorâmica do afloramento BC_04, espessura sedimentar de 12 m e comprimento de 50 m; b) interpretação estratigráfica com os dois perfis: C-C', D-D', os contatos entre as litologias e as fácies (linhas em azul, vermelho e laranja), estruturas de inclusão (elipse tracejada em vermelho) e malhas de veios intrassedimento formados por gipsita acicular (fibrosa) e folhelhos (quadrado tracejado em preto).....	91
Figura 49 – a) e b) Perfil estratigráfico C-C' com 10,5 m de espessura com as duas respectivas fácies e litologias que o compõem; c) seção ampliada (retângulo tracejado preto) das malhas de veios de gipsita acicular (fibrosa) (Gi) e folhelhos negros (Flh); d) inclusão (elipse tracejada em vermelho) com largura (Li) de 50 cm de material homônimo as malhas de veios, respectivamente. ....	93
Figura 50 – a) e b) Perfil estratigráfico D-D' com 11 m de espessura com as duas respectivas fácies e litologias que o compõem e estruturas presentes (retângulo tracejado em preto); c) e d) seção ampliada da inclusão com largura (Li) de 60 cm composta por gipsita acicular (fibrosa) (Gi) e folhelhos negros (Flh). ....	94
Figura 51 - Sondagem geológica com 9,37 m de espessura, formada pelas fácies Gl e Gm (linha continua em azul, representando o contato dessas), compostas por gipsita e matéria orgânica, apresenta topo de 0,0 m e base de 9,37 m de profundidade. Foram confeccionadas três lâminas petrográficas nas profundidades: 0,15 m, 5,95 m, 9,01 m (círculos em vermelho). ....	95

Figura 52 – a) e b) Gipsita nodular, com coloração marrom escuro; c) e d) grão de gipsita de granulometria fina com carbonatos (seta azul) que se deforma ao redor. Fotos em nicóis paralelos (a e c) e nicóis cruzados (b e d), com objetiva de 20x. ....	96
Figura 53 – a) Variedade gipsita acicular (fibrosa) com carbonatos (seta azul); b) deformação em forma de S; c) e d) arranjos em ângulos em agudos em forma de V com a presença de carbonatos, na base (seta amarela). Fotos em nicóis paralelos (a e c) e nicóis cruzados (b e d), com objetiva de 20x.....	97
Figura 54 – a) Variedade alabastrina com carbonatos (seta amarela); b) variedade alabastrina com carbonatos; contatos retos e suturados entre a gipsita e carbonatos (seta amarela); c) e d) gipsita alabastrina apresentando cor cinza claro a branco. Fotos em nicóis paralelos (a e c) e nicóis cruzados (b e d), com objetiva de 20x. ....	98
Figura 55 - Gipsita acicular (fibrosa). a) e b) Pequenas deformações desses cristais; c) e d) arranjos em ângulos em agudos em forma de V (“fantasmas” de gipsita <i>chevron</i> ). Fotos em nicóis paralelos (a e c) e nicóis cruzados (b e d), com objetiva de 20x.....	99
Figura 56 - Contato entre nodular e acicular (fibrosa) com a presença de carbonatos, em a) e b); contatos retos e suturados com a gipsita acicular (fibrosa) e com os carbonatos limite do contato (linha tracejada em vermelho da figura a)) dessas duas texturas, em c) e d); contato dos grãos dessa textura, também apresentam contatos retos e suturados, em e) e f). Fotos em nicóis descruzados (a, c, e) e nicóis cruzados (b, d, f) com objetiva de 20x.....	100
Figura 57 - Espécies de nanofósseis: <i>Assipetra</i> sp. <i>Assipetra terebrodentarius</i> , <i>Nannoconus truittii truittii</i> , <i>Nannoconus truittii frequens</i> , <i>Nannoconus</i> sp., <i>Thoracosphaera</i> sp., <i>Watznaueria barnesae</i> , <i>Watznaueria</i> sp. ....	102
Figura 58 - Curvas de reflectância normalizada com os principais níveis de gipsita.....	103
Figura 59 - Curvas de reflectância normalizada com os principais níveis de carbonatos, com indicação das principais feições que indicam, composição predominantemente de calcita...	104
Figura 60 - Curvas de reflectância normalizada com os principais níveis de folhelhos e argilito, com indicação de principais feições em ~2209 e ~2345 nm (Al-OH) e de água em cerca de 1912 nm. ....	105
Figura 61 - Curvas de reflectância normalizadas de amostras de gipsita, de níveis carbonáticos e de argilitos com matéria orgânica. Os comprimentos de onda usados na criação do índice espectral de gipsita (1140 e 1208 nm) estão indicados. ....	106
Figura 62 - Gráfico de leituras espectrais versus o índice de gipsita proposto neste trabalho. Amostras de rocha com valores de índice superiores a 1 indicam a presença de gipsita no material. ....	106

Figura 63 - Modelo digital de terreno da área mapeada (losango em amarelo) com as respectivas direções de sombreamento: a) 0° Az; b) 45° Az; c) 90° Az e 315° Az; e os lineamentos de cristas (em laranja) e vales (em azul). .....	108
Figura 64 - Diagramas de rosetas com cristas e vales com as respectivas direções de sombreamento: a) 0° Az; b) 45° Az; c) 90° Az e 315° Az; e o número de lineamentos extraídos das respectivas direções.....	109

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Afloramentos (BC) com seus respectivos níveis que tiveram lâminas petrográficas. .....	27
Tabela 2 - Classificação de GRABAU (1904) com base na granulometria das rochas carbonáticas. ....	28
Tabela 3 - Concentração dos principais íons presentes nos rios e mares (ppm). ....	46
Tabela 4 - Principais texturas e hábitos relacionados a anidrita e gipsita. ....	49
Tabela 5 - Afloramentos e sondagem geológica com suas respectivas coordenadas em UTM. .....	62
Tabela 6 – Associação de fácies, interpretação do sistema deposicional. ....	101
Tabela 7 – Espécies de nanofósseis dos respectivos afloramentos e níveis amostrados. ....	102

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>20</b>
1.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	20
1.2 MOTIVAÇÃO .....	21
1.3 OBJETIVOS .....	22
1.4 MATERIAIS E MÉTODOS .....	22
<b>1.4.1 Etapa pré-campo.....</b>	<b>23</b>
1.4.1.1 Predefinição dos afloramentos.....	23
<b>1.4.2 Etapa de campo.....</b>	<b>25</b>
<b>1.4.3 Etapa de laboratório.....</b>	<b>26</b>
1.4.3.1 Perfis sedimentares e análise de fácies .....	26
1.4.3.3 Análise Bioestratigráfica .....	29
1.4.3.4 Espectroscopia de reflectância.....	29
<b>1.4.4 Etapa pós campo .....</b>	<b>30</b>
1.4.4.1 Confecção do mapa final .....	30
1.4.4.2 Sensoriamento Remoto.....	30
<b>2 GEOLOGIA REGIONAL .....</b>	<b>32</b>
2.1 PROVÍNCIA DO PARNAÍBA .....	32
<b>2.1.1 Estratigrafia da Bacia do Parnaíba .....</b>	<b>34</b>
2.2 BACIA DE SÃO LUÍS-GRAJAÚ .....	38
<b>2.2.1 Estratigrafia da Bacia de São Luís-Grajaú.....</b>	<b>40</b>
<b>3 FORMAÇÃO CODÓ .....</b>	<b>42</b>
3.1 FORMAÇÃO CODÓ.....	42
<b>4 ROCHAS EVAPORÍTICAS .....</b>	<b>45</b>
4.1 ORIGEM DAS ROCHAS EVAPORÍTICAS .....	45
<b>4.1.1 Definição de evaporitos .....</b>	<b>45</b>
<b>4.1.2 Mineralogia e texturas evaporíticas .....</b>	<b>45</b>
<b>4.1.3 Mineralogia e texturas.....</b>	<b>48</b>
4.2 AMBIENTES DEPOSICIONAIS DE ROCHAS EVAPORÍTICAS.....	50
<b>4.2.1 Características gerais .....</b>	<b>50</b>
4.3 MODELOS DE DEPOSIÇÃO EM BACIAS EVAPORÍTICAS PRETÉRITAS .....	51

4.3.1 Bacia com barreira em uma das entradas ( <i>basinwide deposits</i> ).....	51
4.3.2 Plataformas Evaporíticas.....	55
4.3.3 Evaporitos Lacustres.....	57
4.4 MODELOS DE DEPOSIÇÃO EM BACIAS EVAPORÍTICAS ATUAIS .....	58
4.4.1 Depósitos de <i>Sabkhas</i> e lagos salinos.....	58
4.4.2 Depósitos de salinas e lagos salinos .....	60
<b>5 RESULTADOS .....</b>	<b>62</b>
5.1 CARACTERIZAÇÃO FACIOLÓGICA E PETROGRÁFICA DAS ROCHAS DOS AFLORAMENTOS E SONDAGEM GEOLÓGICA DOS EVAPORITOS .....	62
5.1.1 Descrição faciológica e petrográfica das litofácies da sequência 1.....	63
5.1.2 Descrição faciológica e petrográfica das litofácies da sequência 3.....	73
5.2 FÁCIES EVAPORÍTICAS .....	84
5.2.1 Descrição faciológica e petrográfica das litofácies da sequência 2.....	84
5.2.2 Descrição faciológica e petrográfica da sondagem geológica .....	95
5.3 BIOESTRATIGRAFIA .....	102
5.4 ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA .....	103
5.4.1 Índice espectral de gipsita.....	105
5.5 SENSORIAMENTO REMOTO .....	107
5.5.1 Lineamentos Estruturais.....	107
<b>6 DISCUSSÕES .....</b>	<b>110</b>
6.1 PARAGÊNESE MINERAL .....	110
6.2 ANÁLISE DE FÁCIES E SISTEMAS DEPOSICIONAIS .....	111
6.3 ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA E SEDIMENTAÇÃO DAS FÁCIES .....	114
6.4 CONFIGURAÇÃO MORFOTECTÔNICA ATUAL DA MINA DO CHORADO .....	115
<b>7 CONCLUSÕES.....</b>	<b>116</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>117</b>
<b>ANEXO 1 – MAPA GEOLÓGICO .....</b>	<b>123</b>

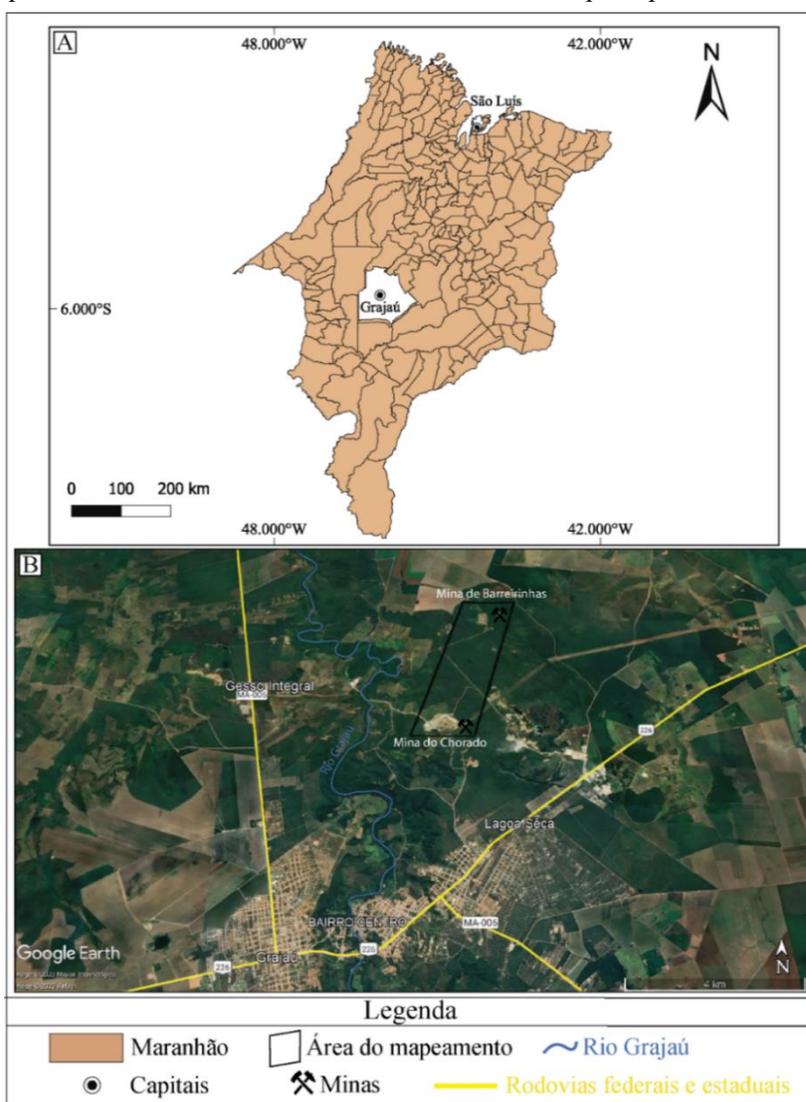
## 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os principais motivos para a realização desse trabalho de conclusão de curso, com os principais objetivos a serem alcançados acerca do tema.

### 1.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no sudoeste do estado do Maranhão, a 568 km da capital São Luís, no município de Grajaú. A área se localiza entre duas minas: Chorado e Barreirinhas pertencentes a empresa Gesso Integral com uma distância de 10,8 km do centro de Grajaú, possuindo uma área mapeável de 6,28 km<sup>2</sup>. Os principais acessos podem ser feitos através da rodovia federal BR-226 e pela rodovia estadual MA-006, com ambos os acessos por estradas vicinais de propriedade privada (Figura 1).

Figura 1 – a) Mapa de localização da área mapeada, localização da cidade de Grajaú; e b) área do mapeamento nas minas: Chorado e Barreirinhas, com as principais vias de acesso.



Fonte: O autor (2023).

## 1.2 MOTIVAÇÃO

A sedimentação dos depósitos cretáceos na Bacia de São Luís-Grajaú marca os três estágios aos quais a bacia foi submetida. A evolução tectonoestratigráfica da bacia apresenta certa similaridade quando comparada as outras bacias marginais brasileiras (*e.g.* Bacias de Santos, Campos, Sergipe-Alagoas) ligadas a abertura e, conseqüentemente, a formação do Atlântico Sul, sendo divididas em três estágios (Góes & Rossetti, 2001; Rossetti, 2001; Vaz *et al.*, 2007):

- i) Pré-rifte (Neoaptiano-Eoalbiano): formando uma grande depressão com baixa subsidência com predomínio de uma sedimentação adelgada representada pelas formações Grajaú e Codó, compostas por: arenitos, folhelhos, calcários e evaporitos, com sedimentação atribuída a ambientes marinho raso, lacustre e flúvio-deltaico;
- ii) Rifte (Eoalbiano-Mesoalbiano): apresentando um intenso falhamento de cinemática transtensional, com a formação de uma depressão profunda e, assim, acúmulo de espessa sucessão sedimentar, composta pela porção basal da Formação Itapecuru, composta por: arenitos e argilitos atribuídos a ambientes marinho raso e fluvio/deltaico;
- iii) Drifte (Mesoalbiano-Neocretáceo): associado à deriva continental com rápida ampliação do fundo oceânico que culminou ao decaimento termal, no final do Albiano a Cenomaniano, representado pelas formações Alcântara e Cujupe, compostos por argilitos e arenitos atribuídos a um sistema de vales estuarinos incisos.

A sucessão sedimentar da Formação Codó, aos entornos do município de Grajaú-MA, tem como principais ocorrências: rochas evaporíticas (gipsita/anidrita), conjuntamente com folhelhos negros, argilitos e siltitos com matéria orgânica, carbonatos e argilitos.

A ocorrência dessas rochas na cidade de Grajaú-MA evidencia um ambiente deposicional diferente quando comparada a cidade de Codó-MA, como descrito por Paz & Rossetti (2001, 2005), Paz *et al.* (2005) e Rossetti *et al.* (2004).

Esses autores sugerem dois tipos de ambientes sedimentares nas duas cidades: em Codó-MA, um ambiente lacustre hipersalino em que se divide em três associações (lago central, intermediário e marginal, com as respectivas sucessões litológicas para cada associação) e na cidade de Grajaú-MA, um ambiente de *Sabkha*, com destaque para a ocorrência de espessos (5 a 15 metros) estratos de gipsita.

O mapeamento de superfície das principais litologias que ocorrem na cidade de Grajaú, é de suma importância, tanto no viés científico (*e.g.* distribuição da formação, descrição litológica, conteúdo fossilífero, geoquímico e tectônico), como econômico, na prospecção de gesso, para a indústria (construção civil e agricultura). Nessa temática, o último mapeamento de detalhe nessa região, foi realizado por Lovato *et al.* (1994), com a Folha Geológica SB. 23-V-D – Barra do Corda (escala: 1:250.000).

Dessa forma, o presente trabalho visa contribuir com um maior detalhamento da ocorrência das litologias da Formação Codó, na cidade de Grajaú, a partir da caracterização sedimentológica, estratigráfica, bioestratigráfica, textural, faciológica, para assim, identificar o paleoambiente da área mapeada e caracterizar sua paleogeografia. Por fim, o uso de ferramentas de sensoriamento remoto auxiliará na construção dos principais lineamentos estruturais presentes na área, gerando assim, um mapa geológico de detalhe (escala: 1:25.000) da área.

### 1.3 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo um maior detalhamento, através de novas ferramentas (*e.g.* índice de espectroscopia de reflectância), das rochas aflorantes da Formação Codó na cidade de Grajaú auxiliando, assim, o mapeamento da porção aflorante como também a análise paleogeográfica das principais fácies associadas a esta, a partir das rochas evaporíticas. Neste detalhamento os objetivos gerais do presente trabalho, são: i) construção dos perfis estratigráficos dos afloramentos; ii) descrição e interpretação das lâminas delgadas; iii) sensoriamento remoto para a construção do mapa geológico e extração dos principais lineamentos estruturais. Os objetivos específicos, são: i) integração dos dados estratigráficos e sedimentológicos para a interpretação dos principais sistemas deposicionais através das associações de fácies; ii) configuração morfotectônica através da extração dos principais lineamento estruturais; iii) descrição das principais espécies de nanofósseis calcários para a reconstrução paleogeográfica; iv) espectroscopia de reflectância para composição mineral e argilominerais associados as litologias estudadas e a ferramenta estatística do índice espectral da gipsita para automatizar a identificação dos seus principais níveis.

### 1.4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia foi desenvolvida em quatro principais etapas: (i) a etapa de pré-campo, o levantamento bibliográfico contendo informações sobre a geologia, com ênfase na seção evaporítica da Bacia de São Luís-Grajaú, pertencente a Formação Codó com a escolha da área de interesse a ser mapeada com o auxílio de folhas geológicas (CPRM) e dados de

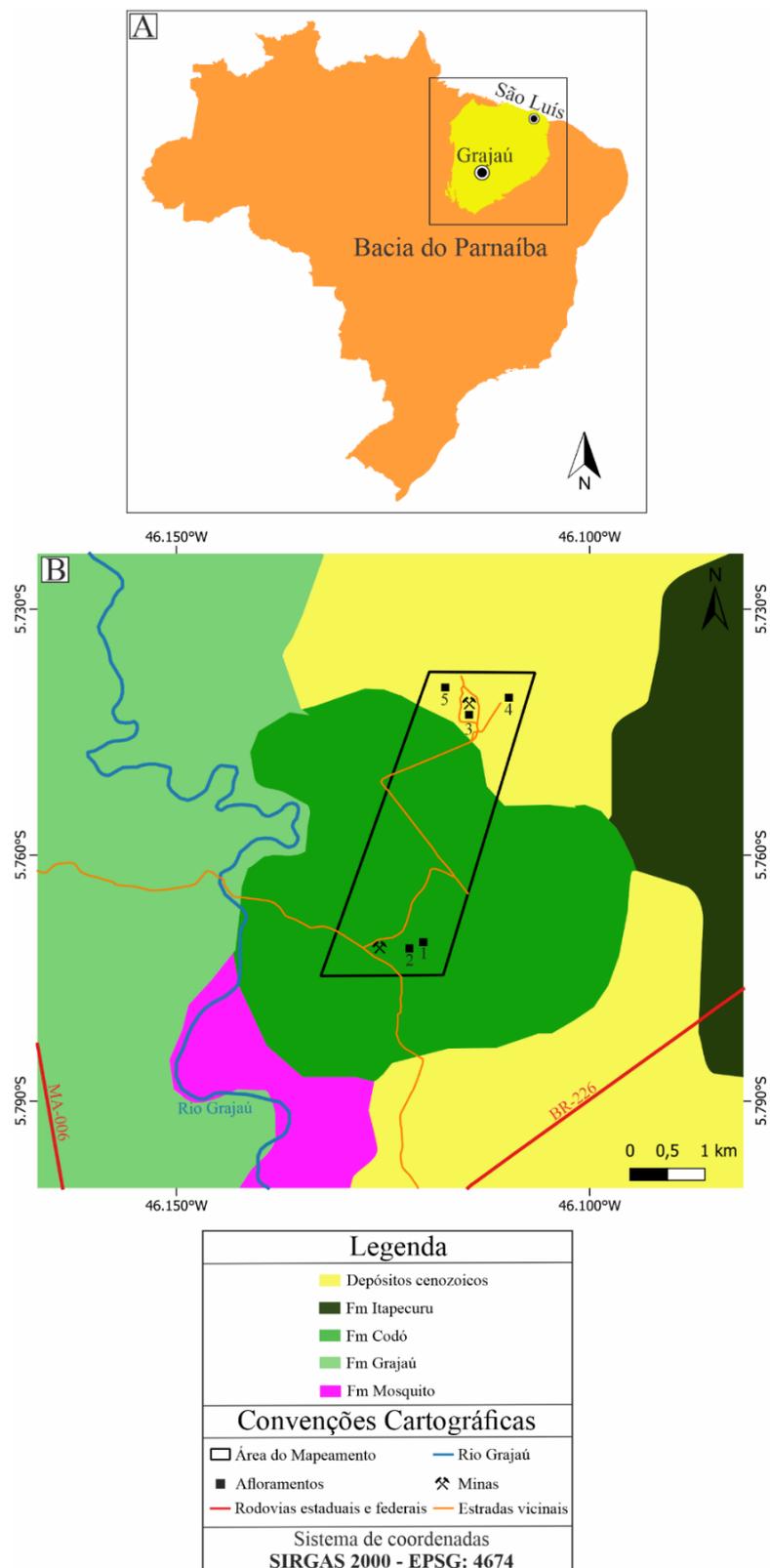
sensoriamento remoto e radar; (ii) etapa de campo, no qual, foram levantados perfis estratigráficos de afloramento, coletas de amostras e descrição do furo de sondagem geológica F064-03, cedido pela empresa Gesso Integral; (iii) a etapa de laboratório e pós campo, que consiste na digitalização dos perfis estratigráficos e da sondagem, petrografia quantitativa e qualitativa das lâminas delgadas das rochas, confecção de lâminas para a identificação das principais espécies de nanofósseis, espectroscopia de reflectância para as principais fases minerais presentes; o tratamento e discussão dos dados obtidos: a confecção do mapa final, a extração dos principais lineamentos estruturais regionais da área em questão e a interpretação desses resultados.

### **1.4.1 Etapa pré-campo**

#### **1.4.1.1 Predefinição dos afloramentos**

Para a confecção do pré-mapa (Figura 2) foi realizado uma compilação da base cartográfica disponível da região em questão, com os arquivos em formato *shapefiles* dos mapas geológicos disponíveis no Geobank - CPRM, como: a Folha Geológica SB. 23-V-D – Barra do Corda (escala: 1:250.000) (Lovato *et al.* 1994), o mapa geológico do Estado do Maranhão (escala: 1:750.000) (Klein *et al.* 2012); além do levantamento bibliográfico com dados sedimentológicos e estratigráficos. As delimitações de estradas (principais e secundárias) e cursos d'água foram confeccionados a partir de imagens de radar disponíveis no sistema *Google Earth Pro*®. Na elaboração do modelo digital de terreno (MDT), os dados altimétricos usados foram do programa de imageamento ALOS-PALSAR (resolução espacial: 12,5 x 12,5 m) da JAXA (*Japan Aerospace Exploration Agency*), posteriormente, esses dados foram filtrados para a escala determinada de 1:25.000. Por fim, na confecção desses mapas o *software* livre QGIS® (versão 3.14.1) foi utilizado.

Figura 2 – a) Mapa de localização geográfica; e b) as principais formações e os afloramentos descritos.



Fonte: Modificado de (KLEIN *et al.* 2012) com arquivos extraídos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e Serviço Geológico do Brasil (CPRM) – GEOBANK, 2023.

### 1.4.2 Etapa de campo

As etapas de campos compreenderam na descrição da sondagem geológica: F064-03 (espessura: 9,37 metros) e dois trabalhos de campo que resultou na descrição de sete afloramentos (Tabela 1) tendo como objetivo a coleta de dados para o devido fim da pesquisa. A descrição da sondagem F064-03 foi realizada na primeira etapa de campo e na etapa pós campo.

Sistematicamente, foram usados os seguintes materiais:

- GPS e martelo litológico;
- Lupa de bolso (10x);
- Canivete, trena e ácido clorídrico (HCl - 10%);
- Caneta, pincel;

E por fim, borrifador com água tendo como principal objetivo de realizar as descrições macroscópicas, mineralogia e de textura dos evaporitos da sondagem geológica.

O primeiro trabalho de campo foi realizado no período entre 18 e 21 de agosto de 2021, concentrando-se no polo gesso do município de Grajaú, em uma área de 18 km<sup>2</sup>, a cerca de 3 km a nordeste da cidade homônima. Cinco perfis estratigráficos foram levantados na Mina do Chorado, pertencente a Mineração Gesso Integral, próximo a Grajaú. O segundo trabalho de campo foi realizado no período entre 21 e 22 de outubro de 2021, onde levantou-se os últimos dois perfis estratigráficos da área mapeada. Nas duas etapas de campo, as descrições estratigráficas se deram com o uso dos respectivos materiais: lupa de bolso (10x), canivete, trena e caneta, caderneta de campo, bússola, GPS (*Global Positioning System*), martelo petrográfico e estratigráfico, e ácido clorídrico (HCl a 10%).

Na identificação dos afloramentos levantados, a localização e o posicionamento se deram com o uso do GPS e a identificação se deu com a nomenclatura do autor: Bruno Caetano, “BC”, seguido do respectivo número do ponto levantado, (ex: BC-01).

A sistemática das duas etapas compreende:

- 1) Levantamento de perfil sedimentar em escala 1:100 contendo a descrição de litofácies e estruturas sedimentares (aspectos estruturais, texturais e composicionais), dando enfoque às texturas macroscópicas dos evaporitos e as demais litologias;
- 2) Coleta de amostras utilizadas na confecção de lâminas delgadas e para espectroscopia de reflectância;
- 3) Aquisição de fotografias de afloramentos e da sondagem.

### 1.4.3 Etapa de laboratório

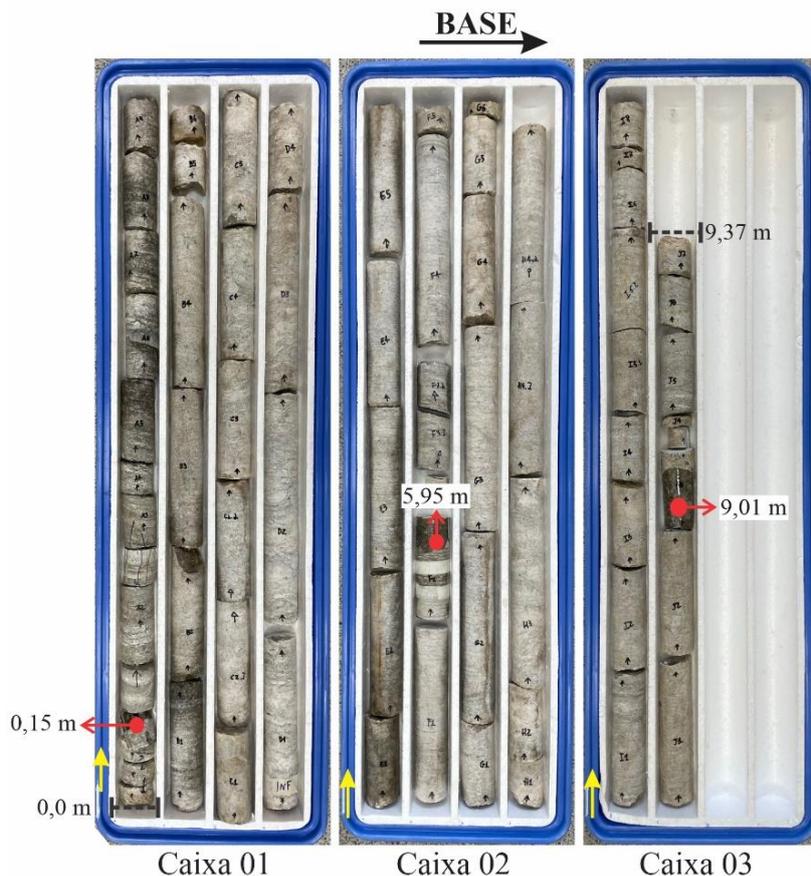
#### 1.4.3.1 Perfis sedimentares e análise de fácies

O levantamento de perfis sedimentares, como também a descrição da sondagem, fornece uma série de características para o conhecimento das sucessões sedimentares de uma área aflorantes, tais como: litologia, mineralogia, cor, textura, granulometria, espessura, estruturas sedimentares e tectônicas, medidas estruturais, conteúdo fossilífero e paleocorrentes. Isso permite a correlação e a comparação entre sessões sedimentares de outras áreas (Tucker, 2014).

#### 1.4.3.2 Análises petrográficas

Com base nas amostras coletadas em campo e a amostragem estratégica no furo de sondagem, foram confeccionadas 11 seções delgadas com 30  $\mu\text{m}$  de espessura, sendo 3 provenientes da sondagem (Figura 3) e 8 de afloramentos (Tabela 1). As lâminas foram descritas utilizando um microscópio ZEISS modelo SCOPE A1, com câmera acoplada, pertencente ao Laboratório de Petrologia Sedimentar do LAGESE.

Figura 3 - Sondagem geológica com os níveis de gipsita que foram confeccionadas as lâminas: A1, F2 e J3, com respectivas profundidades de 0,15 m, 5,95 m e 9,01 metros.



Fonte: O autor (2023).

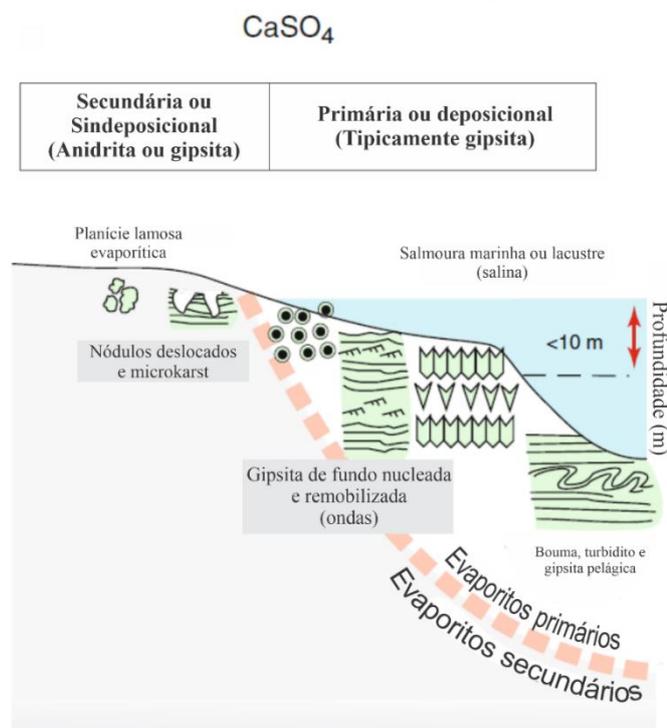
Tabela 1 – Afloramentos (BC) com seus respectivos níveis que tiveram lâminas petrográficas.

Afloramento	Seção	Litologia	Espessura
BC-01	Basal	Siltito	0,53 m
		Calcarenito	0,20 m
		Folhelho negro	0,47 m
		Calcarenito	0,10 m
BC-01	Intermediária	Gipsita e argilito	4,62 m
BC-04	Topo	Calcilutito	1,15 m
		Calcarenito	0,40 m

Fonte: O autor (2023).

Como as rochas evaporíticas são o principal foco deste trabalho, foi realizada uma descrição detalhada sobre os principais aspectos dessas rochas: mineralogia, textura e hábitos, com base nos trabalhos de Paz & Rossetti (2006a) e Warren (2016) (Figura 4).

Figura 4 - Relação entre ambientes evaporíticos e as respectivas texturas presentes.



Fonte: Modificado de Warren (2016).

No detalhamento das rochas carbonáticas, durante as etapas de campo, a descrição baseou-se na classificação de Grabau (1904) - que considera o aspecto granulométrico dessas rochas, seguindo uma escala com três grupos (Tabela 2):

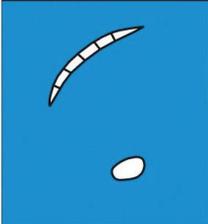
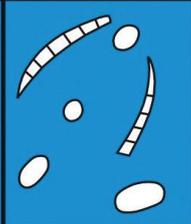
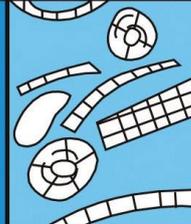
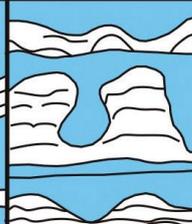
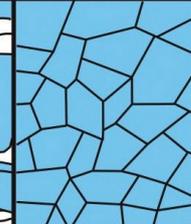
Tabela 2 - Classificação de GRABAU (1904) com base na granulometria das rochas carbonáticas.

Litologia	Granulometria (mm)
Calcirrudito	> 2 mm
Calcarenito	0,062 – 2 mm
Calcilutito	< 0,062 mm

Fonte: Grabau (1904).

Durante a etapa de laboratório, seguiu-se com a classificação de Dunham (1962) que se baseia na textura deposicional (Figura 5).

Figura 5 - Classificação das rochas carbonáticas com base na textura e a relação entre grão e matriz.

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

Fonte: Terra *et al.* (2010) adaptado de Dunham (1962).

#### 1.4.3.3 Análise Bioestratigráfica

Para a confecção das lâminas foram escolhidas 9 amostras tendo como resultado 3 estéreis e 6 fossilíferas com média a pobre preservação, do afloramento BC\_01 (1 amostra) e BC\_05 (8 amostras) essas amostras foram processadas no PALEOLAB (DGEO-UFPE) a partir do método de Antunes (1997), descrito abaixo:

- 1) Coloca-se cerca de 1 grama de sedimento, previamente moído no tubo de ensaio;
- 2) Adiciona-se um pouco de água destilada no tubo e, com o auxílio da haste de vidro desagrega-se totalmente o sedimento. Após a total desagregação, coloca-se mais água no tubo e homogeneiza-se a solução novamente;
- 3) Deixa-se em repouso por cerca de 7 minutos;
- 4) Coloca-se a lamínula sobre a placa aquecedora, previamente ligada. Temperatura máxima de 60° C;
- 5) Colocam-se duas a três gotas da suspensão sobre a lamínula. Em seguida, espalham-se gotas de água sobre a lamínula;
- 6) Esperar até que a solução seque totalmente;
- 7) Colar a lamínula (seca) sobre a lâmina, com Bálsamo do Canadá, *Entelam* ou *Northland* – esta última foi a utilizada no trabalho - na placa aquecedora;
- 8) Em seguida, coloca-se o conjunto (lamínula mais lâmina), no raio ultravioleta, para completa adesão dele.

#### 1.4.3.4 Espectroscopia de reflectância

A espectroscopia de reflectância é uma técnica baseada na absorção das propriedades químicas e estruturais de átomos e moléculas (Hunt, 1977; Clark, 1999). Feições de absorção dos espectros minerais são devidos a presença de específicos grupos moleculares específicos, dependendo da posição, forma e intensidade do comprimento de onda no visível ao infravermelho próximo (VNIR: 350 a 1.000 nm) e no infravermelho de ondas curtas (SWIR: 1.001 a 2.500 nm), sendo fatores para diagnosticar minerais (*e.g.* OH, Metal-OH, C-O, S-O), presentes em uma amostra (Senna *et al.* 2008).

Foram realizadas leituras de reflectância em 10 amostras: seção basal e intermediária do BC\_01, calcarenito do BC\_04 e as três profundidades da sondagem com lâmina petrográfica, cada amostra realizada são feitas três análises, contabilizando, trinta análises no total.

As análises foram feitas no Instituto Tecnológico Vale, localizado em Ouro Preto (MG). O equipamento foi o ASD-FieldSpec4- *High Resolution Next Generation*, caracterizado por 2.151 canais que mede a energia refletida da faixa do visível ao infravermelho de ondas curtas, ou seja, de 350 a 2.500 nm. Os dados de reflectância foram interpretados visualmente para identificação de minerais usando o software livre HypPy (*Hyperspectral Python*). Após a identificação mineralógica, foram criados índices espectrais para automatizar a identificação principalmente de níveis de gipsita. Gráficos de espalhamento para validar índices espectrais no conjunto amostral (n=30) serão produzidos com o software livre *Orange Data Mining*.

#### **1.4.4 Etapa pós campo**

##### **1.4.4.1 Confeção do mapa final**

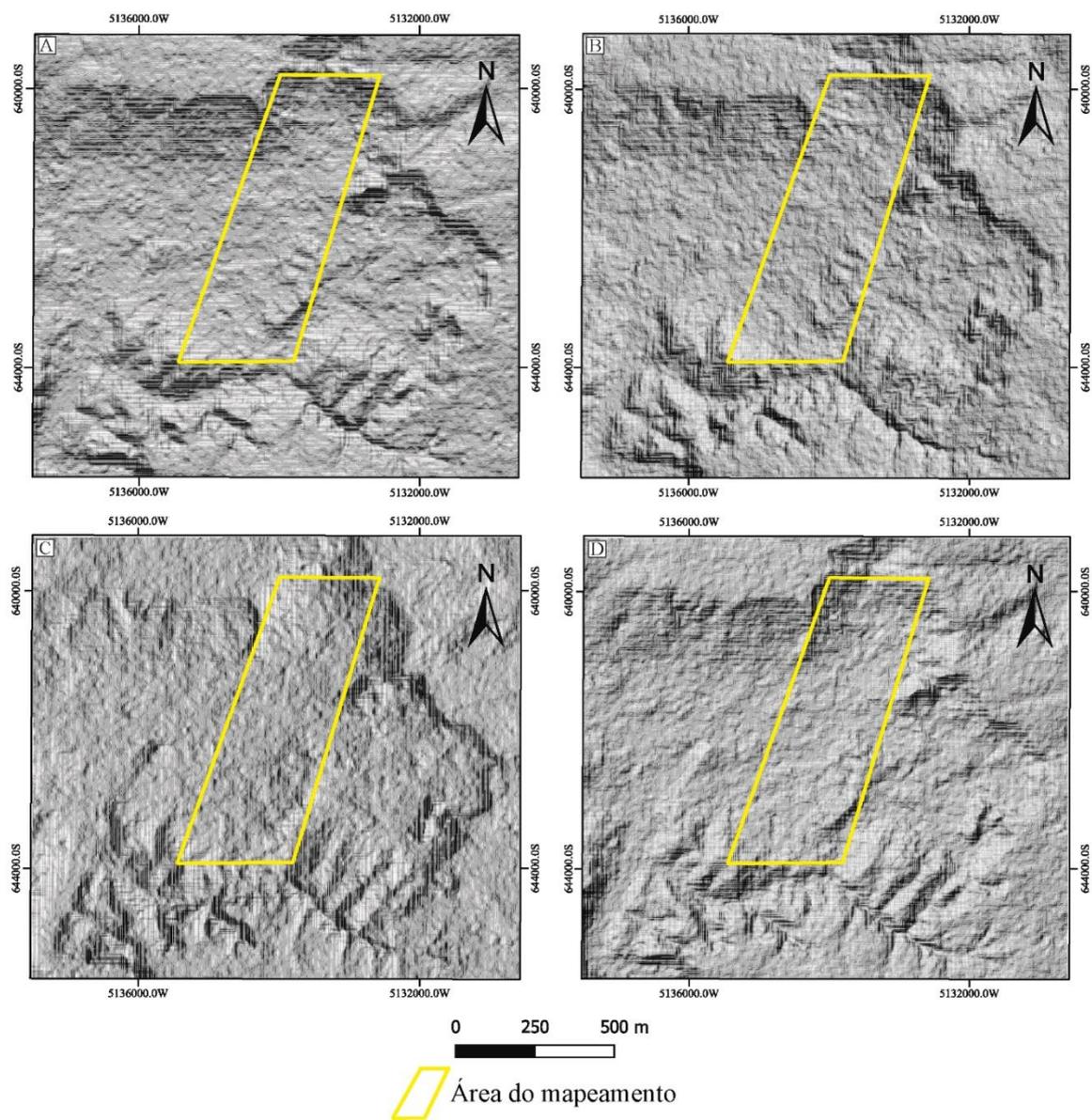
A área está inserida aos arredores do município de Grajaú-MA, com os aspectos observados nas duas etapas de campo descritas anteriormente. Para a elaboração do mapa final, de escala 1:25.000, foram elaborados arquivos do tipo *shapefiles* de polígono, linha e pontos do software livre QGIS® (versão 3.14.1), com o auxílio das evidências de campo e os mapas anteriores. A confecção do mapa final da área de estudo compreende na atualização de áreas já existentes, que não foram mapeadas anteriormente na escala de detalhe deste trabalho (Lovato *et al.* 1994; Klein *et al.* 2012).

##### **1.4.4.2 Sensoriamento Remoto**

As imagens de satélite e o MDT foram processados no software QGIS® (versão 3.14.1), onde houve a extração manual da rede de drenagem. Sobre o MDT foram aplicados a técnica de sombreamento nas direções: 0° Az, 45° Az, 90° Az e 315° Az, gerando imagens sombreadas (Figura 6) para a análise dos lineamentos estruturais (O'leary *et al.* 1976). As imagens sombreadas destacam estruturas lineares de acordo com as direções dos ângulos de iluminação escolhidos.

Em seguida, os lineamentos estruturais foram extraídos manualmente, onde a escala usada foi de 1.50.000 com fator de aproximação (Z) de 3 que buscou realçar melhor as feições de relevo lineares positivas (cristas) ou negativas (vales). Após a extração, foram feitos cálculos para a obtenção da direção azimutal e comprimento de cada lineamento, sendo confeccionados diagramas de rosetas em software de geoestatística. Conjuntamente, com todos os dados de *shapefiles* de litologias, limites estaduais, cursos d'água, geologia estrutural, foram integrados e interpretados no *software* livre QGIS® (versão 3.14.1).

Figura 6 - Imagem de ALOS-PALSAR sombreadas de acordo com os ângulos de iluminação da área mapeada (losango em amarelo): a) 0° Az; b) 45° Az; c) 90° Az; d) 315° Az.



Fonte: O autor (2023).

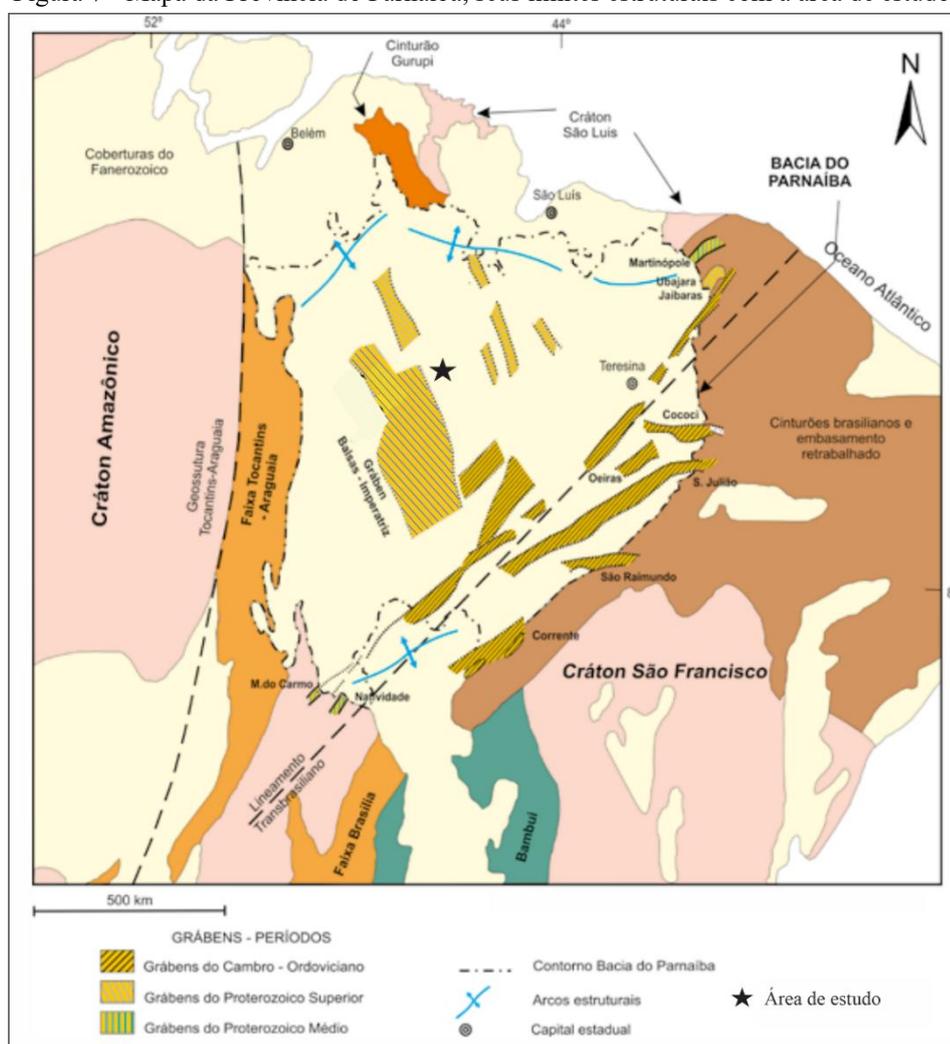
## 2 GEOLOGIA REGIONAL

Neste capítulo serão abordadas as principais bacias sedimentares que a área de estudo se insere, conjuntamente, as litologias e limites estruturais dessas serão elucidados abaixo.

### 2.1 PROVÍNCIA DO PARNAÍBA

A Província do Parnaíba (PPA) compreende a uma área de aproximadamente 600.000 km<sup>2</sup> e com espessura sedimentar de até 3.500 m (Góes & Feijó, 1994; Vaz *et al.*, 2007). Sua formação ocorre sobre um embasamento continental durante o estágio de estabilização da plataforma sul-americana (Almeida & Carneiro, 2004; Vaz *et al.*, 2007). Cinturões de dobramentos e lineamentos marginais aos crátons (Amazônico e São Francisco), delimitam estruturalmente a província (Figura 7), como: o cinturão Gurupi, a norte; a faixa de dobramentos Tocantins-Araguaia e Geossutura Tocantins-Araguaia (Almeida, 1974), a oeste; por fim, o Lineamento Transbrasiliiano, a sudeste-leste (Costa Neto *et al.* 2014).

Figura 7 - Mapa da Província do Parnaíba, seus limites estruturais com a área de estudo.



Fonte: Modificado de Costa Neto *et al.* 2014.

A evolução tectonoestratigráfica na PPA se desenvolveu em fraturas e falhas herdadas do embasamento que foram importantes na fase inicial de sedimentação da província como, também, no controle dos eixos deposicionais até o Eocarbonífero. No Neocarbonífero até o Jurássico, os depocentros foram deslocados para a parte central da bacia, no qual, o padrão de sedimentação desenvolveu em formato ovalado (Vaz *et al.* 2007).

Com a abertura do Oceano Atlântico Equatorial (Mesozóico) - onde o rifteamento quebrou a conexão Brasil e África -, foi gerada uma importante feição flexural, a qual, limita à norte da Província do Parnaíba, o Arco Ferrer-Urbano Santos (Pedreira *et al.*, 2003; Vaz *et al.* 2007). O desenvolvimento dessas feições estruturais ao longo dos estágios tectônicos da província, ocasionou a geração de discordâncias que limitam as sequências deposicionais. De acordo com Góes (1995) há quatro sítios deposicionais (Figura 8):

- Bacia do Parnaíba: Sequências Siluriana (Grupo Serra Grande), Mesodevoniana-Eocarbonífera (Grupo Canindé) e Neocarbonífera-Eotriássica (Grupo Balsas);
- Bacia das Alpercatas: Sequências Jurássica (Fm Pastos Bons) e Cretácea (Fm Corda) com magmatismo Jurássico (Fm Mosquito) e Cretáceo (Fm Sardinha);
- Bacia de São Luís-Grajaú: Sequência Cretácea (Formações Grajaú, Codó e Itapecuru);
- Bacia do Espigão-Mestre: Depósitos eólicos, no qual, por correlação com as bacias de Grajaú e San-Franciscana, é atribuída idade cretácea.

Figura 8 - Bacias da Província da Parnaíba e seus principais limites associados.

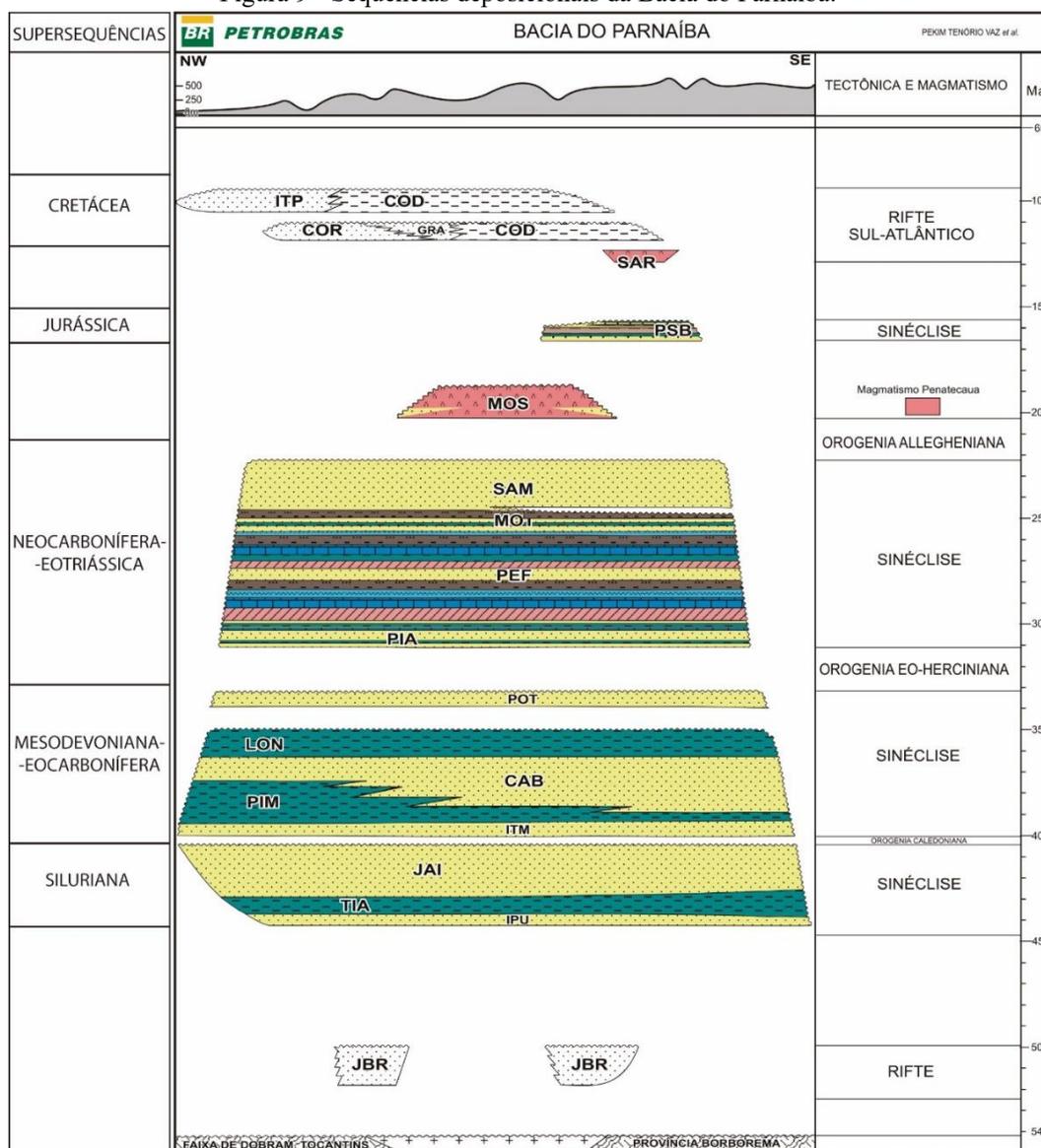


Fonte: Modificado de Pedreira *et al.* (2003) e Góes (1995).

### 2.1.1 Estratigrafia da Bacia do Parnaíba

A unidades sedimentares que preenchem a Bacia do Parnaíba foram depositadas em cinco sequências deposicionais, conforme Vaz *et al.* (2007). Essas sequências são separadas por discordâncias regionais que marcam, assim, os diferentes padrões de sedimentação em toda bacia. São agrupadas nas sequências: siluriana (Grupo Serra Grande), mesodevoniana-eotriássica (Grupo Canindé), neocarbonífera-eotriássica (Grupo Balsas), jurássica (Formação Pastos Bons) e cretácea (Formações Corda, Grajaú, Codó, Itapecuru) (Figura 9).

Figura 9 - Sequências deposicionais da Bacia do Parnaíba.



Fonte: Modificado de Vaz *et al.* (2007).

A Sequência Siluriana é definida por um ciclo transgressivo-regressivo completo, formada pelo Grupo Serra Grande, no qual, é composto pelas formações Ipu, Tianguá e Jaicós. A formação Ipu é composta por arenitos com níveis de tamanho seixos, conglomerados com matriz areno-argilosa e matações de quartzo, foram depositadas numa grande variedade de sistemas deposicionais: glacial proximal e glacio-fluvial, a leques ou frentes deltaicos (Caputo, 1984; Vaz *et al.* 2007). A formação Tianguá é composta por folhelhos cinza-escuro com bioturbações, sideríticos e carbonáticos, arenitos cinza-escuros, com sistema deposicional de plataforma rasa (Góes & Feijó, 1994). Essa formação marca um episódio transgressivo da seqüência.

Por fim, a Formação Jaicós marca a superfície de inundação máxima, assim, o intervalo regressivo da sequência, é composta por arenitos cinza com tonalidades claras, creme ou amarronzada, com seixos angulares a subangulares com má seleção, com estratificação cruzada ou lenticular (Caputo, 1984; Vaz *et al.* 2007). Assim, como a Formação Ipu, uma variedade de sistemas deposicionais foi descrito para esta formação, com sistemas fluviais, deltaicos e plataformais, transicional e marinho raso (Góes & Feijó, 1994).

A Sequência Mesodevoniana-Eocarbonífera é formada pelo Grupo Serra Grande que é composto pelas formações Itaim, Pimenteiras, Cabeças, Longá e Poti. A formação Itaim composta por arenitos finos a médios com grãos subarredondados, na porção basal é composta por folhelhos bioturbados, o sistema deposicional foi caracterizado por Góes & Feijó (1994) como deltaico e plataformal, com dominância de processos de marés e tempestades.

A Formação Pimenteiras é composta por folhelhos cinza-escuros, pretos a esverdeados, ricos em matéria orgânica, marcando assim, uma ingressão marinha na bacia, sua sedimentação ocorreu num ambiente de plataforma rasa dominada por tempestades (Vaz *et al.* 2007). A Formação Cabeças é essencialmente composta por arenitos cinza-claros a brancos, médios a grossos, a presença de tilitos, pavimentos e seixos estriados indicam um ambiente glacial a periglacial (Caputo, 1994; Vaz *et al.*, 2007). Contudo, a presença de estratificações cruzadas ou sigmoidais, na parte transicional com a formação Pimenteiras (Della Favera, 1990) denota um ambiente com influência de ondas (Góes & Feijó, 1994). A Formação Longá é composta essencialmente de folhelhos de variadas colorações (cinza-escuros a pretos e partes em roxo) com bioturbações, por pacotes de arenitos e siltitos cinza-claros na seção intermediária, o ambiente descrito é plataformal dominado por tempestades (Lima & Leite, 1978; Góes & Feijó, 1994; Vaz *et al.*, 2007). Por fim, a Formação Poti pode ser dividida em duas seções: a basal é composta por arenitos cinza-esbranquiçados, médios, com lâminas de siltitos cinza-claros; e topo, composta por arenitos cinza e presença de siltitos e folhelhos com níveis de carvão, sendo assim, o sistema deposicional é descrito como planícies de maré, com pouca influência de tempestades (Lima & Leite, 1978; Góes & Feijó, 1994; Vaz *et al.*, 2007).

A sequência Neocarbonífera-Eotriássica é formada pelo Grupo Balsas que é composto pelas formações Piauí, Pedra de Fogo, Motuca e Sambaíba. A Formação Piauí, é composta por arenitos de cor rosa, médios, maciços ou com estratificação cruzada de grande porte com intercalações de folhelhos vermelhos, arenitos finos a médios, calcários, sílex, siltitos e lentes conglomeráticas (Caputo, 1994; Lima & Leite, 1978), seu sistema deposicional é interpretado como fluvial com contribuição eólica e breves incursões marinhas, com clima semi-árido a desértico (Lima & Leite, 1978; Vaz *et al.*, 2007). A Formação Pedra de Fogo contém uma

variedade litológica importante que registra no Permiano, mudanças na bacia, sendo composta por sílex, calcário oolítico e pisolítico, eventualmente estromatolítico, intercalações com arenito fino a médio, folhelho cinza, siltito, anidrita e calcários dolomíticos. O sistema deposicional se deu num contexto marinho raso a litorâneo com planícies de *sabkha*, com eventual influência de tempestades (Góes & Feijó, 1994). A Formação Motuca é formada por siltito vermelho e marrom, anidrita e calcários, foram depositados em um sistema desértico com lagos associados (Góes & Feijó, 1994; Vaz *et al.*, 2007). Por fim, a formação Sambaíba é formada por arenitos vermelhos a rosa, finos a médios, subangulosos a subarredondados, presença de dunas com estratificação cruzada de grande porte, caracterizando um sistema desértico com contribuição fluvial (Vaz *et al.* 2007).

A sequência Jurássica é formada pela Formação Pastos Bons, composta por arenitos finos a médios, com grãos subarredondados, presença de estratificação paralela com raras lentes de calcários, siltito, folhelhos/argilitos cinza a verdes, arenitos finos gradando para siltitos (Caputo, 1994), depositados em paleodepressões continentais, lacustrinas com contribuição fluvial, em clima semi-árido a árido (Vaz *et al.* 2007).

A sequência Cretácea é formada pelas formações Corda, Grajaú, Codó e Itapecuru. A Formação Corda é essencialmente formada por arenitos vermelhos, castanhos, muito finos a médios, com boa seleção, ricos em óxidos de ferros e zeólitas, com presença de estratificações cruzadas de grande porte, fluxos de grãos, *ripples*, depositados em um sistema desértico é atribuído por Vaz *et al.* (2007). As Formações Grajaú e Codó apresentam uma contemporaneidade em suas sedimentações, com isso, neste trabalho será adotada a proposta de Vaz *et al.* (2007). A Formação Grajaú é formada por arenitos de cor creme-esbranquiçado, amarelado, granulometria média a grossa, subangulosos a angulosos com má seleção. A Formação Codó é composta por folhelhos, calcários, siltitos, gipsita/anidrita e arenitos. Os sistemas deposicionais de ambas as formações se caracterizam por um sistema marinho raso, lacustre e flúvio-deltáico (Lima & Leite, 1978; Rossetti *et al.* 2001a; Vaz *et al.*, 2007).

Por fim, a Formação Itapecuru recobre essa sequência com a deposição de arenitos variegados, finos, friáveis, com estratificações cruzadas (*e.g. swaley, hummocky*, acanalada, tabular), com presença de pelitos e arenitos conglomeráticos, uma grande variedade de sistemas deposicionais são atribuídos: sistemas de vales incisos, estuário-lagunar com episódios de ondas de grande escala, canal fluvial, laguna, canal de maré e litorâneo (Rossetti *et al.*, 2001b; Anaisse Junior *et al.*, 2001; Vaz *et al.* 2007).

Com a ruptura do Pangea e, conseqüentemente a abertura do Oceano Atlântico, foram geradas reativações de falhas e intenso magmatismo básico na Bacia do Parnaíba, com as formações Mosquito e Sardinha marcando esse estágio. A Formação Mosquito (Jurássica) é composta por derrames básicos com intercalações de arenitos e a Formação Sardinha (Cretáceo) é composta por basaltos de cor preta a roxo (Aguiar, 1971; Vaz *et al.* 2007).

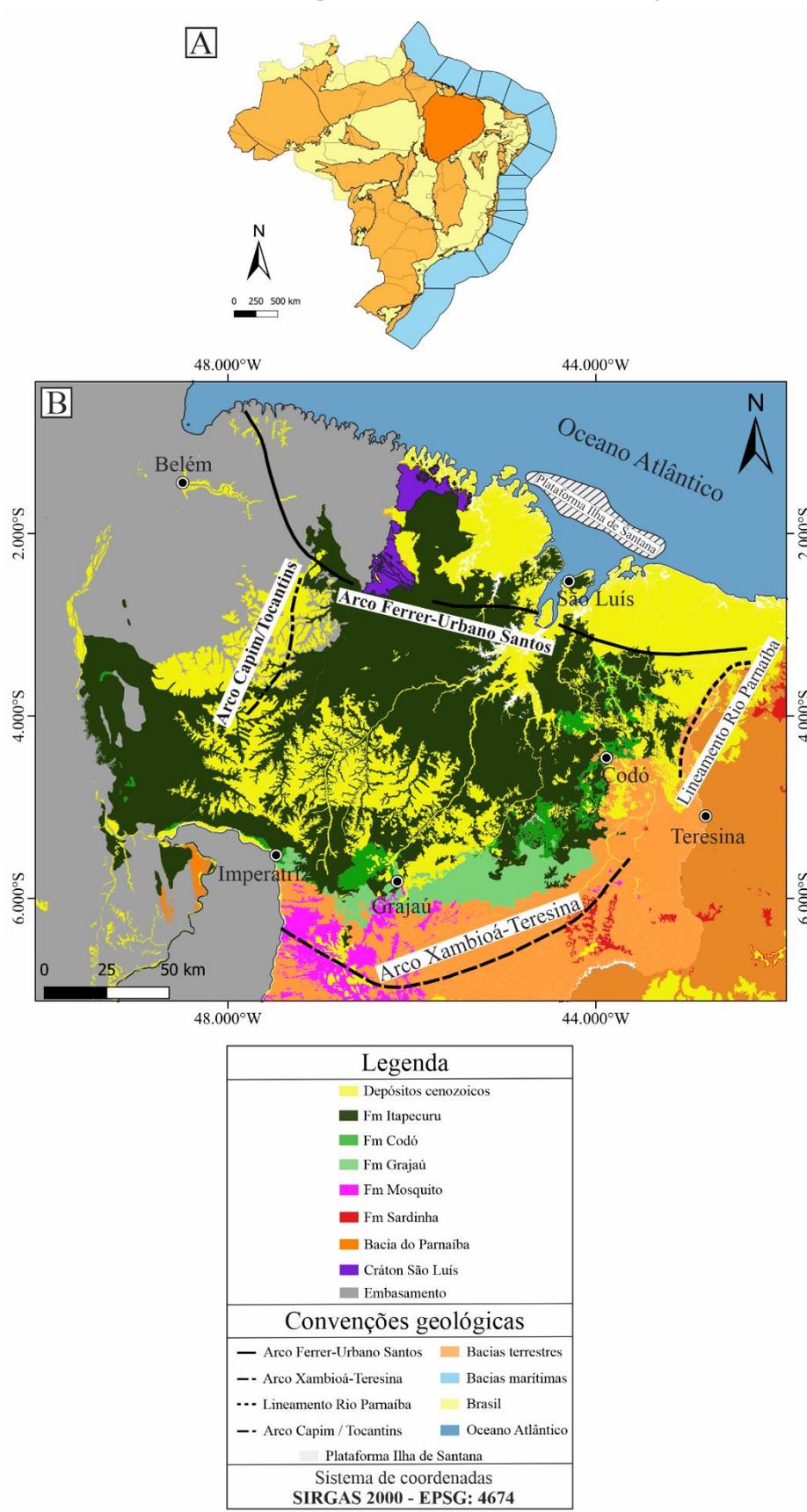
## 2.2 BACIA DE SÃO LUÍS-GRAJAÚ

O Cretáceo foi um período marcado por grandes transformações no planeta Terra, mudanças paleoclimáticas e paleogeográficas foram importantes parâmetros para a evolução tectonoestratigráfica das bacias sedimentares brasileiras. A grande concentração de folhelhos negros que foram gerados, a partir da grande elevação dos níveis eustáticos desses mares, e sua interação com o clima e vulcanismo, proporcionaram condições de anoxia (Jenkyns, 2010; Rossetti, 2001b). Conjuntamente, também neste período, foi marcado pelo desenvolvimento de contextos sedimentares, que proporcionou a formação de rochas evaporíticas nas bacias marginais e terrestres brasileiras, com isso, o estabelecimento do proto-oceano Atlântico (Mohriak *et al.* 2008).

Nesse cenário, a Bacia de São Luís-Grajaú inserida na Província Parnaíba (Pedreira *et al.*, 2003) se desenvolve em uma área de 130.000 km<sup>2</sup> inserida na seção cretácea dessa província, apresentando preenchimento sedimentar de até 900 m de espessura. A denominação atual, proposta por Góes e Rossetti (2001b), refere-se a esta bacia como a continuidade a sul, da Bacia de São Luís, com área de 150.000 km<sup>2</sup> (Paz & Rossetti, 2006b) que compreende uma distribuição geográfica no Maranhão e nordeste do Pará.

É limitada a sul, pelo Arco Xambioá-Alto Parnaíba, a norte, pela Plataforma Ilha de Santana, a leste, pelo Lineamento Rio Parnaíba e a oeste, pelo Arco Capim (Nascimento & Góes, 2007) (Figura 10).

Figura 10 – a) Localização da Bacia São Luís-Grajaú com seus limites geográficos e tectônicos, a Província da Parnaíba, em destaque (em laranja); b) estratigrafia e principais limites tectônicos que limitam a bacia de São Luís-Grajaú.



Fonte: O autor (2023).

### 2.2.1 Estratigrafia da Bacia de São Luís-Grajaú

A gênese da Bacia de São Luís-Grajaú está ligada aos estágios de rifteamento do *Gondwana* no Mesozoico, devido a esforços distensionais e transcorrentes atuantes, durante o Eocretáceo e início do Neocretáceo. Esses esforços que geraram a bacia podem ser divididos em três fases principais (Azevedo, 1991, Góes & Rossetti, 2001, Rossetti, 2001c):

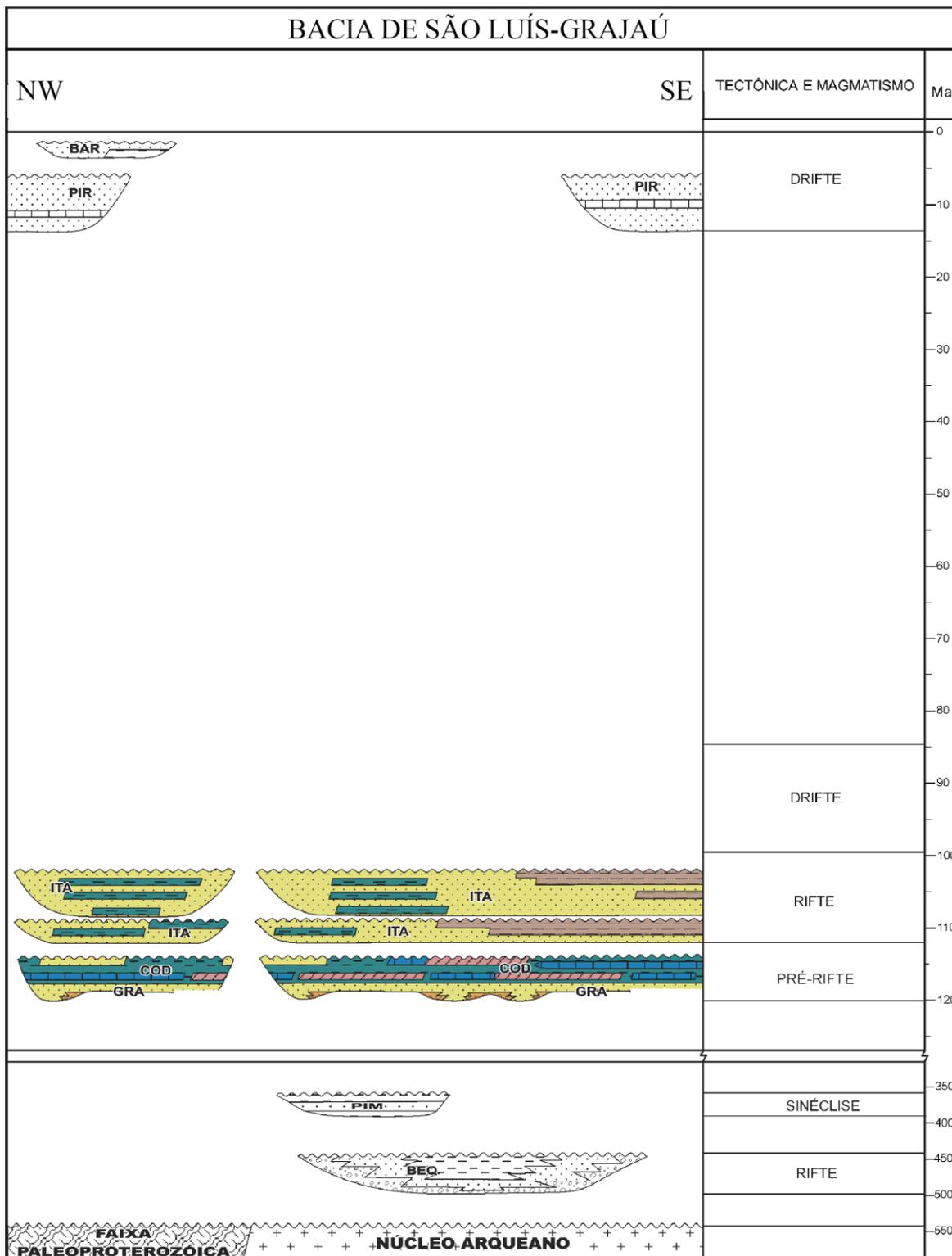
- i) Pré-rifte: adelgaçamento crustal e desenvolvimento de uma ampla depressão com subsidência (Aptiano);
- ii) Rifte: intenso tectonismo transtensional, sendo responsável pelo desenvolvimento de uma zona de deslocamento basal (*detachment*), que culminou com a formação do Sistema de Gráben Gurupi, o qual interliga as bacias de Bragança-Viseu, Ilha Nova e São Luís-Grajaú (Albiano);
- iii) Drifte: fase de deriva continental e rápida ampliação do fundo do oceânico associado ao declínio termal (final do Albiano a Cenomaniano).

O desenvolvimento de falhas durante esses estágios foi observado por Rezende & Pamplona (1970) e Azevedo (1991), no qual, identificaram três *trends* principais distintos: NE-SW, NW-SE e, frequentemente, E-W. Com a separação dos continentes africano e sulamericano, ocorreu uma reativação de falhas normais do embasamento, com direção NE-SW e subordinadamente, NW-SE. Outro *trend* observado com direção E-W está associada a falha de Sobradinho que é uma continuidade da zona de fratura Romanche, localizada na porção sul e leste da bacia (Góes & Rossetti, 2001; Paz & Rossetti, 2005; Zalán, 2007).

O embasamento da Bacia de São Luís-Grajaú é composto por rochas gnáissicas, graníticas e metassedimentares da Faixa Móvel Gurupi (Neoproterozoico) e da porção infracrustal arqueana do Cráton de São Luís, rochas paleozoicas, como a Formação Bequimão e Pimenteiras (Rossetti, 2001c; Zalán, 2007).

Os depósitos da Bacia de São Luís-Grajaú estão quase inteiramente ligados às rochas cretáceas compostas pelas formações: Grajaú, Codó, Itapecuru e depósitos cenozoicos das formações: Pirabas (rochas carbonáticas) e Barreiras (rochas argilo-silte-arenosos) (Rossetti, 2000; Góes & Rossetti, 2001; Zalán, 2007; Vaz *et al.*, 2007) (Figura 11).

Figura 11 - Carta tectonoestratigráfica da Bacia de São Luís-Grajaú. Legenda: BEQ - Fm Bequimão; PIM - Fm Pimenteiras; GRA - Fm Grajaú; COD - Fm Codó; ITA - Fm Itapecuru; PIR - Pirabas; BAR - Fm Barreiras.



Fonte: Modificado de Zalán (2007).

### 3 FORMAÇÃO CODÓ

Neste capítulo serão abordados uma breve síntese bibliográfica dos aspectos sedimentológico, estratigráfico, bioestratigráfico, geoquímico e geocronológico, atrelados ao(s) sistema(s) deposicional(is) e idade(s), no qual, a Formação Codó se insere.

#### 3.1 FORMAÇÃO CODÓ

Na Bacia de São Luís-Grajaú, a Formação Codó é composta por folhelhos negros, anidrita/gipsita, carbonatos e margas com intercalações de arenitos de coloração branca-verdeada (Lima *et al.*, 1994; Reis & Caputo, 2007). A porção basal dessa formação se interdigita com a Formação Grajaú e a porção superior é sotoposta a Formação Itapecuru. De acordo com Lima (1982) os depósitos dessa formação atingem uma espessura máxima de 180 metros, que representa a sequência S1 proposta por Rossetti (2001) com um sistema deposicional de grande debate ao longo dos anos.

Estudos baseados em associação de fácies e dados isotópicos sugerem um paleoambiente lacustre-*sabkha* (Paz, 2000; Paz & Rossetti, 2001; 2006a, b; Rossetti *et al.*, 2004) com drenagens semifechadas a fechadas (Paz & Rossetti, 2006b; Bahniuk *et al.*, 2015).

Paz & Rossetti (2001), analisando depósitos na cidade de Codó-MA, descrevem três associações de fácies formando ciclos de raseamento ascendente: i) centro de lago - formado por folhelhos negros e evaporitos, com condições anóxicas devido à preservação de matéria orgânica, apontando assim, uma sedimentação com um ambiente de baixa energia com ciclos de raseamento ascendente; ii) lago transicional - formado por argilito laminado, *mudstone* calcífero, calcário meso-cristalino e peloidal, sob um ambiente de baixa energia, abaixo da linha de influência de maré, com oxigenação relativamente maior quando comparado as primeiras litologias; iii) lago marginal - formado por pelito maciço, calcita-arenito, gipsita-arenito, calcário ostracodal e pisoidal, tufa e ritmito de calcário/folhelho, com ambiente de baixa energia próxima a zona vadosa, subaquoso raso a subaéreo com pequeno episódio de intenso retrabalhamento.

Mendez (2007) propôs quatro associações de fácies diferentes com base em dados sedimentológicos e paleontológicos, no qual, divide a formação em dois intervalos: i) inferior - redutor/anóxico, caracterizando um sistema deposicional lacustre hipersalino seguindo de uma *sabkha*, e ii) superior - óxico/subóxico - um sistema fluvial entrelaçado seguido de um lacustre com influência marinha (lagoa). Zalán (2007) sugere um sistema lagunal, ligado a um mar epicontinental raso e anóxico, eventualmente restrito que desencadeia na precipitação de evaporitos (anidrita, gipsita e raramente, anidrita), o autor divide em três intervalos distintos:

i) inferior, predominantemente arenoso; médio, composto por pelito-carbonático-evaporítico; ii) superior, composto por folhelhos, carbonatos, arenitos e evaporitos. Os dois primeiros intervalos representam o primeiro ciclo evaporítico, enquanto o intervalo superior, representa o segundo intervalo evaporíticos da bacia.

Nos estudos das rochas evaporíticas da formação, Paz & Rossetti (2006a), detalharam petrograficamente sete fácies em afloramentos nas cidades de Codó e Grajaú-MA, são elas: i) gipsita chevron; ii) gipsta/anidrita nodular/lensoidal; iii) gipsita acicular (fibrosa); iv) gipsita mosaico; v) gipsita brechada ou gipsita-arenito; vi) gipsita/anidrita pseudo-nodular e vii) gipsita roseta. Essas texturas refletem a evolução da salmoura, nível do freático e taxa de evaporação. A fácies i) são oriundas de fases primárias da salmoura com formação abaixo de condições subaquosas entre a superfície do sedimento e níveis de alta saturação de sulfato da salmoura, com profundidades menores que 2 metros. A fácies iii) ocorre devido a remobilização de fluidos de sulfatos que guardam resquícios da textura primária (*chevron*), e são geralmente deformadas. As fácies ii) e iv) marcam mudanças climáticas sazonais com baixas temperaturas. A fácies v) é formada em exposições subáreas resultantes de níveis extremamente baixos da salmoura, em que, acarreta remobilizações locais na superfície. Por fim, as fácies vi) e vii) são formadas em fases tardias com ação de águas que percolam durante o soterramento ou águas superficiais que agem durante o intemperismo.

Os folhelhos dessa formação são caracterizados através de estudos com biomarcadores, pirólise *Rock-Eval* e isótopos estáveis (Gonzalez *et al.*, 2020; Bastos *et al.*, 2020). Esses folhelhos são descritos como termicamente imaturos, depositados em condições anóxicas (porção inferior) a óxicas (porção superior), hipersalinas em um sistema lacustre com frequentes influências marinhas. Silva (2022), caracteriza a deposição dessas rochas em condições óxicas-subóxicas, em um clima quente-úmido com considerável salinidade e matéria orgânica predominantemente de origem não-marinha, mas, por vezes, com influência marinha.

Salgado Campos *et al.* (2020), através de dados litogeoquímicos e identificação de argilominerais, sugerem um ambiente alcalino hipersalino com clima árido a tropical. O autor divide em duas seções a formação: i) inferior - composta por folhelhos com matéria orgânica, carbonatos e evaporitos; e ii) superior - composto por arenitos, folhelhos e argilitos. Nesta seção é proposto um sistema lagunar com influência marinha com a presença de argilominerais (*e.g.* caulinita, montmorilonita e illita).

Bobco *et al.* (2023) sugere um sistema lacustre-*sabkha* através de dados sedimentológicos, geoquímicos, isotópicos e análises palinológicas, que permitiram o reconhecimento da composição da matéria orgânica de origem continental, lacustre e marinha,

dividindo em cinco estágios deposicionais com evolução de um sistema lacustre-*sabhka* com i) expansão do lago; ii) lago salobro transitório; iii) lago raso perene; iv) *sabhka* e v) lago estratificado. Por fim, esse sistema apresenta variações entre lagos abertos e semifechados, com incursões marinhas ocasionais.

A ideia de golfo é sugerida por Rodrigues (1995) e Bastos *et al.* (2014) a partir da presença de *proxies* geoquímicos indicativos de um ambiente marinho associado à hipersalinidade são factíveis com um modelo de golfo para a deposição dessa unidade sedimentar.

A idade da Formação Codó, apresenta dados bioestratigráficos (Antoniolli, 2001; Antoniolli & Arai, 2002; Pedrão *et al.*, 2002) e datação absoluta pelo método Re-Os (Silva, 2022). Os dados de bioestratigrafia são baseados em ostracodes não marinhos e palinologia que indica uma fauna neoptiana, palinozona *Sergipea variverrucata* (P270) que sugere deposição no Aptiano Superior e a palinozona *Complicatisaccus cearenses* (P280) com deposição no Albiano Inferior (Antoniolli, 2001; Antoniolli & Arai, 2002; Pedrão *et al.*, 2002). Os dados datação absoluta através da metodologia por Re-Os (Silva, 2022), obteve uma idade de  $119,52 \pm 2,51$  Ma que posiciona a formação no intervalo Barrremiano Superior – Aptiano Inferior (117,2-125,4 Ma).

## 4 ROCHAS EVAPORÍTICAS

Neste capítulo serão abordados uma breve síntese bibliográfica dos aspectos sedimentológicos, estratigráficos, mineralógicos, geoquímicos e isotópicos dos principais minerais, rochas, ambientes e sistemas deposicionais das rochas evaporíticas.

### 4.1 ORIGEM DAS ROCHAS EVAPORÍTICAS

#### 4.1.1 Definição de evaporitos

Evaporitos do latim *evaporare* e do sufixo grego *litho*, são rochas que se depositaram pela evaporação de água (Mohriak *et al.*, 2008). Incluem uma gama de precipitados químicos, compostos por sais e carbonatos alcalino terrosos. Esses depósitos refletem condições em que a taxa de evaporação supera a taxa de influxo de água doce ou salgada da bacia (Warren, 2006).

Segundo Warren (2006), para a formação e preservação dessas rochas, alguns requisitos são observados, como: i) a existência e manutenção de uma salmoura na superfície ou próximo a ela, sendo alcalina o suficiente para a precipitação do sal com clima árido a semiárido; ii) espaço de acomodação em uma depressão não preenchida por outros sedimentos; e, por fim, iii) um ambiente de soterramento no qual não ocorra a percolação de fluidos subsaturados capazes de dissolver os sais. Todos esses requisitos são necessários independentemente do ambiente de formação (continental, costeiro ou marinho).

Essas rochas possuem características em dois estados físicos, tanto no sólido, como em líquido. São rochas temporárias, pois quimicamente são móveis (dissolução, troca catiônica) e fisicamente também (fluxo sólido) (Mohriak *et al.*, 2008). As principais propriedades físico-químicas são: composição química, solubilidade, mobilidade, cristalinidade, densidade, fluatibilidade, viscosidade, resistência a esforços, condutividade térmica e velocidade sísmica (Martins, 2016).

#### 4.1.2 Mineralogia e texturas evaporíticas

A mineralogia dos evaporitos depende da composição química da água que essas rochas se precipitam. Os principais cátions dissolvidos nas águas de rios e mares são:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{Br}^-$  que ocorrem em maior concentração nos mares quando comparado aos rios (Tabela 3). A entrada de íons carregados em águas fluviais em uma bacia evaporítica, acarretará a diminuição da concentração dos íons e com a mudança nos compostos que se precipitam (Martins, 2016).

Tabela 3 - Concentração dos principais íons presentes nos rios e mares (ppm).

Íon	Oceano (ppm)	Rios (ppm)
Cl <sup>-</sup>	18.980	7,5
Na <sup>+</sup>	10.560	6,3
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2.650	11
Mg <sup>2+</sup>	1.270	4,1
Ca <sup>2+</sup>	400	15
K <sup>+</sup>	380	2,3
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	140	58
Br <sup>-</sup>	65	13

Fonte: Mohriak *et al.* (2008).

Evaporitos gerados em ambientes marinhos apresentam diferentes características daqueles gerados a partir de águas continentais (Harraz, 2012). A precipitação do sal ocorre quando a solução atinge a saturação, sendo depositados em camadas e registram mudança na concentração do soluto através de diferentes componentes (Espíndola, 2011). A Figura 12, resume os principais minerais evaporíticos.

Figura 12 - Principais minerais evaporíticos de ambientes marinhos e continentais.

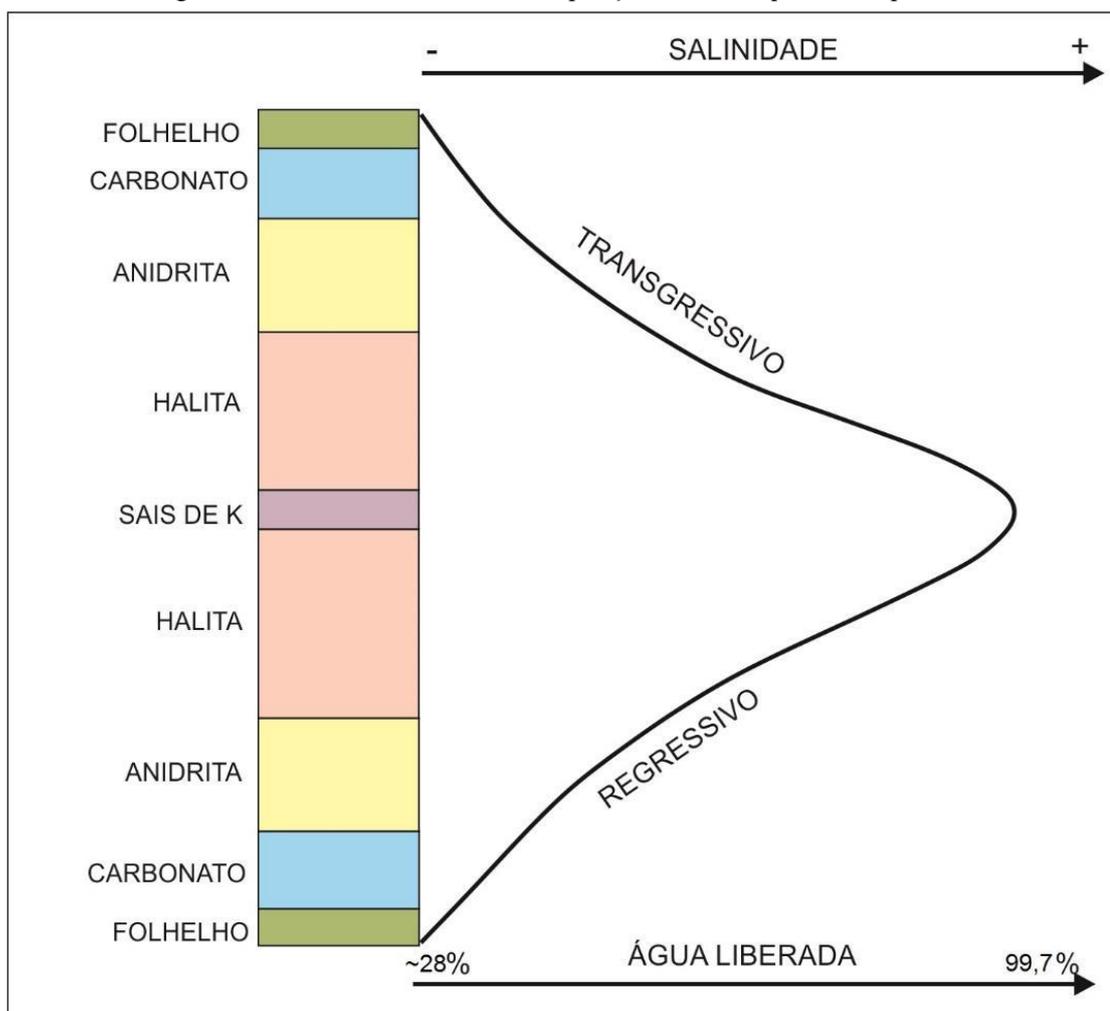
MINERAL	FÓRMULA	MINERAL	FÓRMULA
Anidrita	CaSO <sub>4</sub>	Leonhardita	MgSO <sub>4</sub> .4H <sub>2</sub> O
Antarcticita	CaCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	Leonita	MgSO <sub>4</sub> .K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .4H <sub>2</sub> O
Aphthitalita (glaserita)	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .(Na,K)SO <sub>4</sub>	Loewita	2MgSO <sub>4</sub> .2Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O
Aragonita	CaCO <sub>3</sub>	Magnésita	MgCO <sub>3</sub>
Bassanita	CaSO <sub>4</sub> .1/2H <sub>2</sub> O	Meyerhoffite	Ca <sub>2</sub> B <sub>3</sub> O <sub>11</sub> .7H <sub>2</sub> O
Bischofita	MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	Mirabilita	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .10H <sub>2</sub> O
Bloedita	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .MgSO <sub>4</sub> .4H <sub>2</sub> O	Nahcolita	NaHCO <sub>3</sub>
Bórax	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> .10H <sub>2</sub> O	Natronita	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .10H <sub>2</sub> O
Boracita	Mg <sub>3</sub> B <sub>7</sub> O <sub>13</sub> .Cl	Nitratita	NaNO <sub>3</sub>
Burkeita	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .2Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Nitro	KNO <sub>3</sub>
Cainita	4MgSO <sub>4</sub> .4KCl.11H <sub>2</sub> O	Pentahidrita	MgSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O
Calcita	CaCO <sub>3</sub>	Pirssonita	CaCO <sub>3</sub> .Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .2H <sub>2</sub> O
Calcita Magnesiana	(Mg <sub>5</sub> Ca <sub>1-2</sub> )CO <sub>3</sub>	Polihalita	2CaSO <sub>4</sub> .MgSO <sub>4</sub> .K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O
Carnalita	MgCl <sub>2</sub> .KCl.6H <sub>2</sub> O	Proberita	NaCaB <sub>5</sub> O <sub>9</sub> .5H <sub>2</sub> O
Colemanita	Ca <sub>2</sub> B <sub>3</sub> O <sub>11</sub> .5H <sub>2</sub> O	Prickita (pandermita)	CaB <sub>4</sub> O <sub>10</sub> .7H <sub>2</sub> O
Darapskita	NaSO <sub>4</sub> .NaNO <sub>3</sub> .H <sub>2</sub> O	Rinneita	FeCl <sub>2</sub> .NaCl.3KCl
Dolomita	Ca <sub>(1-x)</sub> Mg <sub>(1-x)</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Sanderita	MgSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O
Epsomita	MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	Schoenita (Picromerita)	MgSO <sub>4</sub> .K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .6H <sub>2</sub> O
Ferroatrilita	3Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O	Shortita	2CaCO <sub>3</sub> .Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
Gaylussita	CaCO <sub>3</sub> .Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .5H <sub>2</sub> O	Silvita	KCl
Glauberita	CaSO <sub>4</sub> .Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Syngenita	CaSO <sub>4</sub> .K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O
Gipsita	CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	Taquidrita	CaCl <sub>2</sub> .2MgCl <sub>2</sub> .12H <sub>2</sub> O
Halita	NaCl	Thenardita	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Hanksita	9Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .2Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .KCl	Thermonatrilita	NaCO <sub>3</sub> .H <sub>2</sub> O
Hexahidrita	MgSO <sub>4</sub> .6H <sub>2</sub> O	Tinalconita	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> .5H <sub>2</sub> O
Howlita	H <sub>5</sub> C <sub>2</sub> SiB <sub>5</sub> O <sub>14</sub>	Trona	NaHCO <sub>3</sub> .2NaCO <sub>3</sub> .Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Ikaíta	CaCO <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O	Tychite	2MgCO <sub>3</sub> .2NaCO <sub>3</sub> .Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Inyoita	Ca <sub>2</sub> B <sub>6</sub> O <sub>11</sub> .13H <sub>2</sub> O	Ulexita	NaCaB <sub>5</sub> O <sub>9</sub> .5H <sub>2</sub> O
Kernita	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> .4H <sub>2</sub> O	Van'thoffita	MgSO <sub>4</sub> .3Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Kieserita	MgSO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O		
Langbeinita	2MgSO <sub>4</sub> .K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		

Fonte: Bobco (2014).

Ciclos evaporíticos são definidos através de indicativos de variação da salinidade dentro de uma bacia evaporíticas, uma vez que a variação de salinidade está relacionada com a aridez climática e com o influxo de água na bacia (Warren, 2016). Os ciclos de primeira ordem podem ser definidos pelo aumento de salinidade, com níveis mais baixos no início seguido de um aumento e na fase final, um declínio novamente para os níveis iniciais (Carvalho, 1987; Warren, 1989). Esse ciclo é marcado na base por camadas de folhelhos negros com elevados teores de matéria orgânica, enquanto o topo dessa sequência pode ser marcado pela deposição de sais mais solúveis, compostos por magnésio e potássio (Mohriak *et al.* 2008). A sequência de precipitação dos minerais (Figura 13) ocorre em função das diferentes solubilidades e da quantidade de cada composto disponível na salmoura (Hardie, 1984), esta sequência típica é descrita a seguir.

- i) Carbonatos: não são minerais evaporíticos, mas regularmente a deposição destes minerais (calcita, dolomita e aragonita), são observados;
- ii) Sulfatos de cálcio: comumente há deposição de gipsita, com posterior transformação em anidrita com conseqüente aumento de temperatura e pressão, cerca de 60% do volume da rocha é perdido com a compactação. Anidrita requer um clima árido, com médias de temperaturas acima de 22° C e temperaturas sazonais superiores a 35° C (Tucker, 2001; Bobco, 2014);
- iii) Halita: mineral evaporíticos mais abundante, e sua deposição ocorre quando a concentração na salmoura atinge 27%. Alternâncias entre halita e anidrita denotam mudanças sazonais da temperatura e/ou composição da salmoura. A análise de Br pode ser um indicativo do ambiente, no qual, foram depositadas, em ambientes marinhos (acima de 65 ppm) e não marinho (menor que 50 ppm) (Tucker, 2001; Bobco, 2014);
- iv) Carnalita: sua precipitação ocorre somente em salmouras altamente concentradas, esse sal pode se transformar em silvita com a dissolução de cloreto de magnésio;
- v) Bischofita: precipita-se em níveis de salinidade extremamente elevados, nas bacias marginais brasileiras é substituída por taquidrita;
- vi) Taquidrita: mineral altamente solúvel, para sua deposição é necessário que o sulfato em solução não seja suficiente para precipitar toda concentração de cálcio, para que assim, não haja a substituição por bischofita (Mohriak *et al.* 2008).

Figura 13 - Ordem do ciclo ideal na deposição de uma sequência evaporítica.



Fonte: Martins (2016).

#### 4.1.3 Mineralogia e texturas

A variação de texturas em rochas evaporíticas indica tanto estabilidade hidrológica, quanto o nível de energia na salmoura durante a deposição dessas rochas (Warren, 2010; Bobco, 2014) (Tabela 4). Evaporitos primários são precipitados em corpos salinos superficiais, guardando informações cristalográficas dos processos deposicionais, já os evaporitos secundários registram feições de subsuperfície, fluxo tardio de águas basinais e recristalização inicial pervasiva. Essas características são formadas em domínios eodiagenéticos e mesodiagenéticos, já os evaporitos terciários, ocorrem na telodiagênese, com feições de dissolução e reidratação (Warren, 2010; Bobco, 2014).

Tabela 4 - Principais texturas e hábitos relacionados a anidrita e gipsita.

Hábitos/texturas	Indicação das condições deposicionais
Gipsita colunar (paliçada)	Crescimento de cristais em salinas com profundidades rasas (<5 m), em ambientes aquosos.
Pseudomorfos de gipsita lenticular	Pseudomorfos se formam em sedimentos do tipo <i>sabkha</i> (esteiras algálicas e lamas dolomíticas) como resultado de diagênese precoce. Fácies de intermaré em <i>sabkha</i> costeiro.
Nódulos de anidrita	Indicadores de <i>sabkha</i> .
Anidrita laminar (intercalação de lâminas de anidrita e micrita)	Encontrada como camadas finas em lentes salinas.
Gipsita alabastrina	Produto diagenético tardio, inclui grande variedade de texturas (e.g. gipsita porfiroblástica).
Gipsita porfiroblástica	Gerada pela hidratação da anidrita, ocorre em condições eodiagenéticas.
Espato acetinado incolor ou ligeiramente alaranjado ou gipsita fibrosa	Produto diagenético tardio formado pela transformação da anidrita em gipsita durante o soergimento tectônico.
Gipsita <i>chevron</i>	Precipitação primária, formado em condições subaquosas entre a superfície do sedimento e a salmoura devido a saturação em sulfato, deposita na base do corpo salino raso (com menos de 2 m de profundidade). A intercalação desta com a gipsita nodular primária refletem flutuações sazonais da salmoura.
Gipsita ou anidrita nodular-lensoidal	Com a diminuição do nível da salmoura, a gipsita ou anidrita nodular-lensoidal cresce displacivamente dentro dos sedimentos adjacentes (folhelhos, por exemplo). Hábito mais comum de precipitação intrasedimento, tanto em planícies lamosas quanto em outros ambientes sujeitos a condições palustrinas.
Gipsita acicular a fibrosa	Nas laminações pode substituir a gipsita <i>chevron</i> . A ausência de outros tipos de gipsita secundária indica que esta substituição ocorreu logo após a deposição, ainda sob forte influência das condições da salmoura primária. Sendo assim é considerada como um reflexo do acamamento primário.
Gipsita mosaico	Ao preservar a laminação primária, em alternância com a gipsita <i>chevron</i> a acicular, considera-se que é formada perto da superfície deposicional, logo após a formação das laminações individuais. Pode ser formada pela substituição de anidrita, precipitada como fase primária, indicado pela abundante quantidade de relictos de anidrita

	dentro dos cristais. Os contatos suturados indicam a não-estabilidade do mineral em baixas temperaturas, refletindo a formação sob eodiagênese.
Gipsarenito ou Gipsita brechada	O nível extremamente baixo da salmoura leva à exposição, resultando no fraturamento da gipsita, brechação do precipitado e em últimos casos a formação de gipsarenito <i>in situ</i> . A possível presença de cutículas em torno dos clastos é atribuída a infiltração mecânica ou a adesão de resíduos na superfície clastos durante o retrabalhamento.
Anidrita ou Gipsita pseudonodular	Representa a penúltima fase de formação de gipsita ou anidrita. Sua ocorrência é restrita a gipsita maciça a macronodular, onde a estruturas primárias foram inteiramente perdidas. Contém cristais alabastrinos e fibrosos límpidos, considerada de origem secundária, formada em consequência da hidratação, especialmente da anidrita, induzida pelo diapirismo ou outro mecanismo que promove a percolação de água através das rochas evaporíticas. O fraturamento sob condições de remobilização do sal gera o aspecto pseudonodular, ou seja, a quebra em fragmentos individuais. Neste caso pode ocorrer também a precipitação de gipsita fibrosa ao longo das fraturas.
Rosetas de gipsita	Indica a última fase de formação de gipsita, evidenciada pelo fato desta truncar todas as outras morfologias. Agregados de grandes cristais fibrosos de gipsita são formados pela ação de águas intraestratais durante o soterramento ou águas superficiais durante o intemperismo.

Fonte: Modificado de Bobco (2014).

## 4.2 AMBIENTES DEPOSICIONAIS DE ROCHAS EVAPORÍTICAS

### 4.2.1 Características gerais

Para a formação e preservação de rochas evaporíticas são necessárias algumas condições primordiais: i) a taxa de evaporação deve ser maior que a taxa de precipitação pluviométrica e do influxo de água; ii) isolamento da bacia gerando uma progressiva concentração e deposição de sais (Mohriak *et al.* 2008); iii) espaço de acomodação; iv) um ambiente de soterramento com restrição de circulação de soluções subsaturadas suficientemente para dissolução dos sais (Warren, 2006).

### 4.3 MODELOS DE DEPOSIÇÃO EM BACIAS EVAPORÍTICAS PRETÉRITAS

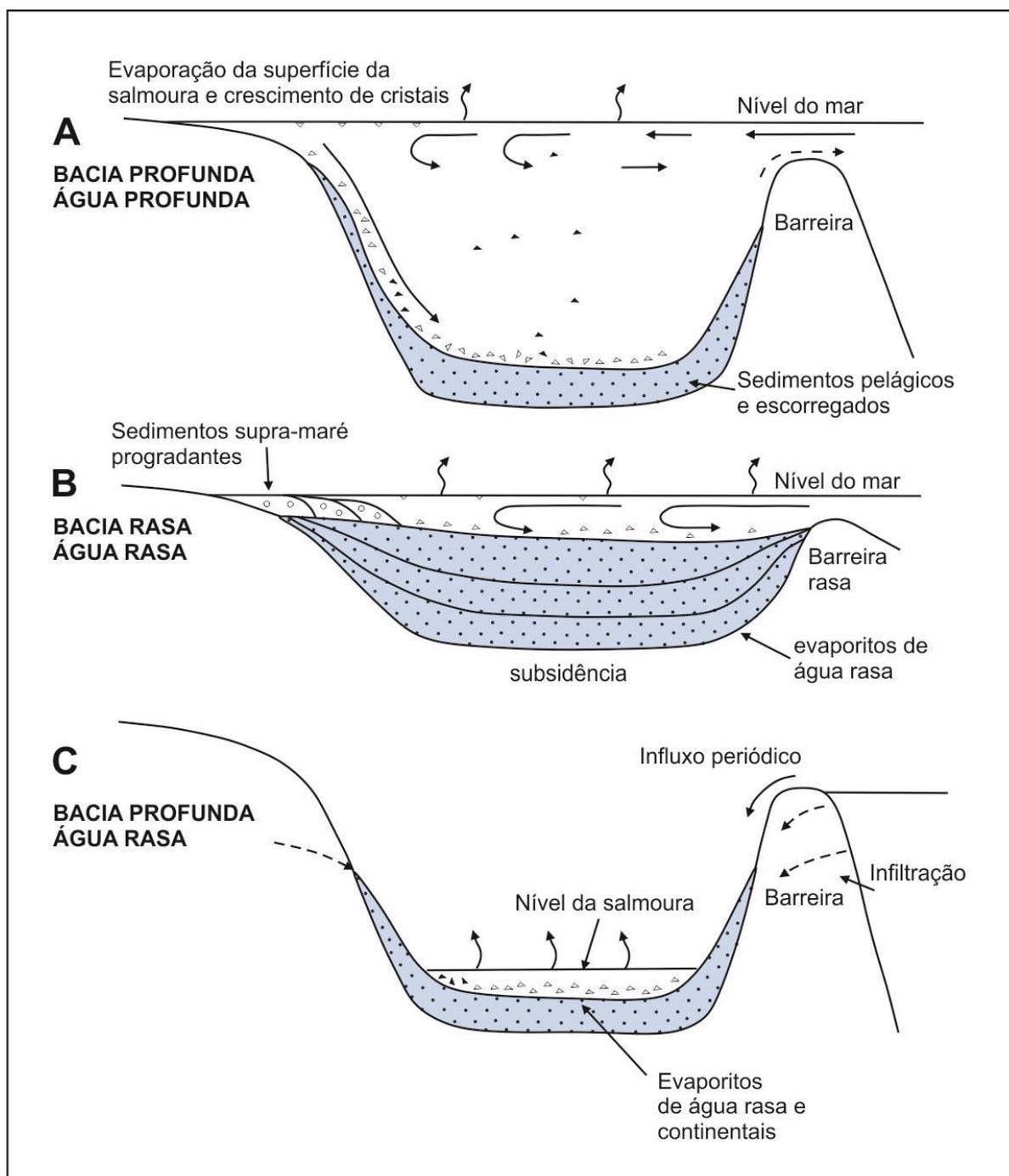
#### 4.3.1 Bacia com barreira em uma das entradas (*basinwide deposits*)

A bacia evaporítica possui uma barreira topográfica que restringe a entrada e livre circulação de águas com o mar aberto em uma de suas extremidades, esse tipo de configuração, resulta em três modelos: 1- bacia profunda com água profunda, 2- bacia rasa com água rasa e 3- bacia profunda com água rasa (Mohriak *et al.* 2008) (Figura 14).

No modelo de bacia profunda com água profunda, a formação dos evaporitos ocorre na interface água-ar com sua deposição no fundo da bacia. Isso justificaria as grandes espessuras desses evaporitos, como pode ser visto nas bacias de margem atlântica. Contudo, esse modelo é contestado, pelo fato de que os evaporitos atuais estão sempre associados com ambiente subaéreo ou marinho raso, com estruturas formadas em exposições subaéreas (Mohriak *et al.* 2008). O modelo de bacia rasa com água rasa não explica a formação de espessas sequências evaporíticas em tão reduzidos espaços de acomodação (Mohriak *et al.* 2008). Por fim, o modelo de bacia profunda com água rasa, proposto por Hsü (1972), sugere que a bacia estaria abaixo do nível médio dos mares, isolada por uma barreira que não permitia alguma conexão com o mar, com um clima predominantemente árido. Essa configuração resultaria em ausência de aporte de águas do mar, rios ou chuvas, tornando um ambiente muito seco, desencadeando ressecamento quase completo com a precipitação de sais solúveis em áreas restritas. Com uma subida do nível do mar e, conseqüentemente, ultrapassando o limite dessa barreira em uma das entradas da bacia, iniciaria um novo ciclo transgressivo marinho e a evaporação da salmoura. Com isso, a dissolução de parte dos sais depositados anteriormente e a precipitação de uma nova sequência evaporíticas estariam marcados no registro geológico. Nesse modelo, Hsü (1972) assume que a barreira limitante apresenta uma permeabilidade que permite o influxo e o refluxo parcial da salmoura por meio de poros e fraturas.

O modelo de deposição evaporítica em bacia com barreira em uma das entradas forma dois padrões típicos de distribuição de fácies: padrão “olho de touro” (do inglês: *bull's eye pattern*) e padrão “gota de lágrima” (do inglês: *tear drop pattern*) (Mohriak *et al.* 2008; Martins, 2016).

Figura 14 - Modelos de bacias evaporíticas com barreiras em uma das entradas. a) bacia profunda - água profunda; b) bacia rasa - água rasa e c) bacia profunda - água rasa.

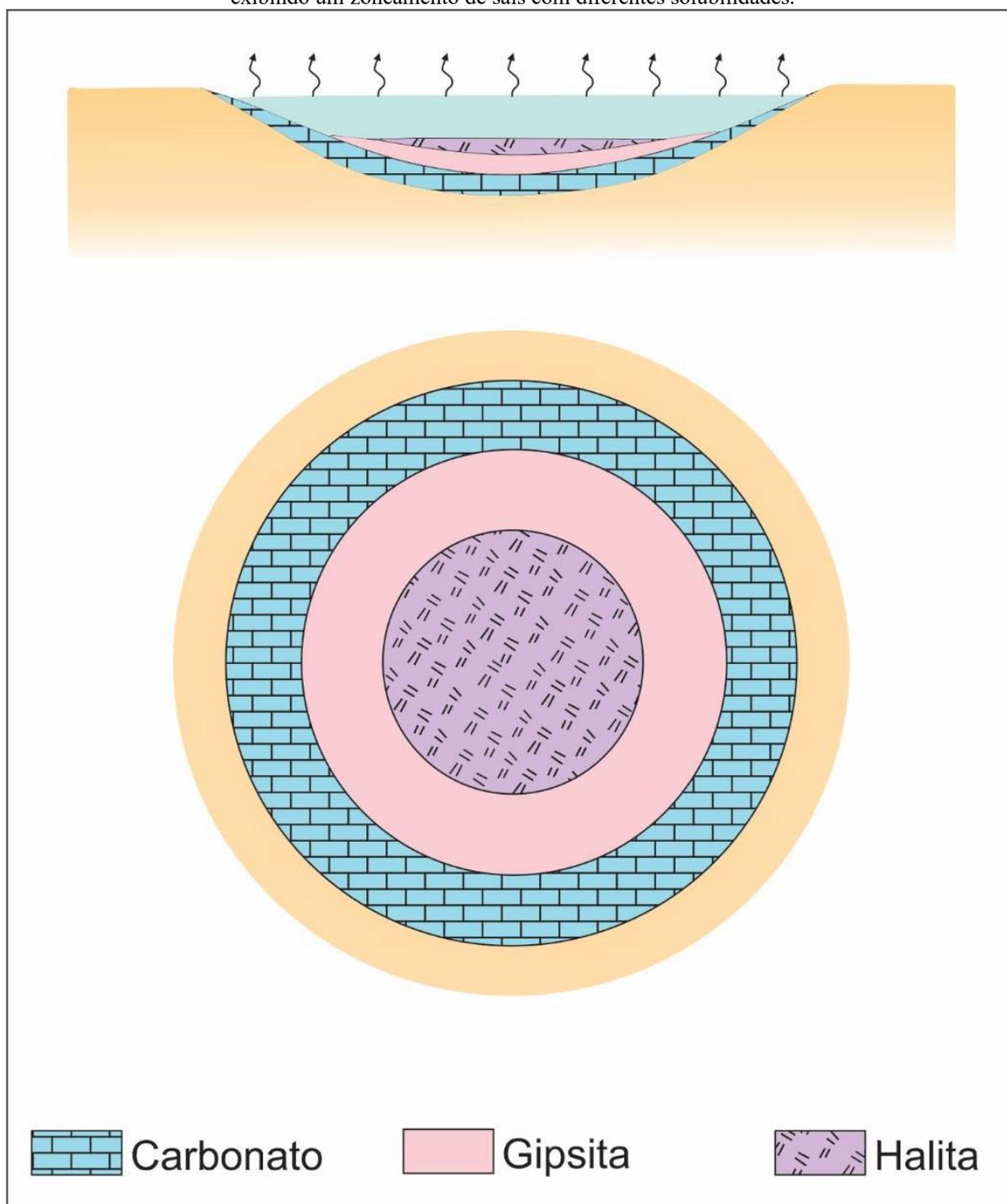


Fonte: Martins (2016).

O padrão “olho de touro” apresenta como principais características a deposição concêntrica dos evaporitos obedecendo à sequência de deposição dos minerais em escala de solubilidade, menos solúvel para o mais solúvel, com uma evaporação de certa quantidade de água, sem aporte adicional durante o processo de evaporação, resultando no completo ressecamento.

Esse padrão é típico de bacias completamente fechadas, com associação de fácies exibindo um zoneamento associado as principais fases de evaporação da salmoura, de modo que os sais menos solúveis se depositaram nas bordas e os mais solúveis nas partes mais centrais da bacia (Hsü, 1972; Mohriak *et al.* 2008; Martins, 2016) (Figura 15).

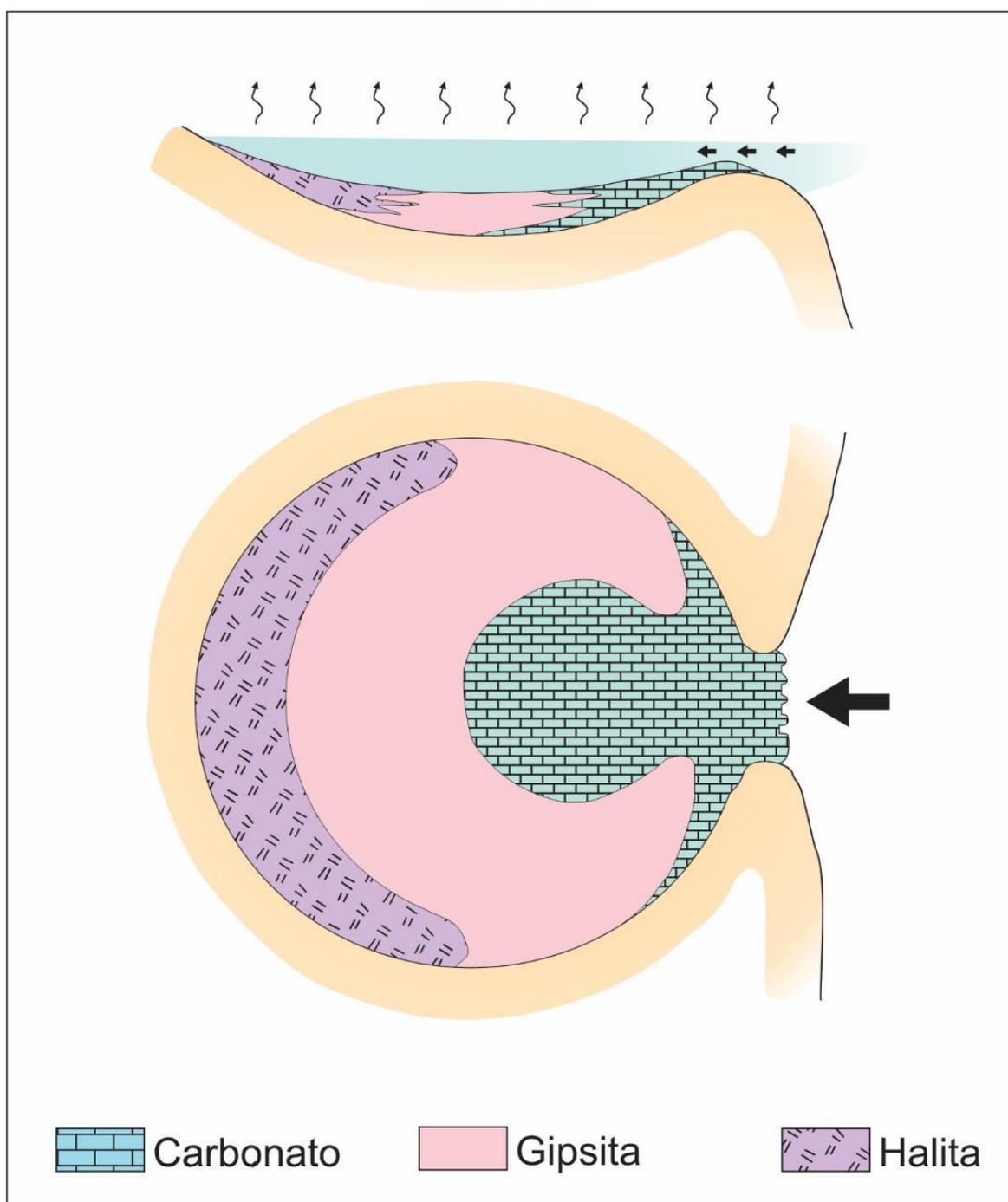
Figura 15 - Modelo de distribuição de fácies "olho de touro", associado a bacias completamente fechadas, exibindo um zoneamento de sais com diferentes solubilidades.



Fonte: Martins (2016).

O padrão “gota de lágrima” apresenta uma distribuição assimétrica de fácies, com os sais solúveis localizados na porção mais distal da bacia e os menos solúveis mais próximos do canal de entrada. Esse padrão é tipicamente observado em bacias restritas com um canal de entrada de água salgada que nutre a bacia, repondo o influxo de água que se perde na evaporação (Hsü, 1972; Mohriak *et al.* 2008; Martins, 2016) (Figura 16).

Figura 16 - Modelo de distribuição de fácies "gota de lagrima", típico de bacias restritas com um canal de entrada. A associação de fácies é assimétrica onde os sais mais concentrados se depositam nas porções afastadas da bacia.



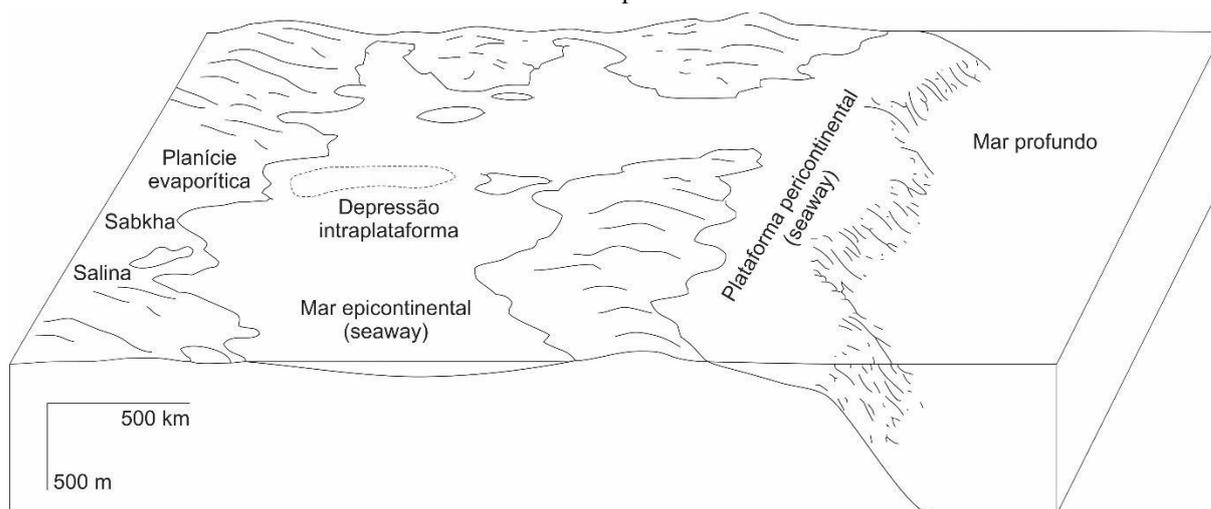
Fonte: Martins (2016).

### 4.3.2 Plataformas Evaporíticas

Formados em contextos de mares epicontinentais e pericontinentais, evaporitos plataformais constituem em camadas de sal em ciclos empilhados de plataformas marinhas rasas, com intercalação de carbonatos marinhos rasos e siliciclásticos continentais (Warren, 2006). Mares epicontinentais (*seaways*) são mares interiores e plataformas enormes e rasas, com extensões quilométricas e dezenas de metros de profundidade (Figura 17). Durante as fases de isolamento hidrográfico com a deposição de sal, a profundidade diminui ainda mais (Warren, 2006).

Com a ligação interrompida entre o oceano aberto e o mar epicontinental, ocorre a deposição de evaporitos em amplas planícies (*mudflats*) nesse ambiente. Essas planícies são cercadas por desertos de dunas e planícies de *wad*, sob lenta circulação de lençóis perenes de salmoura marinha que cobrem as partes mais baixas da bacia, próximo a cunha salina marinha. Além disso, deposições de terraços carbonáticos ou planície de areia tipicamente isolam a salmoura do oceano aberto (Warren, 2006; Martins, 2016).

Figura 17 - Mares epicontinentais, com grandes áreas continentais e águas rasas com áreas de centenas a milhares de quilômetros.

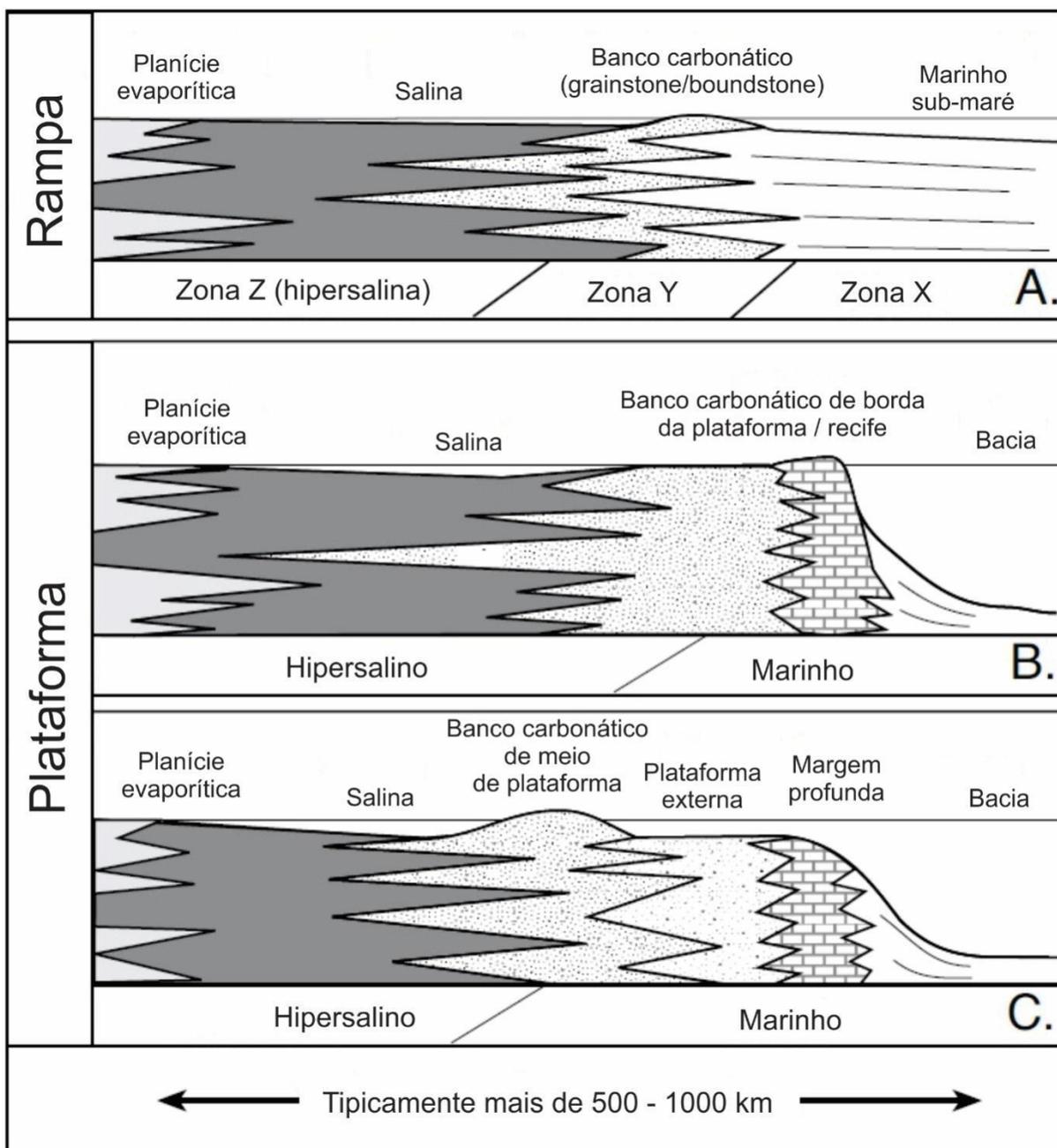


Fonte: Martins (2016).

O contexto deposicional neste ambiente apresenta duas configurações: plataforma e rampa - com a divisão da rampa em zonas hipersalina e marinha, e a rampa, em zonas X, Y e Z (Figura 18). A zona X com uma região ampla, com baixa energia e abaixo do nível de base da plataforma de mar aberto, possuindo uma sedimentação composta por *mudstone* e *wackestones* marinhos bioturbados, podendo ocorrer a deposição de sedimentos ricos em matéria orgânica. A zona Y é estreita se posicionando na região intermediária, desde o banco carbonático de alta energia até o limite de ação de marés com direção ao continente, a sedimentação nessa zona é

composta por areias, *grainstones* e recifes. Por fim, a zona Z é extremamente rasa, instalada num ambiente de baixa energia, próximo a zona Y com direção ao continente, e se isolada da zona X a sua sedimentação é formada por extensos depósitos de evaporitos (Martins, 2016).

Figura 18 - Evaporitos em rampas e plataformas. Em a) rampa com inclinação suave com restrição causada pela zona Y; b) plataforma protegida com restrição pela exposição de recifes; c) plataforma protegida, com margem profunda e bancos do centro da plataforma que restringem a exposição.



Fonte: Martins (2016).

### 4.3.3 Evaporitos Lacustres

Bohacs *et al.* (2000) sugerem que os depósitos evaporíticos lacustres do passado podem ser divididos em três tipos: sub-preenchido (*underfilled*), balanceado (*balanced fill*) e super-preenchido (*overfilled*). Com isso, os evaporitos formados em lagos, apresentam uma combinação de água/sedimento por um determinado espaço de tempo com espaço de acomodação. Os dois fatores mais importantes nesse sistema são: o clima (incluindo o aporte sedimentar e profundidade da lâmina d'água) e a tectônica que exerce papel fundamental na configuração dos depósitos (Warren, 2006).

Quando a taxa de aporte sedimentar/água excede a geração de espaço de acomodação que geralmente, apresenta relação precipitação/evaporação alta e a taxa de subsidência é baixa, é desenvolvido nessas condições os lagos do tipo super-preenchido. Esses lagos são fortemente relacionados com sistemas de rios perenes e seus depósitos são normalmente compostos por carvão e depósitos fluviais. Esses depósitos formam uma associação de fácies flúvio-lacustre que é composta por margas, coquinas argilosas, *grainstone* bioclásticos, arenitos, *mudstone* e carvão, também se observa uma mistura de matéria orgânica lacustre e continental (Bohacs *et al.* 2000; Warren, 2006; Martins, 2016).

Quando a taxa de aporte sedimentar/água e geração de espaço de acomodação se equilibram, de modo que a entrada de água é suficiente para preencher periodicamente o espaço de acomodação disponível, os lagos do tipo balanceado se desenvolvem. A associação de fácies é composta por uma complexa intercalação de carbonatos, rochas siliciclásticas, *mudstones* ricos em matéria orgânica, com biota de água doce a salina (Bohacs *et al.* 2000; Warren, 2006; Martins, 2016).

Por fim, quando a taxa de geração de espaço excede o aporte sedimentar/água, os lagos sub-preenchidos são formados em uma bacia com hidrologia fechada e com depósitos de lagos efêmeros salinos ou *playas*. As fácies apresentam composição muito contrastantes que variam de arenitos clásticos, *grainstones*, folhelhos betuminosos e evaporitos, recobrimo as porções mais baixas da bacia nos períodos mais áridos do lago (Bohacs *et al.* 2000; Warren, 2006; Martins, 2016).

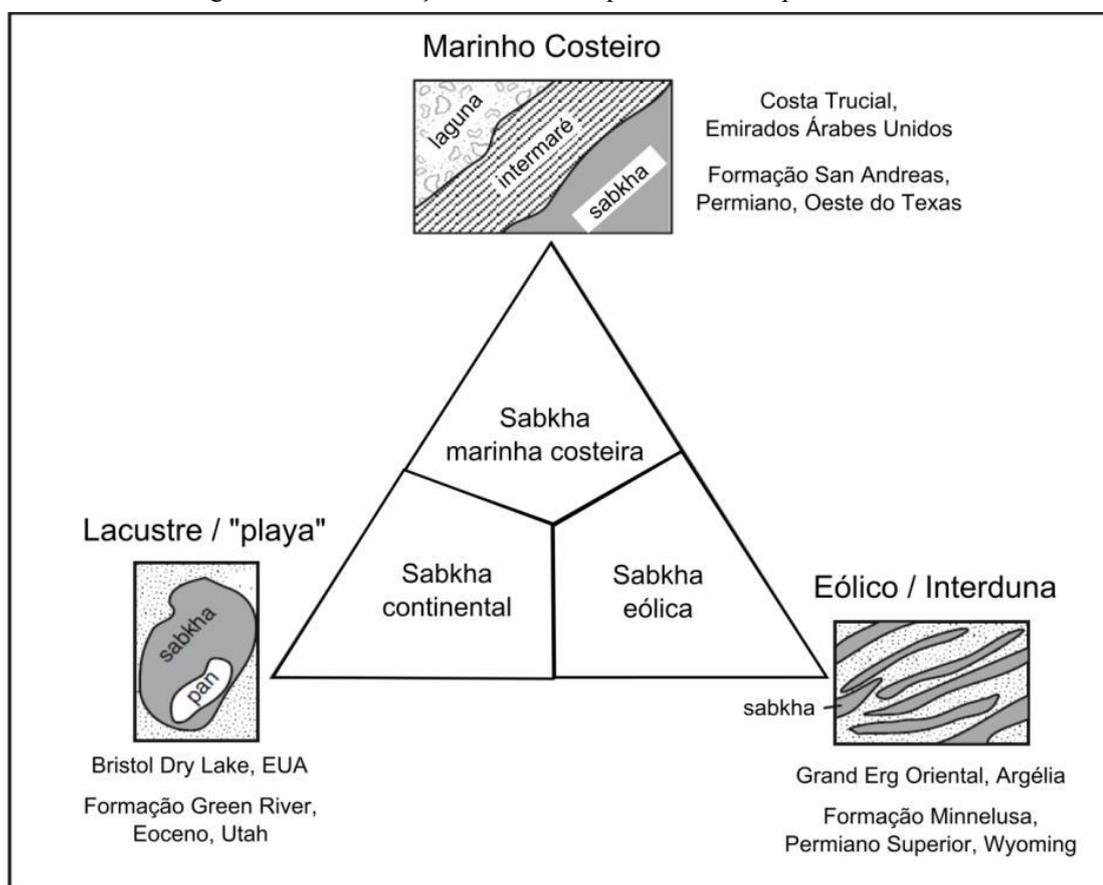
#### 4.4 MODELOS DE DEPOSIÇÃO EM BACIAS EVAPÓRITICAS ATUAIS

##### 4.4.1 Depósitos de *Sabkhas* e lagos salinos

Por definição, o termo *Sabkha* é uma palavra árabe que significa planície de sal, usada como termo local no Golfo Pérsico que descreve planícies costeiras e interiores, com grandes extensões, incrustadas por sal e frequentemente inundadas. É caracterizado com o crescimento de evaporitos intrassedimento, abaixo de uma superfície com geomorfologia plana e fluatibilidade do topo da franja capilar (Warren & Kendall, 1985; Warren, 2006).

A classificação desse ambiente é restritamente definida a partir da matriz hospedeira em que o sal cresce, como: marinhas costeiras, flúvio-lacustres ou eólicas (Figura 19). Sendo essa última subconjunto das duas primeiras (Warren, 2006, Martins, 2016).

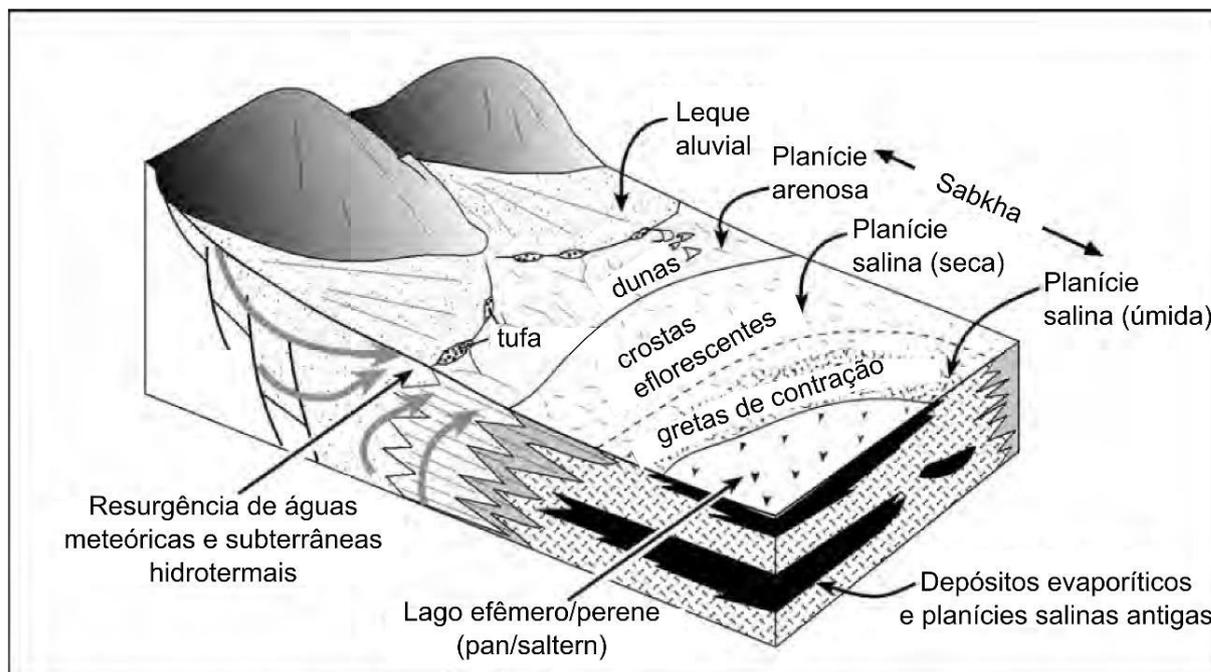
Figura 19 - Classificação e contexto deposicional dos tipos de sabkha.



Fonte: Martins (2016).

Exemplos de *Sabkha* marinhas costeiras modernas são formadas em estreitos cinturões nos desertos costeiros (*e.g.*, *sabkha* holocênicas de Abu Dhabi). As *sabkhas* continentais fazem parte de um complexo de *playa*, no qual, a franja capilar intercepta a superfície situando-se entre a margem da bacia e sua parte mais rasa que está coberta pela salmoura (Warren, 2006) (Figura 20).

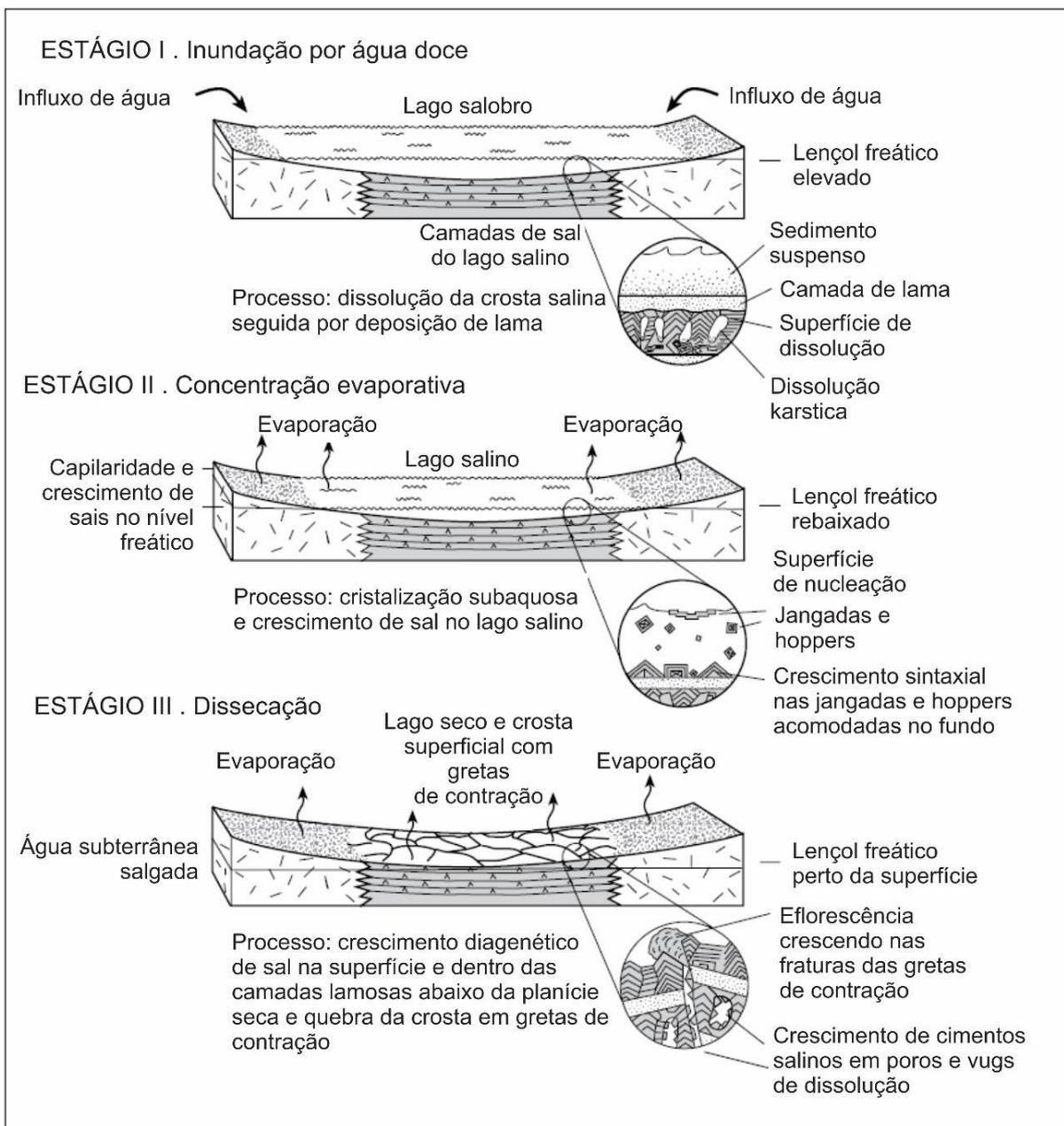
Figura 20 - Sabkha continental com suas várias fácies e processos de fornecimento de sais para este ambiente.



Fonte: Martins (2016).

Os lagos salinos efêmeros se desenvolvem no contexto continental, intimamente relacionados a formação de *sabkhas*, localizando-se na parte mais baixa do complexo de *playa*. Seus depósitos são formados por camadas bandadas de sal com empilhamento agradacional, contornados por depósitos de *sabkha*, que se depositam acima de camadas de sal mais antiga (Lowenstein & Hardie, 1985; Warren, 2006) (Figura 21).

Figura 21 - Estágios de evolução de um ciclo deposicional de um lago efêmero continental (*saline pan*).



Fonte: Martins (2016).

#### 4.4.2 Depósitos de salinas e Lagos salinos

Os depósitos de salinas são formados em depressões costeiras, abaixo do nível do mar sem uma conexão permanente com o oceano pela superfície (em um ambiente restrito), mas por meio de barreiras semipermeáveis - como cordões litorâneos arenosos que permitem a percolação de água marinha nesses depósitos (Warren, 2006).

Os lagos salinos perenes, são denominados por drenagens perenes. Tipicamente, ocorrem na parte mais profunda da bacia endorreica com uma deposição de carbonatos e siliciclásticos, onde o contínuo influxo de água na depressão do lago, oriundos de rios ou fontes termais, são fatores na manutenção da salmoura (Warren, 2006).

## 5 RESULTADOS

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO FACIOLÓGICA E PETROGRÁFICA DAS ROCHAS DOS AFLORAMENTOS E SONDAGEM GEOLÓGICA DOS EVAPORITOS

Com o objetivo de descrever as fácies associadas à Formação Codó presentes na Mina do Chorado (Gesso Integral), município de Grajaú-MA, cinco afloramentos foram descritos com seus respectivos aspectos macroscópicos (*e.g.* mineralogia, estruturas sedimentares, cor, granulometria) e microscópicos (*e.g.* mineralogia, texturas, conteúdo fossilífero).

Posteriormente, a descrição da sondagem geológica com os principais aspectos texturais das rochas evaporíticas, foram detalhados com perfis estratigráficos digitais e descrição em lâmina petrográfica.

Foram descritos onze fácies e as respectivas lâminas petrográficas de alguns litotipos da área mapeada (Tabela 5), no qual, formam as sequências 1, 2 e 3 que serão descritas a seguir.

Tabela 5 - Afloramentos e sondagem geológica com suas respectivas coordenadas em UTM.

AFLORAMENTOS	COORDENADAS	
	Longitude (E) (m)	Latitude (S) (m)
BC 01	375864.79	9361966.94
BC 02	375845.16	9361945.36
BC 03	376584.62	9365176.68
BC 04	377116.98	9365329.06
BC 05	376264.12	9365465.03
SONDAGEM F064-03	376086.00	9377631.00

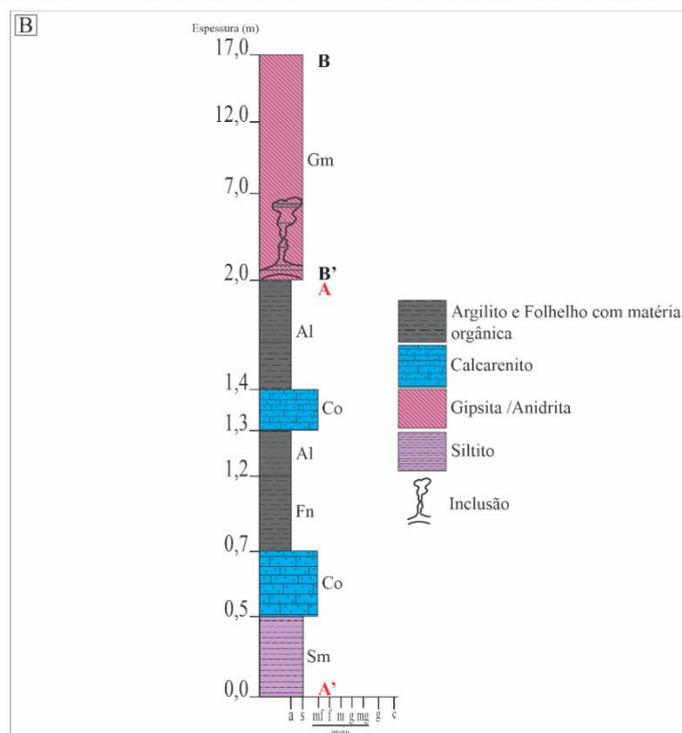
Fonte: O autor (2023).

### 5.1.1 Descrição faciológica e petrográfica das litofácies da sequência 1

#### Fácies Siltito maciço (Sm)

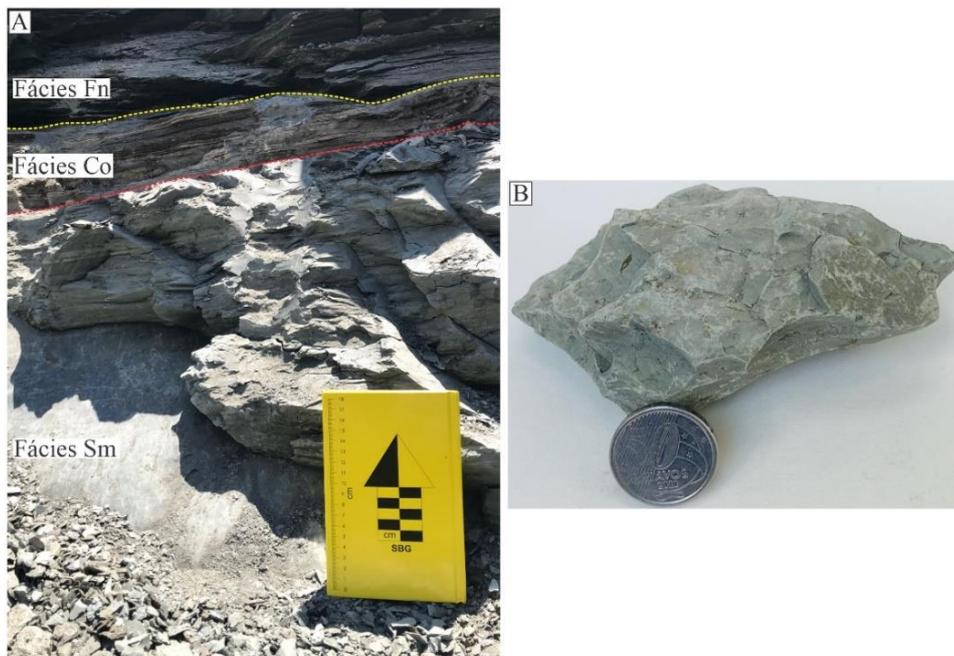
Constitui a seção basal do afloramento BC\_01 apresenta espessura de 0,53 metros, sua sedimentação é atribuída a subida do nível de base (Figura 22). Esta fácies apresenta estrutura maciça, caracterizada por um siltito de coloração verde clara, aparentemente com baixo teor de matéria orgânica, devido à baixa preservação desta (Figura 23).

Figura 22 – a) Perfis estratigráficos: A-A' e B-B' da seção basal e intermediária do afloramento BC\_01, estruturas em formatos de bolsões (retângulo em azul) compostos por gipsita acicular (fibrosa) e folhelhos (retângulo azul); b) perfil composto da seção basal e intermediária.



Fonte: O autor (2023).

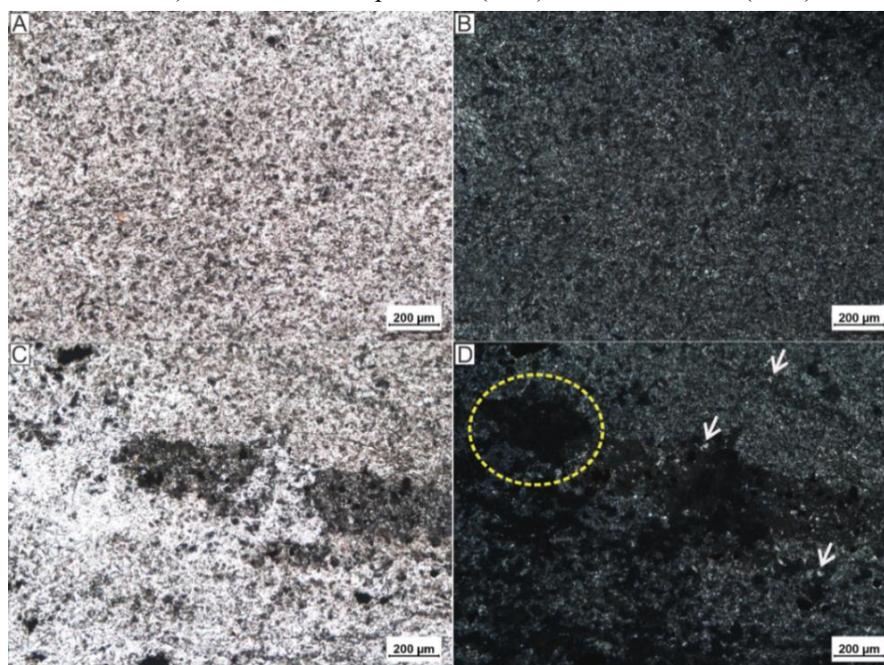
Figura 23 – a) Fácies Siltito maciço de coloração verde clara, com espessura de 0,53 metros, porção basal do afloramento BC\_01, e o contato com a fácies Co, no topo (linha tracejada em vermelho); b) amostra litológica.



Fonte: O autor (2023).

Petrograficamente, esta fácies é descrita como um siltito com moderado teor de matéria orgânica, composto essencialmente por matéria orgânica e quartzo anédricos, angulosos a subangulosos, de granulometria fina a média, ambos com composição modal de 50% (Figura 24).

Figura 24 – a) Fácies Sm, descrita petrograficamente como um siltito com moderado teor de matéria orgânica, (b) composto essencialmente de matéria orgânica (círculo pontilhado em amarelo) e quartzo anédricos (setas brancas). Fotos em nicóis paralelos (a e c) e nicóis cruzados (b e d).

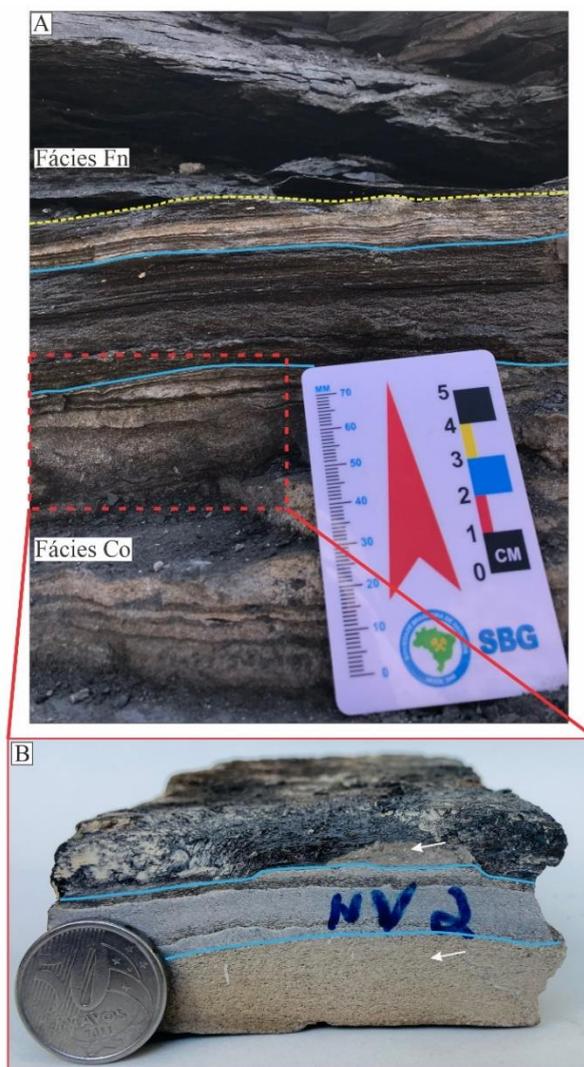


Fonte: O autor (2023).

### Fácies Calcário ostracodal (Co)

Essa fácies ocorre sobreposta a fácies Sm, com espessura variável de 0,15 a 0,20 metros, e sotoposta a fácies Al, com espessura de 0,1 metros, sua sedimentação é atribuída a descida do nível de base (Figura 22). A fácies Co é descrita por um calcarenito de granulometria média com laminação plano-paralela de espessura centimétrica com alternâncias claras e escuras (Figura 25a), composto por: ostracodes que apresentam tamanhos médios em torno de 0,15 a 0,3 cm, em geral, suas formas são ovaladas a arredondadas, perfazem 80% da composição, enquanto 20% do restante é composto por tapetes microbiais de coloração escura, presentes na alternância da laminação (Figura 25b).

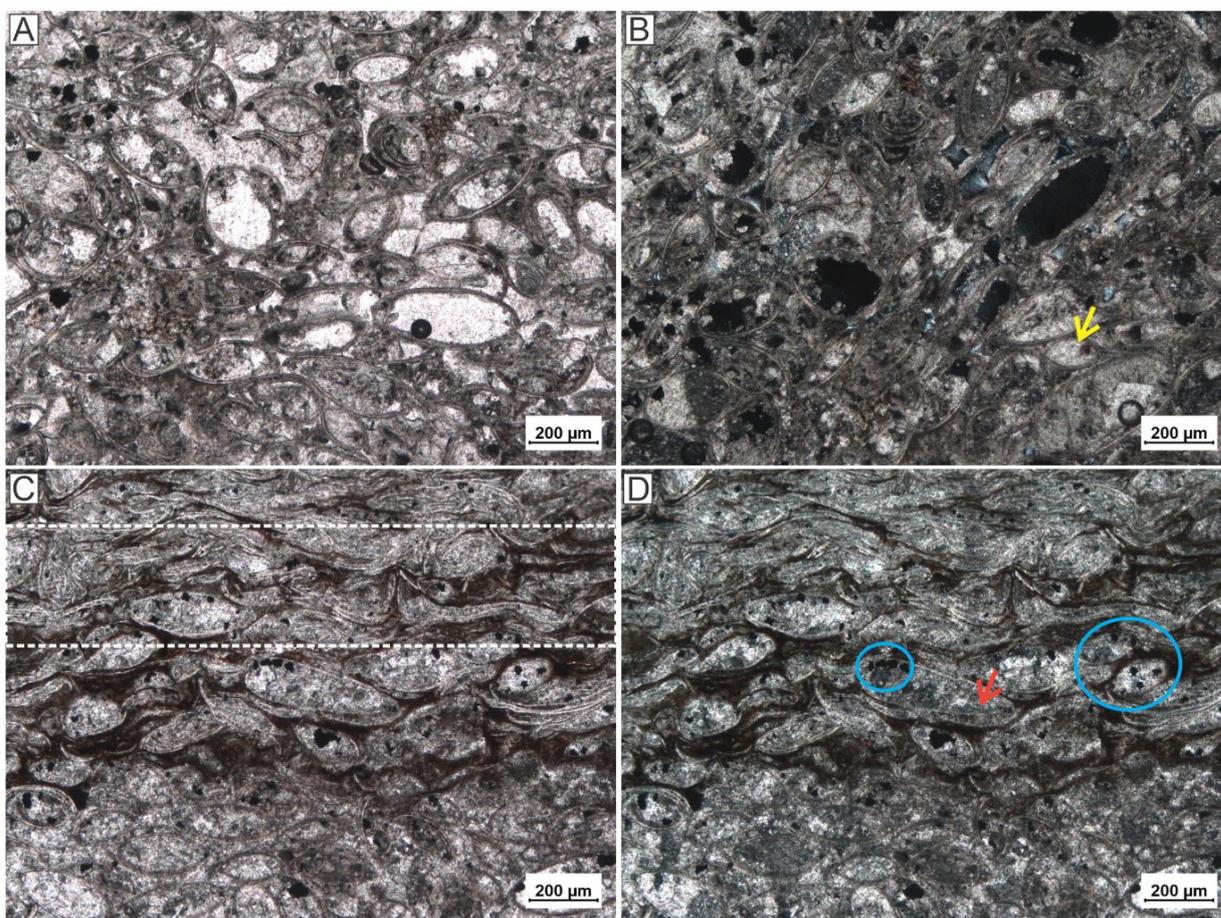
Figura 25 – a) Fácies Calcário ostracodal com seu contato no topo com a fácies Fn (linha tracejada em amarelo) com sua laminação plano-paralela e tapetes microbiais (linha contínua em azul); b) zoom na porção basal para confecção da lâmina petrográfica, em que, se observa os tapetes microbiais (linha contínua em azul) e ostracodes (setas em branco) em formas ovaladas a esféricas.



Fonte: O autor (2023).

Petrograficamente, esta fácies é descrita como um *packstone* de matriz micrítica e cimento composto por calcita espática, apresenta níveis piritizados e oxidados, denominado de “ostracodito”, devido a sua composição ser essencialmente de ostracodes de formas monoespecíficas do andar Alagoas (Aptiano), biozona O-11 (figura 26).

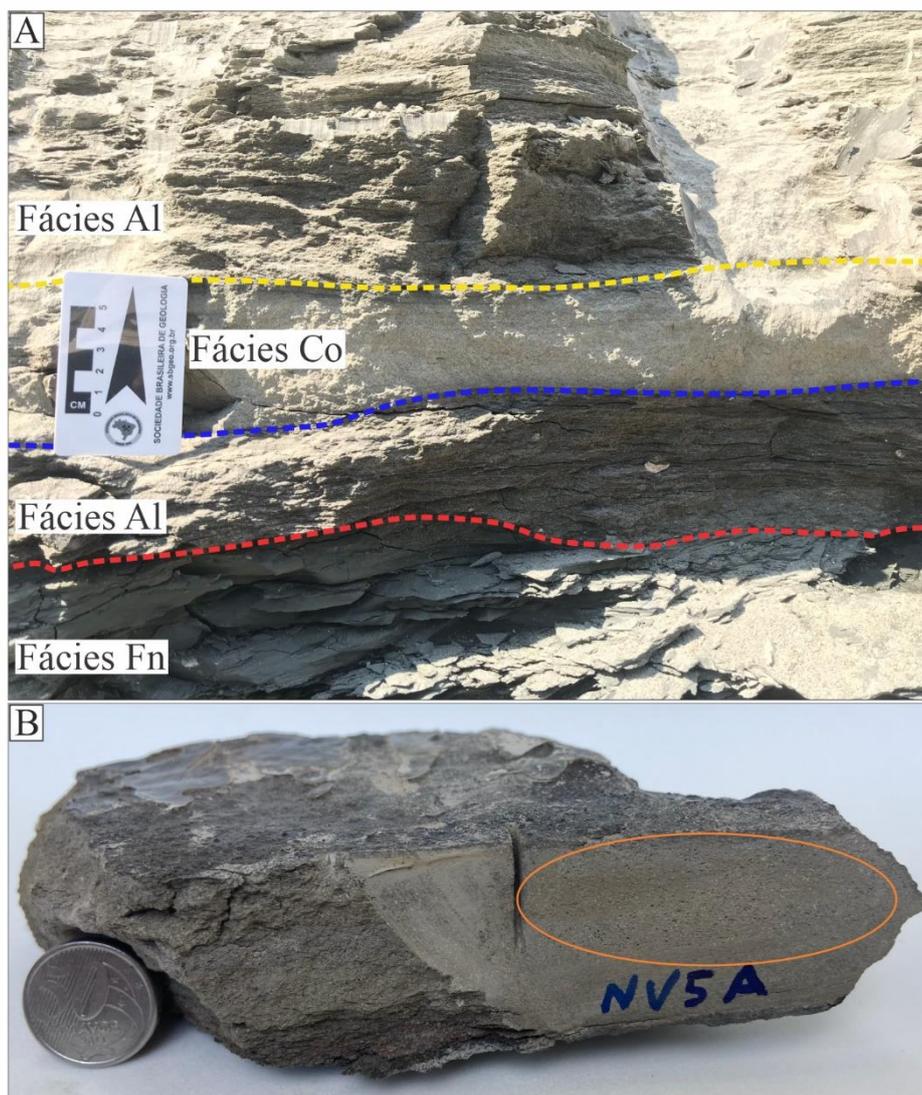
Figura 26 – a) e b) Fácies Co, descrita como um *packstone* de matriz micrítica e cimento composto por calcita espática (seta amarela); c) ostracodes de formas monoespecíficas formando os tapetes microbiais (retângulo pontilhado em branco); d) níveis piritizados (seta vermelha) e oxidados (círculos em azul). Fotos em nicóis paralelos (a e c) e nicóis cruzados (b e d), com objetiva de 20x.



Fonte: O autor (2023).

Quando sobreposta a fácies A1, é caracterizada por um calcarenito de granulometria muito fina, sua sedimentação é atribuída a descida do nível de base (Figura 22), com estrutura maciça e cor cinza claro (Figura 27a), os principais grãos são de conchas de ostracodes com tamanhos milimétricos, constituindo aproximadamente 70% da rocha (Figura 27b), essa fácies apresentam uma variação lateral de 0,07 a 01 metros.

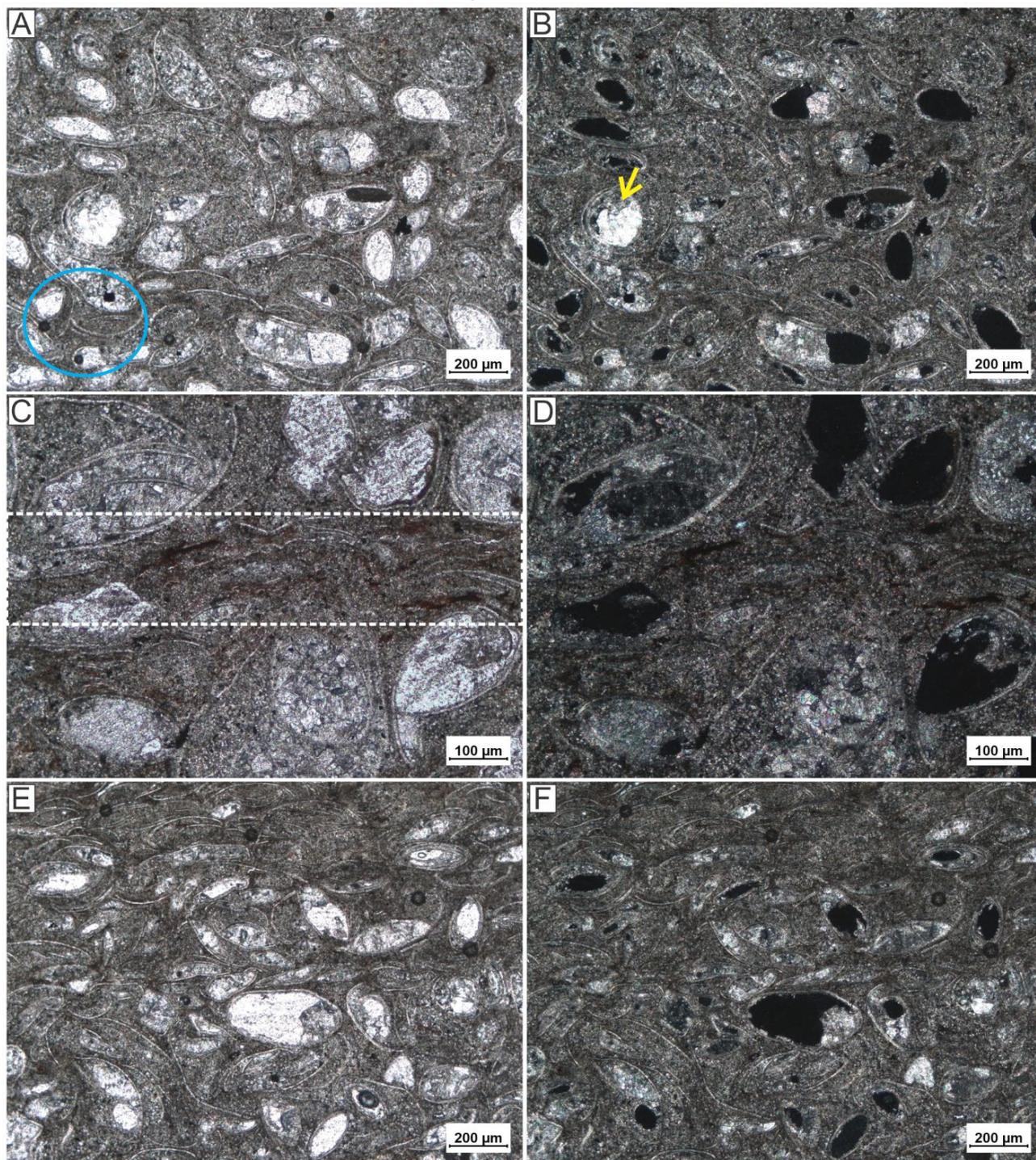
Figura 27 – a) Fácies Calcário ostracodal (Co) composta essencialmente por ostracodes que perfazem 70% da rocha, com granulometria fina a média, estrutura maciça, observa-se o contato basal com a fácies Al (linha tracejada em azul) e no topo o contato com fácies Al (linha tracejada em amarelo); b) amostra com presença de ostracodes (elipse laranja).



Fonte: O autor (2023).

Petrograficamente, esta fácies é descrita como *packstone*, com presença de variações de valvas bem e mal-formadas de ostracodes, a cimentação interior dessas valvas é formada por calcita espática, com matriz essencialmente micrítica, presença de pirita e níveis de oxidação (figura 28).

Figura 28 – a) Fácies Co com presença de pirita (círculo azul); descrita como um *packstone* de matriz micrítica e (b) cimento composto por calcita espática (seta amarela) com ostracodes bem e mal-formados e níveis de oxidação (retângulo pontilhado em branco), em c), d), e) e f). Fotos em nicóis paralelos (a, c, e) e nicóis cruzados (b, d, f), com objetiva de 20x.

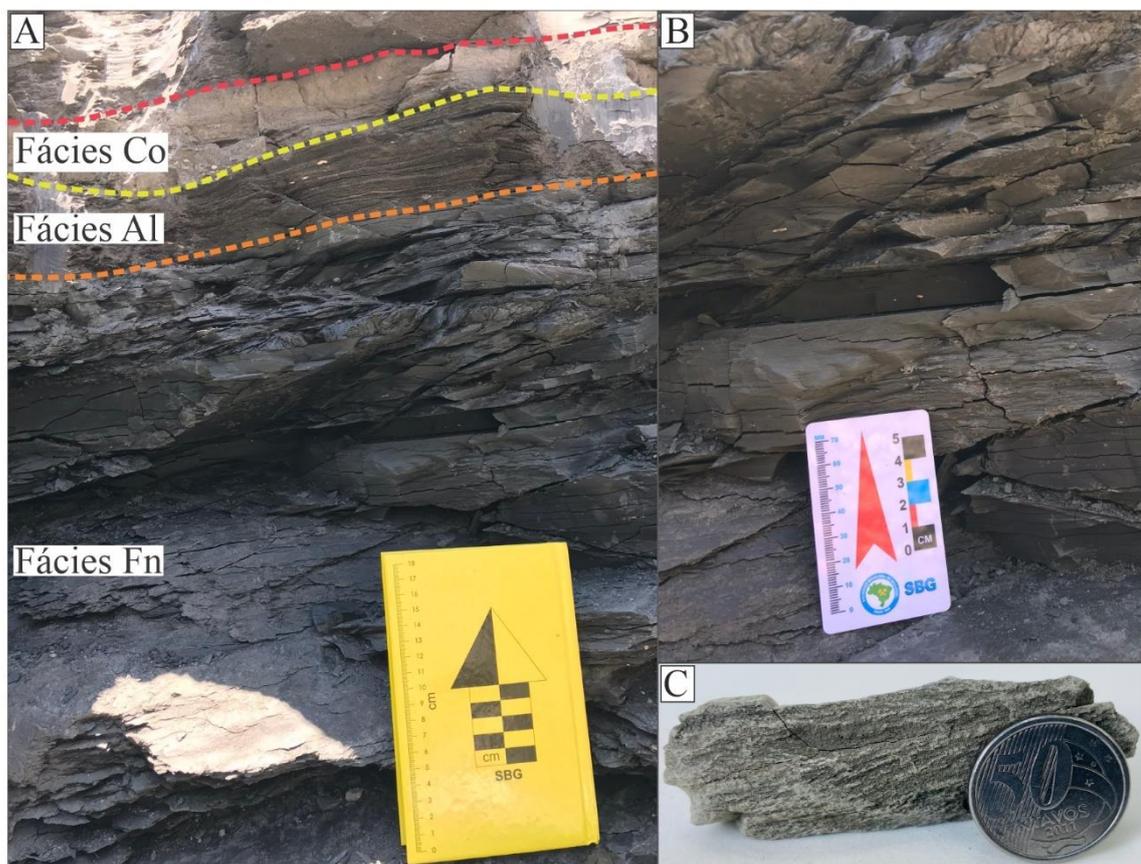


Fonte: O autor (2023).

### Fácies Folhelho negro (Fn)

Esta fácies apresenta espessura de 0,46 metros, sua sedimentação é atribuída a subida do nível de base (Figura 22), apresenta um folhelho negro composto por essencialmente matéria orgânica com alto teor de preservação e estrutura físsil (Figura 29).

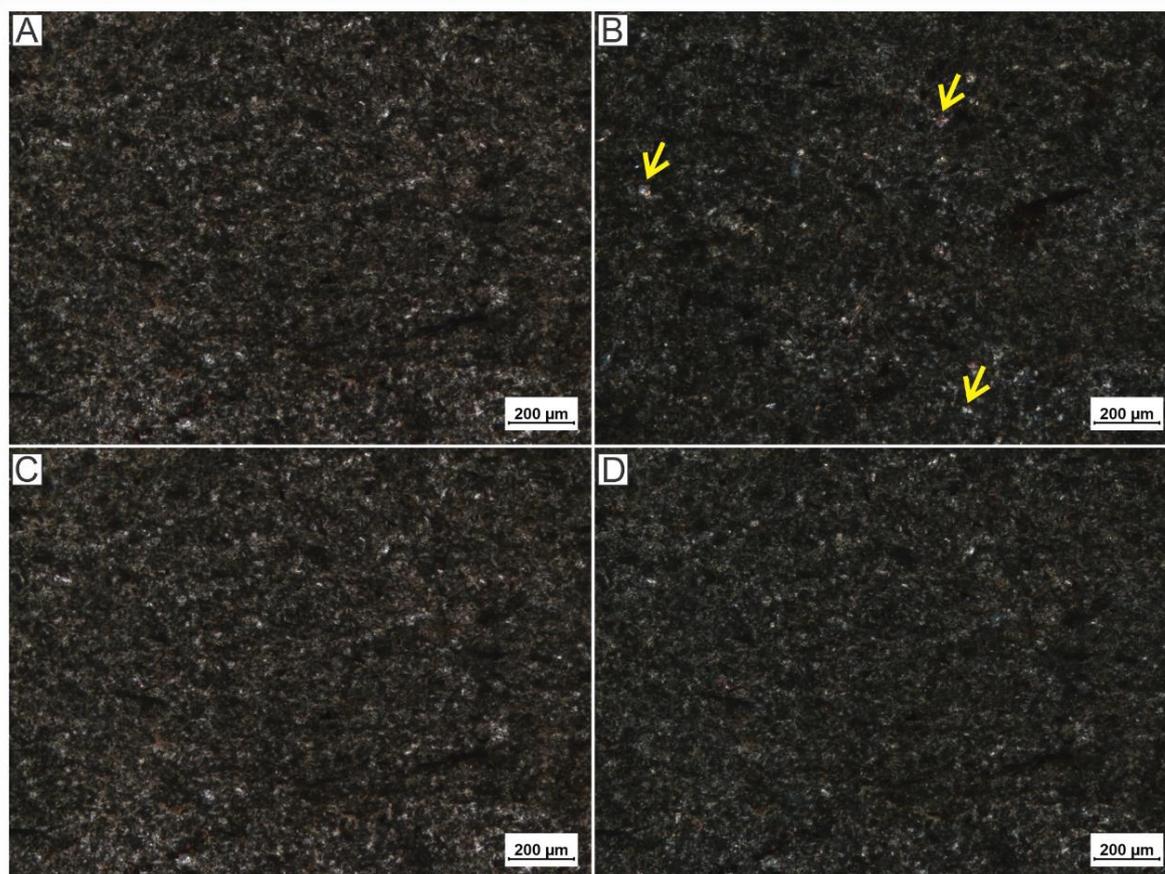
Figura 29 – a) Fácies Folhelho Negro (Fn) composta essencialmente por matéria orgânica, sobreposta a esta, observa-se o contato desta com a fácies Al (linha tracejada em laranja) e o contato da fácies Al e Co (linha tracejada em amarelo); b) estrutura de físsilidade e em c) amostra de mão.



Fonte: O autor (2023).

Petrograficamente, esta fácies é composta por quartzos anédricos, angulosos a subarredondados, de granulometria fina com 40% em composição modal. A matéria orgânica amorfa é o principal constituinte da rocha com 60% da composição (Figura 30).

Figura 30 – a) Fácies Fn composta essencialmente por matéria orgânica e quartzo; b) quartzo se apresenta de forma anédrica (setas em amarelo) e granulometria fina; c) e d) matéria orgânica que perfaz mais de 60% da composição da rocha. Fotos em nicóis paralelos (a e c) e nicóis cruzados (b e d), com objetiva de 20x.

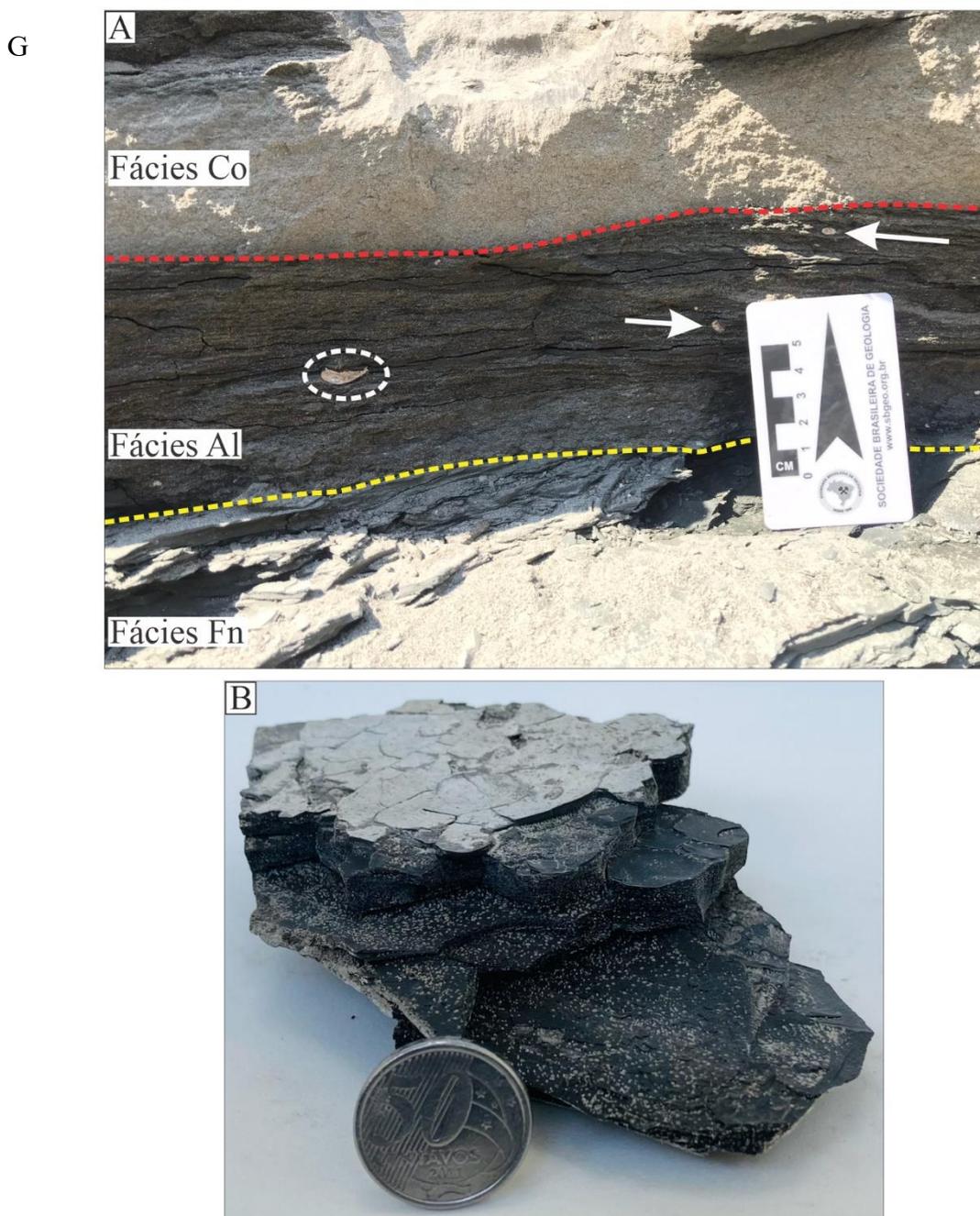


Fonte: O autor (2023).

### **Fácies Argilito laminado (Al)**

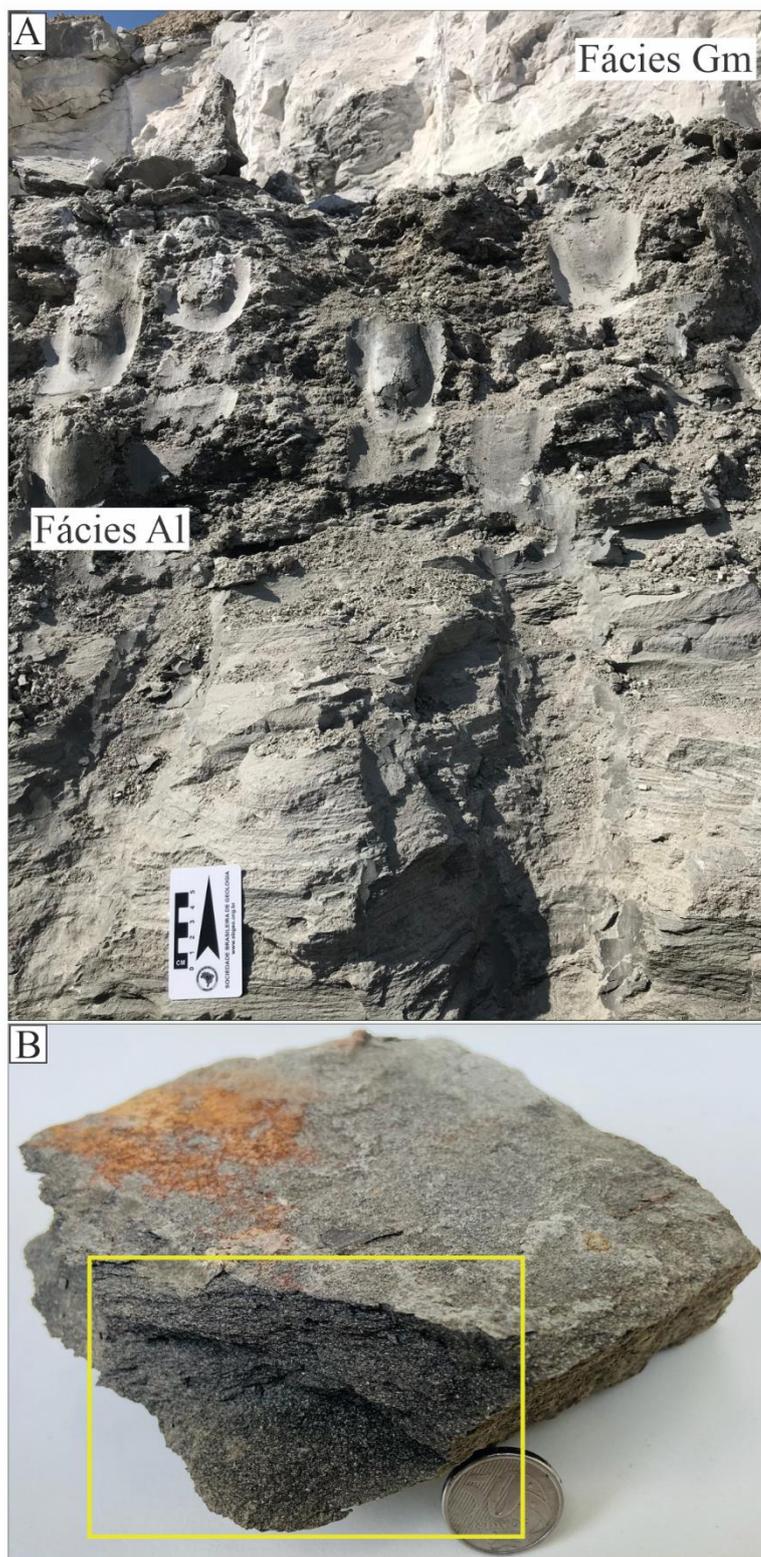
Esta fácies ocorre em dois níveis, sobreposta as fácies Fn, com espessura de 0,1 metros, e a fácies Co com espessura de 0,6 metros, sua sedimentação é atribuída a subida do nível de base (Figura 22). Sobreposta a fácies Fn, apresenta um argilito laminado essencialmente composto por matéria orgânica (Figura 31a). A presença de macro fósseis (invertebrados) de tamanhos centimétricos (2 a 3 cm) (figura 31a) e ostracodes de tamanhos milimétricos também estão presentes nesta fácies (Figura 31b). Quando sobreposto a fácies Co, é composta por um argilito de estruturação maciça, formado essencialmente de matéria orgânica bem preservada, coloração variando entre cinza claro a escuro (Figura 32a), com presença de ostracodes de tamanhos milimétricos (Figura 32b).

Figura 31 – a) Fácies Argilito laminado (Al) composta essencialmente por matéria orgânica, sobreposta a esta, observa-se o contato desta com a fácies Co (linha tracejada em vermelho) e o contato da fácies Al e Fn (linha tracejada em amarelo), estrutura laminada e a presença de macro fósseis (invertebrados) (círculo tracejado e setas em branco); b) amostra do argilito com presença de ostracodes (pontinhos em branco).



Fonte: O autor (2023).

Figura 32 – a) Fácies Argilito laminado (Al) composta essencialmente por matéria orgânica, com granulometria fina, sobreposta a esta, observa-se o contato desta com a fácies Gm que representa a seção intermediária do afloramento BC\_01, estrutura maciça e os contatos com a fácies; b) amostra com presença de ostracodes (retângulo amarelo).



Fonte: O autor (2023).

### 5.1.2 Descrição faciológica e petrográfica das litofácies da sequência 3

#### **Fácies Argilito maciço marrom (Amm)**

Compreende o topo do afloramento BC\_01, ocorrendo sotoposto a fácies Gm, esta fácies apresenta espessura de 10,7 metros, sua sedimentação é atribuída a subida do nível de base (Figura 33-II), composto por quatro níveis de argilitos (base para o topo): I- argilito de cor bege, com níveis centimétricos (1 a 2 cm) de gipsita acicular (fibrosa) (Figuras 33a e b); II- argilito de cor vermelho claro, apresentando também gipsita acicular com tamanhos centimétricos (0,5 a 1 cm) (Figura 33c); III- argilito de cor marrom, com grãos dispersos de quartzo e presença de óxidos (Figura 33d); IV- argilito de cor vermelha, com presença de grãos de quartzo com granulometria de silte a areia fina (Figura 33e). Sobreposta ao nível IV, sedimentos recentes foram depositados, o horizonte O de granulometria argilo-siltosa com desenvolvimento de raízes e grãos de quartzo de tamanhos centimétricos (1 a 2 cm) (Figura 33f).

Figura 33 – I) Fácies Argilito maciço (Amm) com 10,7 metros de espessura com seus respectivos níveis argilosos: a) e b) argilito de cor bege; c) argilito de cor vermelho claro com gipsita acicular; d) argilito de cor marrom com grãos de quartzo e presença de óxidos; e) argilito de cor vermelha com grãos de quartzo; f) horizonte O; II) Perfil estratigráfico.

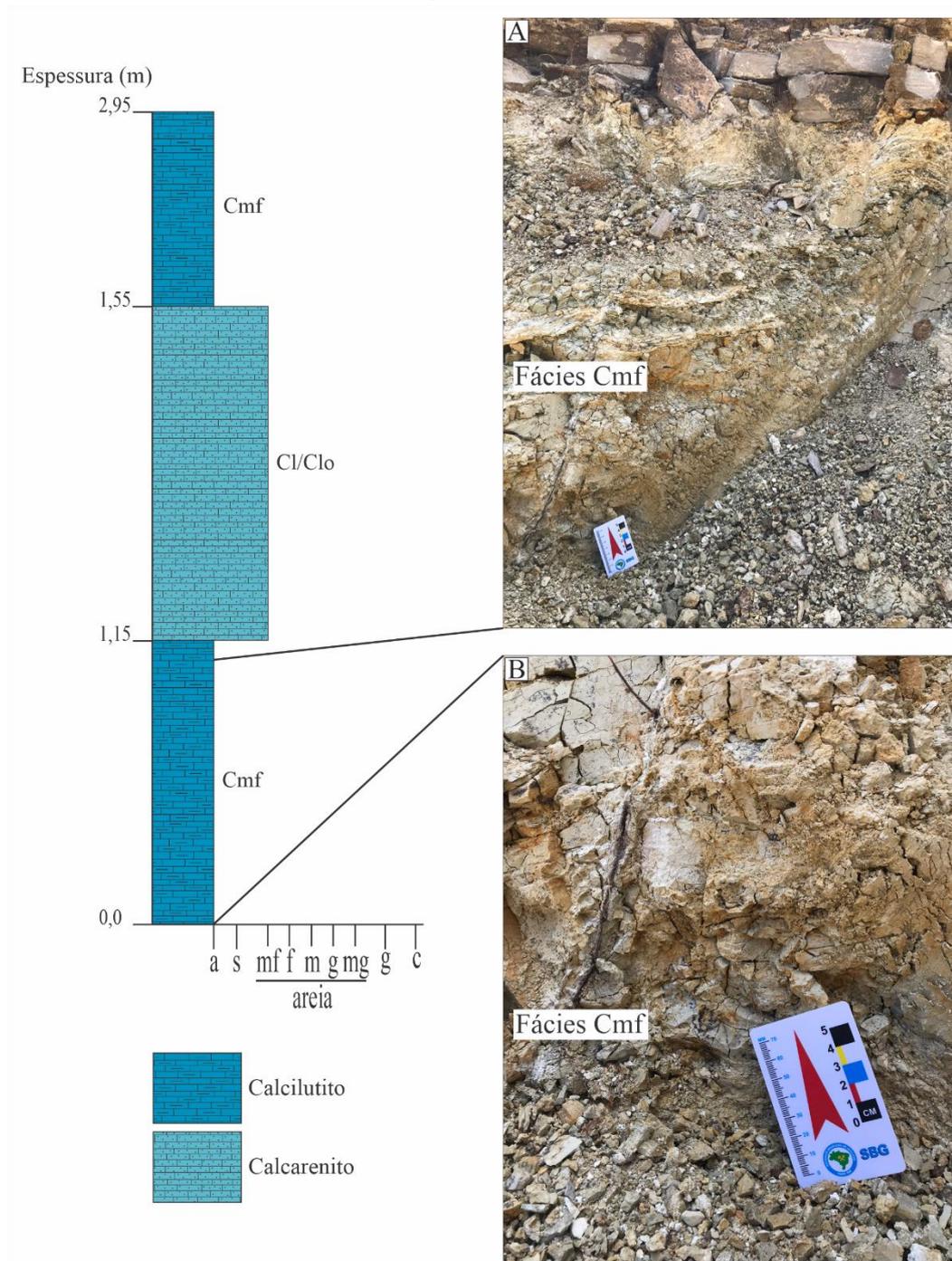


Fonte: O autor (2023).

### Fácies Calcário maciço fino (Cmf)

Esta fácies, representa a seção basal e o topo do afloramento BC\_04, com espessuras de 1,15 e 1,40 metros, é caracterizado por um calcilutito de estrutura maciça, cor marrom claro (Figura 34a) e a presença de raízes também é observada (Figura 34b).

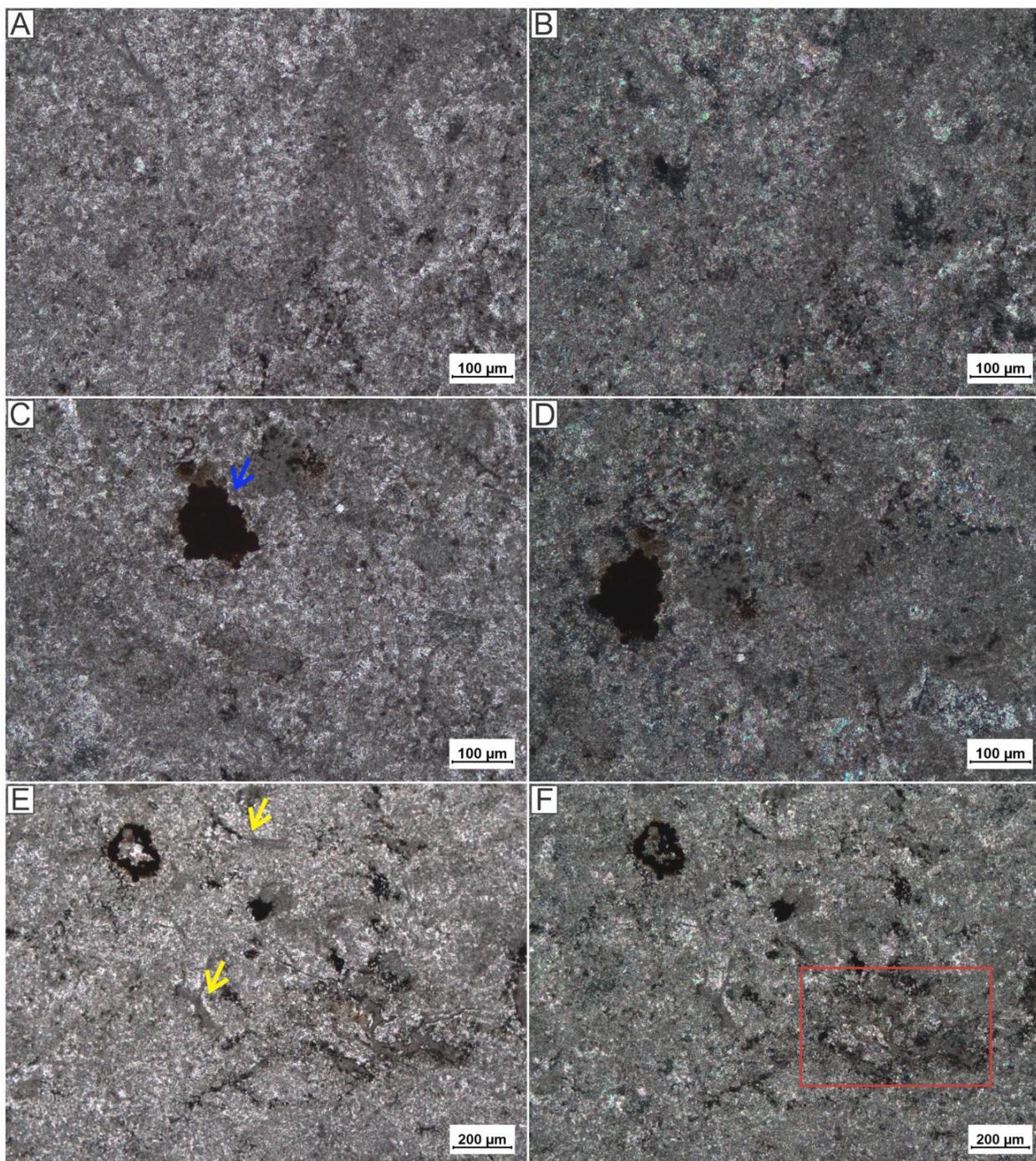
Figura 34 – a) Fácies Calcário maciço fino (Cmf) com 1,15 metros, formada por um calcilutito de estrutura maciça e cor marrom claro; b) presença de raízes também é observada.



Fonte: O autor (2023).

Petrograficamente, esta fácies é descrita como *wackestone* de matriz micrítica (Figuras 35a e b), com porosidade sendo substituída por pirita (Figuras 35c e d), resquícios de valvas mal-formadas e desarticuladas de ostracodes sendo preenchidas em seu interior por calcita espática (Figuras 35e e f).

Figura 35 – a) e b) Fácies Cmf, descrita como um *wackestone* de matriz micrítica; c) e d) porosidade sendo substituída por pirita (seta azul); e) e f) resquícios de valvas desarticuladas (setas em amarelo) sendo preenchidas por calcita espática (retângulo vermelho). Fotos em nicóis paralelos (a, c, e) e nicóis cruzados (b, d, f), com objetiva de 10x.

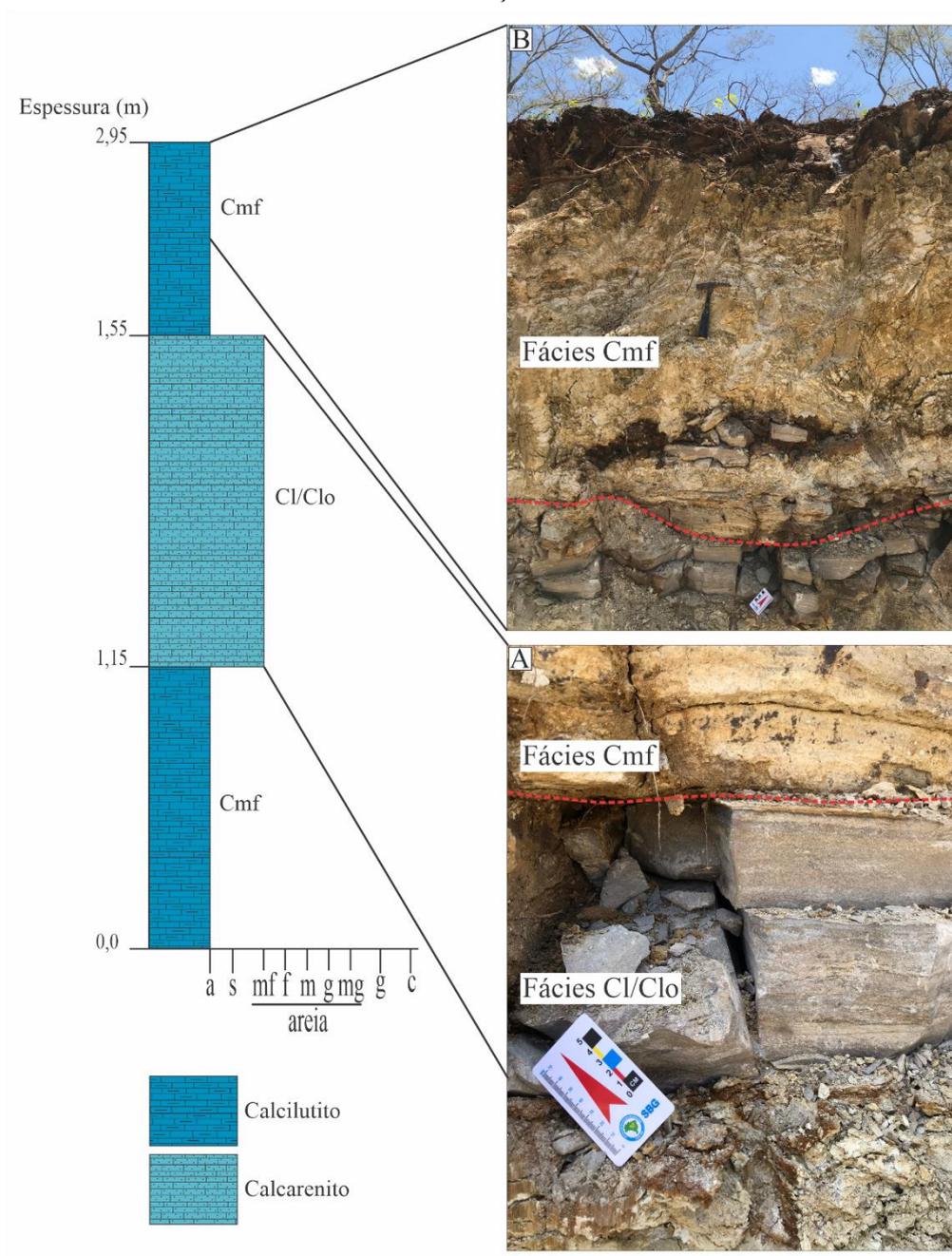


Fonte: O autor (2023).

### Fácies Calcário laminado (Cl/Clo)

Esta fácies, com espessura de 0,40 metros, é caracterizada por um calcarenito de granulometria média, com estrutura maciça, com alternância de camadas nas cores: marrom claro e cinza claro (Figuras 36) presença de vênulas de óxidos de cor preta com direções transversais e verticais (Figura 37).

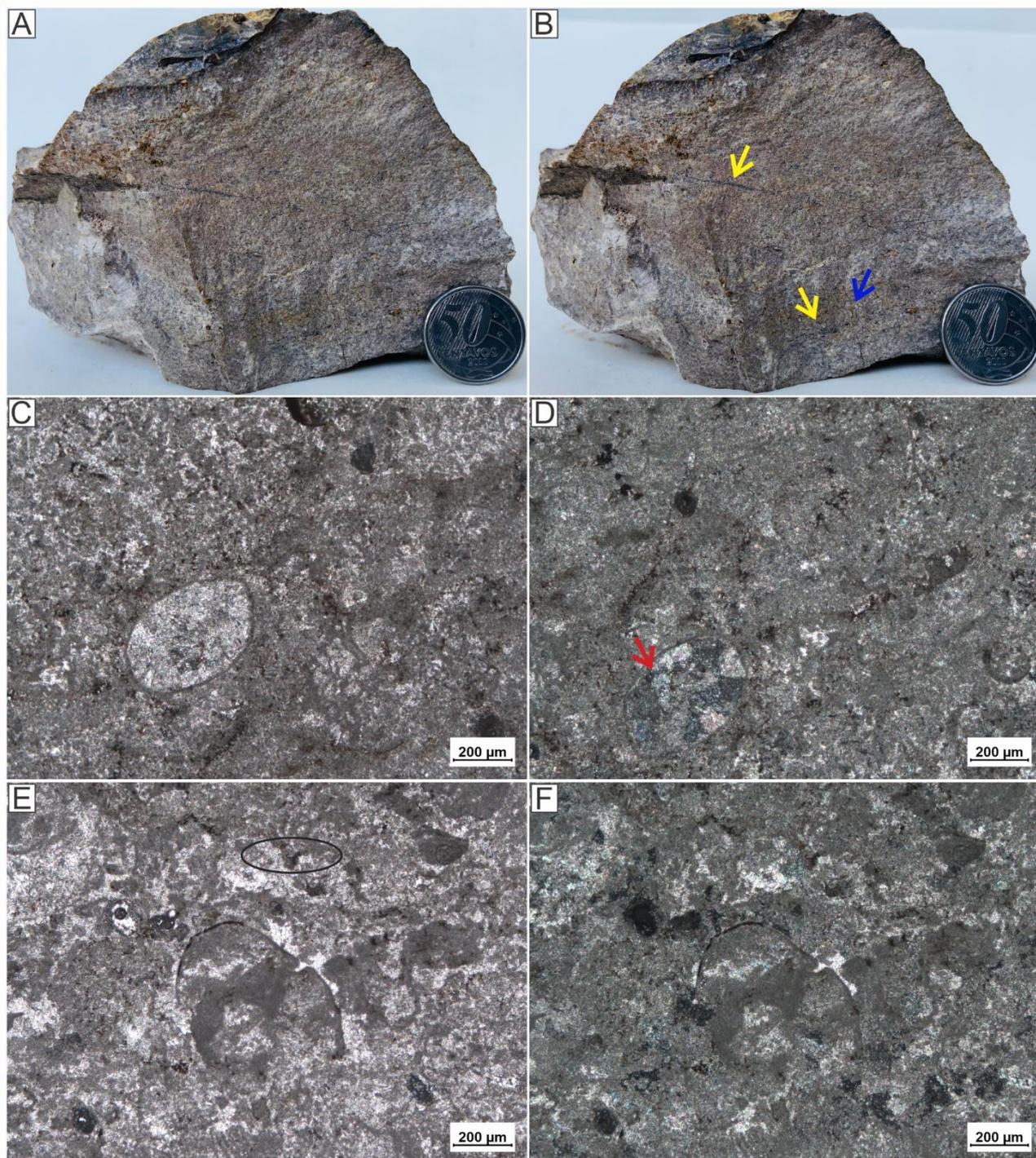
Figura 36 – Fácies Calcário laminado (Cl/Clo) e Calcário maciço fino (Cmf) (contato das fácies, linha tracejada em vermelho) com 0,40 m e 1,40 metros, respectivamente; a) Fácies Cl/Clo formada por um calcarenito com estrutura laminar, com alternâncias de camadas marrom claro e cinzas; b) a Fácies Cmf formada por um calcilutito de estrutura maciça e cor marrom claro.



Fonte: O autor (2023).

Petrograficamente, esta fácies é descrita como *wackestone* de matriz micrítica preenchendo o interior de valvas de ostracodes, apresenta porosidade fenestral e vugular (Figuras 37c e d) e pirita framboidal (Figuras 37e e f).

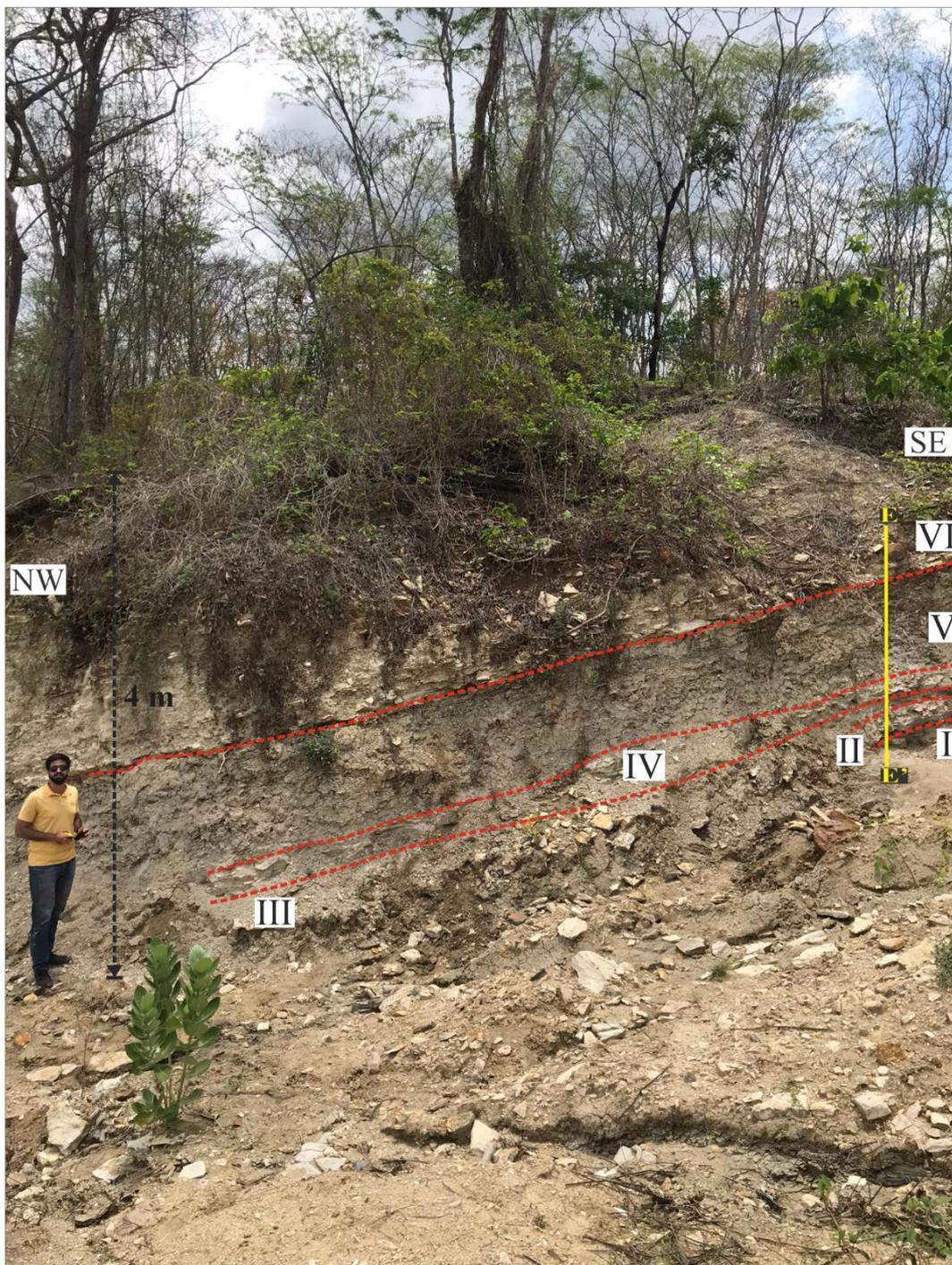
Figura 37 – a) Fácies Cl/Clo, com estrutura maciça, com coloração marrom clara, presença de vênulas de óxidos de cor preta com direções transversais (setas em amarelo) e verticais (seta azul); b) *wackestone* com matriz micrítica (seta vermelha) preenchendo (c e d) valvas de ostracodes e porosidade fenestral e vugular; e) e f) presença de pirita framboidal. Fotos em nicóis paralelos (c, e) e nicóis cruzados (d, f), com objetiva de 20x.



Fonte: O autor (2023).

Outro afloramento (BC\_05) também foi descrito níveis de rochas carbonáticas, na área da Mina de Barreirinhas. Este afloramento, com espessura de 3,1 metros e direção NW-SE, para melhor descrição, foi dividido em seis níveis e suas respectivas fácies, representados em algarismos romanos e seu respectivo perfil estratigráfico: E-E' (Figura 38).

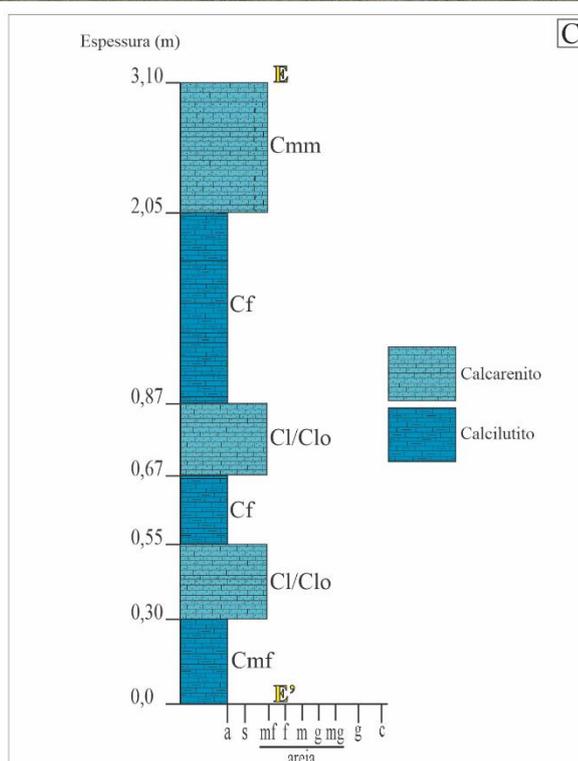
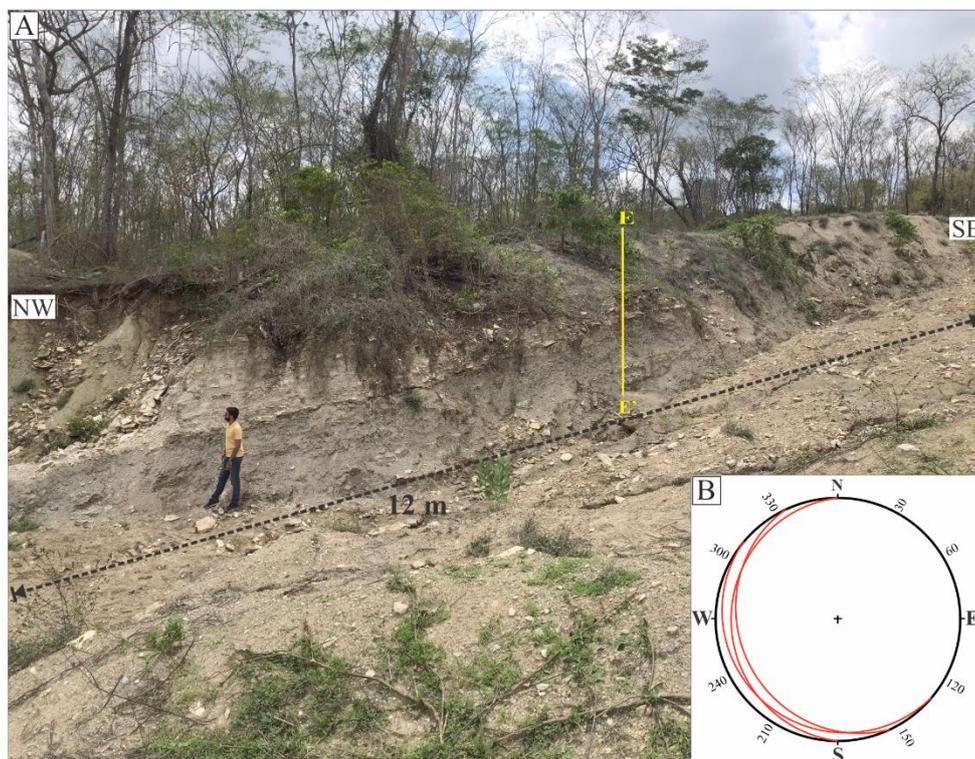
Figura 38 - Afloramento BC\_05 com espessura de 4 metros e direção NW-SE, dividido em seis níveis e suas respectivas fácies.



Fonte: O autor (2023).

A descrição em seis níveis estratigráficos se observa no perfil: E-E', com espessura sedimentar de 3,1 metros, respectivamente e comprimento de 12 metros (Figuras 39a e c). Este afloramento com atitudes de acamamento mergulhando para SW (Figura 39b).

Figura 39 – a) e c) Afloramento BC\_05 com espessura sedimentar de 3,1 metros; b) acamamento mergulhando para SW, representado no estereograma.



Fonte: O autor (2023).

### **Fácies Calcário maciço fino (Cmf)**

Esta fácies representa a seção basal (nível I) do afloramento BC\_05 (Figura 39), com espessura de 0,30 metros, é caracterizada por um calcilito, estrutura maciça e cor marrom escuro, contato reto com a poção basal da fácies Cmm (Figura 40a).

### **Fácies Calcário laminado (Cl/Clo)**

Esta fácies, com espessuras de 0,25 e 1,05 metros, corresponde aos níveis II e IV (Figura 39), sendo caracterizada por um calcarenito de granulometria média a fina com laminações plano-paralela, essa fácies apresenta cor variando entre cinza-escuro/marrom-claro a bege. A presença de óxidos (Clo) nas laminações mais escuras (Figuras 40b e 41a) como também a presença de micas (biotita e muscovita) no nível II. Esta fácies apresenta contato reto com a fácies Cf (Figura 40b).

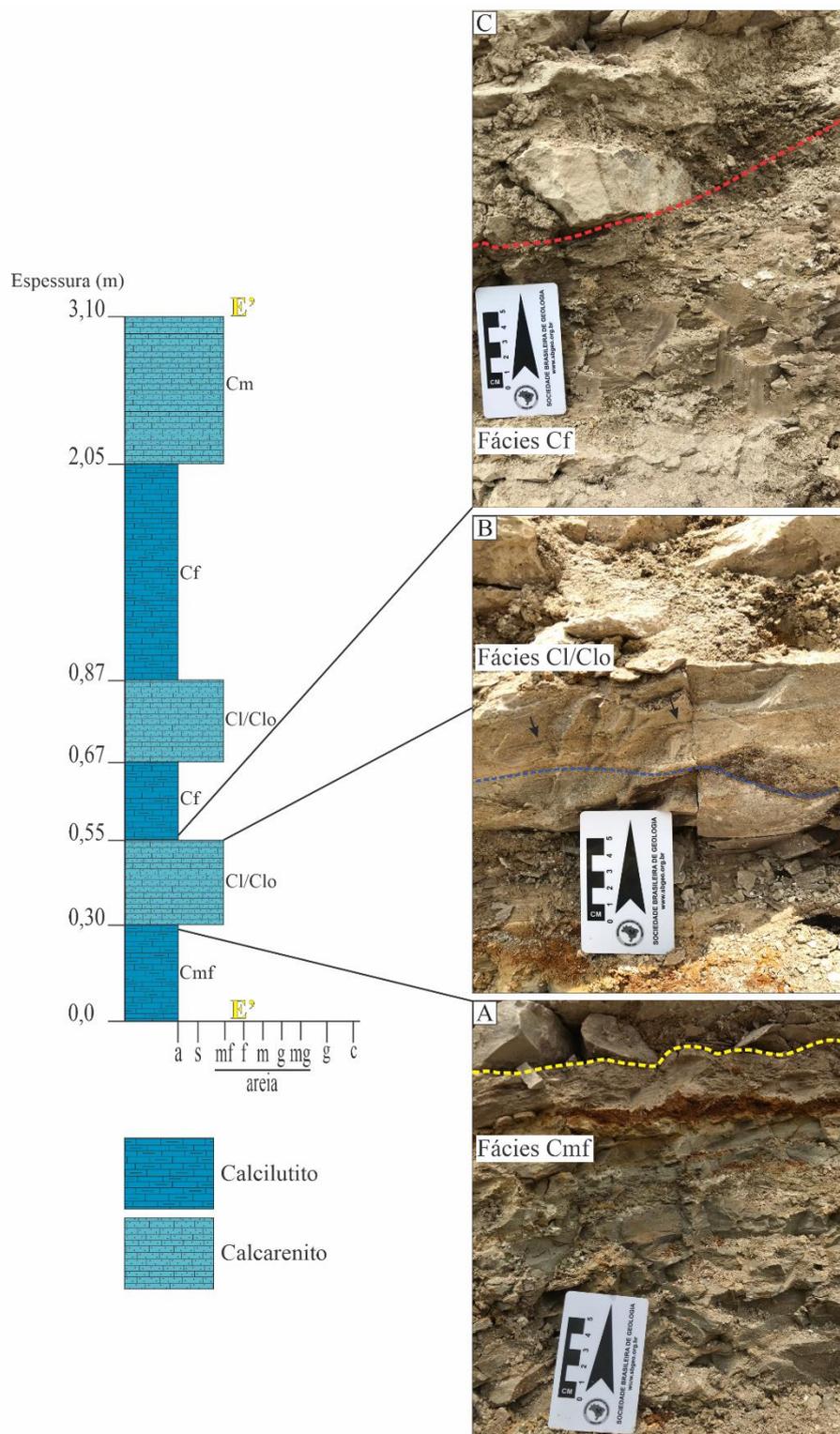
### **Fácies Calcário físsil (Cf)**

Esta fácies, com espessuras de 0,12 e 1,18 metros, corresponde aos níveis: III e V (Figura 39), sendo caracterizada por um calcilito, com estrutura físsil e cor marrom escuro. A presença de vênulas gipsita acicular (fíbrida), ocorrem preenchendo os planos de fissilidade sem orientação preferencial no nível V (Figuras 40c e 41b).

### **Fácies Calcário maciço (Cm)**

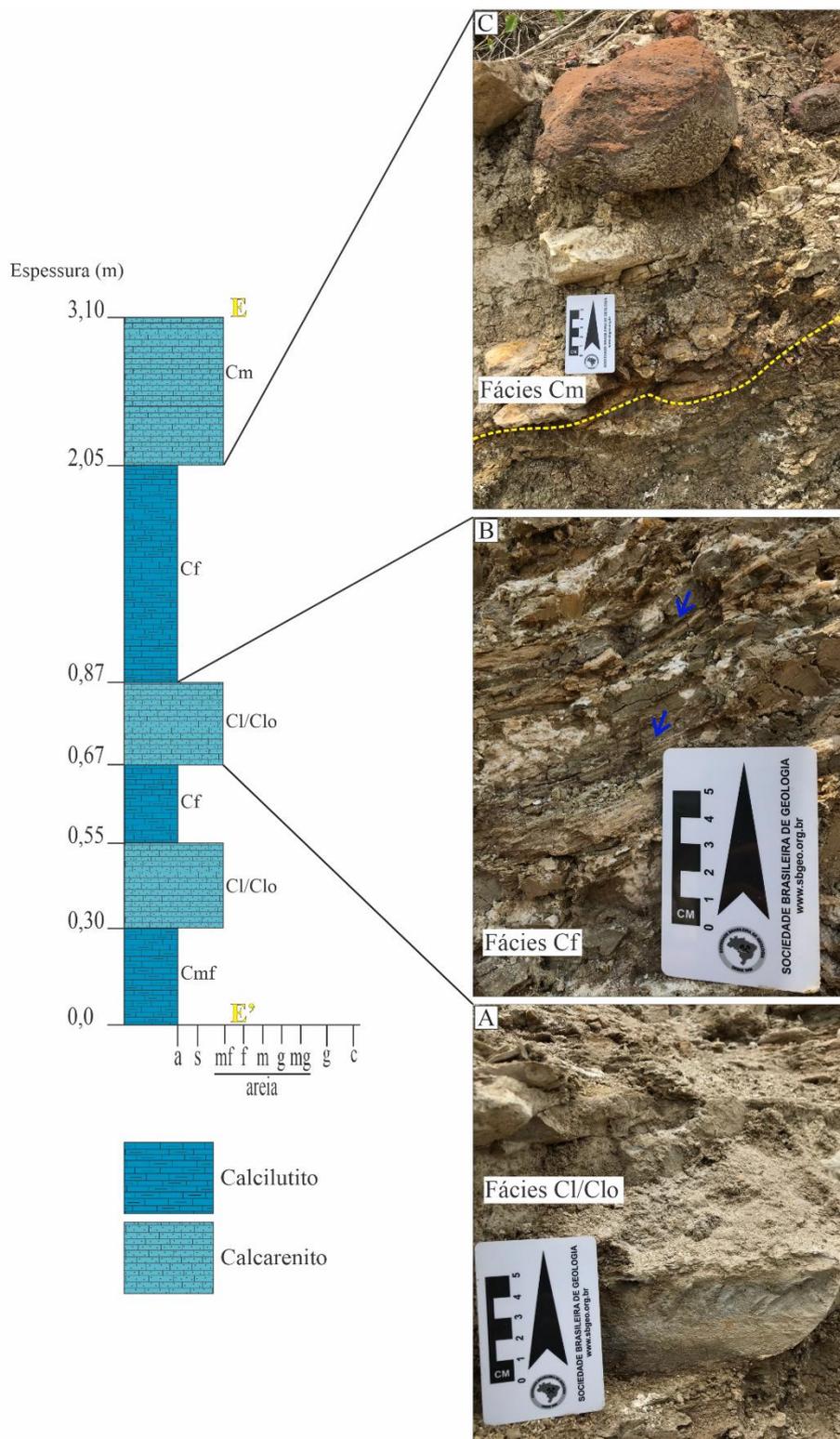
Esta fácies, com espessura de 0,20 metros, corresponde aos níveis VI (Figura 39) sendo caracterizada por um calcilito de granulometria argilo-siltosa, com estrutura maciça, apresentando cor marrom claro com presença de óxidos, em menor proporção quando comparado a fácies Cl/Clo (Figura 41c).

Figura 40 - Afloramento BC\_05 com espessura de 3,1 metros. a) Fácies Cmf, seção basal do afloramento, composta por um calcilitito com estrutura maciça e cor marrom escuro (contato no topo com a fácies Cl, linha tracejada em amarelo); b) Fácies Cl/Clo, composta por um calcarenito de granulometria fina a média, com laminações plano-paralela, cor variando entre cinza-escuro/marrom-claro a bege (alternância marcada pela linha tracejada em azul) com presença de óxidos (setas pretas); c) Fácies Cf, composta por um calcilitito, estrutura físsil e cor marrom escuro (contato no topo com a fácies Cl/Clo, linha tracejada em vermelho).



Fonte: O autor (2023).

Figura 41 - Afloramento BC\_05 com espessura de 3,1 metros. a) Fácies Cl/Clo, composta por um calcarenito de granulometria média a fina, com laminações plano-paralela, cor variando entre cinza-escuro/marrom-claro a bege; b) Fácies Cf, composta por um calcilutito, estrutura fissil, cor marrom escuro e presença de vênulas de gipsita acicular (fibrosa) (setas em azul); c) Fácies Cm, composta por um calcarenito de granulometria média, estrutura maciça e cor marrom clara (contato basal com a fácies Cf, linha tracejada em amarelo).



Fonte: O autor (2023).

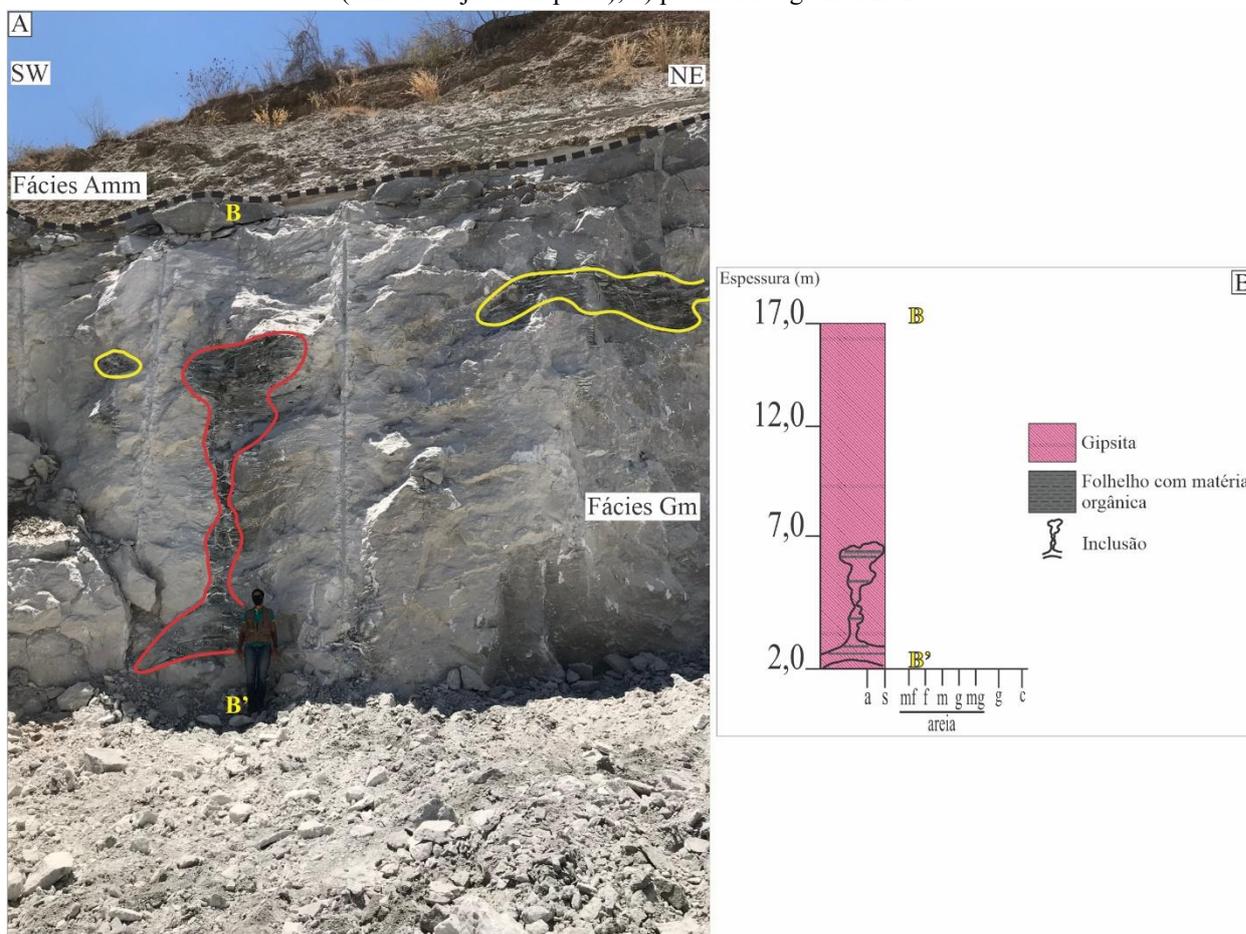
## 5.2 FÁCIES EVAPORÍTICAS

### 5.2.1 Descrição faciológica e petrográfica das litofácies da sequência 2

#### Fácies Gm (Gipsita maciça)

Esta fácies é composta por um pacote formado de gipsita que apresenta uma espessura variável entre 10 e 15 metros (Figura 42), representando assim, a seção intermediária do afloramento BC\_01. Estrutura principal desta fácies é a maciça de granulometria média, coloração cinza claro, também se observa a presença de estruturas como: inclusão de aproximadamente 5 m de altura composta essencialmente por folhelhos negros e gipsita acicular (fibrosa) e formas geométricas do tipo lóbulo de composição homônima (figura 42a e b). Sobreposto a essa fácies, os argilitos da fácies Amm marcam o topo deste afloramento.

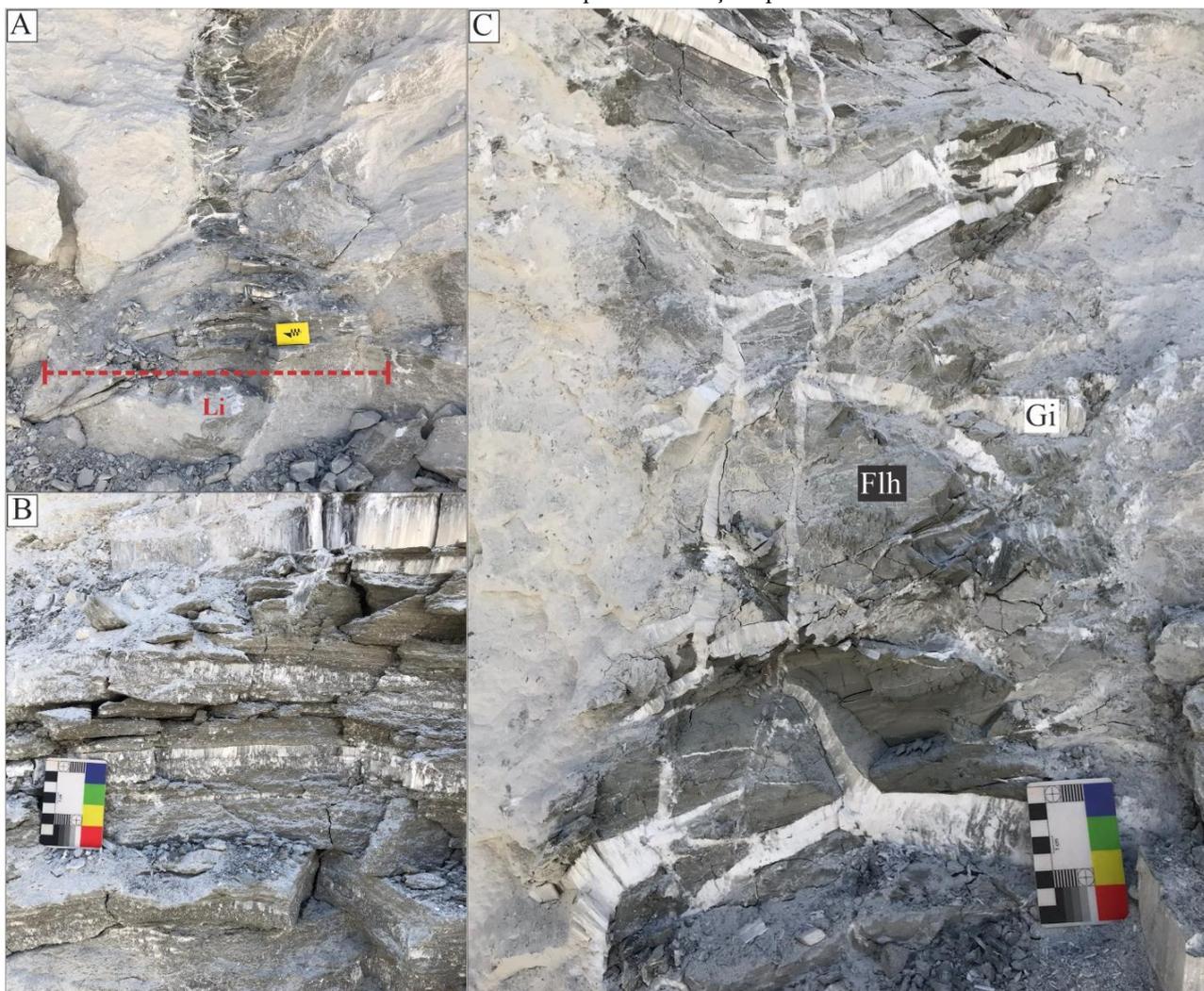
Figura 42 – a) Fácies Gipsita maciça (Gm) composta essencialmente gipsita, com granulometria média, sobreposta a esta, observa-se o contato desta com a fácies Amm que representa o topo do afloramento BC\_01, inclusões (em vermelho e amarelo) formados por folhelhos negros e gipsita acicular (fibrosa), contatos com a fácies sobreposta (linha tracejada em preto); b) perfil estratigráfico B-B'.



Fonte: O autor (2023).

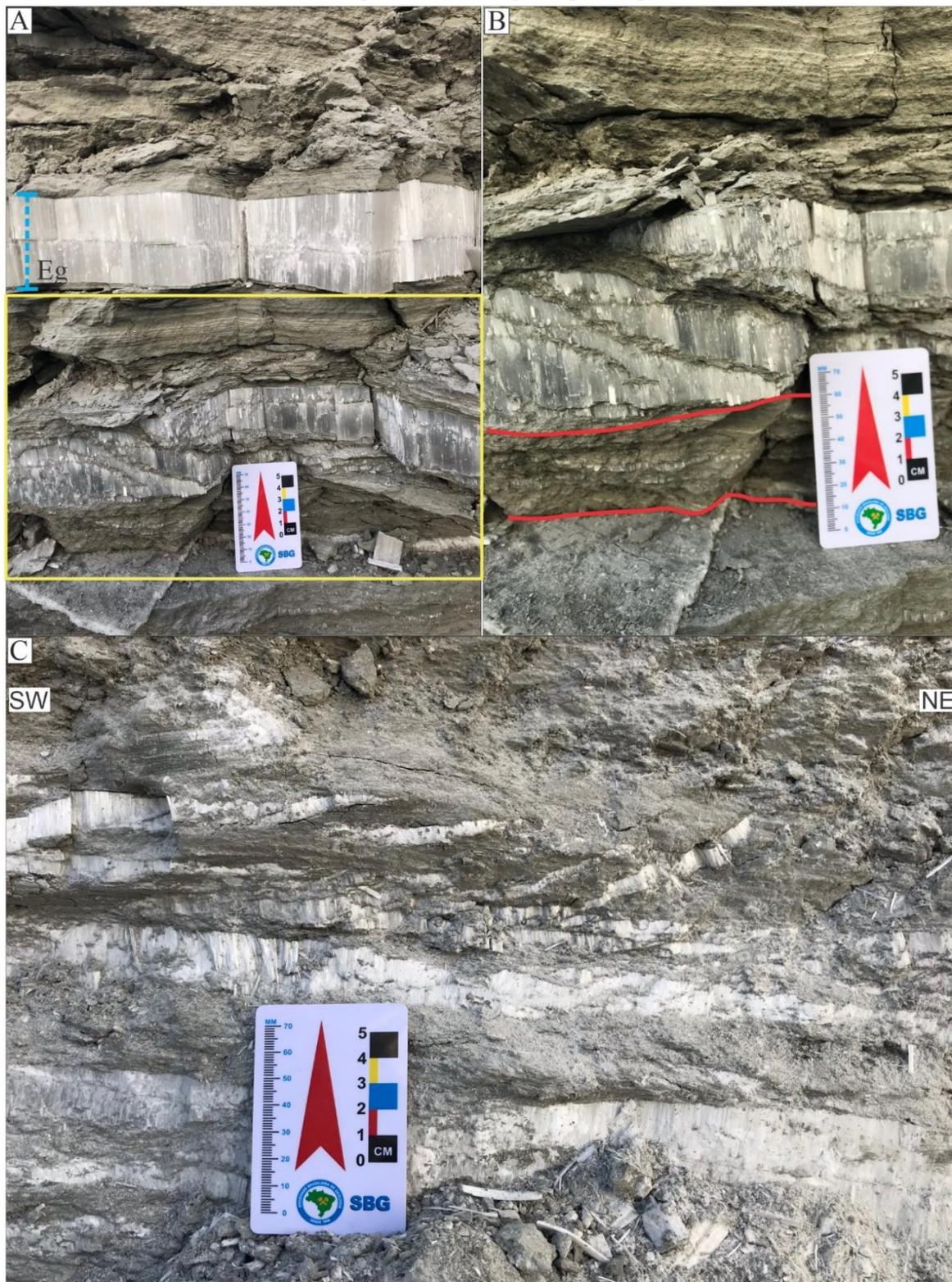
Estruturas como: inclusão composta por malhas de veios formados por gipsita acicular (fibrosa) e folhelho negro (Figura 43), bolsões de composição homônima com laminação plano-paralela (Figura 44), a presença de veios intrassedimentos formados por gipsita acicular (fibrosa), variação Selenita, que intrudem os argilitos ricos em matéria orgânica, também, foram observadas (Figura 44c).

Figura 43 – a) Inclusão com largura (Li) de 2,35 m formado por folhelho negro e gipsita acicular (fibrosa); b) zoom das principais litologias que compõem a estrutura; c) comportamento reológico dos folhelhos (Flh) e da gipsita (Gi) essas intrudem em formas de diques sem direções preferenciais.



Fonte: O autor (2023).

Figura 44 – a) Geometria em formato de bolsão, em detalhe, composto por gipsita acicular (fibrosa) e argilitos com laminação plano-paralela ricos em matéria orgânica, notável, a espessura da gipsita (Eg) de 10 cm; b) zoom, retângulo em amarelo da figura a), uma alternância de camadas mili a centimétricas dessas duas litologias (linha vermelha); c) Veios intrasedimento formados por gipsita acicular (fibrosa), variação Selenita, que intrudem o argilito (parte superior).

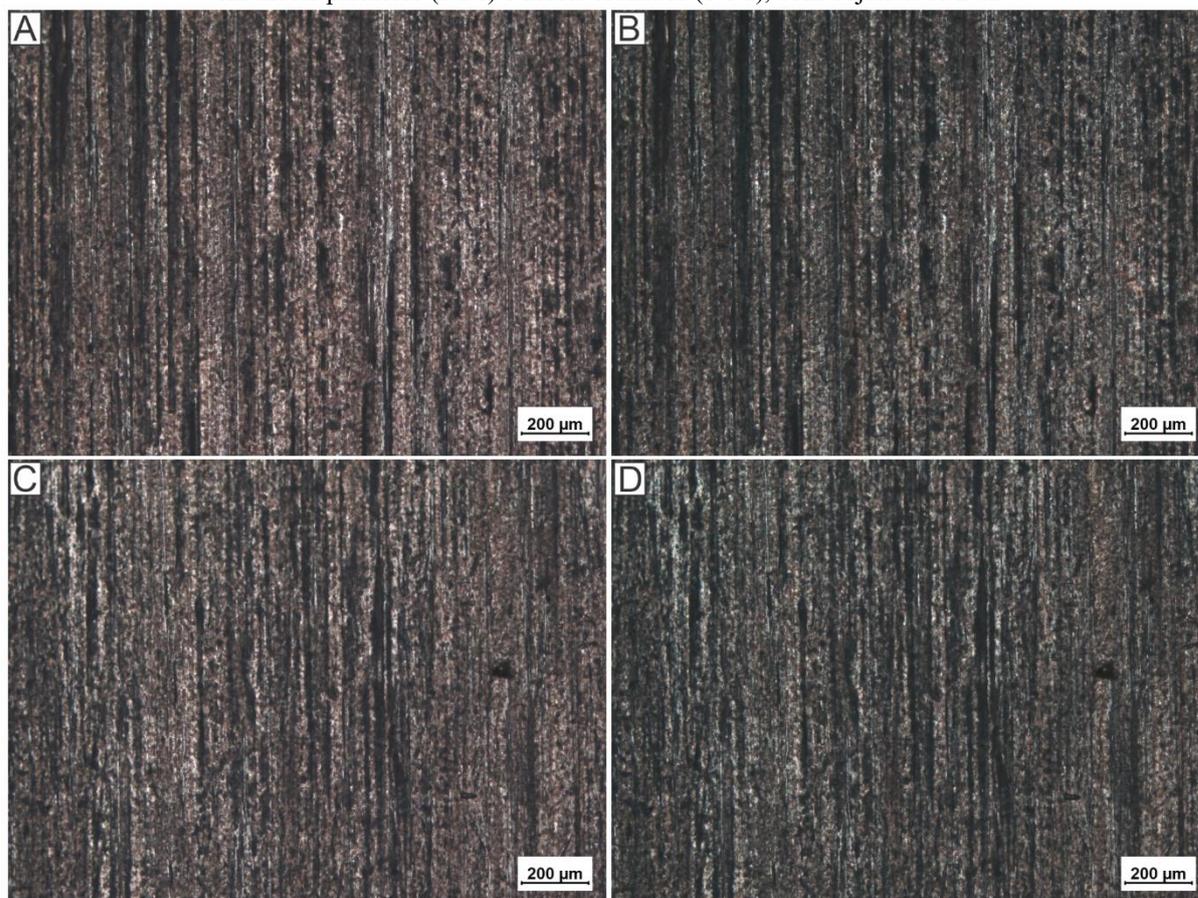


Fonte: O autor (2023).

Petrograficamente, foram descritas duas litologias presentes no afloramento BC\_01: gipsita acicular (fibrosa - variação Selenita) e o argilito com laminação plano-paralela rico em matéria orgânica.

A gipsita acicular (fibrosa), apresenta hábito fibroso, com coloração marrom escuro, essencialmente formado por esse mineral (Figura 45).

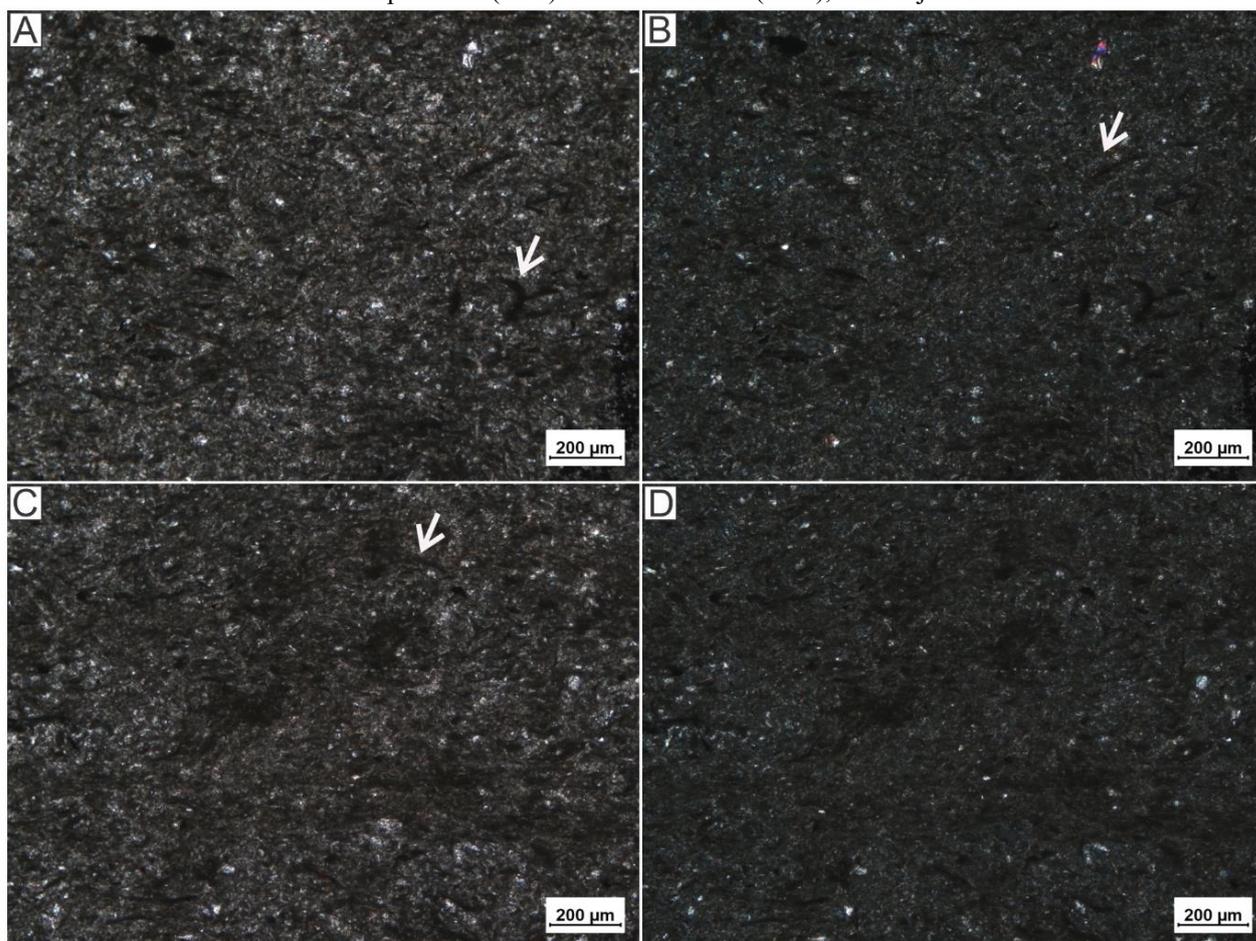
Figura 45 - Gipsita acicular (fibrosa) com hábito fibroso, com coloração marrom escuro, em a), b), c) e d). Fotos em nicóis paralelos (a e c) e nicóis cruzados (b e d), com objetiva de 20x.



Fonte: O autor (2023).

Por fim, o argilito é composto por grãos de quartzo anédricos com 30% de composição modal e matéria orgânica amorfa com 70% de proporção modal, com presença de algumas carapaças ou vestígios dessas preenchidos em seu interior por matéria orgânica (Figura 46).

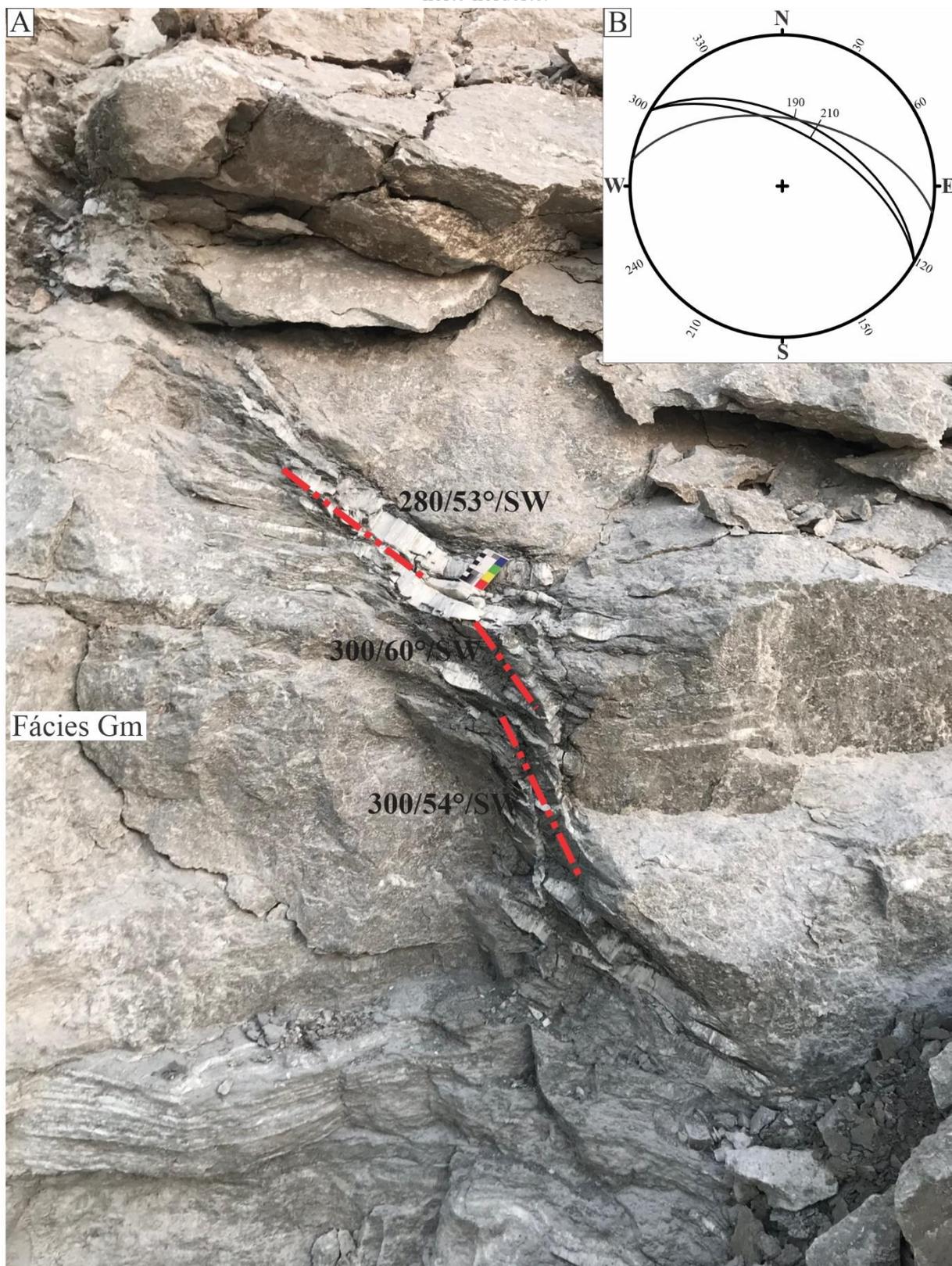
Figura 46 - Argilito composto por quartzos anédricos com extinção ondulante, relevo baixo (pontos em branco) e matéria orgânica amorfa. A presença de carapaças preenchidas por matéria orgânica (setas em branco), em a) a d). Fotos em nicóis paralelos (a e c) e nicóis cruzados (b e d), com objetiva de 20x.



Fonte: O autor (2023).

Estruturas rúpteis foram observadas no afloramento BC\_02, como: fraturas preenchidas por veios de gipsita acicular (fibrosa - variação Selenita) e folhelhos, apresentando espessuras de 12 cm. Essas estruturas se inserem em meio a fácies Gm (Figura 47a) de coloração cinza claro e apresentam atitudes de mergulhos para SO (Figura 47b).

Figura 47 – a) Fraturas preenchidas por gipsita acicular (fibrosa), variação Selenita e folhelhos, em meio a fácies de gipsita maciça (Gm); b) estereograma com as principais atitudes dos planos de fratura, com mergulho para norte-nordeste.



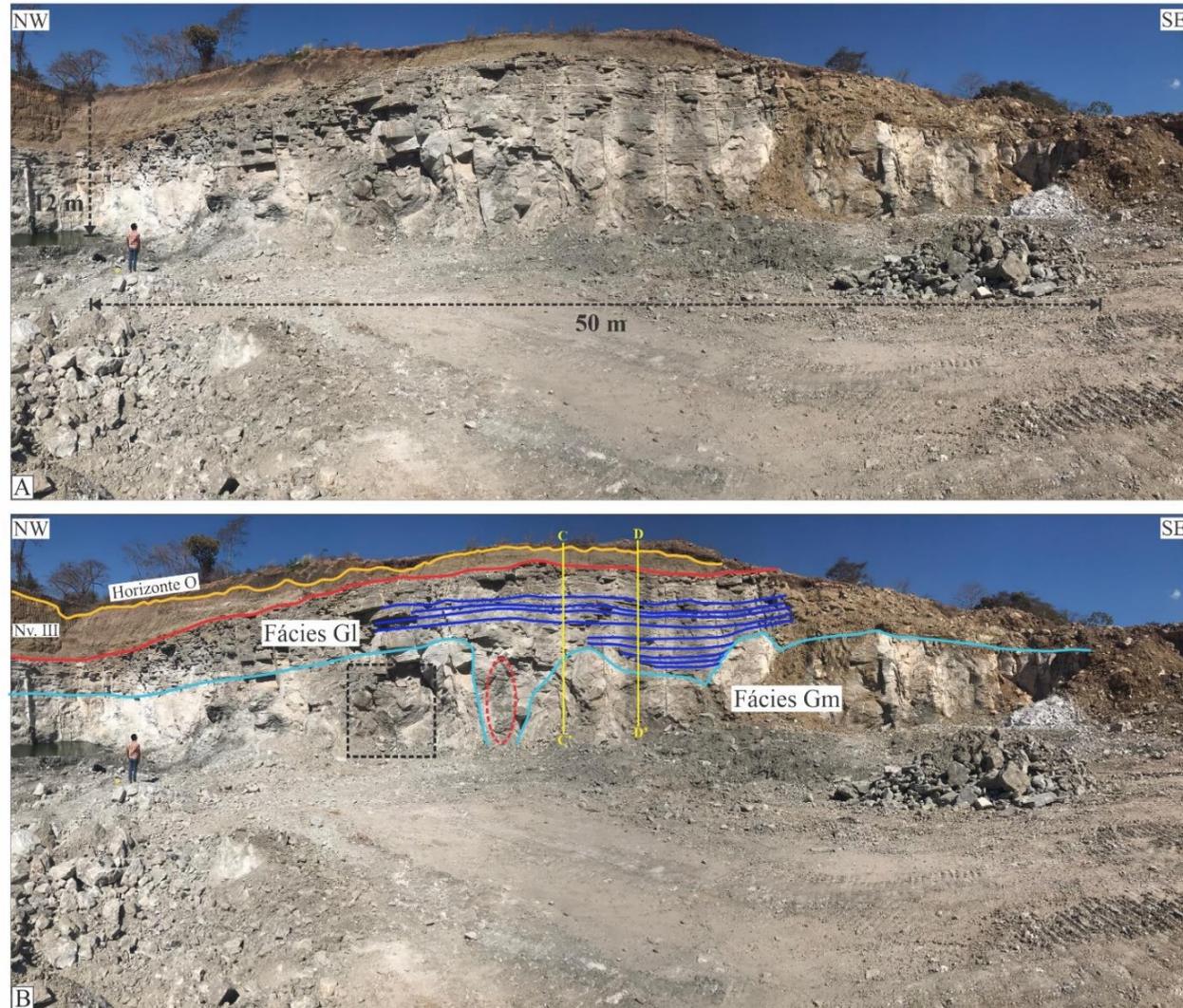
Fonte: O autor (2023).

### **Fácies G1 (Gipsita laminada)**

Esta fácies compreende o afloramento BC\_03, sendo composto por dois perfis estratigráficos (C-C' e D-D'), no qual é composto por um pacote de gipsita que apresenta uma espessura sedimentar variável entre 10,5 e 12 metros e extensão de 50 metros (Figura 48). Com granulometria média, cuja estrutura principal são laminações plano-paralela formadas por uma alternância de camadas cinza claro a esbranquiçadas de gipsita e camadas cinza escuro, sendo estas composta por folhelhos negros (Figura 48a). As camadas de gipsita apresentam duas geometrias nesta fácies: a primeira, na direção noroeste, é composta por camadas plano-paralela compostas por folhelhos negros e gipsita laminada que se adelgaçam para o topo, com o contato com o nível III da fácies Amm (topo do BC\_01), e a segunda, na porção central e a sudeste, essas é composta por camadas plano-paralelas com arqueamento e contato basal com a fácies Gm.

Nos dois perfis estratigráficos (C-C' e D-D') confeccionados observa-se a presença de inclusões composta por malhas de veios formados por gipsita acicular (fibrosa) e folhelhos negros, bolsões de composição homônima, a presença de veios intrassedimentos formados por gipsita acicular (fibrosa) que intrudem os folhelhos, também foram observados e serão descritos a seguir (Figura 48b).

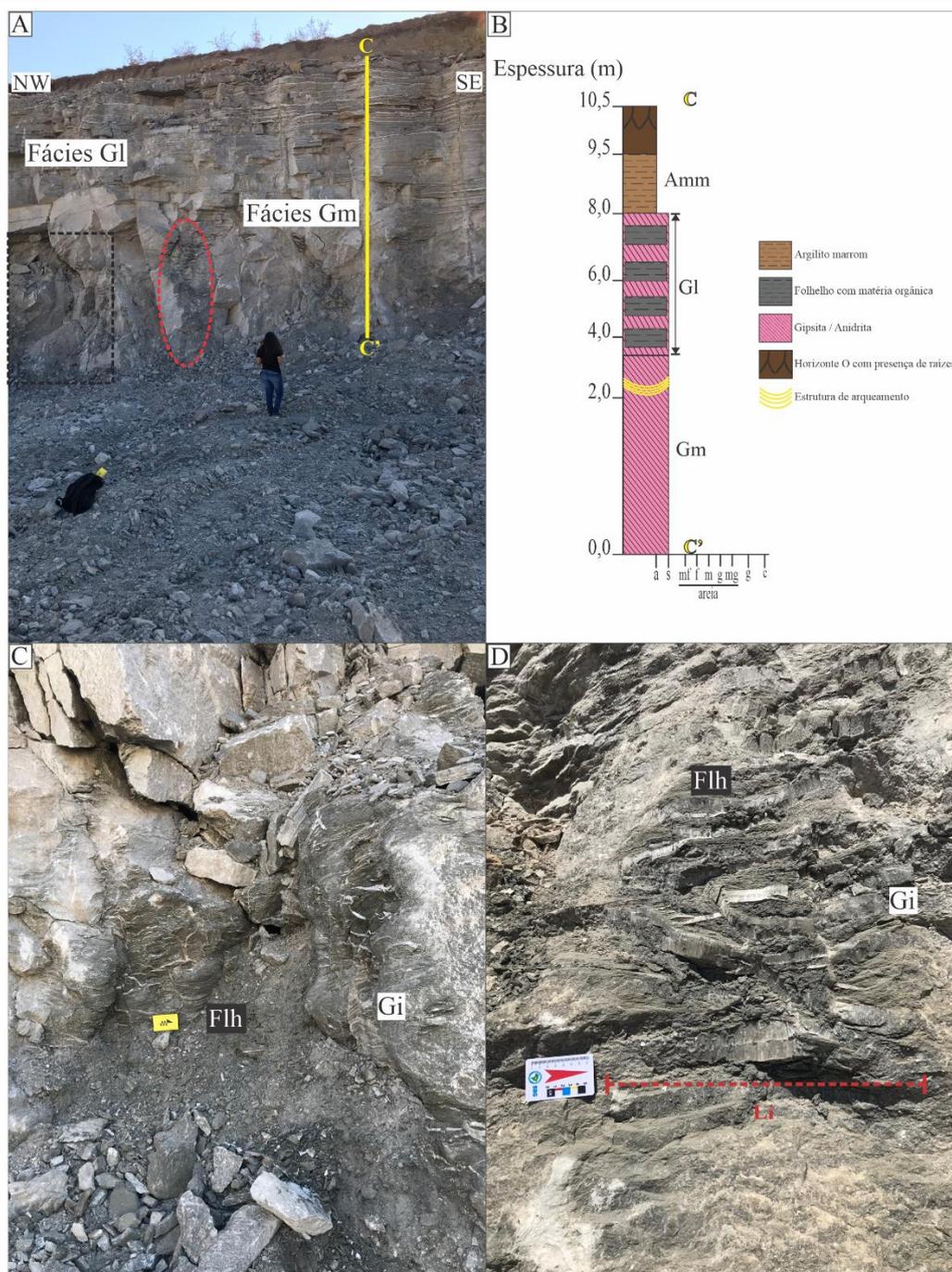
Figura 48 - Fácies Gipsita laminada (G1) composta essencialmente por gipsita, de granulometria média com laminação plano paralela, formadas por uma alternância de camadas cinza claro a cinza escuro, formadas por gipsita e folhelhos negros, respectivamente. a) Visão panorâmica do afloramento BC\_04, espessura sedimentar de 12 m e comprimento de 50 m; b) interpretação estratigráfica com os dois perfis: C-C', D-D', os contatos entre as litologias e as fácies (linhas em azul, vermelho e laranja), estruturas de inclusão (elipse tracejada em vermelho) e malhas de veios intrassedimento formados por gipsita acicular (fibrosa) e folhelhos (quadrado tracejado em preto).



Fonte: O autor (2023).

O primeiro perfil (C-C') apresenta uma espessura sedimentar de 10,5 metros sendo composto por um pacote de gipsita com duas fácies associadas: (i) a seção basal formada pela fácies Gipsita maciça (Gm) com aproximadamente 3 metros de espessura (Figura 49a), apresentando estrutura maciça de granulometria média, coloração cinza claro, a presença de estruturas como: malhas de veios formados por gipsita acicular (fibrosa) e folhelho negro (Figura 49c), além de uma inclusão de aproximadamente 2 metros de altura (Figura 49d) de composição homônima; (ii) sotoposto a essa fácies, observa-se a fácies Gipsita laminada (Gl) composta por gipsita com estratificações plano paralela e folhelhos negros, essa intercalação com aproximadamente 5 metros de espessura marca um regime de flutuação do nível de base da salmoura (subida e descida); por fim, sotoposto a esses dois conjuntos de fácies, (iii) o nível III da fácies Amm, formado essencialmente por um argilito de cor marrom marca a subida do nível de base. Por fim, a formação de uma camada de solo, horizonte O, que delimita o topo deste afloramento.

Figura 49 – a) e b) Perfil estratigráfico C-C' com 10,5 m de espessura com as duas respectivas fácies e litologias que o compõem; c) seção ampliada (retângulo tracejado preto) das malhas de veios de gipsita acicular (fibrosa) (Gi) e folhelhos negros (Flh); d) inclusão (elipse tracejada em vermelho) com largura (Li) de 50 cm de material homônimo as malhas de veios, respectivamente.

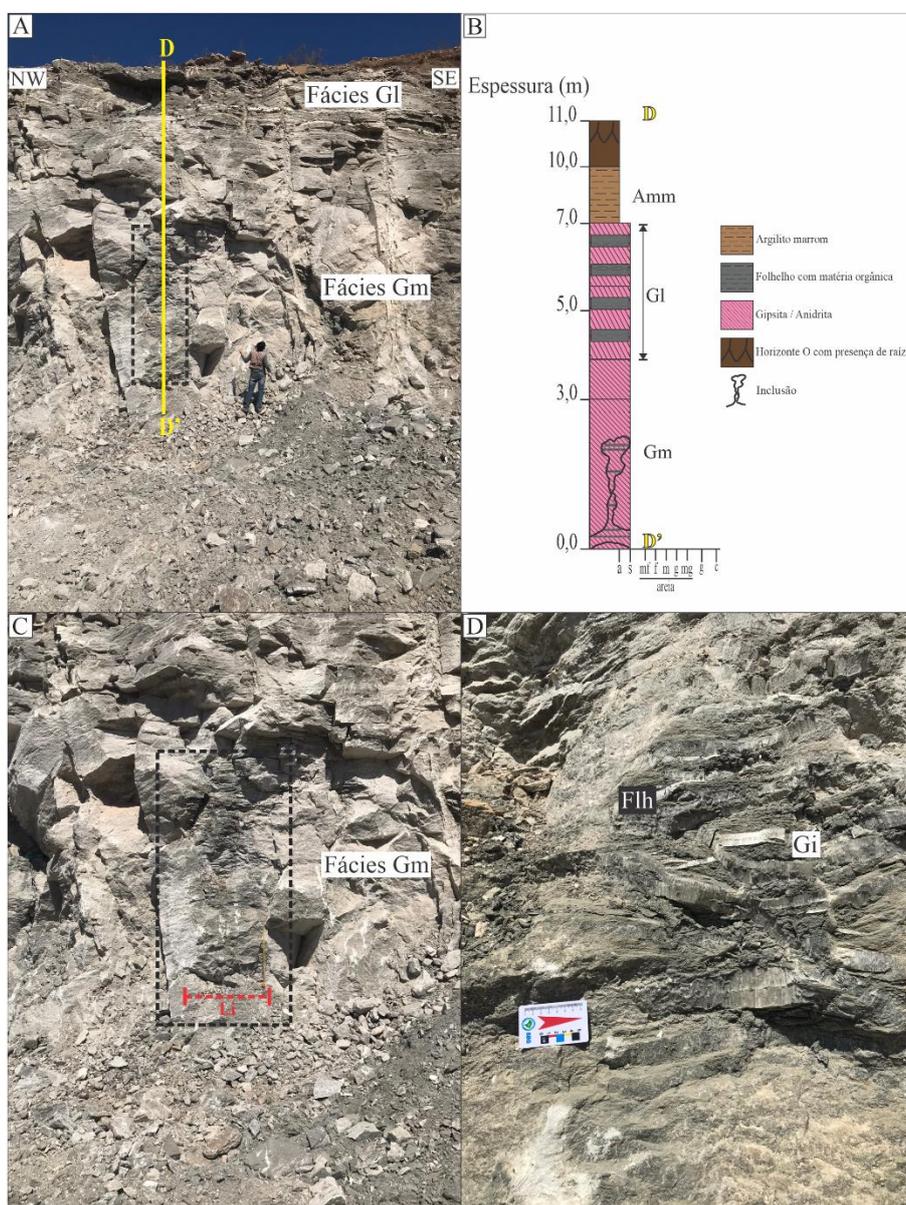


Fonte: O autor (2023).

O segundo perfil (D-D') apresenta uma espessura sedimentar de 11 metros sendo composto por um pacote de gipsita com duas fácies associadas: (i) a seção basal formada pela fácies Gipsita maciça (Gm) com aproximadamente 4 metros de espessura (Figura 50a), apresentando estrutura maciça de granulometria média, coloração cinza claro, também se observa a presença de uma inclusão de aproximadamente 2 metros de altura (Figura 50b e c)

composta por gipsita acicular (fibrosa) e folhelho negro (Figura 50d) e (ii) sotoposto a essa fácies, observa-se a fácies Gipsita laminada (G1) composta por gipsita com estratificações plano paralela e folhelhos negros, sendo essas camadas com estruturas de arqueamento e com aproximadamente 3 metros de espessura, marca também um regime de flutuação do nível de base da salmoura (subida e descida). Acima desses dois conjuntos de fácies, o nível III da fácies Amm, formado essencialmente por um argilito de cor marrom marca uma subida do nível de base. Por fim, uma camada de solo, horizonte O, que delimita o topo deste afloramento (Figura 50b).

Figura 50 – a) e b) Perfil estratigráfico D-D' com 11 m de espessura com as duas respectivas fácies e litologias que o compõem e estruturas presentes (retângulo tracejado em preto); c) e d) seção ampliada da inclusão com largura (Li) de 60 cm composta por gipsita acicular (fibrosa) (Gi) e folhelhos negros (Flh).

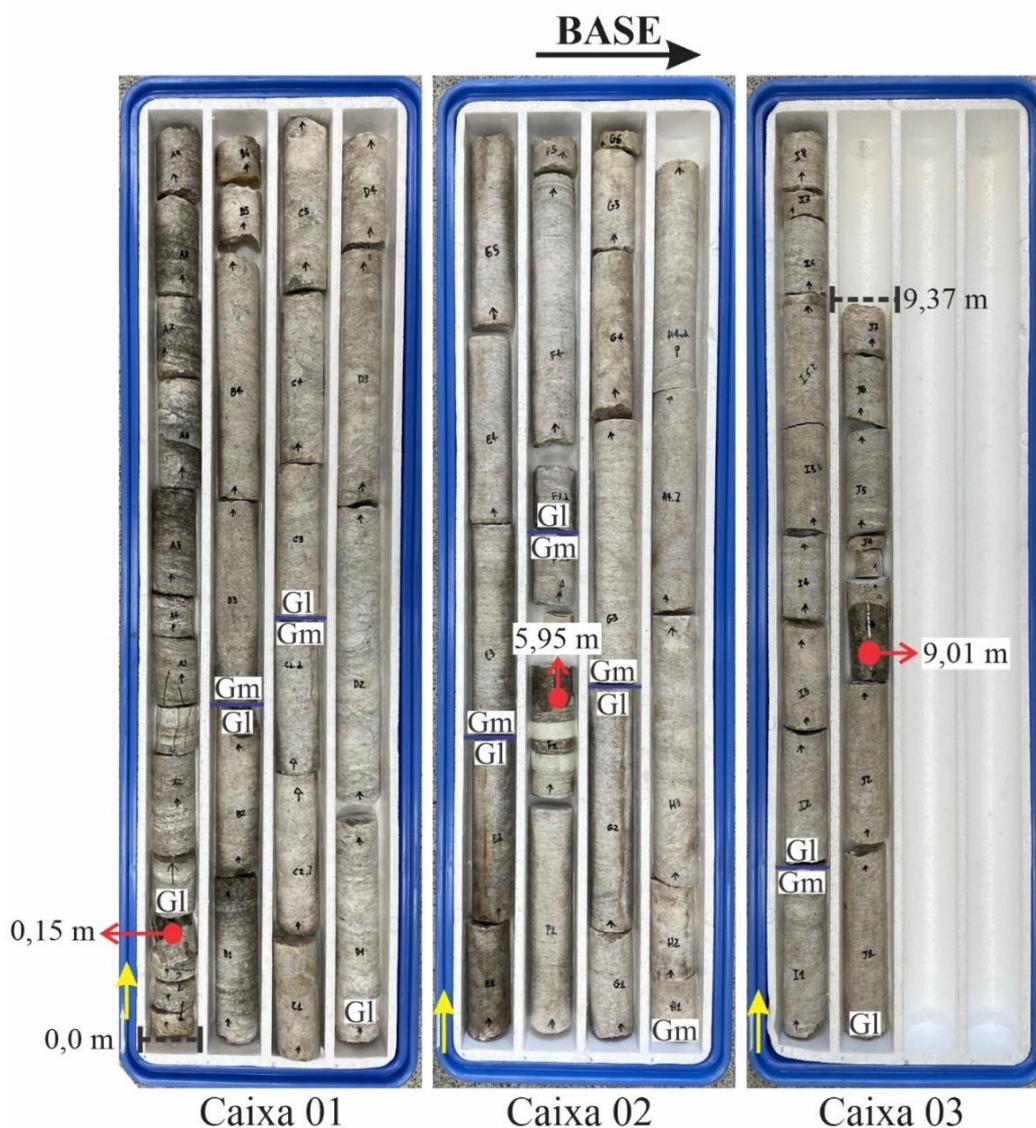


Fonte: O autor (2023).

### 5.2.2 Descrição faciológica e petrográfica da sondagem geológica

Para a descrição dos principais aspectos texturais, mineralógicos e litológicos das rochas evaporíticas, foi realizado uma descrição detalhada de uma sondagem geológica com 9,37 metros de espessura (topo: 0 e base: 9,37 metros), localizada no município de Grajaú-MA (coordenadas na tabela 5). Para isso, foram confeccionados perfis estratigráficos digitais e descrição das principais fases da formação dos evaporitos, que foram descritos em lâminas petrográficas de amostras coletadas em profundidades específicas (Figura 51).

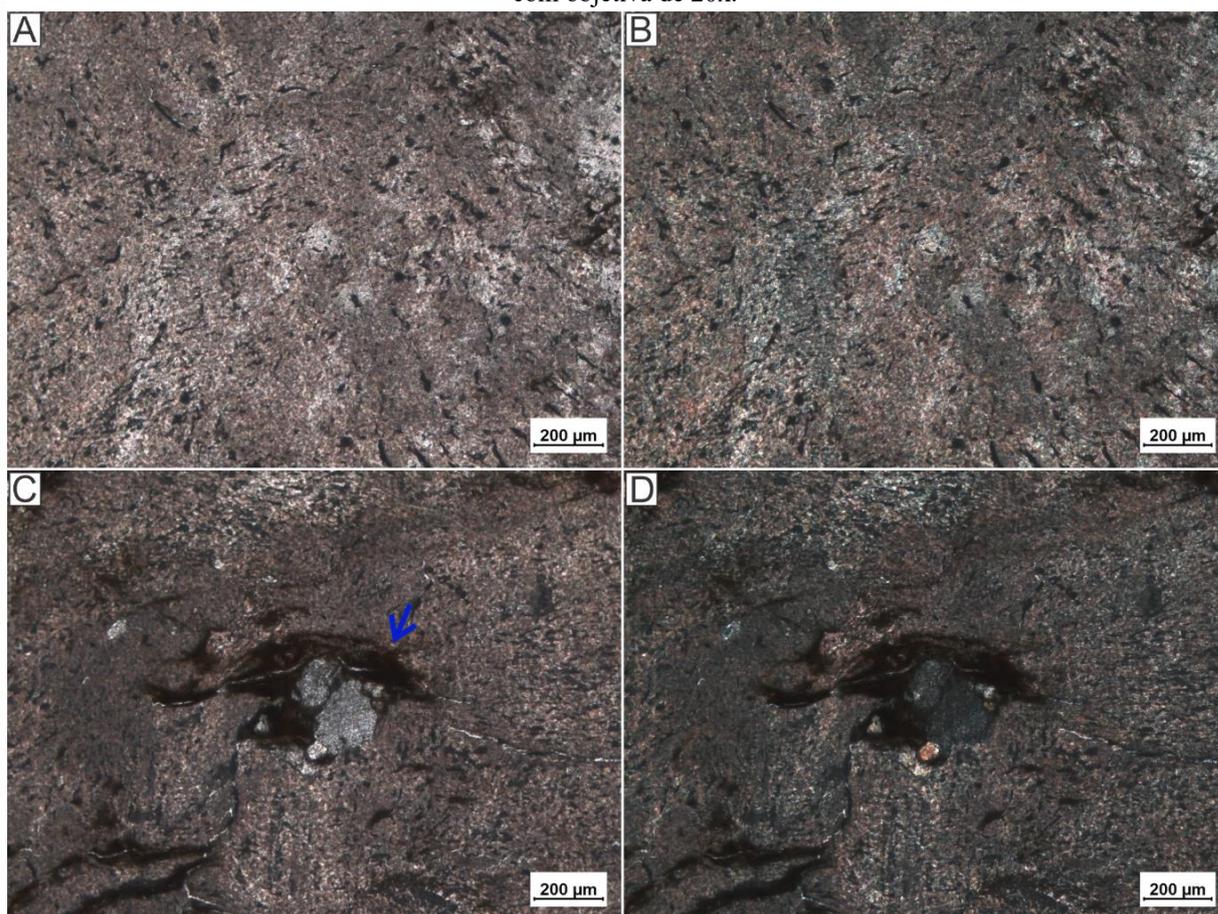
Figura 51 - Sondagem geológica com 9,37 m de espessura, formada pelas fácies G1 e Gm (linha contínua em azul, representando o contato dessas), compostas por gipsita e matéria orgânica, apresenta topo de 0,0 m e base de 9,37 m de profundidade. Foram confeccionadas três lâminas petrográficas nas profundidades: 0,15 m, 5,95 m, 9,01 m (círculos em vermelho).



Fonte: O autor (2023).

Na fácies G1, com profundidade de 9,01 metros (Figura 51), a variedade presente é gipsita nodular, (Figura 52a e b), composta essencialmente por gipsita (95%) e carbonatos (5%), apresentando textura nodular, com leves deformações em poucas porções da lâmina, com destaque para um cristal de gipsita de granulometria fina com carbonatos que se deforma ao redor desse (Figura 52c e d).

Figura 52 – a) e b) Gipsita nodular, com coloração marrom escuro; c) e d) grão de gipsita de granulometria fina com carbonatos (seta azul) que se deforma ao redor. Fotos em nicóis paralelos (a e c) e nicóis cruzados (b e d), com objetiva de 20x.

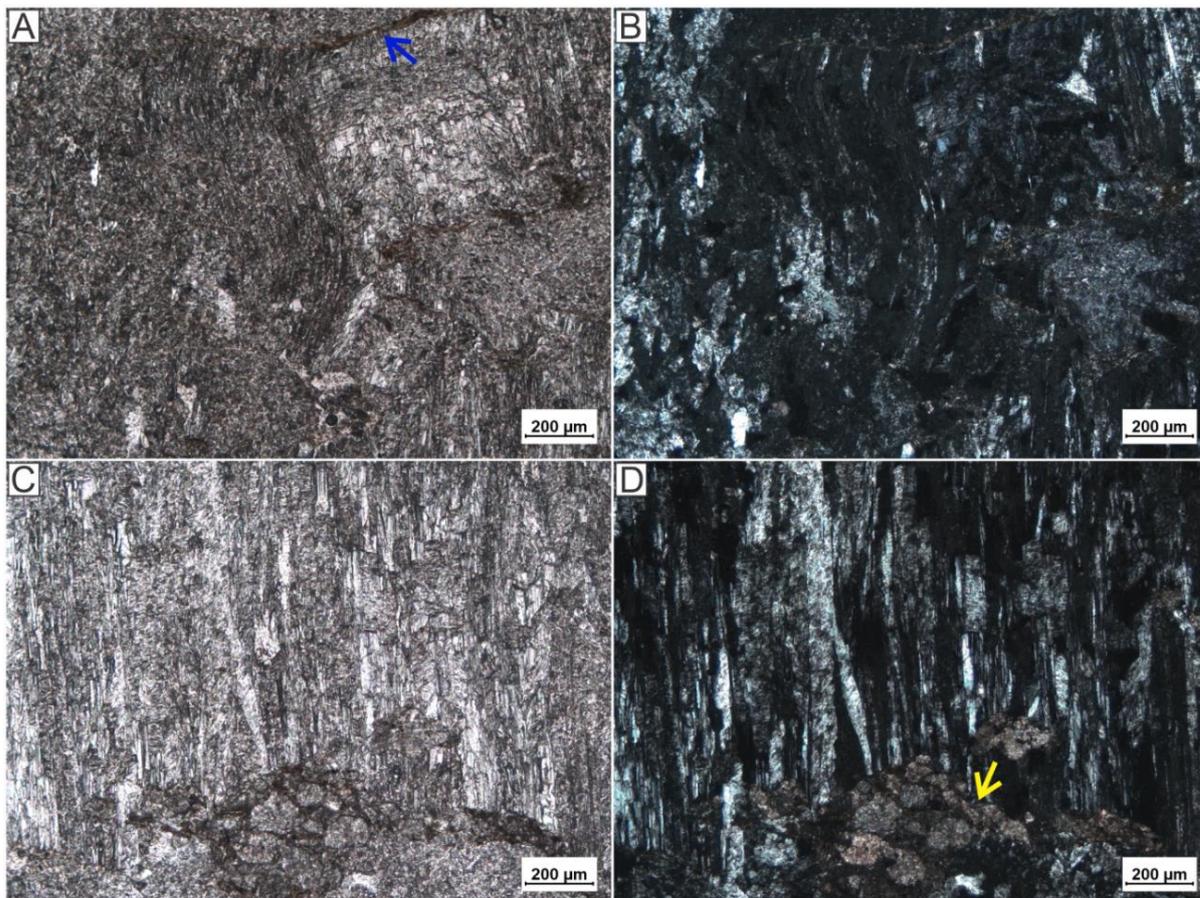


Fonte: O autor (2023).

Na fácies Gm, com profundidade de 5,95 metros (Figura 51), sendo composta pelas variedades acicular (fibrosa) (45%), alabastrina (35%) e carbonatos (25%) (Figuras 53 e 54). A variedade fibrosa apresenta cor cinza claro a branco, contatos retos com os carbonatos, com deformações em forma de S (Figuras 53a e b) e arranjos em ângulos agudos em forma de V (Figuras 53c e d).

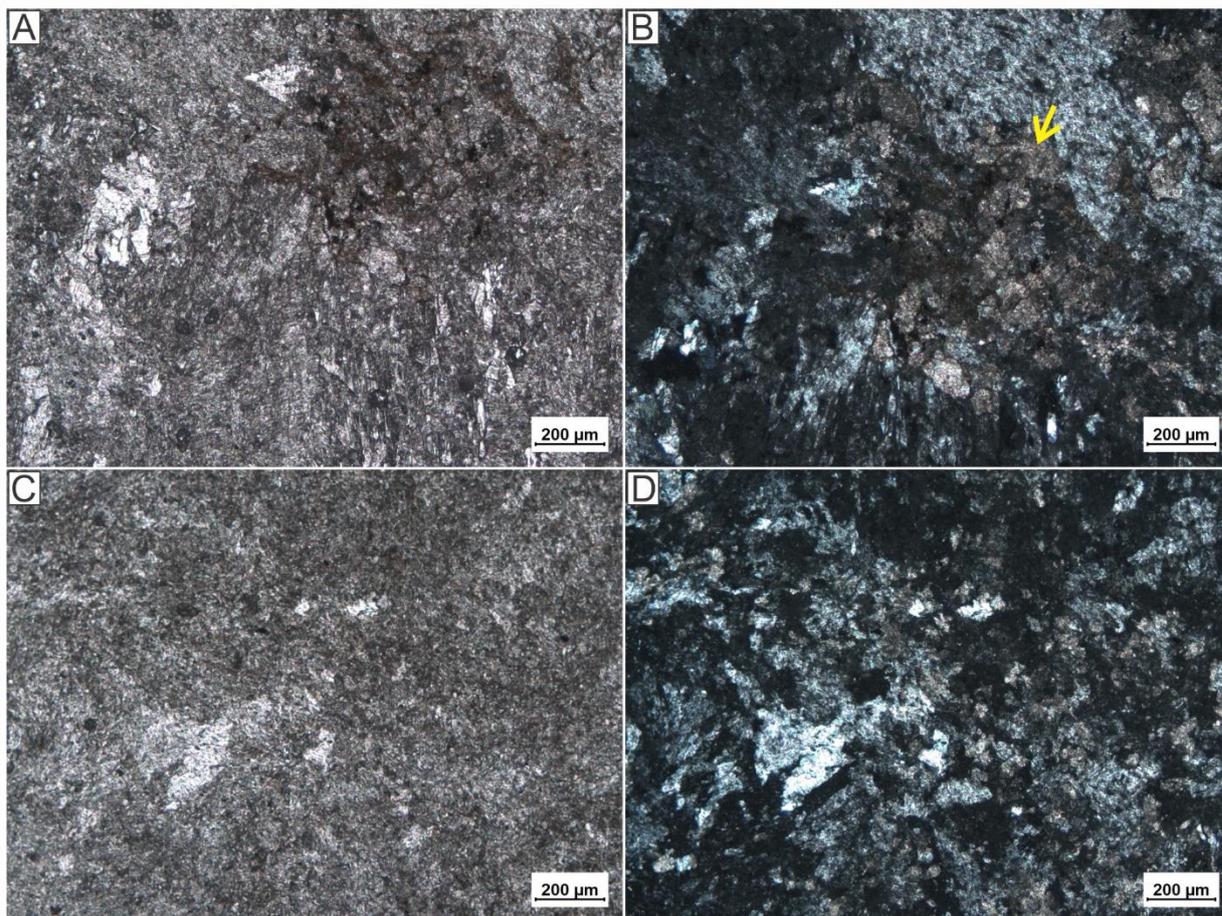
Os cristais da variedade alabastrina apresentam cor cinza claro a branco (Figuras 54a e b), contatos retos e suturados com os carbonatos de formatos anédricos (Figura 54).

Figura 53 – a) Variedade gipsita acicular (fibrosa) com carbonatos (seta azul); b) deformação em forma de S; c) e d) arranjos em ângulos em agudos em forma de V com a presença de carbonatos, na base (seta amarela). Fotos em nicóis paralelos (a e c) e nicóis cruzados (b e d), com objetiva de 20x.



Fonte: O autor (2023).

Figura 54 – a) Variedade alabastrina com carbonatos (seta amarela); b) variedade alabastrina com carbonatos; contatos retos e suturados entre a gipsita e carbonatos (seta amarela); c) e d) gipsita alabastrina apresentando cor cinza claro a branco. Fotos em nicóis paralelos (a e c) e nicóis cruzados (b e d), com objetiva de 20x.

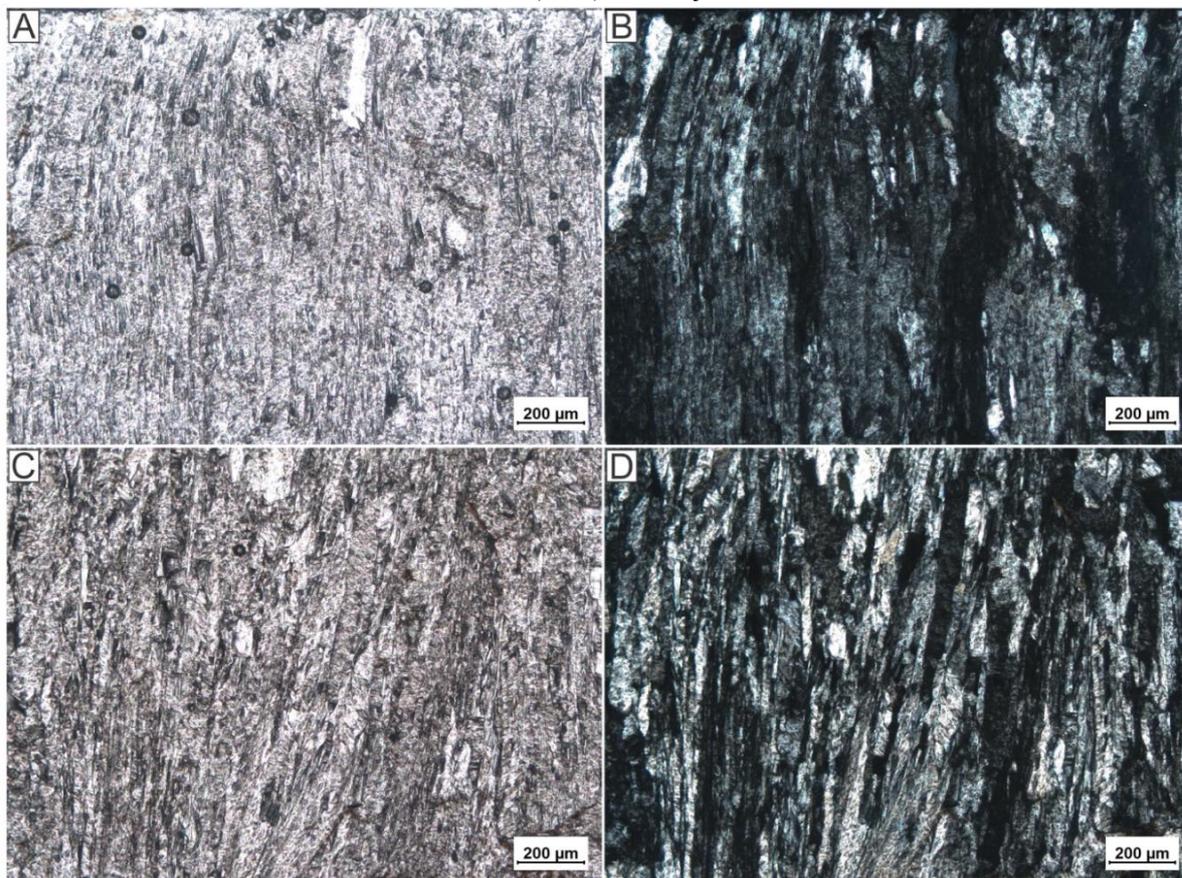


Fonte: O autor (2023).

Na fácies G1, com profundidade de 0,15 m (Figura 51), encontram-se as variedades acicular (fibrosa) (45%) e nodular (40%) com a presença de carbonatos (5%) (Figura 55). Os cristais da variedade acicular (fibrosa) apresentam cor cinza claro a branco, com pequenas deformações (Figuras 55a e b) e arranjos em ângulos agudos em forma de V (“fantasmas” de gipsita *chevron*) (Figuras 55c e d).

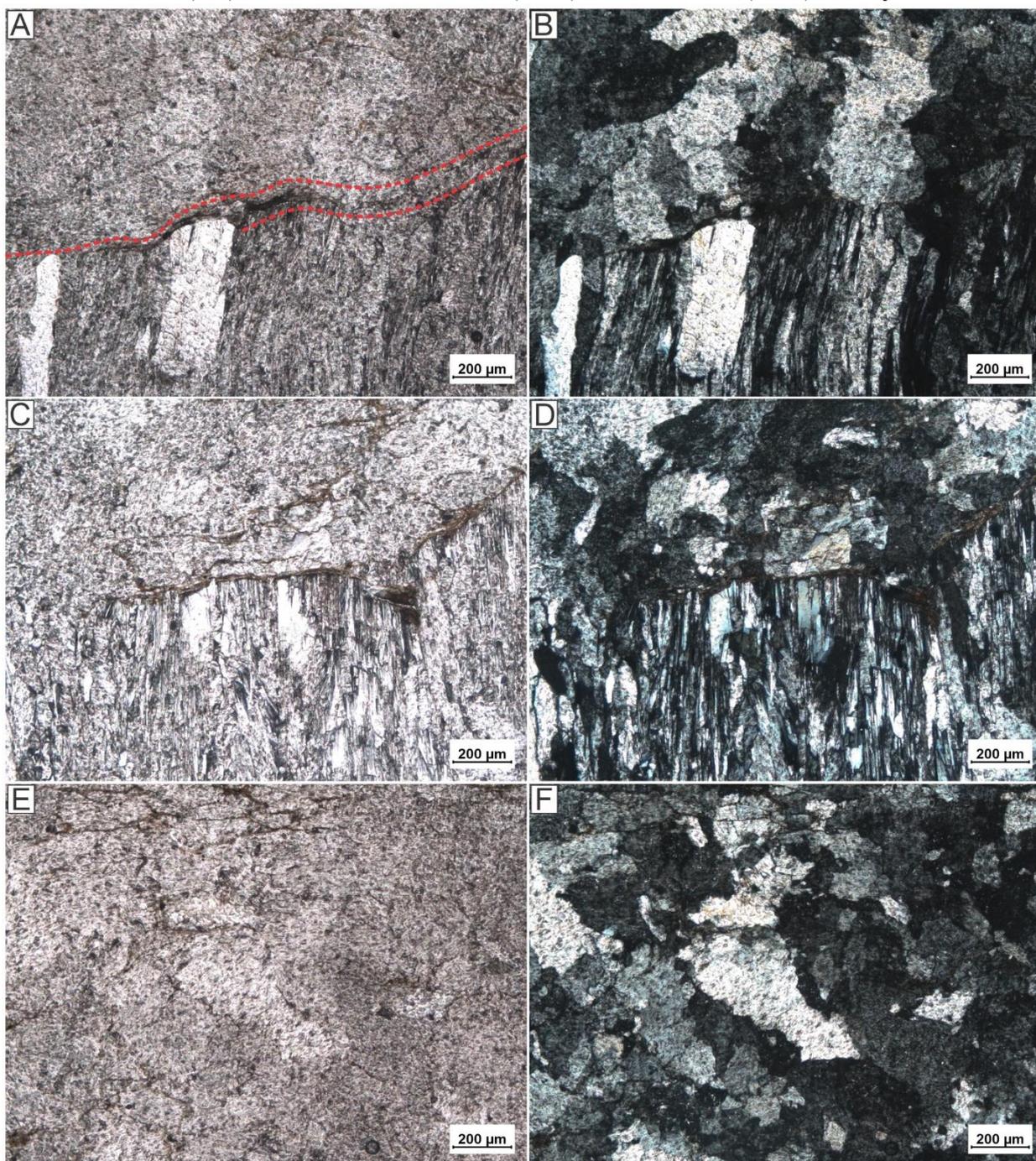
Os cristais da variedade nodular apresentam cor cinza claro a branco, contatos retos e suturados com a gipsita acicular (resquílios de gipsita *chevron*) (Figuras 56a e b) e com os carbonatos que estão no limite do contato dessas tuas texturas (Figuras 56c e d). E o contato dos grãos dessa textura, também apresentam contatos retos e suturados (Figuras 56e e f).

Figura 55 - Gipsita acicular (fibrosa). a) e b) Pequenas deformações desses cristais; c) e d) arranjos em ângulos em agudos em forma de V (“fantasmas” de gipsita *chevron*). Fotos em nicóis paralelos (a e c) e nicóis cruzados (b e d), com objetiva de 20x.



Fonte: O autor (2023).

Figura 56 - Contato entre nodular e acicular (fibrosa) com a presença de carbonatos, em a) e b); contatos retos e suturados com a gipsita acicular (fibrosa) e com os carbonatos limite do contato (linha tracejada em vermelho da figura a)) dessas tuas texturas, em c) e d); contato dos grãos dessa textura, também apresentam contatos retos e suturados, em e) e f). Fotos em nicóis descruzados (a, c, e) e nicóis cruzados (b, d, f) com objetiva de 20x



Fonte: O autor (2023).

Tabela 6 – Associação de fácies, interpretação do sistema deposicional.

Sequências	Associação de Fácies	Fácies	Descrição	Interpretação	Sistema Depositional
I	Sm / Co	Sm	Siltito com estrutura maciça de coloração verde clara, aparentemente baixo teor de matéria orgânica	Deposição de siltito com matéria orgânica em ambiente restrito e coquinas de ostracodes que formam os tapetes microbiais	Lacustre com influência marinha
		Co	Calcarenito com laminação plano-paralela compostas por alternâncias claras e escuras, granulometria fina a média, com tapetes microbiais compostos por ostracodes de tamanhos médios com formas ovaladas a arredondadas		
	Fn / Al	Fn	Folhelho negro composto essencialmente por matéria orgânica com alto teor de matéria orgânica	Deposição a partir de suspensão sob condições anóxicas, restos orgânicos e micritização com baixa energia	Lacustre
		Al	Argilito de estrutura laminada formado essencialmente por matéria orgânica, microfósseis e ostracodes são observados		
II	Gm / Gl	Gm	Gipsita com estrutura maciça, granulometria média, coloração cinza claro, com inclusões e malhas de veios compostas por folhelho negro e gipsita acicular (fibrosa)	Precipitação química e remobilização de sais com eventos cíclicos marcados por períodos de salinidade e flutuações da profundidade	Ambiente <i>pan saline/Sabkha</i>
		Gl	Gipsita com estrutura laminada, granulometria média, as laminações têm camadas cinza claro a esbranquiçadas formadas por gipsita e camadas cinza escuro formadas por folhelhos negros		
III	Amm	Amm	Argilitos com estrutura maciça, com granulometria fina a média, cores variadas: bege, vermelho e vermelho claro, marrom	Deposição em ambiente marinho raso refeito as vezes lagunar, com variação no nível do mar e pequenos influxos terrígenos sob condições euxínicas a óxicas com baixa energia	Marinho Raso/Lacustre
	Cmf / Cl/Clo / Cf / Cm	Cmf	Calclutito com estrutura maciça, granulometria fina, coloração marrom claro a escuro, com presença de raízes		
		Cl/Clo	Calcarenito com estrutura maciça, granulometria média a fina, coloração variando ente cinza-escuro/marrom-claro a bege, com presença de óxidos.		
		Cf	Calclutito com estrutura fissil, granulometria fina, coloração marrom escuro com presença de vênulas de gipsita acicular (fibrosa)		
		Cm	Calclutito/siltito com estrutura maciça, granulometria argilo-siltosa, coloração marrom claro com pouca presença de óxidos		

Fonte: O autor (2023).

### 5.3 BIOESTRATIGRAFIA

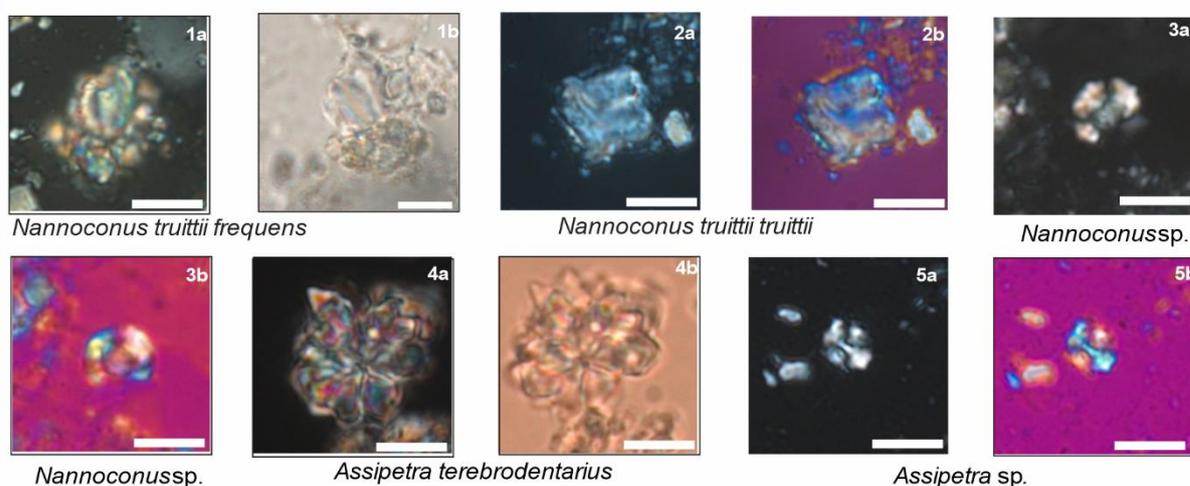
No afloramento BC\_05, foram reconhecidas 8 espécies distintas e 4 gêneros, são eles: *Assipetra* sp. *Assipetra terebrodentarius*, *Nannoconus truittii truittii*, *Nannoconus truittii frequens*, *Nannoconus* sp., *Thoracosphaera* sp., *Watznaueria barnesae*, *Watznaueria* sp (Figura 57). No que se refere à Bioestratigrafia de nanofósseis calcários a presença do gênero *Nannoconus* e *Assipetra* sugerem idade aptiana para as amostras do nível 3 (NV-3). A associação biozonal das demais amostras sugerem uma idade desde o Aptiano ao Cenomaniano (Tabela 7).

Tabela 7 – Espécies de nanofósseis dos respectivos afloramentos e níveis amostrados.

Amostras	Profundidade (m)	Cronoestratigrafia	Sissingh (1977)		Bioeventos	<i>Assipetra</i> sp.*	<i>Assipetra terebrodentarius</i>	<i>Nannoconus truittii frequens</i>	<i>Nannoconus truittii truittii</i>	<i>Nannoconus</i> sp.	<i>Thoracosphaera</i> sp.	<i>Watznaueria barnesae</i>	<i>Watznaueria</i> sp.	
			Preservação	Riqueza										
NV5-BC_05		Apt. - Gen.	CC7 - CC10	M	11					R				
NV4-BC_05				P-M	9						R			R
NV3A1-BC_05				P-M	10						R		R	R
NV3A-BC_05		Aptiano	CC7	M	14	<i>Assipetra</i> *	R	R		R		R	R	
NV2-BC_05				-	0									
NV1-BC_05				-	0									
NV3 BC_1				M	9	▲ <i>N. truittii</i>	R	R		R	R		R	R

Fonte: O autor (2023).

Figura 57 - Espécies de nanofósseis: *Assipetra* sp. *Assipetra terebrodentarius*, *Nannoconus truittii truittii*, *Nannoconus truittii frequens*, *Nannoconus* sp., *Thoracosphaera* sp., *Watznaueria barnesae*, *Watznaueria* sp.



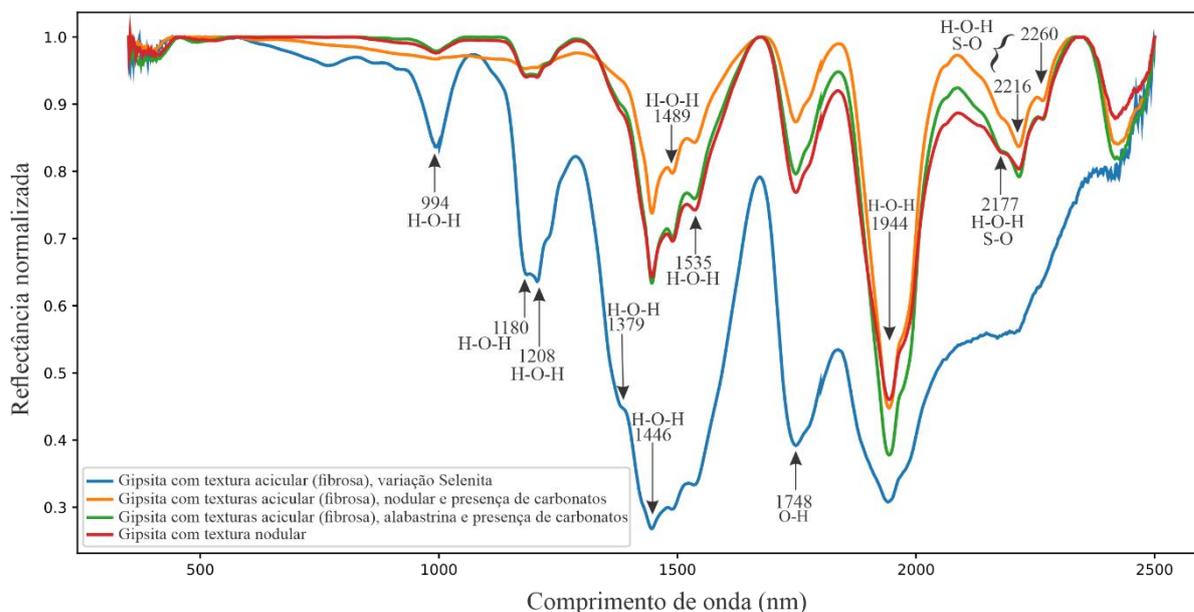
Fonte: O autor (2023).

#### 5.4 ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA

Os espectros dos sulfatos no infravermelho próximo (NIR: 750 a 1000 nm) foram interpretados com as variações de gipsita, suas respectivas texturas e a presença de outros minerais (*e.g.*, carbonatos). Níveis ricos em sulfato hidratado ocorrem nas variedades da gipsita com texturas maciça e fibrosa. As curvas espectrais presentes na figura 58, caracterizam as feições de água presente na estrutura da gipsita nos comprimentos de ondas de 994 nm, 1180 nm, 1208 nm, 1379 nm, 1446 nm, 1489 nm, 1535 nm, 1944 nm, e possivelmente em 1748 nm à feição diagnóstica de O-H (Clark *et al.*, 1990; Pontual *et al.*, 2008). Feições de absorção em ~2177 nm, ~2216 nm e ~2260 nm também foram observadas e podem ser associadas à água molecular ou à ligação S-O (Cloutis *et al.*, 2006).

A relação entre absorção, textura e outros minerais presentes nessas rochas são fatores importantes nas respostas das feições observadas. Na figura 58, observa-se que amostras de gipsita com textura acicular (fibrosa), variação Selenita, apresentam absorções típicas desse mineral com forma mais intensas e maiores profundidades, indicando ser uma amostra com elevada concentração de gipsita. Em contrapartida, outras variedades, tais como: a gipsita com texturas acicular (fibrosa) e nodular e presença de carbonatos, a gipsita com texturas acicular (fibrosa) e alabastrina com presença de carbonatos e a gipsita nodular, apresentam profundidades de absorção não tão intensas, o que se deve ao fato da mistura desses minerais com carbonatos.

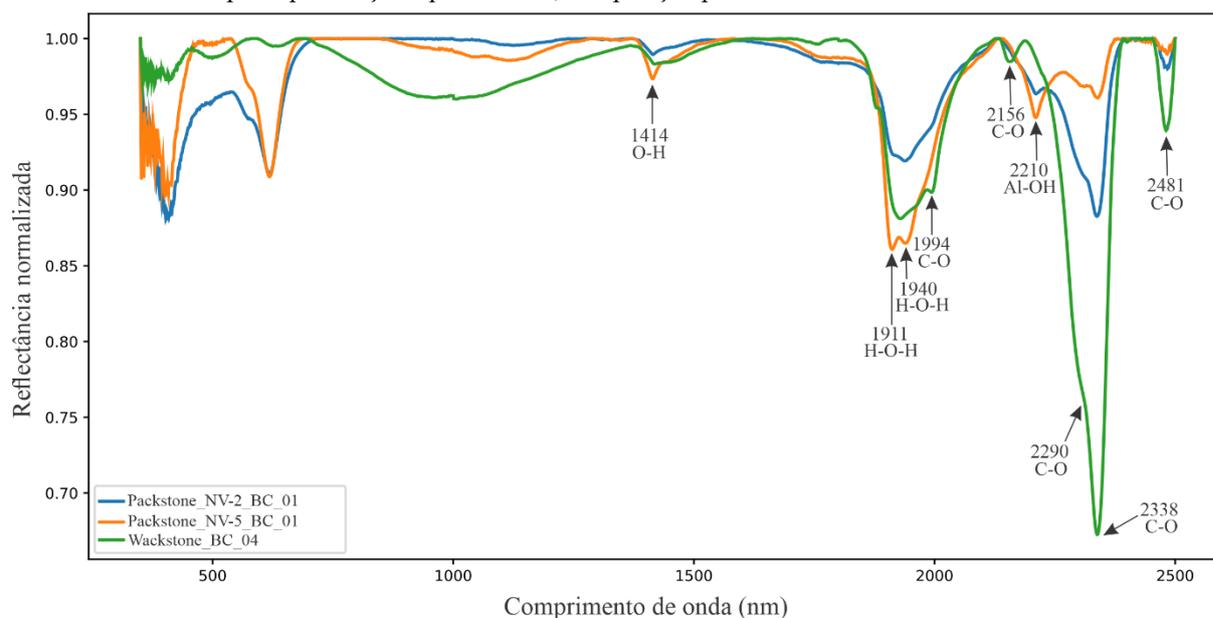
Figura 58 - Curvas de reflectância normalizada com os principais níveis de gipsita.



Fonte: O autor (2023).

Os níveis carbonáticos são marcados por feições de absorções em cerca de 1994 nm, 2156 nm, 2290 nm e 2481 nm, apresentando a feição mais profunda em ~2338 nm, no *wackestone* do afloramento BC\_04 (Figura 59). Estas feições derivam da vibração das moléculas C-O que caracteriza o principal mineral dessas rochas, a calcita (Gaffey, 1986; Clark *et al.*, 1990; Pontual *et al.*, 2008). Nos *packstones* do afloramento BC\_01, nos níveis 02 e 05, foram observadas sutis feições de absorção de O-H em ~1414 nm, de água em ~1911-1940 nm, e de Al-OH em ~2210 nm, podendo indicar a influência de argilominerais, possivelmente esmectita ou illita.

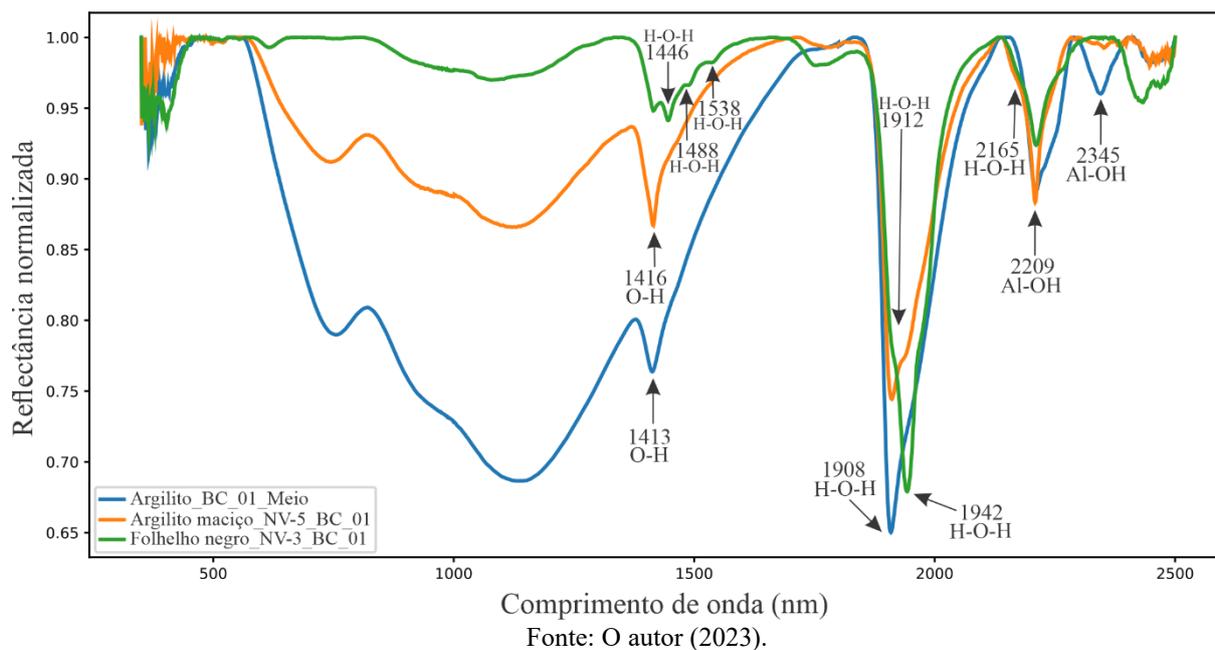
Figura 59 - Curvas de reflectância normalizada com os principais níveis de carbonatos, com indicação das principais feições que indicam, composição predominantemente de calcita.



Fonte: O autor (2023).

Os níveis de folhelho e argilito com presença de matéria orgânica são caracterizados por argilominerais, com feições típicas de O-H em ~1413 nm e 1416 nm, água em ~1912 nm e Al-OH em ~2209 e 2345 nm (Clark *et al.*, 1990; Pontual *et al.*, 2008). Sugere-se que as classes dos argilominerais apresentam feições comuns dos grupos da esmectita (feições de água e de Al-OH em 2209 nm) e/ou illita (caso do argilito BC\_01, com feições de água e as duas feições de Al-OH acima mencionadas). Os folhelhos da base dos níveis 03 e 05 do mesmo afloramento, possuem baixo conteúdo de gipsita, visto pelas feições sutis de água desse mineral em ~1446 nm, 1488 nm, 1538 nm, 1908 nm, ~1942 e ~2165 nm (Figura 60).

Figura 60 - Curvas de reflectância normalizada com os principais níveis de folhelhos e argilito, com indicação de principais feições em ~2209 e ~2345 nm (Al-OH) e de água em cerca de 1912 nm.



#### 5.4.1 Índice espectral de gipsita

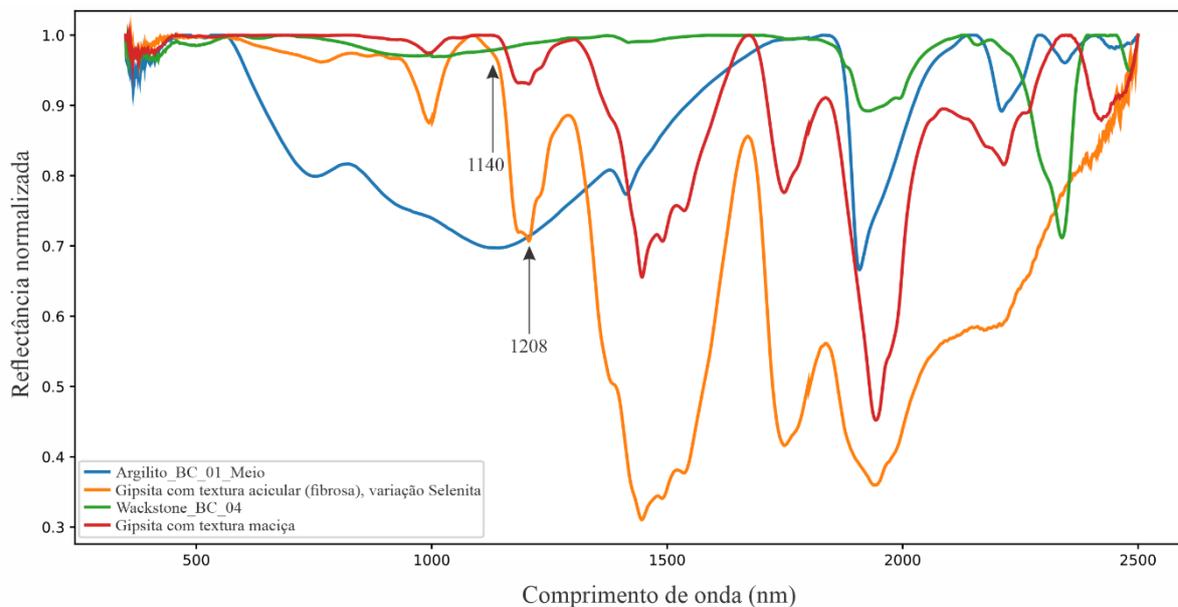
Um índice espectral de gipsita foi criado explorando as feições de absorções típicas da gipsita, como observado na figura 61. Com isso, dentre os testes feitos, usou-se o gradiente de reflectância diagnóstico deste sulfato observado em 1140 nm (pico de reflectância) e 1208 nm (feição de absorção derivada de moléculas de água), criando-se o índice mostrado na Eq. 1.

$$\text{Índice espectral de gipsita} = \rho_{1140 \text{ nm}} / \rho_{1208 \text{ nm}} \text{ (Eq. 1)}$$

Onde  $\rho$  é a reflectância normalizada, em que, valores maiores a 1 indicam presença de gipsita na composição da amostra.

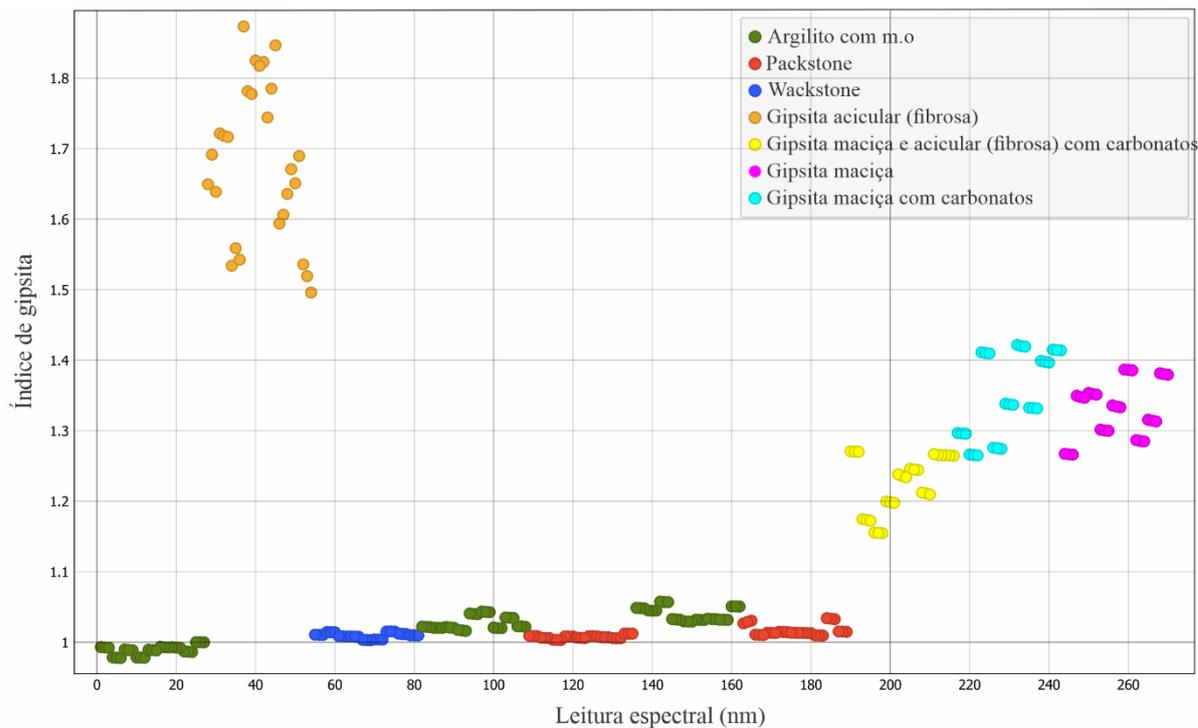
Compreende-se que amostras de gipsita acicular (fibrosa) apresentam sempre os maiores valores no índice de gipsita, fato observado nas feições profundas de absorção da água presente nesses minerais (Figura 61).

Figura 61 - Curvas de reflectância normalizadas de amostras de gipsita, de níveis carbonáticos e de argilitos com matéria orgânica. Os comprimentos de onda usados na criação do índice espectral de gipsita (1140 e 1208 nm) estão indicados.



Fonte: O autor (2023).

Figura 62 - Gráfico de leituras espectrais versus o índice de gipsita proposto neste trabalho. Amostras de rocha com valores de índice superiores a 1 indicam a presença de gipsita no material.



Fonte: O autor (2023).

Amostras de gipsita com outras texturas (*e.g.* acicular (fibrosa), maciça) que apresentam misturas de minerais como os carbonatos, também apresentam índices espectrais maiores que 1, porém, são valores inferiores aos da gipsita acicular (fibrosa), enquanto argilitos e rochas carbonáticas são marcadas por valores do índice inferiores ou iguais a 1 (Figura 62).

## 5.5 SENSORIAMENTO REMOTO

### 5.5.1 Lineamentos Estruturais

Os lineamentos de crista e vale que foram confeccionados na área de estudo estão distribuídos com predomínio de dois *trends* principais: NE-SW e NW-SE, seguidos de dois *trends* secundários de WNW-ESE e ENE-WSW (Figura 63).

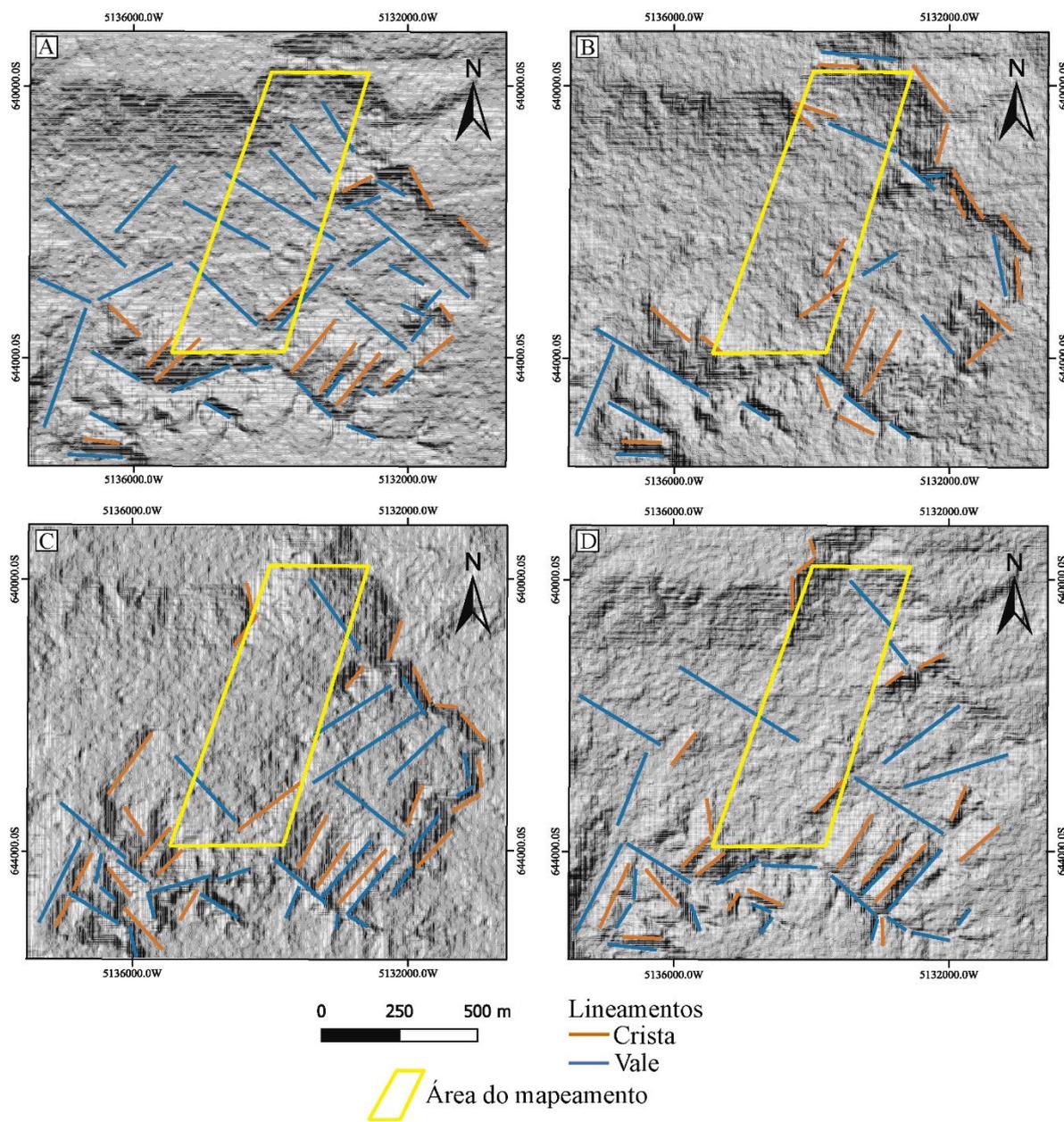
Para a direção de 0° Az, foram extraídos 79 lineamentos com comprimento variando de 27 a 327 metros, apresentando uma direção principal (NE-SW) e uma secundária (NW-SE) (Figuras 63a e 64a). A maior parte dos lineamentos que apresentam comprimento médio de 131 metros estão encaixados em estruturas de vales, conjuntamente com os lineamentos de crista de comprimento médio de 50 metros.

No sombreamento na direção de 45° Az, foram extraídos 35 lineamentos com comprimento variando de 22 a 353 metros, onde apresentam uma direção principal, NW-SE e duas secundárias, WNW-ESE e NE-SW (Figuras 63b e 64b). Os lineamentos de crista apresentam maior concentração com comprimento médio de 149 metros, enquanto os lineamentos de vale com comprimento médio de 126 metros apresentam menor concentração.

No sombreamento na direção de 90° Az, foram extraídos 52 lineamentos com comprimento variando de 11 a 353 metros, onde apresentam dois *trends* principais: NE-SW e NW-SE e dois secundários: ENE-WSW e WNW-ESSE (Figuras 63c e 64c). Os lineamentos de crista e vale nesta direção de sombreamento apresentam equilíbrio em sua distribuição com comprimentos médios de 116 e 129 metros, respectivamente.

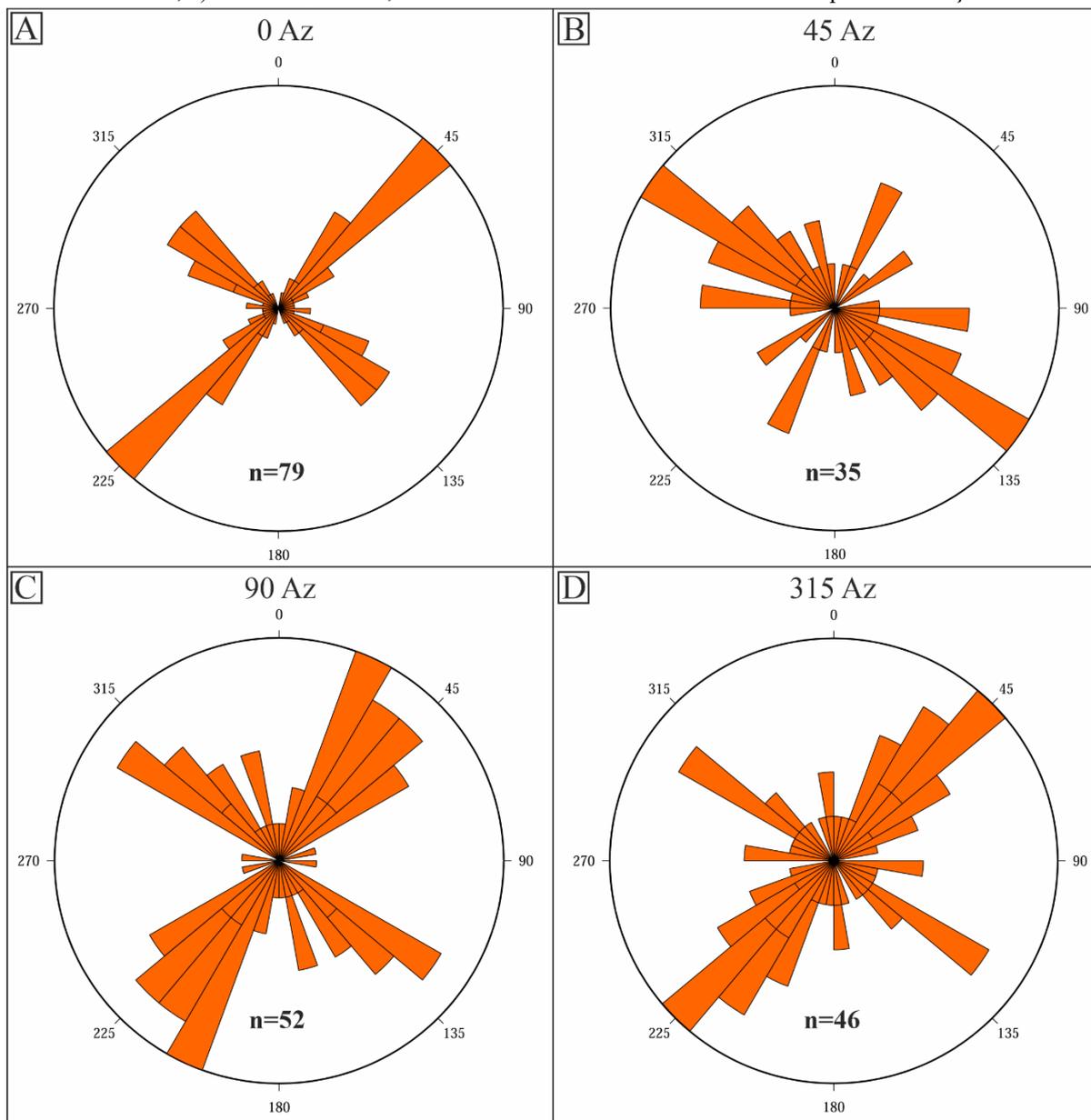
Por fim, na direção de 315° Az, foram extraídos 46 lineamentos com comprimento variando de 3 a 352 metros, onde apresenta um *trend* principal, NE-SW e dois *trends* secundários: NW-SE e WNW-ESSE (Figuras 63d e 64d). Nesta direção também se observa um equilíbrio nos lineamentos de vale e crista que apresentam comprimentos médios de 121 e 139 metros, respectivamente.

Figura 63 - Modelo digital de terreno da área mapeada (losango em amarelo) com as respectivas direções de sombreamento: a)  $0^\circ$  Az; b)  $45^\circ$  Az; c)  $90^\circ$  Az e  $315^\circ$  Az; e os lineamentos de cristas (em laranja) e vales (em azul).



Fonte: O autor (2023).

Figura 64 - Diagramas de rosetas com cristas e vales com as respectivas direções de sombreamento: a) 0° Az; b) 45° Az; c) 90° Az e 315° Az; e o número de lineamentos extraídos das respectivas direções.



Fonte: O autor (2023).

## 6 DISCUSSÕES

### 6.1 PARAGÊNESE MINERAL

A partir das principais texturas e hábitos dos sulfatos de cálcio, é possível a interpretação das condições paleodeposicionais e dessa forma, entender os estágios diagenéticos que foram formados.

A combinação entre a descrição de fácies e das texturas revelou que os evaporitos na Mina do Chorado possuem origem eodiagenética, tendo em vista, que não foi observado nas lâminas descritas feições de mesodiagênese, como: desidratação de gipsita e recristalização como anidrita nodular a maciça, inclusões de rochas associadas e evidências de estilólitos recortando as estruturas (Machel, 1993; Warren & Kendall, 1985; Warren, 2006). A preservação de feições primárias deposicionais como “resquícios” de gipsita *chevron* na textura acicular (fibrosa) permite inferir que esses sulfatos tenham sido depositados em condições deposicionais (primárias) e pós-deposicionais (secundárias), como observado também por Paz & Rossetti (2006a).

Foi possível a distinção de quatro fases distintas na sequência deposicional dos sulfatos, relacionando estruturas, texturas e relação de contatos com outras fases minerais. A primeira fase é caracterizada pela formação da gipsita *chevron* que, neste trabalho, foi observado como resquícios dentro da segunda fase (Figura 56). Esta é caracterizada por essa substituição, resultando na formação da gipsita acicular (fibrosa) (Figuras 53, 55 e 56); a textura nodular (Figura 52) também é formada nessa fase. A terceira fase é formada com a gipsita alabastrina (Figura 54) e, por fim, a quarta fase pela formação da gipsita acicular (fibrosa de variação selenita), que compõem os veios intrassedimentos e que preenchem as fraturas (Figuras 42, 43, 44, 45, 47, 49c e d, 50c e d).

Na precipitação da fase primária, o crescimento dos resquícios dos cristais de *chevron* se origina em condições subaquosas (entre a superfície do sedimento e o nível de saturação da salmoura), e é atribuído a precipitações ascendentes de sais com profundidade menores que 2 metros com salmouras supersaturadas (Paz & Rossetti, 2006a). A formação da gipsita acicular (fibrosa) é registrada na substituição da gipsita *chevron*, onde deformações são observadas devido ao novo arranjo estrutural e essa formação se dá logo após a deposição, representando a segunda fase; porém, ainda com a influência da salmoura primária. Outra textura formada nessa fase é a textura nodular formada essencialmente por gipsita, que ocorre em um ambiente com milimétricas espessuras da superfície de deposição a partir de fluidos nos poros supersaturados na zona capilar na salmoura, que, devido a suas mudanças sazonais, afeta a formação dessa textura (Paz & Rossetti, 2006a).

A textura alabastrina representa a terceira fase, substituindo a outras fases como gipsita porfiroblástica (Bobco, 2014). Contudo, como observado neste trabalho, essa variedade ocorre concomitantemente com a gipsita acicular (fibrosa). Dessa forma, sugere-se que essa textura se formou como substituição da variedade acicular (fibrosa).

Por fim, a quarta fase é formada pela textura acicular (fibrosa) que preenchem os veios intrasedimentos, inclusões e planos de fraturas. Essa variedade pode representar a dissolução dos sulfatos e reprecipitação próxima à superfície ou a reidratação de sulfatos com profundidade e, assim, originando salmouras, onde sazonais recargas de águas continentais permitiram a deposição dos folhelhos (Tucker, 2001). Com isso, quando essa variedade aparece em veios e inclusões, é relacionada à fase sindeposicional dessas duas litologias: com o ressecamento da salmoura, os evaporitos intrudem os folhelhos sem uma direção principal. Porém, quando essa textura é relacionada à geração de fraturas, essas estão associadas a geração de fraturamento hidráulico nas salmouras.

## 6.2 ANÁLISE DE FÁCIES E SISTEMAS DEPOSICIONAIS

Corroborando para um melhor entendimento das principais litologias pertencentes à Formação Codó na cidade de Grajaú-MA, foi possível a definição de 12 fácies, que permitiu a divisão de três sequências: basal, intermediária e superior. Conjuntamente, a análise do furo de sondagem geológica (F064-03), permitiu um melhor entendimento das condições paleoambiental e diagenética dos evaporitos.

A sequência 1 (basal) é representada pelas fácies: Sm, Co, Fn, Al. Essa sequência é marcada por um ambiente de baixa energia com pequenas perturbações (Tabela 6) e uma primeira ingressão marinha marcada na Fácies Co (Tabela 7). Inicialmente óxico, marcada pela sedimentação das fácies Sm (Figuras 23 e 24) e Co (Figuras 25, 26, 27, 28) onde se desenvolveu a deposição do siltito composto por matéria orgânica amorfa e quartzo, seguido do *packstone* com matriz micrítica, formado essencialmente por ostracodes e tapetes microbiais. Conforme Paz & Rossetti (2001), a presença desses tapetes está relacionada às formações oriundas de cianobactérias, algas e fungos. A presença de laminação plano-paralela, valvas de ostracodes ora articuladas e ora desarticuladas, os níveis piritizados e oxidados refletem pequenas perturbações nesse ambiente.

Sobreposto a Fácies Co ocorre a deposição do folhelho negro (Fácies Fn), que marca o começo de um nível anóxico da sequência (Figuras 29 e 30). Sotoposto a essas fácies, a deposição do argilito laminado com matéria orgânica (Fácies Al) com a presença de ostracodes

e microfósseis (invertebrados) (Figura 31). Ambas as fácies foram depositadas em lâmina d'água alta e elevada produtividade orgânica.

A diminuição da lâmina d'água é marcada pela deposição de outro nível da Fácies Co, formada por um *packstone* de matriz micrítica e cimento composto por calcita espática, com ostracodes apresentando valvas bem a mal-formadas, com níveis piritizados e maior oxidação quando comparado o primeiro nível dessa fácies (descrito anteriormente). Por fim, o segundo nível da Fácies Al marca o último nível anóxico da sequência 1, com a deposição de argilitos com matéria orgânica e a presença de ostracodes (Figura 32).

Neste trabalho, sugere-se que essa sequência 1 seja subdividida em subsequências 1a e 1b. A subsequência 1a seria caracterizada por um ambiente marinho raso que permitiu a deposição das fácies Sm e Co, enquanto a subsequência 1b, formada pelas fácies Fn, Al, Co e Am, teria se depositado em um sistema lacustre com níveis anóxicos e óxicos.

A sequência 2 (intermediária) é representada pelas fácies Gl e Gm com inclusões compostas por folhelhos e gipsita acicular (fibrosa) (Tabela 6). Como sugerido nesse trabalho e proposto por Paz & Rossetti (2005), o sistema deposicional nessa região é o *saline pan/sabkha* - indicado pela precipitação dessas fácies. A fácies Gl reflete as camadas da salmoura primária em um ambiente plano, onde as intercalações com folhelhos são formadas por um crescimento intrassedimento a partir de poros supersaturados oriundos de fluidos da zona capilar/freática, refletindo, assim, um ambiente subaquoso com sazonais exposições (Paz & Rossetti, 2005) (Figura 48). A Fácies Gm é formada por cristais de sulfatos retrabalhados à medida em que o nível de água da salmoura abaixa, ocorrendo em um ambiente subaquoso (Figuras 42 e 48). Paz & Rossetti (2005) propõem que a formação dessa fácies advém da presença de cavidades cársticas atribuídas às dissoluções dos evaporitos oriundos das exposições subaéreas, sendo esses mantidos temporariamente acima do nível da água, com dissolução ocorrendo e formando pequenas depressões. As inclusões formadas por gipsita acicular (fibrosa) e folhelhos são oriundas do nível de água que interage com essas cavidades e a disponibilidade de sulfatos que se precipitam nesse ambiente subaquoso.

A sequência 3 (topo) é representada pelas fácies: Amm, Cmf, Cl/Clo, Cf e Cm. Sugere-se um sistema lacustre de baixa energia, em condições euxínicas a óxicas, com influxo terrígeno - a partir da sedimentação das fácies Amm, Cmf (nível: I), Cl/Clo (nível: II), com uma ingressão marinha plataformal nas fácies Cf (níveis III e V) e Cl/Clo (nível IV), seguido de uma nova contribuição lacustre de baixa energia, com influxo terrígeno marcado pela Fácies Cm (Tabela 6).

A Fácies Amm (sotoposta a fácies Gm), onde o primeiro nível é formado por um argilito de cor bege em ambiente euxínico; acima, ocorre o segundo nível de argilitos de cor vermelho claro, caracterizando um ambiente óxico, onde ambos os níveis apresentam o preenchimento de vênulas por gipsita acicular (fibrosa) (Figura 33). No primeiro nível, os sulfatos ocorrem em formas de vênulas, em sua parte basal (Figura 33a e b). É sugerido que a formação desse nível se deu por influência do ambiente *saline pan/sabkha* resultante da disponibilidade final de sulfatos, que se formaram nesse ambiente aquoso. No segundo nível, a ocorrência de gipsita acicular (fibrosa) é menor quando comparado ao primeiro nível; com isso, sugere-se que resquícios do primeiro nível estariam disponíveis para se precipitarem em pequenas espessuras (Figura 33c).

O terceiro nível (composto por um argilito de cor marrom, com grãos de quartzo e presença de óxidos) (Figura 33d) e o quarto nível (formado por um argilito de cor vermelha com grãos de quartzo de granulometria silte a areia fina) apresentam condições sugestivas de um ambiente de baixa energia, mais óxico e com influxo terrígeno (Figura 33e).

A sedimentação das Fácies Cmf nos afloramentos BC-04 (Figura 34) e BC-05 (Figura 40a) é representada por um ambiente calmo, com episódios de perturbação na lâmina de água, que permitiu a formação do *wackestone* de matriz micrítica do afloramento BC-04 com resquícios de valvas de ostracodes mal-formadas e desarticuladas, com a presença de calcita espática e a porosidade substituída por pirita indica um ambiente euxínico (Figura 35). No afloramento BC-05 essa fácies apresenta estrutura maciça e cor marrom escuro, relacionado ao ambiente calmo.

A Fácies Cl/Clo é representada por uma sedimentação nesse ambiente lacustre calmo com poucos episódios de perturbação. Nessa fácies, a presença de laminações de estrutura planar sugere um ambiente calmo, enquanto, as valvas de ostracodes desarticuladas e ovaladas (BC-04) (Figuras 36a, 37) e a presença de de biotita e muscovita (BC-05, nível II), marcam os raros episódios de influxo terrígeno (Figura 45b).

A sedimentação marinha plataformal é marcada pelas sedimentações das fácies Cf (níveis III e V) e Cl/Clo (nível IV) (Figuras 40 e 41). A Fácies Cf (nível III) (Figura 43) é caracterizada por um calcilito com fissilidade e pela presença de nanofósseis calcários: *Assipetra* sp., *Assipetra terebrodentarius*, *Nannoconus truittii truittii*, *Nannoconus truittii frequens*, *Nannoconus* sp., *Thoracosphaera* sp., *Watznaueria barnesae*, *Watznaueria* sp (Figura 57).

A Fácies Cl/Clo (nível IV), sotoposta a fácies Cf, é formada nesse ambiente marinho plataformal, composta um calcarenito de granulometria média a fina com laminações de

estrutura planar, de cor bege. A Fácies Cf do (nível V) é representada pela deposição do calcilito com fissilidade e com presença de vênulas de gipsita acicular (fibrosa), também formada nesse ambiente marinho plataformar (Figura 41). A presença de gipsita nos planos de fissilidade dessa fácies pode ser entendida como um equilíbrio geoquímico entre a disponibilidade dos carbonatos e sulfatos da água marinha, tendo em vista, seu preenchimento pós deposicional (Mohriak *et al.* 2008).

Por fim, a sedimentação da Facies Cm marca um segundo momento de um ambiente lacustre da sequência com pequenas perturbações. Essa configuração é marcada pela sedimentação do calcilito-siltito de granulometria argilo-siltosa, estrutura maciça, cor marrom claro e a presença de óxidos que podem ser compostos por Fe, Mg ou Mn.

### 6.3 ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA E SEDIMENTAÇÃO DAS FÁCIES

As análises de espectroscopia de reflectância descreveram feições de absorção nos evaporitos, representadas por feições de água presente na estrutura da gipsita nos comprimentos de ondas de 994 nm, 1180 nm, 1208 nm, 1379 nm, 1446 nm, 1489 nm, 1535 nm, 1944 nm. Possivelmente, em 1748 nm à feição diagnóstica de O-H (Clark *et al.*, 1990; Pontual *et al.*, 2008). As feições em ~2177 nm, ~2216 nm e ~2260 nm também foram observadas e podem ser associadas à água molecular ou à ligação S-O (Cloutis *et al.*, 2006). As amostras de gipsita com textura acicular (fibrosa, variação Selenita) apresentam absorções típicas (*e.g.* 1748 nm, ~2177 nm, ~2216 nm e ~2260 nm) desse mineral com forma mais intensas e maiores profundidades, indicando que essa variedade apresenta uma formação tardia e elevada concentração de gipsita (Figura 58).

Em contrapartida, outras variedades (a gipsita com texturas acicular (fibrosa) e nodular e presença de carbonatos, a gipsita com texturas acicular (fibrosa) e alabastrina com presença de carbonatos e a gipsita nodular) apresentam profundidades de absorção (*e.g.* 994 nm, 1180 nm, 1208 nm, 1379 nm, 1446 nm, 1489 nm, 1535 nm, 1944 nm) não tão intensas, o que se deve ao fato da mistura desses minerais com carbonatos (Figura 58).

As análises nas rochas carbonáticas descreveram feições de absorções em cerca de 1994 nm, 2156 nm, 2290 nm e 2481 nm - apresentando a feição mais profunda em ~2338 nm no *wackestone* do afloramento BC\_04. Estas feições derivam da vibração das moléculas C-O que caracteriza o principal mineral dessas rochas, a calcita (Gaffey, 1986; Clark *et al.*, 1990; Pontual *et al.*, 2008). Nos *packstones* do afloramento BC\_01, nos níveis 02 e 05 (Fácies Co) foram observadas sutis feições de absorção de O-H em ~1414 nm, de água em ~1911-1940 nm, e de

Al-OH em ~2210 nm (Figura 59), podendo indicar a influência de argilominerais, possivelmente esmectita ou ilita (Pontual *et al.*, 2008).

A análise dessas feições por espectroscopia de reflectância, converge com os resultados de Gonçalves (2006) que identificou através de difratometria de raios-x, na fácies (Co), a presença de esmectita. De acordo com a autora, a formação de esmectita detrítica está associada a grandes volumes de água em um ambiente com depressões, durante nível de base elevado. Já a formação de ilita, a autora sugere que sua ocorrência está próxima à superfície a partir da transformação da esmectita detrítica, sendo este processo ocasionado pelas características deposicionais em áreas marginais de lagos, onde a flutuação da lâmina d'água foi comum, possibilitando frequentes exposições subaéreas e pedogênese.

As análises de espectroscopia de reflectância nos folhelhos e argilitos ricos em matéria orgânica descreveram feições típicas de O-H em ~1413 nm e 1416 nm, de água em ~1912 nm e de Al-OH em ~2209 e 2345 nm. As feições comuns dos argilominerais são dos grupos da esmectita e/ou ilita. Nessas litologias, as análises de Gonçalves (2006) coincidem com os dados do presente trabalho (Figura 60).

#### 6.4 CONFIGURAÇÃO MORFOTECTÔNICA ATUAL DA MINA DO CHORADO

Os lineamentos estruturais interpretados possuem padrões similares aos *trends* principais desenvolvidos por falhas que foram reativadas durante o estágio de separação dos continentes africano e sulamericano. Esses *trends* identificados por Rezende & Pamplona (1970) e Azevedo (1991) apresentam direções principais: NE-SW, NW-SE e, frequentemente, E-W, associado a falha de Sobradinho, que é uma continuidade da zona de fratura Romanche, localizada na porção sul e leste da bacia (Góes & Rossetti, 2001; Paz & Rossetti, 2005; Zalán, 2007).

Na área de estudo, foram identificados predomínio de dois *trends* principais: NE-SW e NW-SE, seguidos de dois *trends* secundários de WNW-ESE e ENE-WSW (Figuras 63 e 64). Os *trends* principais estão ligados às principais direções já descritas na literatura por Góes & Rossetti (2001), Paz & Rossetti (2005), Zalán (2007) e Soares Jr *et al.* 2011, associados a reativações de falhas normais do embasamento. Contudo, na área mapeada não foram observadas essas estruturas. O que se observou foi que o acamamento do afloramento BC\_05 (que mergulha para SW), pode sugerir uma influência dessas estruturas na área.

Os *trends* secundários podem estar ligados ao abatimento no Aptiano do Arco Capim/Tocantins e ou a outras estruturas ligadas ao *trend* principal. Dessa forma, a necessidade de mais estudos, é necessário em um melhor entendimento tectonoestratigráfico da região.

## 7 CONCLUSÕES

Baseando-se nos dados levantados nesse trabalho, as seguintes conclusões são feitas:

- i) Os evaporitos presentes na Mina do Chorado, na região de Grajaú-MA, possuem origem eodiagenética, formada por quatro fases distintas: primária, com resquílios de gipsita *chevron*; secundária, com gipsita acicular (fibrosa) e nodular; terciária, com gipsita alabastrina; quaternária, com gipsita acicular (fibrosa, variação Selenita) - que compõem os veios intrassedimentos e planos de fraturas;
- ii) A descrição de 12 fácies permitiu a divisão em três sequências:
  - Sequência 1, representada por dois sistemas deposicionais (marinho raso e lacustre de baixa energia com pequenas perturbações com níveis anóxicos e óxicos);
  - Sequência 2, representada por um sistema deposicional (*saline pan/sabkha*);
  - Sequência 3, representada por três sistemas deposicionais (lacustre com condições euxínicas a óxicas com influxo terrígeno, marinho plataformar, seguido por um sistema lacustre de baixa energia com influxo terrígeno).
- iii) As análises de espectroscopia de reflectância descreveram feições de absorções intensas com maiores profundidades na gipsita com textura acicular (fibrosa), quando comparada as outras texturas observadas. Nas rochas carbonáticas, observa-se as feições típicas de C-O e a presença de argilominerais (possivelmente esmectita ou illita). Nos folhelhos e argilitos ricos em matéria orgânica, as feições típicas de O-H foram identificadas, além de argilominerais (esmectita e/ou illita);
- iv) Os lineamentos estruturais permitiram a identificação de dois *trends* principais: NE-SW e NW-SE, seguidos de dois *trends* secundários de WNW-ESE e ENE-WSW. Em relação aos dois trends principais, eles estão associados a reativações de falhas normais do embasamento. Contudo, na área mapeada, não foram observadas essas estruturas. O que observa é que o acamamento do afloramento BC\_05 mergulha para SW, sugerindo uma influência dessas estruturas na área, para um melhor entendimento do cenário tectonoestratigráfico é sugerido um estudo mais abrangente;
- v) O mapa geológico de escala: 1:25.000 confeccionado para a área mapeada, evidenciou as principais litologias que compõem as três sequências e o modelo digital de terreno (MDT) permitiu o entendimento dos principais níveis topográficos da região (Anexo 1).

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, G. A. Revisão geológica da bacia paleozóica do Maranhão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 25., 1971, São Paulo. **Anais**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1971. v. 3, p.113-122.
- ALMEIDA, Fernando Flávio Marques de. Sistema tectônico marginal do Cráton do Guaporé. 1974.
- ALMEIDA, FFM de et al. Inundações marinhas fanerozóicas no Brasil e recursos minerais associados. **Mantesso Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, CDR**, p. 43-60, 2004.
- ANAISSE JR, J.; TRUCKENBRODT, W.; ROSSETTI, D. F. Fácies de um sistema estuarino-lagunar no Grupo Itapecuru, região de Açailândia/MA, Bacia do Grajaú. **O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú. Editora do Museu Goeldi**, p. 119-150, 2001.
- ANTUNES, Rogério Loureiro. **Introdução ao estudo dos nanofósseis calcários**. UFRJ/IG, 1997.
- ANTONIOLI, L. Estudo palino-cronoestratigráfico da Formação Codó–Cretáceo inferior do nordeste brasileiro. Rio de Janeiro-RJ. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro-UFRJ, 265p, 2001.
- ANTONIOLI, L.; ARAI, M. O registro da Ecozona Subtilisphaera na Formação Codó (Cretáceo Inferior da Bacia do Parnaíba, Nordeste do Brasil): seu significado paleogeográfico. **Simpósio sobre o Cretáceo do Brasil**, v. 6, n. 2002, p. 25-30, 2002.
- BAHNIUK, Anelize M. et al. Development of microbial carbonates in the Lower Cretaceous Codó Formation (north-east Brazil): Implications for interpretation of microbialite facies associations and palaeoenvironmental conditions. **Sedimentology**, v. 62, n. 1, p. 155-181, 2015. <https://doi.org/10.1111/sed.12144> .
- BASTOS, Lucas Pinto Heckert et al. Estratigrafia química aplicada a Formação Codo nos furos de sondagem UN-24-PI e UN-37-PI (Aptiano/ Albiano da Bacia do Parnaíba). **Bol. Geociências Petrobras**, v. 22, p. 289–312, 2014.
- BASTOS, Lucas Pinto Heckert et al. Expression of Early Cretaceous global anoxic events in Northeastern Brazilian basins. **Cretaceous Research**, v. 110, p. 104390, 2020.
- BOBCO, Fabia Emanuela Rafaloski. Caracterização faciológica, petrográfica e isotópica dos evaporitos do Membro Ipubi, Bacia do Araripe, nordeste do Brasil. 2014.
- BOBCO, Fabia Emanuela Rafaloski et al. Alternations of open and closed lakes in the Lower Aptian Codó Formation (Parnaíba Basin, Brazil). **Sedimentary Geology**, v. 455, p. 106478, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2023.106478>.
- BOHACS, Kevin M. et al. Lake-basin type, source potential, and hydrocarbon character: An integrated sequence-stratigraphic–geochemical framework. 2000.
- CARVALHO, R. S. 1987. Sedimentação evaporítica. In: Seminário sobre "rifts" intracontinentais. Rio de Janeiro, Petrobras/DEPEX, 52-57.

CAPUTO, M. V. **Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of Northern Basins of Brazil**. 1984. 586 p. Thesis (Doctorate) - University of Califórnia, Santa Bárbara, 1984.

CLARK, Roger N. et al. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 95, n. B8, p. 12653-12680, 1990.

CLARK, Roger N. 1999. **Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy, in Manual of Remote Sensing, Remote Sensing for the Earth Sciences**, (A.N. Rencz, ed.). John Wiley and Sons, New York, V.3, 3- 58.

CLOUTIS, Edward A. et al. Detection and discrimination of sulfate minerals using reflectance spectroscopy. **Icarus**, v. 184, n. 1, p. 121-157, 2006.

COSTA NETO, Manoel Corrêa da et al. **Geologia da Folha Imperatriz–SB. 23-VCV, Estado do Maranhão**. CPRM, 2014.

DELLA FÁVERA, J. C. Tempestitos na Bacia do Parnaíba. 1990. 560 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1990.

DE SENNA, Juliano Alves; DE SOUZA FILHO, Carlos Roberto; ANGÉLICA, Rômulo Simões. Characterization of clays used in the ceramic manufacturing industry by reflectance spectroscopy: An experiment in the São Simão ball-clay deposit, Brazil. **Applied clay science**, v. 41, n. 1-2, p. 85-98, 2008.

DOS SANTOS NASCIMENTO, Marivaldo; GÓES, Ana Maria. Petrografia de arenitos e minerais pesados de depósitos cretáceos (Grupo Itapecuru), Bacia de São Luís-Grajaú, norte do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 37, n. 1, p. 51, 2007.

DUNHAM, Robert J. Classification of carbonate rocks according to depositional textures. 1962.

ESPINDOLA, F. E. M. (2011). Análise Geomecânica na Perfuração e Cimentação de Poços de Petróleo em Zonas de Sal.

GAFFEY, Susan J. Spectral reflectance of carbonate minerals in the visible and near infrared (0.35-2.55 microns); calcite, aragonite, and dolomite. **American Mineralogist**, v. 71, n. 1-2, p. 151-162, 1986.

GÓES, A. MO; FEIJÓ, Flávio J. Parnaíba Basin; Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, v. 8, 1994.

GÓES, Ana Maria. **Formação Poti (Carbonífero inferior) da Bacia do Parnaíba**. 1995. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

GÓES, A. M.; ROSSETTI, D. F. Gênese da Bacia de São Luís-Grajaú, Meio-Norte do Brasil. **O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú**, p. 15-29, 2001.

GONZALEZ, Luis D. Caro; MASTALERZ, Maria; MENDONÇA FILHO, João Graciano. Application of organic facies and biomarkers in characterization of paleoenvironmental conditions and maturity of sediments from the Codó Formation in the west-central part of the São Luís Basin, Brazil. **International Journal of Coal Geology**, v. 225, p. 103482, 2020.

GRABAU, Amadeus William. **On the Classification of Sedimentary Rocks**. 1904.

HARDIE, Lawrence A. Evaporites; marine or non-marine? **American Journal of Science**, v. 284, n. 3, p. 193-240, 1984.

HARRAZ, H. Z. Topic 6: Evaporite Salt Deposits (A short series of lectures prepared for the Fourth year of Geology, Tanta University). [Slide]. **Tanta (Egito): Hassan Z. Harraz**, 2012.

HSU, K. J. Origin of saline giants: a critical review after the discovery of the Mediterranean evaporite. **Earth-Science Reviews**, v. 8, n. 4, p. 371-396, 1972.

HUNT, Graham R. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. **Geophysics**, v. 42, n. 3, p. 501-513, 1977.

JENKYNNS, Hugh C. Geochemistry of oceanic anoxic events. **Geochemistry, Geophysics, Geosystems**, v. 11, n. 3, 2010. <https://doi.org/10.1029/2009GC002788>.

KLEIN, Evandro Luiz; SOUSA, Cristiane Silva de. **Geologia e recursos minerais do estado do Maranhão**. CPRM, 2012.

LIMA, E. A. M.; LEITE, J. F. Projeto estudo global dos recursos minerais da Bacia Sedimentar do Parnaíba: integração geológico-metalogenética: **relatório final da etapa III**. Recife: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 1978. 212 p.

LIMA, M. R. Palinologia da Formação Codó na região de Codó. **Boletim Instituto de Geociências da USP**, v. 13, p. 116-128, 1982.

LIMA, H. P.; ARANHA, L. GF; FEIJÓ, F. J. Braganca-Viseu Basin, Sao Luis and Ilha Nova Graben; Bacia de Braganca-Viseu, Sao Luis e Graben de Ilha Nova. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, v. 8, 1994.

LOWENSTEIN, Tim K.; HARDIE, Lawrence A. Criteria for the recognition of salt-pan evaporites. **Sedimentology**, v. 32, n. 5, p. 627-644, 1985.

MARTINS, Gabriela Salomão. Evolução tectono-estratigráfica dos evaporitos Horizonte e Paripueira na porção alagoana da Bacia de Sergipe-Alagoas e suas implicações na abertura do Oceano Atlântico Sul. 2016. 258 f. Dissertação (Mestrado em Análise de Bacias; Tectônica, Petrologia e Recursos Minerais) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

MENDES, M. S. Análise estratigráfica do intervalo formacional Grajaú–Codó (Aptiano) da bacia do Parnaíba, NE do Brasil. **Rio de Janeiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Dissertação de Mestrado, 147p**, 2007.

MOHRIAK, Webster; SZATMARI, Peter; ANJOS, Sylvia M. Couto. **Sal: geologia e tectônica: exemplo nas bacias brasileiras**. Beca, 2008.

O'LEARY, D. W.; FRIEDMAN, J. D.; POHN, H. A. Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. **Geological Society of America Bulletin**, v. 87, n. 10, p. 1463-1469, 1976.

PAZ, J. D. S. **Análise faciológica da Formação Codó (Aptiano superior), na região de Codó (MA), borda leste da Bacia do Grajaú**. 2000. Tese de Doutorado. MSc Thesis, Universidade Federal do Pará, Belém, PA.

PAZ, J. D. S. et al. Reconstrução paleoambiental da Formação Codó (Aptiano), borda leste da Bacia do Grajaú, MA. **O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú. Museu Paraense Emílio Goeldi (Coleção Friedrich Katzer), Belém**, p. 77-100, 2001.

PAZ, J. D. S.; ROSSETTI, D. F. Linking lacustrine cycles with syn-sedimentary tectonic episodes: an example from the Codó Formation (late Aptian), northeastern Brazil. **Geological Magazine**, v. 142, n. 3, p. 269-285, 2005.

PAZ, Jackson DS; ROSSETTI, Dilce F.; MACAMBIRA, Moacir JB. An Upper Aptian saline pan/lake system from the Brazilian equatorial margin: integration of facies and isotopes. **Sedimentology**, v. 52, n. 6, p. 1303-1321, 2005.

PAZ, Jackson DS; ROSSETTI, Dilce F. Petrography of gypsum-bearing facies of the Codo formation (late Aptian), northern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 78, p. 557-572, 2006a.

PAZ, Jackson DS; ROSSETTI, Dilce F. Paleohydrology of an Upper Aptian lacustrine system from northeastern Brazil: Integration of facies and isotopic geochemistry. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 241, p. 247-266. 2006b.

PEDRÃO, E. et al. Palinoestratigrafia e evolução ambiental da seção cretácea das bacias de Bragança-Viseu e São Luís (margem equatorial brasileira). **Acta Geol. Leopoldensia**, v. 25, n. 54, p. 21-39, 2002.

PEDREIRA DA SILVA, A.J., LOPES, R.C., VASCONCELOS, A.M., BAHIA, R.B.C., 2003. Bacias Sedimentares Paleozóicas e Meso-Cenozóicas Interiores. In: Bizzi, L.A., Schobbenhaus, C., Vidotti, R.M., Gonçalves, J.H. (Eds.), **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil**. CPRM, Ed, UnB, Brasília, pp. 55-85.

PONTUAL, S.; MERRY, N.; GAMSON, P. Spectral interpretation-field manual. GMEX. Spectral analysis guides for mineral exploration. **Victoria, AusSpec International Pty**, 2008.

REIS, D. E. S.; CAPUTO, M. V. Potencial industrial e energético do folhelho pirobetuminoso Formação Codó, Bacia do Parnaíba. **Proceedings of the 4º PDPETRO, Campinas, SP, Brazil**, p. 21-24, 2007.

REZENDE, WM de; PAMPLONA, Heraldo Raimundo Pinto. Estudo do desenvolvimento do arco Ferrer-Urbano Santos. **Boletim Técnico da Petrobras**, v. 13, p. 5-14, 1970.

- RODRIGUES, R.A. **Geoquímica Orgânica na Bacia do Parnaíba**. 1995. 225 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.
- ROSSETTI, D. F. Influence of low amplitude/high frequency relative sea-level changes in a wave-dominated estuary (Miocene), São Luís Basin, northern Brazil. **Sedimentary Geology**, v. 133, n. 3-4, p. 295-324, 2000.
- ROSSETTI, D. F. Arquitetura deposicional da bacia de São Luís-Grajaú. **O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú**, p. 31-46, 2001.
- ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; ARAI, M. A passagem aptiano-albiano na Bacia do Grajaú, MA. **O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú**, p. 101-117, 2001a
- ROSSETTI, D. F.; TRUCKENBRODT, W.; SANTOS JÚNIOR, A. E. Clima do Cretáceo no Meio-norte brasileiro. **O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú**. Belém, Museu Goeldi, p. 67-76, 2001b.
- ROSSETTI, D. F. Arquitetura deposicional da bacia de São Luís-Grajaú. **O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú**, p. 31-46, 2001c.
- ROSSETTI, Dilce F.; PAZ, Jackson DS; GÓES, Ana M. Facies analysis of the Codó formation (late Aptian) in the Grajaú area, southern São Luís-Grajaú Basin. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 76, p. 791-806, 2004.
- SALGADO-CAMPOS, Victor Matheus Joaquim et al. Unraveling an alkaline lake and a climate change in Northeastern Brazil during the Late Aptian. **Sedimentary Geology**, v. 442, p. 106290, 2022.
- SILVA, Thales Lúcio Santos da. Paleogeografia do cretáceo no nordeste do Brasil: abordagem geoquímica e geocronológica estratégica das Bacias do Araripe, São Luís e Grajaú. 2022. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.
- SOARES JÚNIOR, A.V., Hasui, Y., Costa, J.B.S., Machado, F.B., 2011. Evolução do rifteamento e paleogeografia da margem atlântica equatorial do Brasil: Triássico ao Holoceno. **Geociências** 669–692
- TERRA, Gerson José Salamoni et al. Classificação de rochas carbonáticas aplicável às bacias sedimentares brasileiras. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, v. 18, n. 1, p. 9-29, 2010.
- TUCKER, Maurice E. *Sedimentary Petrology—An Introduction to the Origin of Sedimentary Rocks*. Oxford, Blackwell, 262p, 2001.
- TUCKER, Maurice E. **Rochas Sedimentares-4**. Bookman Editora, 2014.
- VAZ, Pekim Tenório et al. Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, v. 15, n. 2, p. 253-263, 2007.
- WARREN, John K.; KENDALL, Christopher G. ST C. Comparison of sequences formed in marine sabkha (subaerial) and salina (subaqueous) settings modern and ancient. **AAPG bulletin**, v. 69, n. 6, p. 1013-1023, 1985.

WARREN, John K. *Evaporite sedimentology*. 1989.

WARREN, John K. **Evaporites: sediments, resources and hydrocarbons**. Springer Science & Business Media, 2006. doi:10.1007/3-540-32344-9.

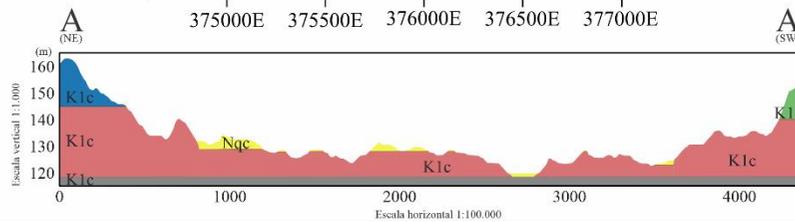
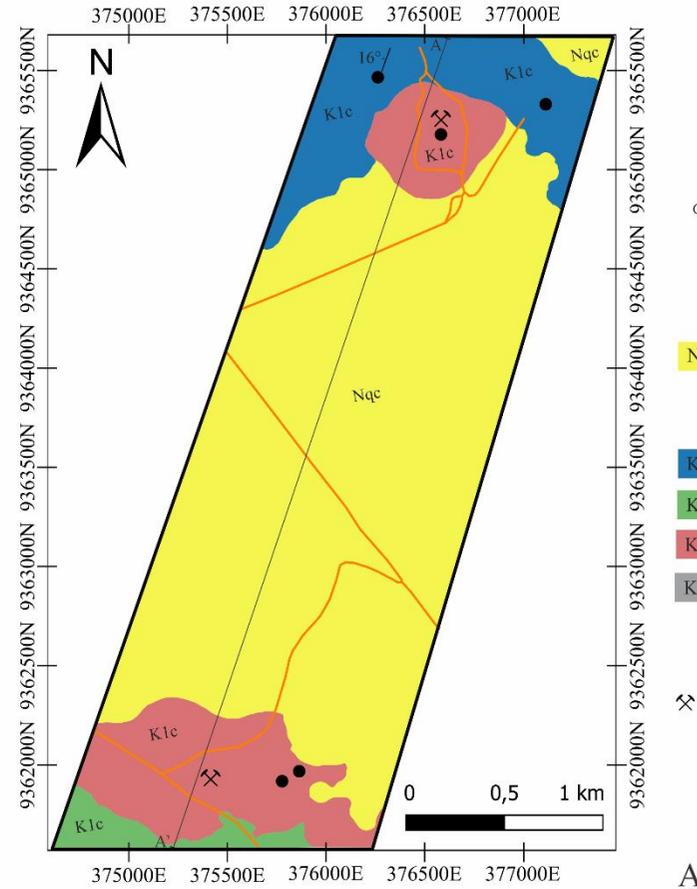
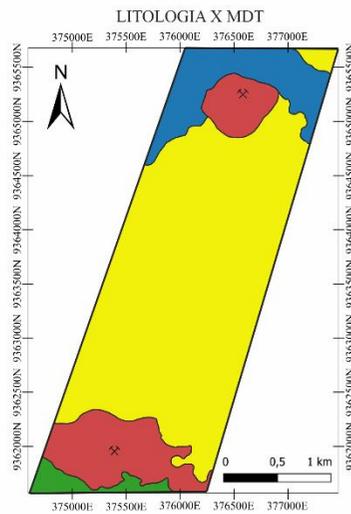
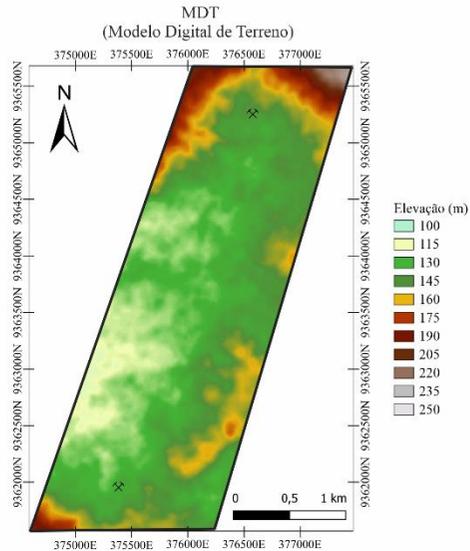
WARREN, John K. Evaporites through time: Tectonic, climatic and eustatic controls in marine and nonmarine deposits. **Earth-Science Reviews**, v. 98, n. 3-4, p. 217-268, 2010.

WARREN, John K. **Evaporites: A geological compendium**. Springer, 2016.

ZALÁN, P. V. Bacias de Bragança-Viseu, São Luís e Ilha Nova. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, v. 15, n. 2, p. 341-345, 2007.

ANEXO 1 – MAPA GEOLÓGICO

MAPA GEOLÓGICO DE UMA PORÇÃO DA MINA DO CHORADO, GRAJAÚ-MA, escala: 1:25.000



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

LAGESE  
LABORATÓRIO DE GEOLOGIA SEDIMENTAR E AMBIENTAL

Autor: Bruno Caetano dos Santos  
Orientador: Mário Ferreira de Lima Filho  
Co-orientadores: João Adauto de Souza Neto e Thales Lúcio Santos da Silva

- LEGENDA**
- NEÓGENO (N)**
- Nqc Depósitos colúvio-cluviais: sedimentos de matriz arenosa argilosa, com formação de horizontes O de solo.
- CRETÁCEO (K)**
- Formação Codó (Aptiano)
- K1c Sequência 3: Calcilitos, calcarenitos com óxidos, muscovita e biotita.
  - K1c Sequência 3: Argilitos de cores vermelhas, marrom claro e escuro, com vênulas de gipsita e presença de quartzo.
  - K1c Sequência 2: Gipsita com inclusões, fraturas e veios formados por gipsita acicular (fibrosa) e folhentos.
  - K1c Sequência 1: Folhentos e argilitos com matéria orgânica, calcários e siltito.
- CONVENÇÕES GEOLÓGICAS**
- Acamamento sedimentar
  - ⊗ Minas ● Afloramentos — Estradas vicinais
- Datum: SIRGAS 2000/UTM Zona 23S, escala: 1:25.000  
Disciplina: Geologia de Campo 4 - 2023.2  
Departamento de Geologia  
Universidade Federal de Pernambuco