



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

ANA CLÁUDIA DA SILVEIRA

**CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA, SEDIMENTOLÓGICA E ESTRATIGRÁFICA
DO TOPO DA CAMADA CARBONÁTICA DO NÍVEL C6 DA FORMAÇÃO CRATO
(PRÉ-SAL, APTIANO) DA BACIA DO ARARIPE, NE DO BRASIL**

Recife
2019

ANA CLÁUDIA DA SILVEIRA

CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA, SEDIMENTOLÓGICA E ESTRATIGRÁFICA DO
TOPO DA CAMADA CARBONÁTICA DO NÍVEL C6 DA FORMAÇÃO CRATO
(PRÉ-SAL, APTIANO) DA BACIA DO ARARIPE, NE DO BRASIL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Geociências.

Área de concentração: Geologia Sedimentar e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Virgínio Henrique de Miranda Lopes Neumann

Coorientadora: Profa. Dra. Lúcia Maria Mafra Valença

Recife
2019

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

- S587c Silveira, Ana Cláudia da.
Caracterização geoquímica, sedimentológica e estratigráfica do topo da camada carbonática do nível C6 da Formação Crato (pré-sal, aptiano) da Bacia do Araripe, NE do Brasil / Ana Cláudia da Silveira – Recife, 2019.
78 f.: figs., tabs.
- Orientador: Prof. Dr. Virgínio Henrique de Miranda Lopes Neumann.
Coorientadora: Profa. Dra. Lúcia Maria Mafra Valença.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Geociências, 2019.
Inclui referências.
1. Geociências. 2. Calcário laminado. 3. Formação Crato. 4. Bacia do Araripe. I. Neumann, Virgínio Henrique de Miranda Lopes (Orientador). II. Valença, Lúcia Maria Mafra (Coorientadora). III. Título.

UFPE

551 CDD (22. ed.)

BCTG / 2020-256

ANA CLÁUDIA DA SILVEIRA

**CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA, SEDIMENTOLÓGICA E ESTRATIGRÁFICA
DO TOPO DA CAMADA CARBONÁTICA DO NÍVEL C6 DA FORMAÇÃO CRATO
(PRÉ-SAL APTIANO) DA BACIA DO ARARIPE, NE DO BRASIL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de doutora em Geociências.

Aprovada em: 09/09/2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Virgínio Henrique de Miranda Lopes Neumann (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Gelson Luís Fambrini (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. João Adauto de Souza Neto (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

Prof.^a Dr.^a Marcela Marques Vieira (Examinadora Externa)

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Alex Souza Moraes (Examinador Externo)

Universidade Federal Rural de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

Primeiramente à Deus pela vida.

À minha querida mãe Suely, exemplo de força e coragem.

Ao meu Noivo Augusto, que esteve ao meu lado em todos os momentos.

Em especial, ao meu Orientador Professor Dr. Virgínio Henrique Neumann, pela amizade, generosidade e conhecimento transmitido ao longo dessa jornada.

À minha Coorientadora Professora Dra. Lúcia Maria Mafra Valença, pela contribuição e disponibilidade de sempre.

Aos professores do PPGEOC e DGEO sempre gentis e acessíveis.

Aos amigos da pós-graduação pelo convívio agradável e por toda a ajuda: Flávia, Jefferson, Germano, Bathô, Bethânia, Josineide.

Aos amigos da vida que sempre torceram por mim: Elis, Jefferson, Nathália, Henrique, Franciele, Talitha.

A CAPES, pelo apoio financeiro para a realização desta Tese.

Ao LAGESE, pelas instalações disponibilizadas para a realização desta pesquisa.

Ao Labise, pelas realizações das análises geoquímicas.

Ao LDN e ao Professor Edval Santos, pelas análises sob MEV.

E a todos que acreditaram na realização deste trabalho.

*“Sonhar é verbo, é seguir,
é pensar, é inspirar,
é fazer força, insistir,
é lutar, é transpirar.
São mil verbos que vêm antes
do verbo realizar.”*

Bráulio Bessa

RESUMO

O pré-sal, intervalo sedimentar encontrado principalmente nas bacias de Campos e Santos, contém os maiores campos petrolíferos do subsolo marinho que atraem muito interesse desde a sua descoberta. Por estar localizado em águas profundas e por apresentar uma grande variedade litológica, torna-se difícil o seu estudo para a elaboração de um modelo de reservatório, o que leva a realização de estudos de modelos análogos. Nesse contexto, a Bacia do Araripe destaca-se por possuir bons afloramentos na sucessão de carbonatos lacustres Aptianos (Andar Alagoas), da Formação Crato, que são semelhantes aos carbonatos que ocorrem no pré-sal. O objetivo deste trabalho foi caracterizar sedimentologicamente, estratigraficamente e geoquimicamente os carbonatos do topo da Formação Crato (nível C6) e observar sua provável origem, uma vez que, vários estudos indicam que são de origem microbial ou que foram formados por precipitação química em condições de hipersalinidade, além de, verificar o comportamento hidrológico da fase final deste paleolago. Para tanto, foram estudados sete afloramentos na região que abrange os municípios de Santana do Cariri, Crato, Arajara, Barbalha, Nova Olinda e Porteiras. Nas amostras coletadas foram feitas análises petrográficas por microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e catoluminescência, além de análises geoquímicas de isótopos estáveis de C e O e Fluorescência de raios-X com os elementos maiores (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , P_2O_5 , MnO e PF). Os calcários laminados foram classificados como calcilutitos ricos em óxidos de ferro, apresentando pirita framboidal e alguns ostracodes. Foram observadas estruturas dúcteis como *microslumps* e *loop bedding* e estruturas rúpteis como microfalhas e microfraturas, estas muitas vezes preenchidas por calcita blocosa ou fibrosa, constituindo veios. Ocorrem, também, porosidades dos tipos fratura, vugular e fenestral. Alguns poros são preenchidos por sílica, calcita e gipsita. Os valores de Delta ^{13}C variaram entre -18,22 e 2,01‰ VPDB e os valores de Delta ^{18}O variaram entre -8,25 e 0,23‰ VPDB. Os valores baixos de Delta ^{13}C e Delta ^{18}O (mais para negativos) têm sido relacionados a níveis mais elevados do lago e às condições de água doce (salinidade < 1), durante a precipitação dos carbonatos. Os valores obtidos de Delta ^{13}C e Delta ^{18}O sugerem o predomínio de um paleolago hidrologicamente fechado. Os resultados geoquímicos associados aos resultados petrográficos forneceram informações que indicam que a origem do carbonato do topo C6 da Formação Crato está ligada à precipitação química. Não foi verificada a presença de organismos que pudessem indicar influência microbial na gênese dos carbonatos estudados neste trabalho.

Palavras-chave: Calcário laminado. Formação Crato. Bacia do Araripe.

ABSTRACT

The pre-salt, sedimentary interval found mainly in the Campos and Santos basins, is one of the largest oil fields in the marine subsoil that attracts much interest since its discovery. Because it is located in deep waters and has a large lithological variety, it is difficult to study it for the elaboration of a reservoir model, which leads to studies of similar models. In this context, the Araripe Basin stands out for having good outcrops in the succession of lacustrine Aptian carbonates (Andar Alagoas), of the Crato Formation, which are similar to the carbonates that occur in the pre-salt. The objective of this work was to characterize sedimentologically, stratigraphically and geochemically the carbonates at the top of the Crato Formation (level C6) and to observe their probable origin, since, several studies indicate that they are of microbial origin or that they were formed by chemical precipitation in conditions of hypersalinity, in addition to verifying the hydrological behavior of the final phase of this paleolago. To this end, seven outcrops were studied in the region that covers the municipalities of Santana do Cariri, Crato, Arajara, Barbalha, Nova Olinda and Porteiras. In the collected samples were made petrographic analyzes by optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM) and catholuminescence, besides geochemical analyzes of stable isotopes of C and O and X-ray Fluorescence with the major elements (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , P_2O_5 , MnO e PF). Laminated limestones were classified as iron oxide rich calcilutites, with framboidal pyrite and some ostracodes. Ductile structures such as microslumps and loop bedding and ruptile structures such as microfaults and microfractures were observed, often filled with blocous or fibrous calcite, forming veins. There are also porosities of fracture, vugular and fenestral types. Some pores are filled with silica, calcite and gypsum. The $\Delta^{13}\text{C}$ values varied between -18.22 and 2.01 ‰ VPDB and the $\Delta^{18}\text{O}$ values varied between -8.25 and 0.23 ‰ VPDB. The low values of $\Delta^{13}\text{C}$ and $\Delta^{18}\text{O}$ (more for negatives) have been related to higher levels of the lake and fresh water conditions (salinity <1), during the precipitation of carbonates. The values obtained from $\Delta^{13}\text{C}$ and $\Delta^{18}\text{O}$ suggest the predominance of a hydrologically closed paleolake. The geochemical results associated with the petrographic results provided information that indicates that the origin of the top C6 carbonate of the Crato Formation is linked to chemical precipitation. The presence of organisms that could indicate microbial influence on the genesis of the carbonates studied in this work was not verified.

Keywords: Laminated limestone. Formation Crato. Araripe Basin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Mapa de localização da Bacia do Araripe no contexto da Província Borborema. DN = Domínio Norte. DZT = Domínio de Zona Transversal. DS = Domínio Sul.....	18
Figura 2 -	Carta Estratigráfica da Bacia do Araripe adotada neste trabalho.....	19
Figura 3 -	Mapa com localização dos dados dos níveis carbonáticos (C1 a C6) que compõem a Formação Crato conforme denominação por Neumann (1999).....	22
Figura 4 -	Mapa de localização dos sete afloramentos estudados do topo do nível C6 da Formação Crato, Bacia do Araripe.....	25
Figura 5 -	Microfácies do nível C6 da Formação Crato proposto por Neumann (1999).....	31
Figura 6 -	Fotomicrografias da microfácies Calcário maciço (m1 encontrada no AFL 04, próximo à Mina Conceição Preta): a) Lama carbonática com fratura horizontal sob polarizadores cruzados (PX); b) Lama carbonática com pirita framboidal sob polarizadores paralelos (P//).....	32
Figura 7 -	Fotomicrografias da microfácies calcário com laminações plano-paralelas (m2). Figuras “a” e “b” sob polarizadores paralelos (P//). As bandas escuras possuem calcita microcristalina, matéria orgânica e pirita, e as lâminas claras são constituídas por calcita microcristalina sem a presença de pirita.....	32
Figura 8 -	Fotomicrografias do calcário com lâminas orgânicas de coloração marrom bem crenuladas e deformadas com presença de calcita recristalizada: imagens “a” e “b” (P//).....	33
Figura 9 -	Fotomicrografia do calcário laminado com <i>microslumps</i> localizado no centro da figura, destacado pelo contorno tracejado (P//).....	34
Figura 10-	Fotomicrografia do calcário laminado com <i>loop bedding</i> simples (P//).....	34
Figura 11-	Fotomicrografias da microfácies calcário com ostracodes (P//): a) Ostracode com início de piritização; b) Ostracode com as valvas constituídas por calcita e calcita microcristalina no seu interior; c) Ostracodes substituídos ora por calcita espática ora por calcita micrítica; d) Ostracode achatado com valva desarticulada e substituído por pirita.....	35
Figura 12-	Fotomicrografias da microfácies m7: a) Nível peloidal (P//); b) Pelóide deformando a laminação (P//).....	36
Figura 13-	Afloramento 1, na Mina Três Irmãos (TI), Município de Nova Olinda. A) Calcários intercalados com folhelhos, apresentando nível de calcita com	

	estrutura cone-em-cone (seta amarela); B) Destaque da imagem “A” para o nível de calcita com estrutura cone-em-cone.....	38
Figura 14-	Fotomicrografias das amostras do AFL 1: A) fratura preenchida por calcita recristalizada (PX); B) imagem “A” sob catodoluminescência (CL); C) valva desarticulada de ostracode substituída por pirita, indicada pela seta branca (PX); D) presença de pirita (P//).....	39
Figura 15-	Afloramento 2, na Pedreira do Aurélio (PA), Município de Nova Olinda. A) calcário intercalado com argilito; B) Destaque da imagem “A” mostrando a ocorrência de óxido de ferro (seta amarela).....	40
Figura 16-	Fotomicrografia de amostra do AFL 2 apresentando ocorrência de óxido de ferro e pirita (P//).....	40
Figura 17-	Afloramento 3, na entrada do Município Santana do Cariri (SC).....	41
Figura 18-	Calcário laminado com pseudomorfo de sal em forma de estrela no AFL 03, em Santana do Cariri.....	41
Figura 19-	Fotomicrografias das amostras do AFL 3 apresentando pirita. Imagens “A” e “B” (P//).....	42
Figura 20-	Afloramento 4, próximo à Mina Conceição Preta (MC), no Município de Santana do Cariri.....	42
Figura 21-	Fotomicrografias das amostras do AFL 4, apresentando processo de piritização: A) pirita disseminada (P//); B) imagem “A” sob catodoluminescência (CL); Imagens “C” e “D” pirita disseminada (PX)....	43
Figura 22-	Fotomicrografias das amostras do AFL 4, apresentando microfalhas e microfraturas preenchidas por calcita e matéria orgânica (MO): A) Microfratura preenchida por calcita espática (no centro da foto, seta amarela) e microfratura com uma parte preenchida por MO substituída por óxido de ferro (P//), seta branca; B) Imagem “A” sob catodoluminescência, a seta branca mostra MO substituída por óxido de ferro; C) Microfalhas deslocando microfraturas preenchidas por calcita espática e matéria orgânica que foi substituída por óxido de ferro (P//); D) Imagem “C” sob catodoluminescência (CL).....	44
Figura 23-	Fotomicrografias das amostras do AFL 4, apresentando sulfatos: A) Cristais de anidrita (NP); B) Imagem “A” sob polarizadores cruzados (PX); C) Gipsita e anidrita (P//); D) Imagem “C” sob polarizadores cruzados (PX) mostrando minerais de gipsita de coloração cinza e minerais coloridos de anidrita com alta birrefringência.....	45
Figura 24-	Fotomicrografias das amostras do AFL 4, apresentando sulfatos: A) cristais de barita (P//); B) imagem “A” sob polarizadores cruzados (PX); C) cristais de barita sob MEV; D) Imagem “C” sob polarizadores cruzados (PX); E) Imagem “C” sob catodoluminescência (CL); F) Espectro por	

	comprimento de onda mostrando picos dos elementos Bário (Ba) e Enxofre (S).....	46
Figura 25-	Afloramento 5, na Mina Caldas (MC), entre os Municípios Arajara-Barbalha.....	47
Figura 26-	Fotomicrografias das amostras do AFL 5, apresentando ostracodes: A) Ostracodes substituídos por calcita espática (P//), com destaque para valvas desarticuladas (setas amarelas); B) imagem “A” sob polarizadores cruzados (PX); C) Ostracode substituído por calcita espática (P//); D) Imagem “C” com destaque para valvas desarticuladas (setas vermelhas) (PX); E) ostracode piritizado (P//); F) Imagem “E” sob polarizadores cruzados (PX); G) Ostracode com valvas articuladas e desarticuladas (P//); H) Imagem “G” sob catodoluminescência (CL).....	48
Figura 27-	Afloramento 6, no Rio da Batateira (RB), Município do Crato.....	49
Figura 28-	Fotomicrografias do AFL 6, apresentando megaquartzos.....	49
Figura 29-	Fotomicrografias do AFL 6, apresentando esferulitos de calcedônia. Imagens A e C sob polarizadores paralelos (P//); B) Imagem “A” sob polarizadores cruzados (PX); D) Imagem “C” sob polarizadores cruzados (PX); E) Imagem “C” sob catodoluminescência (CL), onde a calcedônia se apresenta sem luminescência enquanto que a matriz micrítica apresenta luminescência.....	50
Figura 30-	Fotomicrografias do AFL 6, apresentando pelóides: A) Nível de pelóides (P//); B) Imagem “A” sob polarizadores cruzados (PX); C) Pelóides oxidando (P//); D) Imagem “C” sob catodoluminescência (CL).....	51
Figura 31-	Afloramento 7, oeste do Município de Porteiras (P).....	52
Figura 32-	Amostra de mão do AFL 7, apresentando calcário silicificado com laminações onduladas e crenuladas.....	52
Figura 33-	Fotomicrografias do AFL 7, exibindo várias microfalhas e microfraturas preenchidas por calcita recristalizada e matéria orgânica: A) Fraturas preenchidas por calcita recristalizada (P//); B) Imagem “A” sob catoluminescência (CL), com destaque para um possível ostracode silicificado (seta amarela) e a presença de sílica (seta branca). C) Microfraturas preenchidas por calcita recristalizada e matéria orgânica sendo deslocadas por microfalha (PX); D) Imagem “C” sob catoluminescência (CL), onde as áreas sem luminescência (escuras) indicam a presença de matéria orgânica.....	53
Figura 34-	Fotomicrografias mostrando cristais de calcita formados por precipitação química visualizados sob MEV. Imagens A e B são de amostras do AFL 2, Pedreira do Aurélio; imagens C e D são de amostras do AFL 5, Mina Caldas; E) amostra do AFL 6, Rio da Batateira; F) amostra do AFL 1, Mina Três Irmãos.....	54

Figura 35-	Fotomicrografias mostrando supercrescimento de cristais de calcita espática formando agregados e possíveis pelóides visualizados sob MEV. Nas imagens A e D foram observados agregados de cristais de calcita; B) Imagem “A” mais aproximada; C) Cristais de calcita agregados possivelmente formando pelóides. Imagens A, B, e C são amostras do AFL 4, Mina Conceição Preta; D) Imagem de amostra do AFL 3, Santana do Cariri.....	55
Figura 36-	Fotomicrografias mostrando cristais de calcita com aspecto filamentosos visualizados sob MEV: A) amostra do AFL 6, Rio da Batateira; B) amostra do AFL 1, Mina Três Irmãos.....	55
Figura 37-	Fotomicrografias mostrando estruturas radiais de gipsita visualizados sob MEV. Imagens A, B e C são das amostras do AFL 7, Porteirias; D) amostra do AFL 3, Santana do Cariri. As setas estão mostrando os centros das estruturas radiais de gipsita.....	56
Figura 38-	Fotomicrografias mostrando calcitas esféricas visualizadas sob MEV: A) cristais esféricos/subesféricos de calcita em amostras do AFL 2, Pedreira do Aurélio; B) imagem “A” mais aproximada.....	56
Figura 39-	Fotomicrografia mostrando ostracode sob MEV, encontrado no AFL 5, Mina Caldas.....	57
Figura 40-	Valores de $\delta^{13}\text{C}$ em carbonato marinho próximos de 0‰ e em carbonatos não-marinhos entre 0 e -18‰.....	57
Figura 41-	Perfil quimioestratigráfico (isótopos estáveis de C e O) da seção da Mina Três Irmãos (Nova Olinda, CE). Legenda: cor azul – calcário; cor verde – folhelho.....	59
Figura 42-	Perfil quimioestratigráfico (isótopos estáveis de C e O) da seção da Pedreira do Aurélio (Nova Olinda, CE). Legenda: cor azul – calcário; cor bege – argilito.....	60
Figura 43-	Perfil quimioestratigráfico (isótopos estáveis de C e O) da seção de Santana do Cariri, CE (entrada da cidade). Legenda: cor azul – calcário.....	61
Figura 44-	Perfil quimioestratigráfico (isótopos estáveis de C e O) da seção A da Mina Conceição Preta, CE). Legenda: cor azul – calcário.....	62
Figura 45-	Perfil quimioestratigráfico (isótopos estáveis de C e O) da seção C da Mina Conceição Preta, CE). Legenda: cor azul – calcário.....	63
Figura 46-	Perfil quimioestratigráfico (isótopos estáveis de C e O) da seção D da Mina Conceição Preta, CE). Legenda: cor azul – calcário.....	64
Figura 47-	Perfil quimioestratigráfico (isótopos estáveis de C e O) da seção da Mina Caldas (entre as cidades de Barbalha e Crato). Legenda: cor azul – calcário.....	64

Figura 48-	Perfil quimioestratigráfico (isótopos estáveis de C e O) da seção do Rio da Batateira (bairro do Lameiro, Crato, CE). Legenda: cor azul – calcário..	65
Figura 49-	Perfil quimioestratigráfico (isótopos estáveis de C e O) da seção de Porteiras. Legenda: cor azul – calcário.....	66
Figura 50-	Etapa de descida “rápida” do nível do paleolago Aptiano do topo do nível C6 da Formação Crato, antes da deposição da Formação Ipubi.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-	Localização e coordenadas dos sete afloramentos estudados.....	24
Tabela 2-	Localização das lâminas delgadas.....	26
Tabela 3-	Tabela de microfácies carbonáticas do topo de nível C6 segundo Cabral (2017).....	31
Tabela 4-	Resultados isotópicos de C e O das amostras de rochas carbonáticas do topo do nível C6 da Formação Crato.....	58
Tabela 5-	Resultados isotópicos de C e O e de análises químicas de elementos maiores (em %) obtidas por FRX de amostras carbonáticas da Mina Três Irmãos (AFL 1).....	59
Tabela 6-	Resultados isotópicos de C e O e de análises químicas de elementos maiores (em %) obtidas por FRX de amostras carbonáticas da Pedreira do Aurélio (AFL 2).....	59
Tabela 7-	Resultados isotópicos de C e O e de análises químicas de elementos maiores (em %) obtidas por FRX de amostras carbonáticas da entrada da cidade de Santana do Cariri (AFL 3).....	62
Tabela 8-	Resultados isotópicos de C e O e de análises químicas de elementos maiores (em %) obtidas por FRX de amostras carbonáticas da Mina Conceição Preta (AFL 4).....	63
Tabela 9-	Resultados isotópicos de C e O e de análises químicas de elementos maiores (em %) obtidas por FRX de amostras carbonáticas da Mina Caldas (AFL 5).....	65
Tabela 10-	Resultados isotópicos de C e O e de análises químicas de elementos maiores (em %) obtidas por FRX de amostras carbonáticas do Rio da Batateira (AFL 6).....	66
Tabela 11-	Resultados isotópicos de C e O e de análises químicas de elementos maiores (em %) obtidas por FRX de amostras carbonáticas de Porteiras (AFL 7).....	66
Tabela 12-	Resultados de análises químicas de elementos maiores (em %) obtidas por Fluorescência de raios - X (FRX) das amostras de rochas carbonáticas dos afloramentos do topo do nível C6 da Formação Crato. CP = Conceição Preta. P = Porteiras. SC = Santana do Cariri. TI = Três Irmãos. MC = Mina Caldas. PA = Pedreira do Aurélio. RB = Rio da Batateira. LD = limite de detecção (LD para Na ₂ O e TiO ₂ = 0,01). PF = perda ao fogo.....	70
Tabela 13-	Matriz de correlação dos elementos maiores.....	71

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	HIPÓTESE.....	16
1.2	OBJETIVOS.....	16
2	CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	18
2.1	BACIA DO ARARIPE.....	18
2.2	A TECTONOSEQUÊNCIA PÓS-RIFTE I.....	21
2.3	FORMAÇÃO CRATO.....	22
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	24
3.1	ETAPAS DE CAMPO.....	24
3.2	ANÁLISES DE LABORATÓRIO.....	24
3.2.1	Análises Petrográficas.....	26
3.2.1.1	Catodoluminescência.....	26
3.2.1.2	Microscopia Eletrônica de Varredura.....	27
3.2.2	Análises Geoquímicas.....	27
3.2.2.1	Isótopos Estáveis.....	28
3.2.2.2	Fluorescência de Raios-X.....	28
4	O NÍVEL C6 DA FORMAÇÃO CRATO.....	30
4.1	PARTE SUPERIOR (TOPO) DO NÍVEL C6 DA FORMAÇÃO CRATO.....	30
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37
5.1	AFLORAMENTOS ESTUDADOS NO TOPO DO NÍVEL C6 DA FORMAÇÃO CRATO.....	37
5.2	ANÁLISES DAS AMOSTRAS DE ROCHAS CARBONÁTICAS SOB MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV).....	44
5.3	ISÓTOPOS ESTÁVEIS DE C E O DAS ROCHAS CARBONÁTICAS DO TOPO DO NÍVEL C6 DA FORMAÇÃO CRATO.....	46
5.3.1	Isótopos estáveis de C e O e ambiente lacustre.....	47
5.3.2	Isótopos estáveis de C e O e o comportamento hidrológico do paleolago nos afloramentos estudados.....	50
5.3.3	Isótopos estáveis de C e O e o descenso do nível do lago.....	67
5.4	ANÁLISES GEOQUÍMICAS DOS PRINCIPAIS ÓXIDOS DAS ROCHAS CARBONÁTICAS DO TOPO DO NÍVEL C6 DA FORMAÇÃO CRATO....	69
6	CONCLUSÕES.....	72
	REFERÊNCIAS.....	73

1 INTRODUÇÃO

Dentre as bacias interiores do Nordeste brasileiro, a Bacia do Araripe é a mais extensa (9.000 km²) e se destaca pelo Grupo Santana, estratigraficamente muito estudado, por possuir extensas jazidas de gipsita e especialmente por compor o principal jazigo brasileiro reconhecido em todo mundo, principalmente pela rica paleoictiofauna preservada em concreções carbonáticas (ASSINE, 1992).

A configuração geotectônica da Bacia do Araripe está associada ao evento de rifteamento do Gondwana, que pode ser dividido em três estágios sucessivos: pré-rifte, sin-rifte e pós-rifte (PONTE; PONTE FILHO, 1996). Neste último estágio, é registrada a sedimentação do Andar Alagoas na Bacia do Araripe que é representado pelos depósitos das formações Barbalha, Crato, Ipubi e Romualdo (ASSINE et al., 2014).

A seção sedimentar do Andar Alagoas tem sido alvo de crescente interesse, principalmente pelas rochas carbonáticas encontradas neste intervalo, devido às descobertas de petróleo no “pré-sal” das bacias de Santos e Campos. Algumas fácies reservatórios ocorrem em carbonatos microbiais nessas bacias (MATSUDA et al., 2014), e essas fácies são um dos principais focos dessas descobertas. Tendo em vista, a grande quantidade de petróleo encontrada nos carbonatos de origem microbial, instituições de pesquisa e a Petrobras se interessaram em aprofundar o conhecimento sobre a origem e evolução desses carbonatos, usando sistemas deposicionais cronocorrelatos com registro de sedimentação carbonática.

Os depósitos carbonáticos Aptianos da Formação Crato vêm sendo estudados por apresentarem semelhanças litoestratigráficas a depósitos carbonáticos geradores e reservatórios de petróleo. Esses depósitos apresentam estratigrafia e sedimentologia semelhantes ao “Calcário Trairi” do campo de Xaréu, Bacia do Ceará, que é tanto gerador como reservatório de petróleo (SILVA; NEUMANN, 2003); e apresentam semelhanças aos carbonatos das bacias de Campos e Santos pela sua origem microbial (BARDOLA, 2015; CATTO, 2015).

Sobre a origem dos carbonatos da Formação Crato, foram desenvolvidos estudos que afirmam que sua origem ocorreu por ação microbial (BARDOLA, 2015; CATTO, 2015; WARREN et al., 2017). Entretanto, outros estudos sugerem que foram originados por precipitação autigênica em condições de hipersalinidade (HEIMHOFER; MARTILL, 2007; HEIMHOFER et al., 2010).

No intuito de contribuir para um melhor conhecimento da origem dos carbonatos da Formação Crato, este estudo tem como objetivo principal caracterizar os carbonatos lacustres do topo da Formação Crato, os quais correspondem ao nível carbonático lacustre C6

(NEUMANN, 1999; NEUMANN; CABRERA, 1999), por meio de estudos geoquímicos e sedimentológicos.

1.1 HIPÓTESE

Há uma discussão entre pesquisadores sobre a origem dos carbonatos da Formação Crato. Alguns autores advogam que a sua origem ocorreu por ação microbiana (CATTO, 2015; BARDOLA, 2015; WARREN et al., 2017), enquanto que outros autores sugerem que sua ocorrência foi por precipitação química em condições de hipersalinidade (HEIMHOFER; MARTILL, 2007; HEIMHOFER et al., 2010). Neumann (1999) sugeriu as duas origens, tanto por precipitação química, quanto por agentes microbianos, dependendo da área e da profundidade em que se encontram os níveis carbonáticos.

Levando em consideração os estudos supracitados, os quais inferem seus resultados distintos a toda Formação Crato, delimitar uma área menor para tal estudo proporciona resultados mais específicos. O nível C6 foi escolhido para a realização deste estudo pelo fato de estar em contato com a discordância, vista em toda Bacia do Araripe, que separa a Formação Crato dos evaporitos da Formação Ipubi.

Sendo assim, neste trabalho será investigada a hipótese de que a origem dos calcários laminados (laminitos) Aptianos do topo do nível C6 da Formação Crato tenha sido tanto por precipitação química quanto microbiana.

Outra hipótese a ser averiguada é o comportamento hidrológico do paleolago Araripe. Baseado no trabalho de Neumann (1999), supõe-se que o topo do nível C6 da Formação Crato comportou-se como um lago hidrologicamente fechado.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral caracterizar sedimentologicamente, estratigraficamente e geoquimicamente as camadas carbonáticas do nível C6 do topo da Formação Crato da Bacia do Araripe, a fim de obter informações sobre a configuração paleoambiental e paleolimnológica dessa unidade carbonática. Para tanto, tem como objetivos específicos:

- Analisar a interação entre a atividade química e microbiana na deposição do topo do nível C6 da Formação Crato, usando o MEV (para observar a presença ou não de

microalgas) e abordagens geoquímicas (análise isotópica e de fluorescência de raios-X);

- Estudar o comportamento do paleolago Araripe do ponto de vista hidrológico (se hidrologicamente aberto ou fechado), utilizando os resultados isotópicos de C e O.

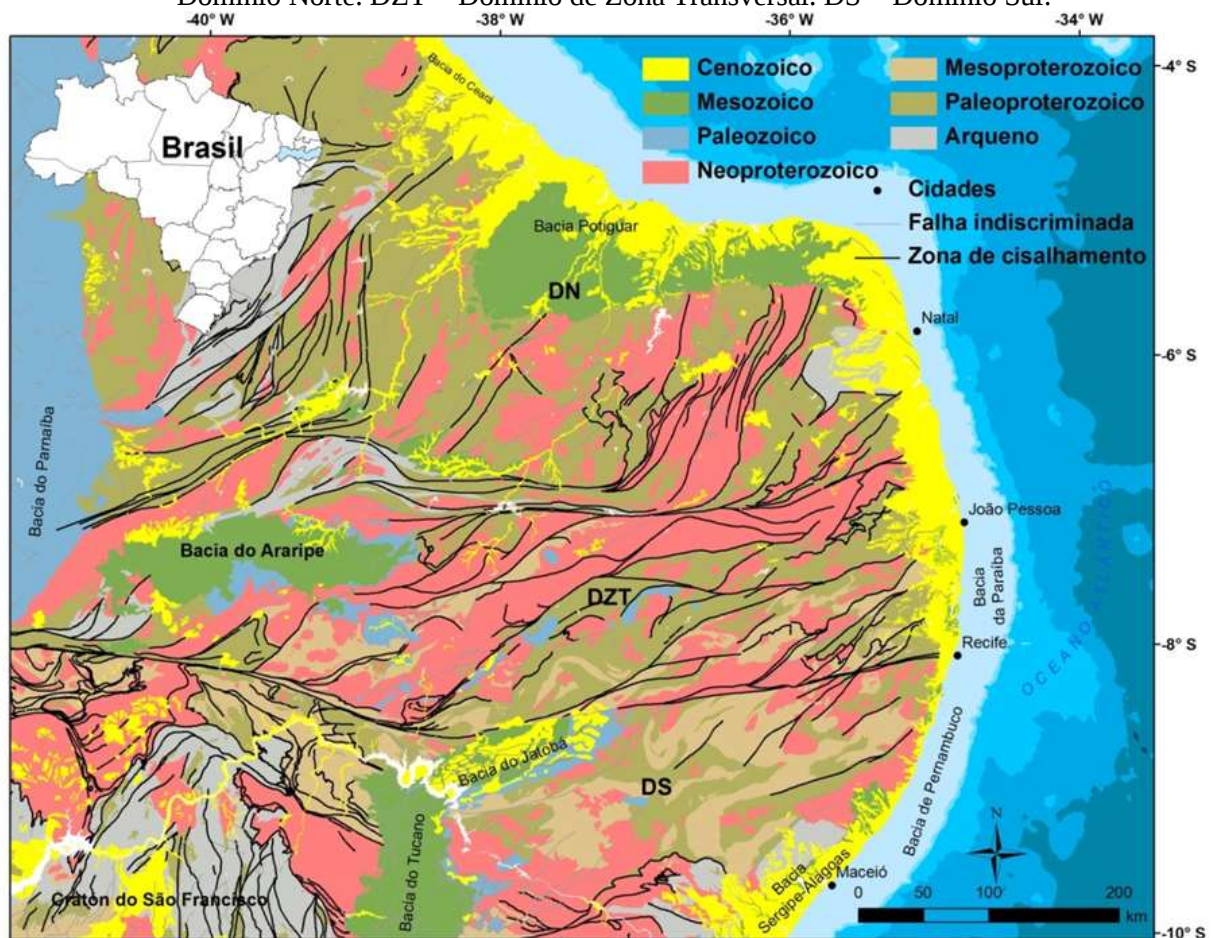
2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

Nesta seção será abordado o contexto geológico onde está inserida a Bacia do Araripe e, especialmente a Formação Crato, área de estudo do presente trabalho.

2.1 BACIA DO ARARIPE

A Bacia do Araripe localiza-se no Nordeste do Brasil, em terrenos precambrianos da Zona Transversal da Província Borborema (BRITO NEVES et al., 2000), e ocupa parte dos Estados do Piauí, Pernambuco e Ceará (VIANA; NEUMANN, 2002), sendo uma das mais extensas bacias interiores do Nordeste, atingindo uma área aproximadamente de 9.000 Km² (ASSINE, 1992) (Figura 1).

Figura 1 - Mapa de localização da Bacia do Araripe no contexto da Província Borborema. DN = Domínio Norte. DZT = Domínio de Zona Transversal. DS = Domínio Sul.



Fonte: Modificado de Brito Neves et al. (2000) e Gratzer et al. (2013).

A Província Borborema foi formada por um processo de colisão complexo associado com o movimento convergente das placas, envolvendo possivelmente amalgamação e acréscimo de microplacas. Este processo foi consolidado no final do evento Brasileiro (JARDIM DE SÁ et al., 1981). Essa área foi afetada pelo extenso rifteamento Jurássico–Cretáceo, processo este relacionado com a separação entre África e América do Sul durante o desmembramento do Pangeia (BERTHOU, 1990; MATOS, 1992; MABESOONE, 1994; PONTE; PONTE FILHO, 1996).

O arcabouço estratigráfico da Bacia do Araripe é constituído por megassequências geradas em regimes tectônicos distintos, sendo assim configurada como uma bacia de evolução poligenética (ASSINE, 1990, 1992, 2007; PONTE; APPI, 1990; PONTE; PONTE FILHO, 1996). Sua evolução tectono-sedimentar recebeu várias classificações. Assine et al. (2014) e Neumann e Assine (2015) agruparam estas diferentes propostas identificando quatro grandes unidades limitadas por discordâncias regionais (Figura 2), são elas: Sequência Paleozoica, Supersequência Pré-Rifte, Supersequência Rifte e Supersequência Pós-Rifte, esta última subdivide-se em Sequência Pós-Rifte I e Sequência Pós-Rifte II.

Figura 2 - Carta Estratigráfica da Bacia do Araripe adotada neste trabalho.

MESOZOICO	CRETÁCIO	ALBIANO/ CENOMANIANO	POS-RIFTE II	GRUPO ARARIPE	Formação Exu Formação Araripina
		APTIANO	POS-RIFTE I	GRUPO SANTANA	Formação Romualdo Formação Ipubi Formação Crato Formação Barbalha
		DISCORDÂNCIA PRÉ-APTIANO			
		HALTERIANO/ BERRIASIANO?	RIFTE	GRUPO VALE DO CARIRI	Formação Abaiara
		JURÁSSICO	PRÉ-RIFTE		Formação Missão Velha Formação Brejo Santo
	DISCORDÂNCIA PRÉ-MEZOSOICO				
PALEOZOICO		DEVONIANO?	BETA	Formação Cariri	
	DISCORDÂNCIA PRÉ-FANEROZOICO				
PRÉ- CAMBRIANO		PROTEROZOICO	EMBASAMENTO CRISTALINO (Grupos Granjeiro-Seridó, Cachoeirinha e Suítes Intrusivas)		

Fonte: Neumann e Assine (2015).

A Sequência Paleozoica de idade Siluro-Devoniana é constituída pela Formação Mauriti definida por Gasparly e Anjos (1964), equivalente à Formação Cariri definida por Beurlen (1962). É caracterizada por arenitos de granulação média a muito grossa (BEURLLEN, 1962; ASSINE, 1992, 1994, 2007; PONTE; PONTE FILHO, 1996; ARAI, 2006) interpretados como fácies de sistemas fluviais entrelaçados (ASSINE, 1992, 1994, 2007).

A Supersequência Pré-Rifte de idade Neojurássica é constituída pela Formação Brejo Santo, caracterizada por folhelhos e lamitos vermelhos e representa a parte basal da primeira fase lacustre da bacia, evidenciando um ambiente lacustre raso com influência fluvial e eólica (GASPARY; ANJOS 1964; ASSINE, 2007), e pela Formação Missão Velha (BEURLLEN, 1962; PONTE; APPI, 1990) a qual é caracterizada por arenitos quartzosos e conglomeráticos representando uma associação faciológica de planícies fluviais de sistemas entrelaçados caracterizados por canais rasos e de alta energia (BEURLLEN, 1962; ASSINE, 2007).

A Supersequência Rifte de idade Neocomiana é representada pela Formação Abaiara, caracterizada por folhelhos silticos e siltitos vermelhos com intercalações lateralmente descontínuas de camadas de arenitos finos. Essa formação foi sedimentada em tratos deposicionais continentais, com lagos rasos sendo substituídos por planícies fluviais de canais entrelaçados (ASSINE, 2007).

A Supersequência Pós-Rifte de idade neoaptiana-eoalbiana foi dividida por Assine et al. (2014) e Neumann e Assine (2015) em duas sequências (I e II). A Sequência Pós-Rifte I corresponde às formações Barbalha, Crato, Ipubi e Romualdo, as quais serão abordadas no tópico seguinte, e a Sequência Pós-Rifte II corresponde às formações Araripina e Exu.

Segundo Assine (2007), a Formação Arajara é equivalente à Formação Araripina de Ponte e Appi (1990). É caracterizada por intercalações de arenitos finos com lâminas e clastos de argila.

A Formação Exu é constituída por arenitos grossos e argilosos intercalados com níveis de arenitos conglomeráticos (NEUMANN, 1999). Esses arenitos fluviais que recobrem a Formação Araripina em discordância erosiva representam um novo evento tectono-sedimentar (ASSINE, 2007).

Para este trabalho foi adotada a proposta de Neumann (1999) e Neumann e Cabrera (1999) que elevaram os membros Crato, Ipubi e Romualdo à categoria de Formação, antes pertencentes à Formação Santana. Esta, por sua vez, foi elevada à categoria de Grupo englobando as formações Barbalha, Crato, Ipubi, Romualdo e Araripina.

2.2 A TECTONOSEQUÊNCIA PÓS-RIFTE I

A Tectonosequência Pós-rifte I está constituída pelas formações Barbalha, Crato, Ipubi e Romualdo.

A Formação Barbalha de idade neoptiana (LIMA; PERINOTTO, 1984) representa o estágio inicial da tectonosequência pós-rifte, constituída por arenitos com intercalações de folhelhos verdes a avermelhados e por níveis delgados de conglomerados (ASSINE, 2007). Essa Formação compreende dois ciclos fluviais, com granodecrescência ascendente, separados por um intervalo pelítico-carbonático lacustre, que foi denominado de “camadas Batateiras” por Hashimoto et al. (1987).

A Formação Crato representa expansões e retrações lacustres devido à maior ou menor entrada de água no sistema e à formação de níveis descontínuos de calcários laminados, que se interdigitam com folhelhos, siltitos e arenitos calcíferos e margas (NEUMANN, 1999). Apresenta um arcabouço fossilífero abundante e diversificado (MABESOONE; TINOCO, 1973) caracterizado pela ausência de formas marinhas indicando ambientes de sedimentação lacustres (NEUMANN, 1999). No topo da Formação Crato ocorre uma discordância caracterizada por uma superfície ondulada com calcretes e silcretes, assim como gretas de dessecação que são indícios de uma exposição subaérea; que afetou tanto o último nível de calcários laminados quanto litologias adjacentes formadas devido à variação lateral entre os diversos sistemas do lago.

Acima dessa discordância foi depositada a Formação Ipubi, durante o Albiano Superior (SILVA, 2017), que representa a fácies evaporítica do sistema lacustre, composta por gipsita e anidrita com intercalações de folhelhos escuros (MARTILL, 1993). É caracterizada na parte basal por folhelhos negros, fossilíferos e betuminosos. Com a descida do nível do lago, formaram-se lentes de evaporitos, que hoje são representados principalmente por gipsita e secundariamente por anidrita. Esse pacote de folhelhos e evaporitos apresenta espessura que varia de 30 a 40 metros. No topo da sucessão evaporítica ocorre nova discordância regional que causou exposição, dissolução e erosão dos evaporitos, caracterizada por uma fina camada de brecha, com aproximadamente 10 a 20 cm de espessura.

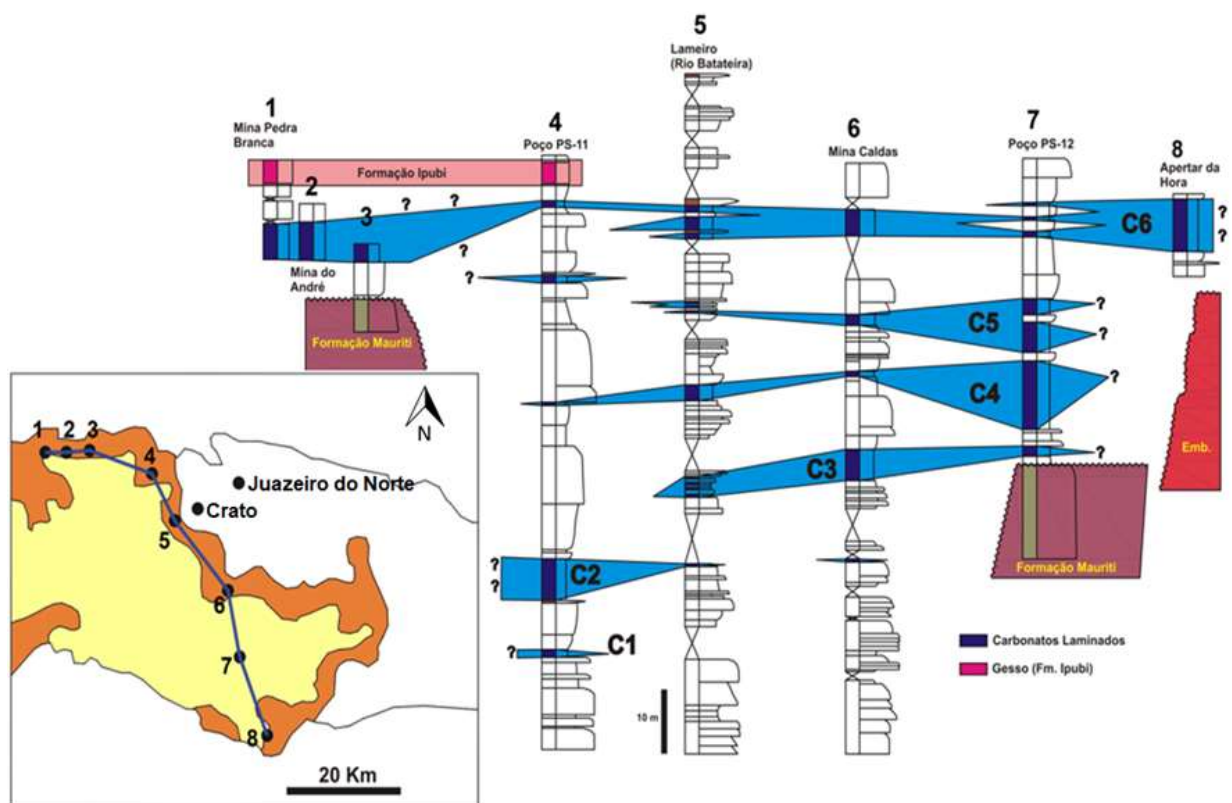
Sobre esta brecha ocorrem os depósitos da Formação Romualdo, cuja base é composta por camadas estratificadas de arenitos finos a médios, por vezes conglomerados por clastos de gipsita, intercalados com folhelhos esverdeados calcíferos. A porção superior da Formação Romualdo apresenta granodecrescência ascendente, apresentando no topo argilitos verdes e escuros e níveis de calcário maciço, contendo concreções carbonáticas (NEUMANN, 1999). A

interpretação sugere que as unidades Ipubi e Romualdo representam o incremento da influência marinha (ASSINE, 2007).

2.3 FORMAÇÃO CRATO

Segundo Neumann (1999), a Formação Crato representa o registro de um sistema lacustre, predominantemente carbonático, que é constituído por seis níveis de calcários laminados (C1 a C6), intercalados por níveis de ritmitos formados por camadas de calcário, siltito e arenito carbonáticos e margas. Esta deposição ocorreu nas porções mais profundas do paleolago Araripe, as quais ficaram protegidas do aporte sedimentar terrígeno (Figura 3).

Figura 3 – Mapa com localização dos dados dos níveis carbonáticos (C1 a C6) que compõem a Formação Crato conforme denominação por Neumann (1999).



Fonte: Modificado de Neumann (1999).

O nível C1 foi detectado em poço na região da borda central norte da bacia (poço PS11), apresentando nessa área cerca de 1 m de espessura com extensão total desconhecida. Este nível de calcários laminados ocorre intercalado a camadas de folhelhos lacustres.

O nível C2 apresenta três subconjuntos de camadas de calcário, C2a, C2b (30 cm) e C2c, que foram detectados em poço na borda norte da bacia (poço PS11), em poços na região da Mina Caldas e na região do perfil do Rio da Batateira.

O nível C3 foi detectado em poço na borda sul da bacia (OS 11) e nos perfis do Rio da Batateira e da Mina Caldas. Este nível já apresenta um deslocamento da deposição para SE em relação aos níveis anteriores. Este nível apresenta uma espessura de 5 a 10m, e sua extensão chega a dezenas de quilômetros.

O nível C4 apresenta dois subconjuntos denominados C4a e C4b, que foram detectados em poço na borda sul da bacia (PS 12 – nível C4a) e no perfil do Rio da Batateira (C4b).

O nível C5 também ocorre dividido em dois subníveis, C5a e C5b. A parte basal (C5a) foi observada em poço na borda sul da bacia (OS 12), e a parte superior (C5b) foi detectada em poço na borda norte da bacia (OS 12) e no perfil do Rio da Batateira.

O nível C6 representa a deposição carbonática mais extensa de toda a sequência lacustre Aptiana. A porção basal deste nível foi detectada em todos os perfis e poços executados para a estratigrafia da bacia na região da chapada, exceto o poço na borda norte da bacia no Ponto 4 da Figura 3 (PS 11), onde se observa a sua parte superior. Este nível de carbonatos laminados ocorre intercalado por siltitos argilosos, calcíferos e margas. No topo deste intervalo ocorrem feições que sugerem a ocorrência de exposição subaérea e erosão, como calcretes, e retrabalhamento de fragmentos do calcário laminado. O topo do nível C6 é o objeto de estudo deste trabalho.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi realizado a partir de levantamento bibliográfico, etapas de campo (descrição de afloramentos e coletas de amostras) e análises de laboratório (microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura (MEV) com espectrômetro de comprimento de ondas acoplado (WDS), isótopos estáveis de Carbono e Oxigênio e Fluorescência de raios - X).

3.1 ETAPAS DE CAMPO

Duas etapas de campo foram realizadas compreendendo a região que abrange os municípios de Nova Olinda, Santana do Cariri, Arajara, Barbalha, Crato e Porteiras. Nos afloramentos estudados (Figura 4) foram feitas descrições sedimentológicas e litológicas e a coleta de amostras. Cada afloramento foi georeferenciado com GPS baseado em coordenadas UTM (Tabela 1).

Tabela 1 – Localização e coordenadas dos sete afloramentos estudados.

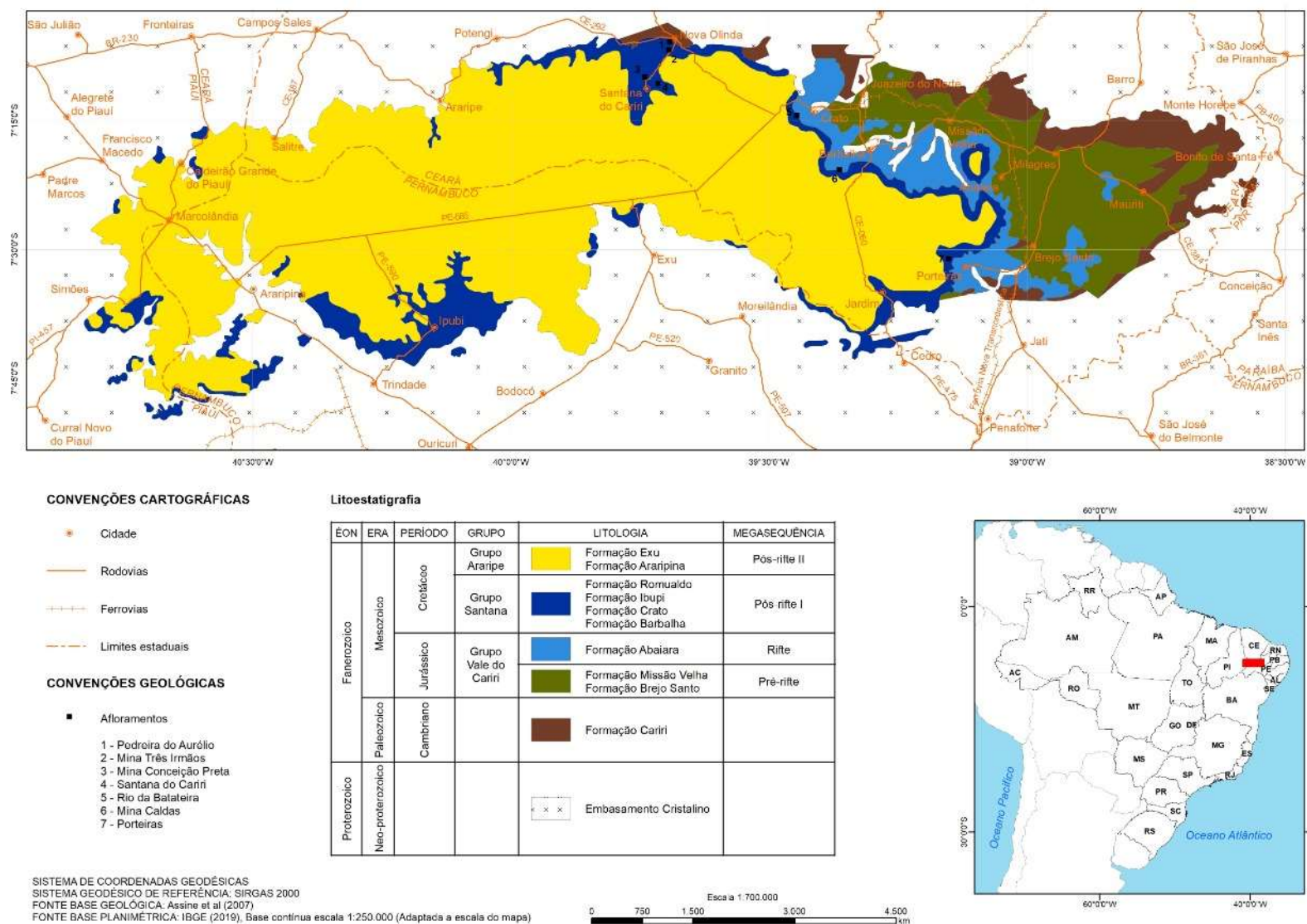
AFLORAMENTOS	LOCALIZAÇÃO		COORDENADAS	
	Município	Toponímia	Longitude	Latitude
AFL 01	Nova Olinda	Mina Três Irmãos	422927	9213348
AFL 02	Nova Olinda	Pedreira do Aurélio	422475	9212179
AFL 03	Santana do Cariri	Entrada da cidade	418510	9206479
AFL 04	Santana do Cariri	Mina Conceição Preta	420678	9204600
AFL 05	Arajara-Barbalha	Mina Caldas	459476	9186848
AFL 06	Crato	Rio da Batateira	449537	9197952
AFL 07	Porteiras	Oeste da cidade	482766	9167537

Fonte: a autora (2019).

3.2 ANÁLISES DE LABORATÓRIO

Para o presente estudo foram realizadas análises laboratoriais, tais como: análises petrográficas utilizando Catodoluminescência (CL) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV); e, análises geoquímicas com isótopos estáveis de carbono e oxigênio e Fluorescência de Raios-X (FRX). Todas as análises foram realizadas nos laboratórios da própria Universidade Federal de Pernambuco, exceto a confecção de parte das lâminas petrográficas que foram confeccionadas na CPRM-PE.

Figura 4 – Mapa de localização dos sete afloramentos estudados do topo do nível C6 da Formação Crato, Bacia do Araripe.



Fonte: Modificado de Assine (2007).

3.2.1 Análises Petrográficas

As análises petrográficas permitiram descrever as feições texturais e estruturais, a composição mineralógica (grãos, cimento e matriz) e paleontológica, além de analisar a porosidade. Com base nessas análises, os carbonatos estudados foram classificados conforme as classificações de Grabau (1904) e Dunhan (1962) para rochas carbonáticas.

A partir das amostras coletadas, foram confeccionadas lâminas delgadas no Laboratório de Laminação da UFPE e da CPRM – Recife. Em um total de 38 lâminas delgadas (Tabela 2) foi feita a descrição petrográfica utilizando um microscópio óptico de marca OLYMPUS, modelo BX-41 no Laboratório de Microscopia Óptica do Departamento de Geologia da UFPE.

Tabela 2 – Localização das lâminas delgadas.

AFLORAMENTOS	LOCALIZAÇÃO	Nº DE LÂMINAS
AFL 01	Nova Olinda - Mina Três Irmãos (TI)	5
AFL 02	Nova Olinda - Pedreira do Aurélio (PA)	8
AFL 03	Santana do Cariri - Entrada da cidade (SC)	5
AFL 04	Santana do Cariri - Mina Conceição Preta (CP)	8
AFL 05	Arajara-Barbalha - Mina Caldas (MC)	4
AFL 06	Crato - Rio da Batateira (RB)	6
AFL 07	Porteiras - Oeste da cidade (P)	2
TOTAL DE LÂMINAS ESTUDADAS		38

Fonte: a autora (2019).

3.2.1.1 Catodoluminescência

A Catodoluminescência (CL) é uma técnica que tem sido muito utilizada na área da petrologia, principalmente na petrologia sedimentar (MARSHALL, 1988). Esta técnica fornece informações sobre a distribuição espacial de alguns elementos traços, como o Fe^{2+} e Mn^{2+} , em cristais de calcita, dolomita e cimentos diversos (SCHOLLE, 2003).

O resultado produzido pela CL é normalmente interpretado como: brilhantemente luminescente, luminescente, pouco luminescente e não luminescente. Geralmente, a luminescência é maior quando o Mn^{2+} é incorporado ao retículo cristalino da calcita, enquanto a incorporação de Fe^{2+} reduz ou extingue a luminescência (BUDD et al., 2000).

A CL foi utilizada como método complementar à petrografia convencional, uma vez que, destaca feições que não são facilmente reconhecidas na microscopia óptica por luz transmitida. É frequentemente aplicada para o mapeamento petrográfico de áreas cimentadas,

análise temporal de gerações de fraturas e, principalmente, para a caracterização dos processos diagenéticos (MEYERS, 1974).

As análises de CL do presente trabalho foram realizadas em um equipamento *Cambridge Image Technology Ltd.* (CITL), modelo CL8200, acoplado à um microscópio óptico, do Laboratório de Catodoluminescência no Departamento de Geologia da UFPE.

3.2.1.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) pode fornecer rapidamente informações sobre a morfologia e identificação de elementos químicos de uma amostra sólida, as características microestruturais de objetos sólidos, além de fornecer a aparência tridimensional da imagem das amostras (DEDAVIT et al., 2007), isso porque possui alta resolução (melhor que 1 nm) (NAGATANI et al., 1987). Devido à essa capacidade, o MEV é utilizado em várias áreas do conhecimento.

A utilização do MEV foi essencial para a identificação de feições pouco perceptíveis pela análise petrográfica convencional, e para a investigação de micro-organismos nas amostras estudadas. As amostras foram revestidas com carbono e analisadas num aparelho JEOL JSM 6460 com espectrômetro de dispersão de comprimento de onda (WDS; Marca Oxford) no Laboratório de Dispositivos e Nanoestruturas (LDN) da UFPE.

3.2.2 Análises Geoquímicas

Estudos com dados dos isótopos estáveis de carbono e oxigênio são amplamente utilizados em rochas sedimentares como um indicador para condições deposicionais e fácies (paleoambiente, paleossalidade, paleotemperatura, etc.) porque eles refletem principalmente a composição da água de onde o carbonato precipitou em um ambiente lacustre (TALBOT, 1990) ou marinho (REINHARDT et al., 2003).

Alguns pesquisadores analisaram o comportamento isotópico de C e O em carbonatos lacustres aptianos em algumas bacias interiores do nordeste do Brasil como Neumann (1999), na Bacia do Araripe; Gratzner et al. (2013), na Bacia do Jatobá; e Silveira et al. (2014), na Sub-bacia de Tucano Norte.

A análise química dos elementos maiores, reportada em forma de óxidos maiores, realizada por espectrometria de fluorescência de raios-X, têm sido bastante utilizadas nos estudos de rochas sedimentares (COSTA et al., 2010; TORRES et al., 2018).

Análises geoquímicas de elementos maiores, menores e ETR também foram realizadas em calcários da Formação Crato, na Bacia do Araripe (NEUMANN, 1999), mas não exatamente no topo da unidade carbonática C6.

3.2.2.1 Isótopos Estáveis

A análise de isótopos estáveis de carbono e oxigênio em carbonatos lacustres é uma ferramenta de grande relevância para reconstruir a história deposicional e paleogeográfica de paleolagos (TALBOT, 1990; TALBOT; KELTS, 1989).

Muitos estudos sobre a composição isotópica de carbono e oxigênio foram realizados em carbonatos lacustres. Na literatura podem ser destacados os trabalhos de: McKenzie (1985), Kelts e Talbot (1990), Talbot (1990), Fronval et al. (1995), Valero-Garcês et al. (1997), Camoin et al. (1997), Leng e Marshall (2004), Paz e Rossetti (2006) e Maslen et al. (2011).

As análises de isótopos estáveis de carbono e oxigênio, para este estudo, foram realizadas em 38 amostras. De cada amostra foram utilizados 20mg de pó que foram submetidos a extrações do CO₂ em uma linha de extração convencional de alto vácuo depois de reagir com ácido ortofosfórico a 25°C por 1 dia (3 dias, quando dolomita está presente). O gás CO₂ obtido foi analisado em espectrômetro de massa *ThermoFinnigan Delta V Advantage*. Os resultados foram expressos na notação δ em permil (‰) relativo ao padrão em VPDB e V-SMOW. Os dados isotópicos de carbono e oxigênio foram calibrados com padrões internacionais (*Vienna Pee Dee Belemnite* - VPDB) (CRAIG, 1957). As análises isotópicas foram realizadas no Laboratório de Isótopos Estáveis (LABISE) do Departamento de Geologia da UFPE.

3.2.2.2 Fluorescência de Raios-X

A Fluorescência de raios-X (FRX) é uma técnica não destrutiva que possibilita identificar os elementos químicos em uma amostra (análise qualitativa) como também determinar a proporção (concentração) de cada elemento presente na amostra (OLIVEIRA, 2011).

As análises de Fluorescência de raios-X foram realizadas no Laboratório de Isótopos Estáveis (LABISE) do Departamento de Geologia da UFPE.

Para estas análises, uma porção de amostra foi secada em estufa a 110°C. Parte dessa amostra foi levada a uma mufla a 1.000°C por 2 horas para determinação da perda ao fogo. Outra parte da amostra foi prensada em cápsulas de alumínio com 30 toneladas de força. As

pastilhas prensadas foram analisadas em espectrômetro de fluorescência de raios-X *Rigaku* modelo *ZSX Primus II*, equipado com tubo de Rh e 7 cristais analisadores.

4 O NÍVEL C6 DA FORMAÇÃO CRATO

O nível C6 da Formação Crato é composto praticamente por um pacote contínuo de calcários laminados, também chamado de laminitos, apresentando mais próximo ao topo uma alternância de níveis carbonáticos e argilitos, folhelhos, siltitos e por vezes, arenitos finos. Este nível C6 está bem exposto nas pedreiras da região de Nova Olinda – Santana do Cariri, devido à exploração do calcário laminado como rocha ornamental.

Na análise petrográfica dos laminitos do nível C6, Neumann (1999) identificou cinco microfácies: Microfácies sm1 – ritmito argila-carbonato; Microfácies sm2 - lâminas plano-onduladas e onduladas com estruturas do tipo loop bedding; Microfácies sm4 - lâminas plano-onduladas e onduladas com microslumps e microripples; Microfácies sm5 - lâminas plano-onduladas e plano-paralelas; e Microfácies sm6 - lâminas plano-onduladas e plano-paralelas com ostracodes (Figura 5).

4.1 PARTE SUPERIOR (TOPO) DO NÍVEL C6 DA FORMAÇÃO CRATO

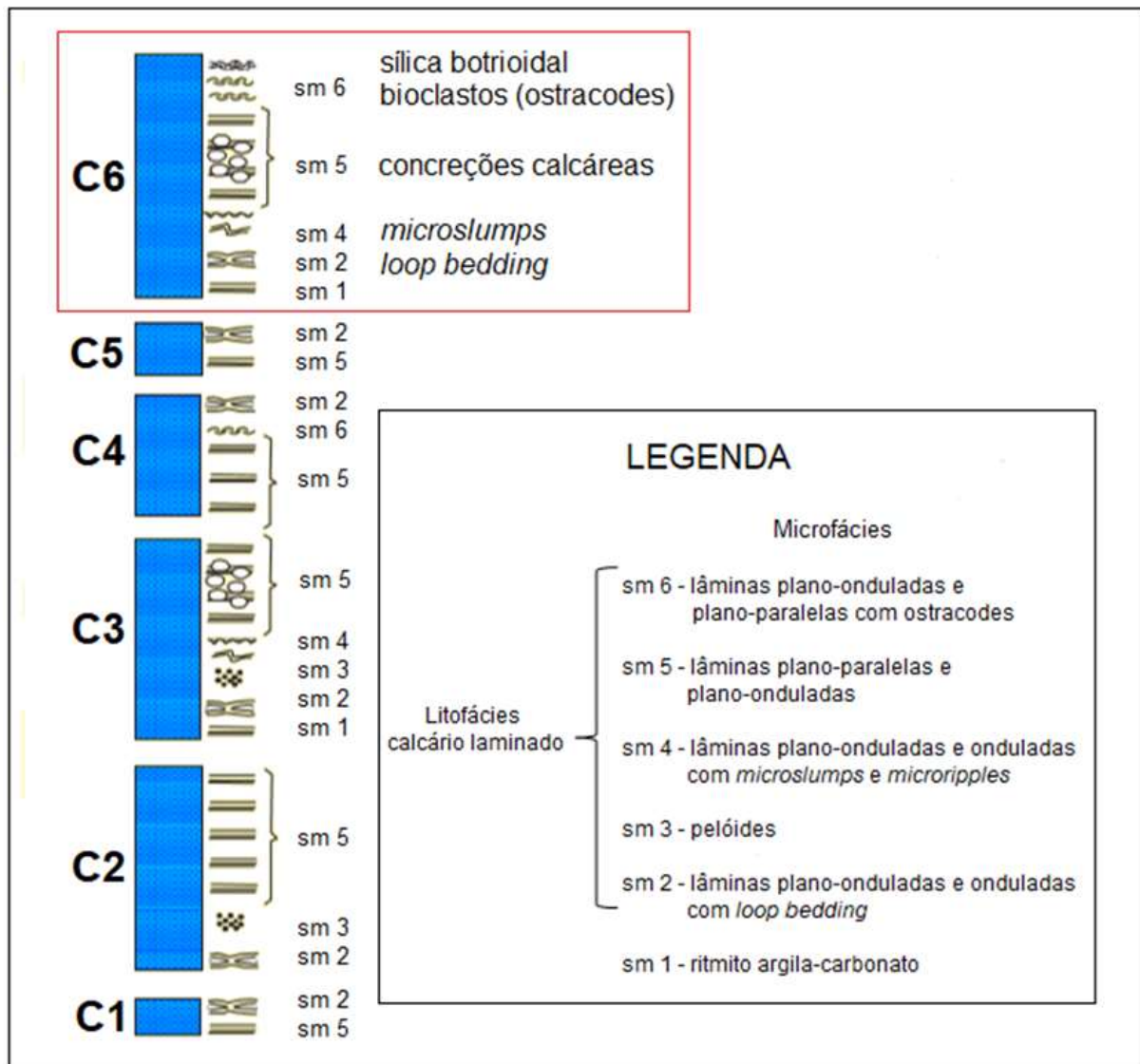
O estudo do topo do nível C6 da Formação Crato faz parte de uma grande pesquisa que compreende uma Dissertação de Mestrado realizada por Cabral (2017), um artigo publicado por Cabral et al. (2019) e esta Tese de Doutorado.

Os trabalhos de Cabral (2017) e Cabral et al. (2019) estudaram os processos diagenéticos dos carbonatos do topo do nível C6 e definiram as microfácies encontradas, as quais serão abordadas neste trabalho.

Segundo Cabral (2017), foi observada apenas a litofácies calcário laminado no topo do nível C6, corroborando com a proposta de Neumann et al. (1999) (Figura 5). Os calcários laminados apresentam coloração bege a marrom e, por vezes, cinza a azulado, apresentando laminações plano-paralelas e onduladas, presença de estruturas de escorregamento (*micro slumps*), microfalhas, microfraturas, *loop bedding*, ostracodes e pelóides

Cabral (2017) e Cabral et al. (2019) identificaram sete microfácies no topo da camada C6 (Tabela 3). A Microfácies calcário maciço (m1) é composta por uma lama carbonática de calcita micrítica, com coloração que varia de bege a marrom clara sem laminações aparentes, apresentando pirita framboidal e manchas de óxido/hidróxido de ferro (Figura 6). Várias microfraturas foram observadas nesta microfácies, as quais estão preenchidas/cimentadas por calcita e/ou sílica, o que contribui para a ausência de porosidades primárias ou secundárias.

Figura 5 – Microfácies do nível C6 da Formação Crato proposto por Neumann (1999).



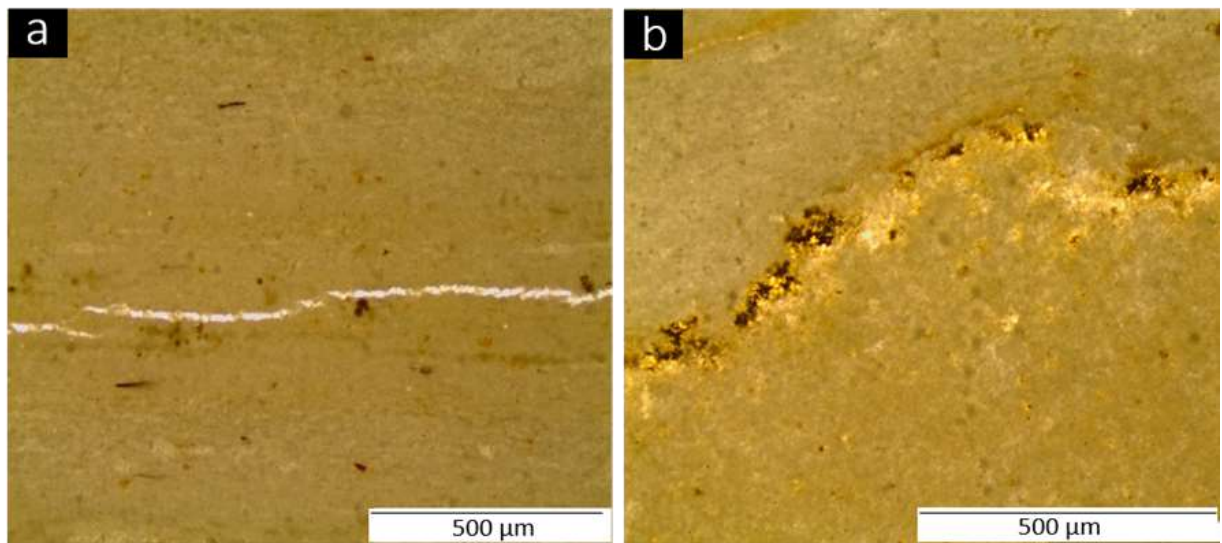
Fonte: Modificado de Neumann (1999) e Silva e Neumann (2003).

Tabela 3 – Tabela de microfácies carbonáticas do topo de nível C6 segundo Cabral (2017).

MICROFÁCIES	DESCRIÇÃO
m1	Microfácies Calcário Maciço
m2	Microfácies Calcário com Laminações Plano-paralelas
m3	Microfácies Calcário com Laminações Onduladas
m4	Microfácies Calcário com <i>Slumps</i>
m5	Microfácies Calcário com <i>Loop bedding</i>
m6	Microfácies Calcário com Ostracodes
m7	Microfácies Calcário com Pelóides

Fonte: Cabral (2017).

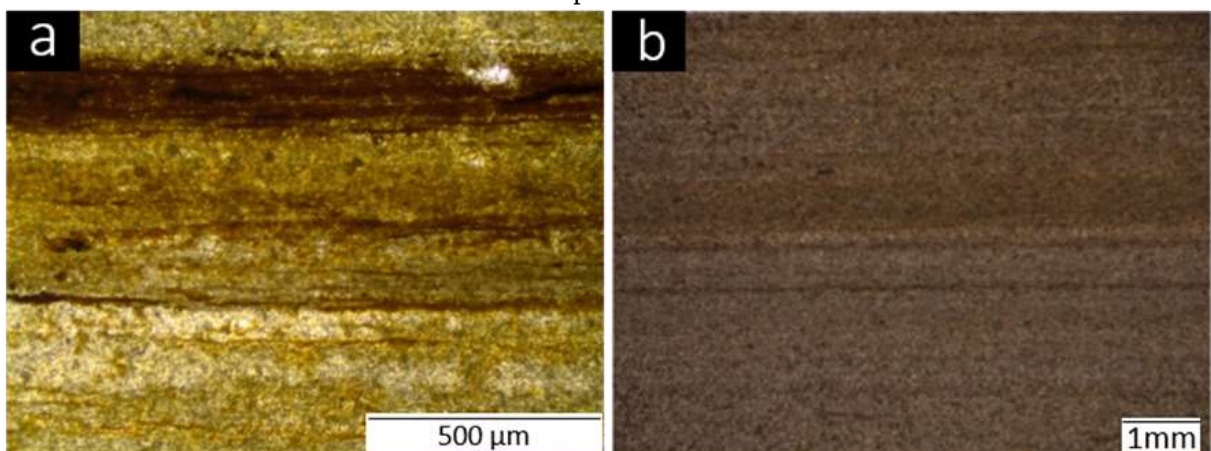
Figura 6 – Fotomicrografias da microfácies Calcário maciço (m1 encontrada no AFL 04, próximo à Mina Conceição Preta): a) Lama carbonática com fratura horizontal sob polarizadores cruzados (PX); b) Lama carbonática com pirita framboidal sob polarizadores paralelos (P//).



Fonte: Modificado de Cabral (2017).

A Microfácies calcário com laminações plano-paralelas (m2) é representada por calcário com lâminas plano-paralelas milimétricas, de coloração bege e marrom escura, compostas, respectivamente, por calcita micrítica e por minerais opacos (pirita framboidal), óxido de ferro e matéria orgânica. Várias microfraturas foram observadas nesta microfácies, onde muitas delas estão preenchidas por matéria orgânica, sílica e calcita (Figura 7). Nos calcários estudados, a microfácies m2 é a de maior ocorrência.

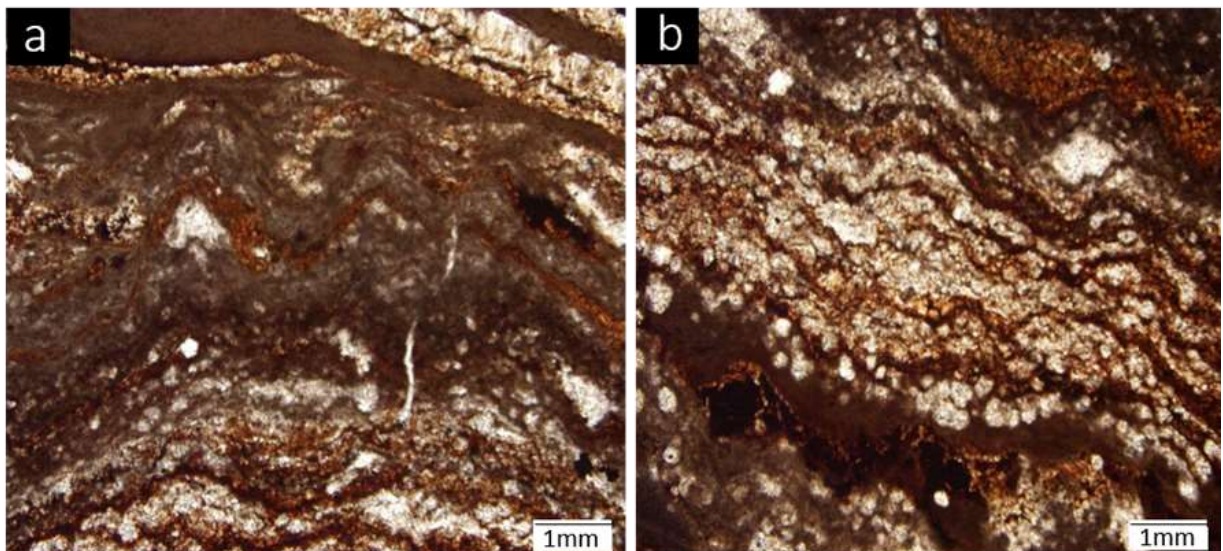
Figura 7 – Fotomicrografias da microfácies calcário com laminações plano-paralelas (m2). Figuras “a” e “b” sob polarizadores paralelos (P//). As bandas escuras possuem calcita microcristalina, matéria orgânica e pirita, e as lâminas claras são constituídas por calcita microcristalina sem a presença de pirita.



Fonte: Cabral (2017).

A Microfácies calcário com laminações onduladas (m3) é caracterizada por lâminas orgânicas crenuladas, em maior parte onduladas e deformadas, de coloração marrom escuro substituídas por pirita (Figura 8). Apresenta pirita framboidal, óxido/hidróxido de ferro e várias fraturas preenchidas por calcita fibrosa, além da presença de sílica (quartzo criptocristalino, megaquartzo e calcedônia) e sulfatos (gipsita, anidrita e barita) que ocorreram pelo processo de substituição. Esta microfácies foi encontrada nos afloramentos do Crato (Rio da Batateira – RB) e Porteiras (P), os quais estão localizados no contato entre a Formação Crato (topo do nível C6) e a Formação Ipubi.

Figura 8 – Fotomicrografias do calcário com lâminas orgânicas de coloração marrom bem crenuladas e deformadas com presença de calcita recristalizada: imagens “a” e “b” (P//).

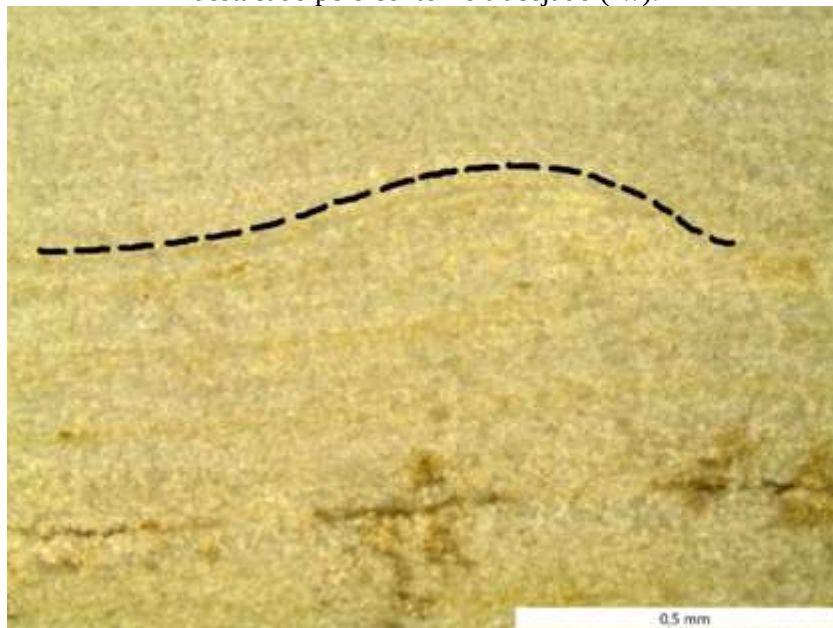


Fonte: Cabral (2017).

A Microfácies calcário com *slumps* (m4) é bem semelhante à Microfácies calcário com laminações plano-paralelas (m2), entretanto apresenta laminações suaves exibindo feições de escorregamento, as quais foram formadas quando o sedimento ainda não estava totalmente consolidado (Figura 9).

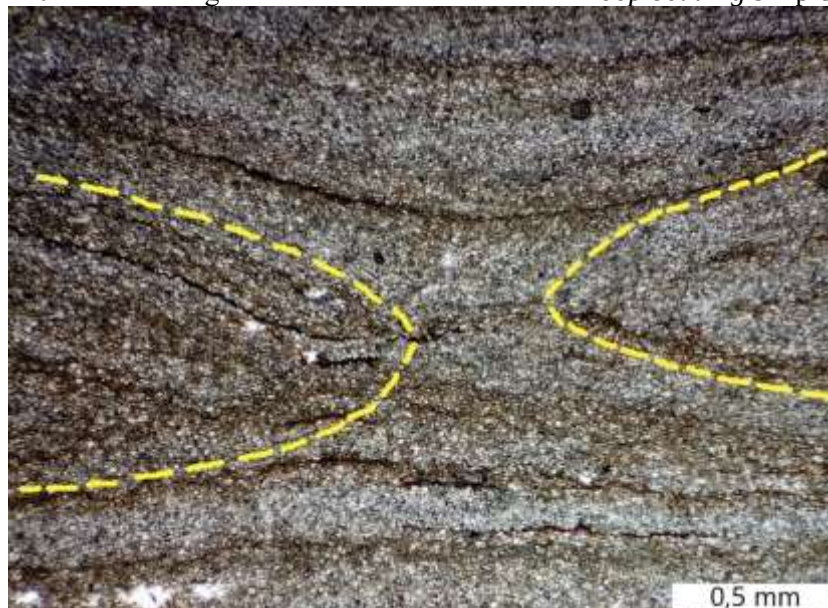
A Microfácies calcário com *loop bedding* (m5), identificada em poucas amostras, é caracterizada por calcário laminado com a presença de *loop bedding*, que são microestruturas que causam um apertamento nas lâminas semelhantes à *boudinage* sedimentar. Essas microestruturas foram classificadas como *loop bedding* simples, gerados diageneticamente por sobrecarga (Figura 10).

Figura 9 – Fotomicrografia do calcário laminado com *microslumps* localizado no centro da figura, destacado pelo contorno tracejado (P//).



Fonte: Cabral (2017).

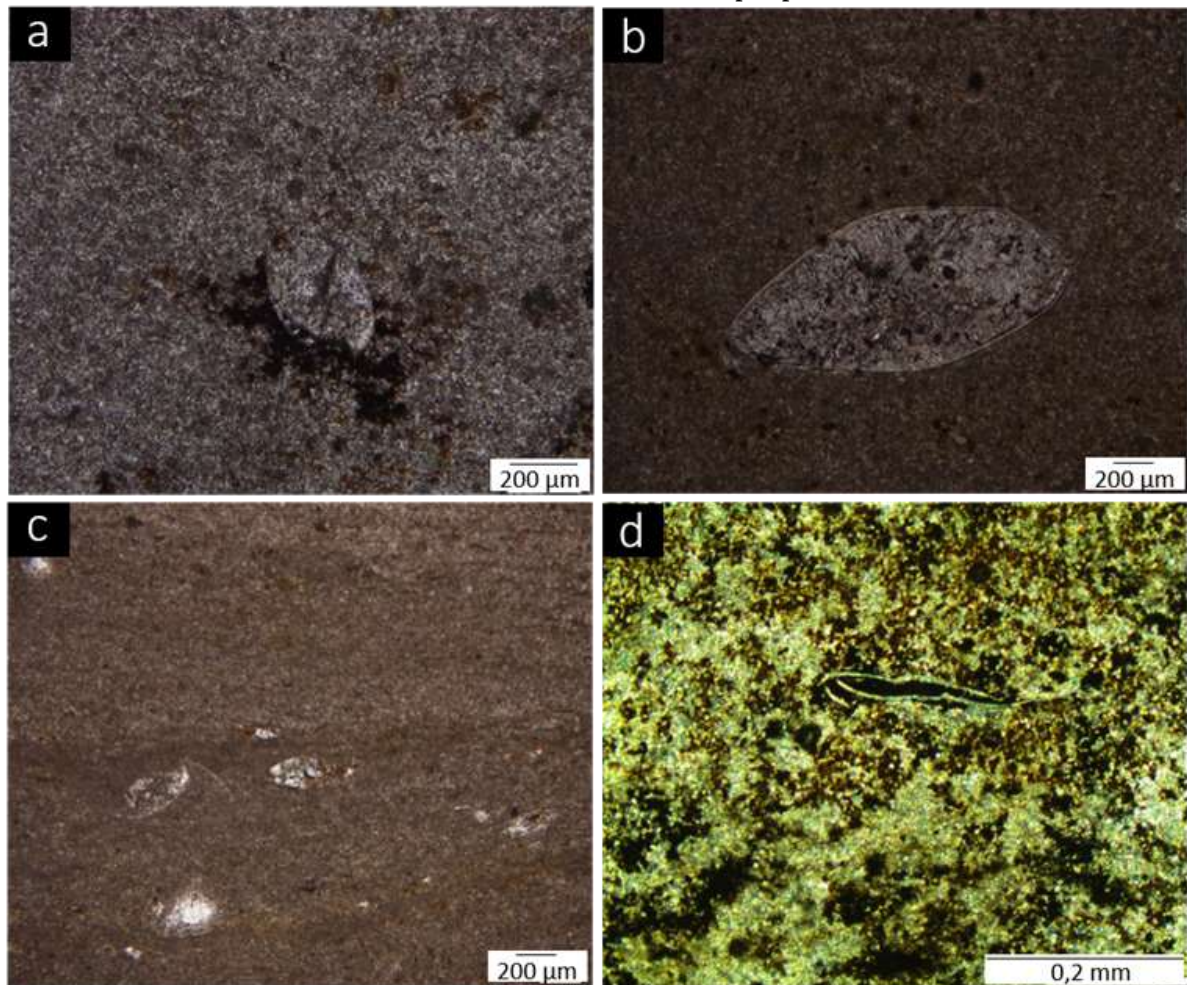
Figura 10 – Fotomicrografia do calcário laminado com *loop bedding* simples (P//).



Fonte: Cabral (2017).

A Microfácies calcário com ostracodes (m6) foi encontrada nos calcários laminados e maciços. Alguns bioclastos observados foram identificados como ostracodes, que apresentam valvas inteiras e articuladas, mas também com valvas desarticuladas e achatadas. Esses ostracodes encontram-se substituídos por calcita micrítica e/ou espática e pirita (Figura 11).

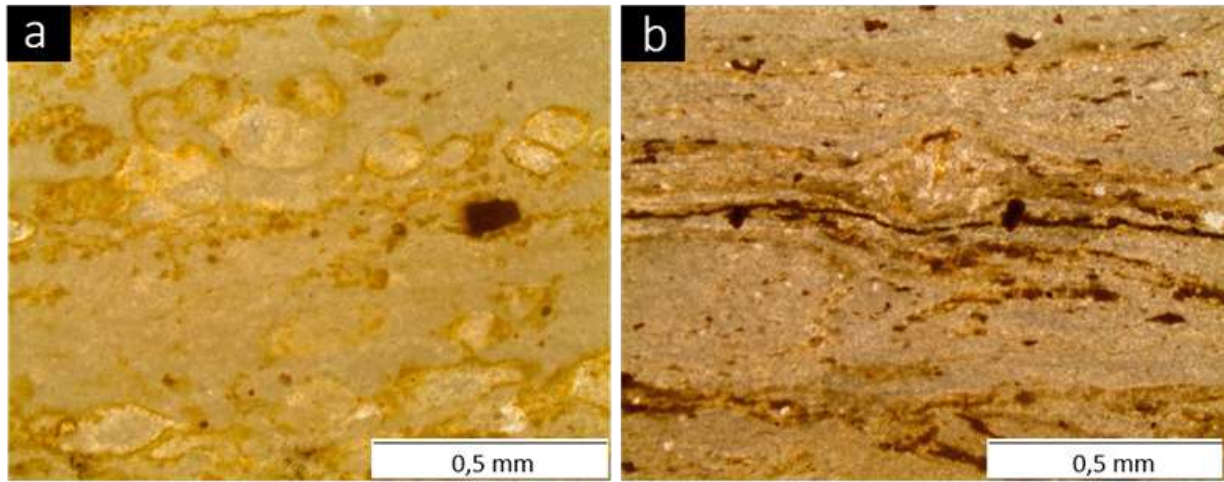
Figura 11 – Fotomicrografias da microfácies calcário com ostracodes (P//): a) Ostracode com início de piritização; b) Ostracode com as valvas constituídas por calcita e calcita microcristalina no seu interior; c) Ostracodes substituídos ora por calcita espática ora por calcita micrítica; d) Ostracode achatado com valva desarticulada e substituído por pirita.



Fonte: Cabral (2017).

A Microfácies calcário com pelóides (m7), identificada em poucas amostras, é caracterizada por um nível de pelóides milimétricos em formas circular e elipsoidal, espalhados numa matriz micrítica. Provavelmente esses pelóides foram formados pela alteração de ostracodes (Figura 12).

Figura 12 – Fotomicrografias da microfácies m7: a) Nível peloidal (P//); b) Pelóide deformando a laminação (P//).



Fonte: Cabral (2017).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo apresenta os dados obtidos dos estudos petrográficos com microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura (MEV) com espectrômetro de comprimento de ondas (WDS) acoplado e catodoluminescência (CL), além de análises geoquímicas com isótopos de C e O e fluorescência de raios-X (FRX) obtenção das concentrações dos elementos maiores nos carbonatos do topo do nível C6 da Formação Crato.

5.1 AFLORAMENTOS ESTUDADOS NO TOPO DO NÍVEL C6 DA FORMAÇÃO CRATO

Os afloramentos estudados no topo do nível C6 da Formação Crato (ver Tabela 1), estão distribuídos na parte setentrional da Bacia do Araripe (ver Figura 4).

O afloramento 1 (AFL 1), localiza-se na Mina Três Irmãos (TI), no Município de Nova Olinda, possui 3,5 m de altura e é caracterizado por calcários tabulares intercalados com folhelhos, apresentando uma coloração bege amarelada e marrom acinzentado, respectivamente (Figura 13). Nos calcários foram observados níveis de calcita fibrosa, com espessura de 1 cm e de calcita com estrutura cone-em-cone com espessura de 2 cm (Figura 13B), evidenciando processo de recristalização.

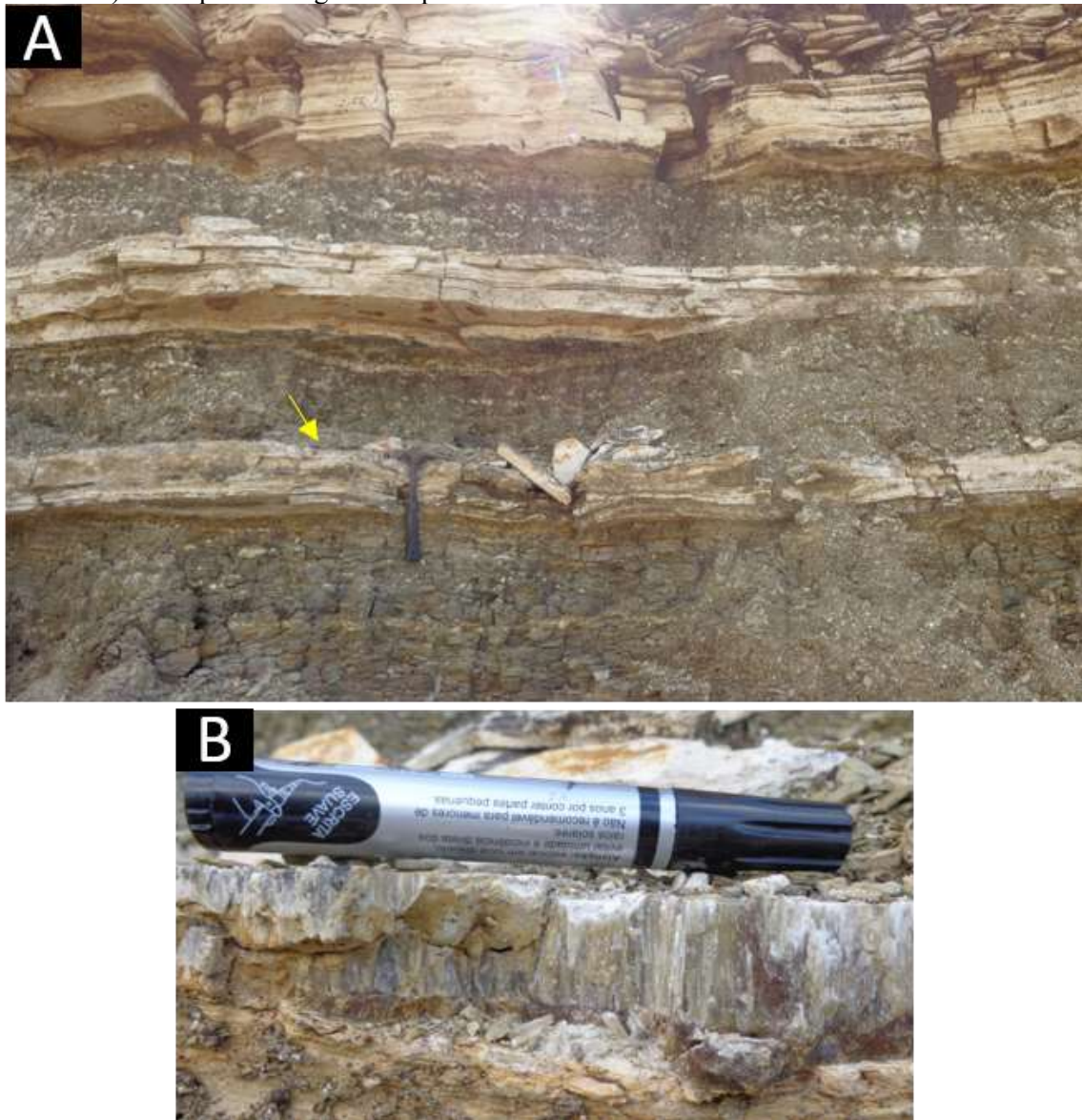
Nas seções delgadas das amostras estudadas do AFL 1 foram observados o processo de piritização, a presença de ostracodes desarticulados e fraturas preenchidas por calcita recristalizada (Figura 14).

O afloramento 2 (AFL 2), localiza-se na Pedreira do Aurélio (PA), também no Município de Nova Olinda. Com uma altura de 2 m, o AFL 2 é caracterizado por calcário intercalado com argilito, de coloração bege amarelada e cinza com partes esbranquiçadas, respectivamente. Neste afloramento também foi observada a ocorrência de óxidos/hidróxidos de ferro. (Figura 15) e pirita em seções delgadas (Figura 16).

O afloramento 3 (AFL 3), localiza-se na entrada do Município de Santana do Cariri (SC), possui 1 m de altura e apresenta calcários laminados de coloração bege (Figura 17). Próximo ao afloramento foi observado pseudomorfo de sal (*hooper* de halita) (Figura 18). Segundo Martill et al. (2007b), a presença de pseudomorfo de halita nesses calcários confirma que eles foram depositados num ambiente de crescente aridez em condições de hipersalinidade.

Nas seções delgadas foi observado o processo de piritização, onde ocorre a substituição da matéria orgânica por pirita (Figura 19).

Figura 13 – Afloramento 1, na Mina Três Irmãos (TI), Município de Nova Olinda. A) Calcários intercalados com folhelhos, apresentando nível de calcita com estrutura cone-em-cone (seta amarela); B) Destaque da imagem “A” para o nível de calcita com estrutura cone-em-cone.

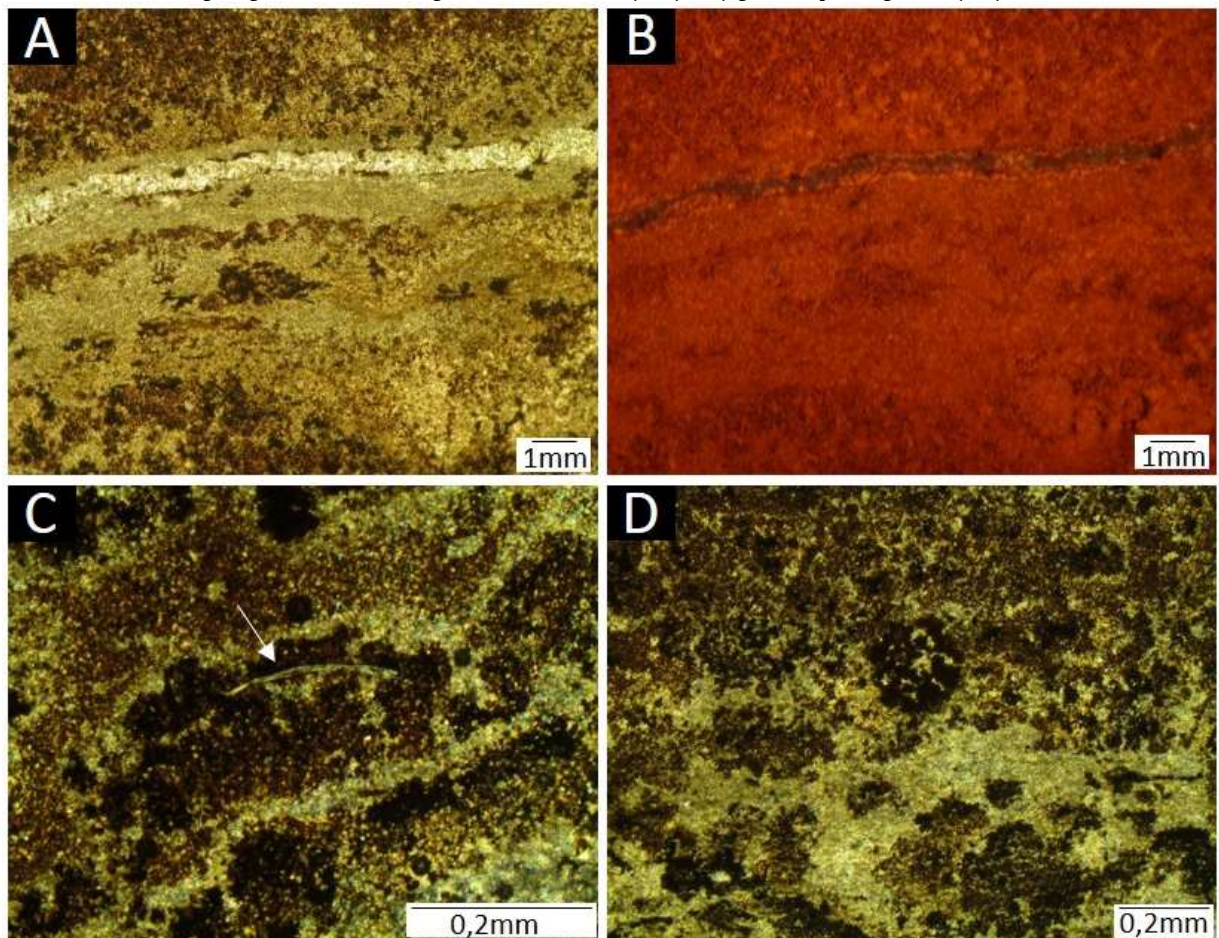


Fonte: a autora (2019).

O afloramento 4 (AFL 4), localiza-se próximo à Mina Conceição Preta (MC), no Município de Santana do Cariri. Possui 2 m de altura e é caracterizado por calcários laminados apresentando níveis de coloração que vão de marrom escuro à marrom alaranjado (Figura 20).

A partir do estudo das seções delgadas foi possível observar que se trata de calcários ricos em óxido/hidróxidos de ferro e pirita (Figura 21). A presença de pirita indica a ocorrência de alterações diagenéticas em rochas carbonáticas por processos de substituição, associadas, possivelmente, à ambientes anóxicos, relacionando-se com a presença de matéria orgânica nesse ambiente. Segundo Cabral (2017) e Cabral et al. (2019) a ocorrência de pirita sugere um estágio eodiagenético.

Figura 14 – Fotomicrografias das amostras do AFL 1: A) fratura preenchida por calcita recristalizada (PX); B) imagem “A” sob catodoluminescência (CL); C) valva desarticulada de ostracode substituída por pirita, indicada pela seta branca (PX); D) presença de pirita (P//).



Fonte: a autora (2019).

Muitas microfraturas e microfalhas foram observadas nesse afloramento, a maioria delas preenchidas por calcita e matéria orgânica (Figura 22). Nas amostras do topo do AFL 4 foi verificado o processo de sulfatização, identificado pela presença de gipsita, anidrita (Figura 23) e barita (Figura 24) assim como foi visto por Cabral (2017).

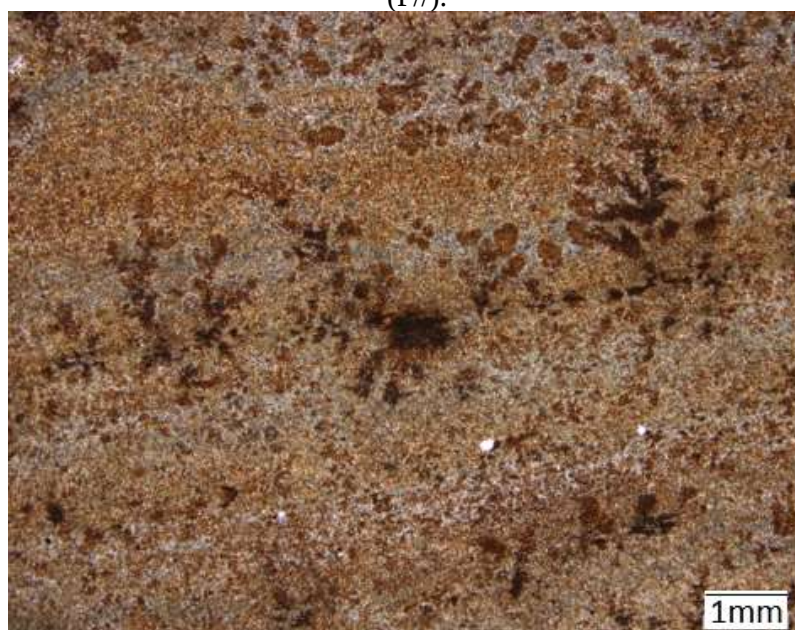
O afloramento 5 (AFL 5), localiza-se na Mina Caldas (MC), entre os Municípios Arajara-Barbalha (Figura 25). Possui 60 cm de altura, é caracterizado por calcários laminados apresentando níveis de coloração que gradam de bege claro, marrom escuro à cinza escuro. Segundo a definição de Cabral (2017) para as microfácies do topo do nível C6 da Formação Crato, a microfácies (m6) corresponde a esse afloramento. Nas seções delgadas estudadas foi verificada uma grande ocorrência de ostracodes substituídos por pirita e calcita espática (Figura 26). Os ostracodes observados aparecem articulados, indicando uma sedimentação de baixa energia, como também aparecem com valvas desarticuladas, em que Cabral (2017) sugere que estes ostracodes sofreram processos de compactação.

Figura 15 – Afloramento 2, na Pedreira do Aurélio (PA), Município de Nova Olinda. A) calcário intercalado com argilito; B) Destaque da imagem “A” mostrando a ocorrência de óxido de ferro (seta amarela).



Fonte: a autora (2019).

Figura 16 - Fotomicrografia de amostra do AFL 2 apresentando ocorrência de óxido de ferro e pirita (P//).



Fonte: a autora (2019).

Figura 17 – Afloramento 3, na entrada do Município Santana do Cariri (SC).



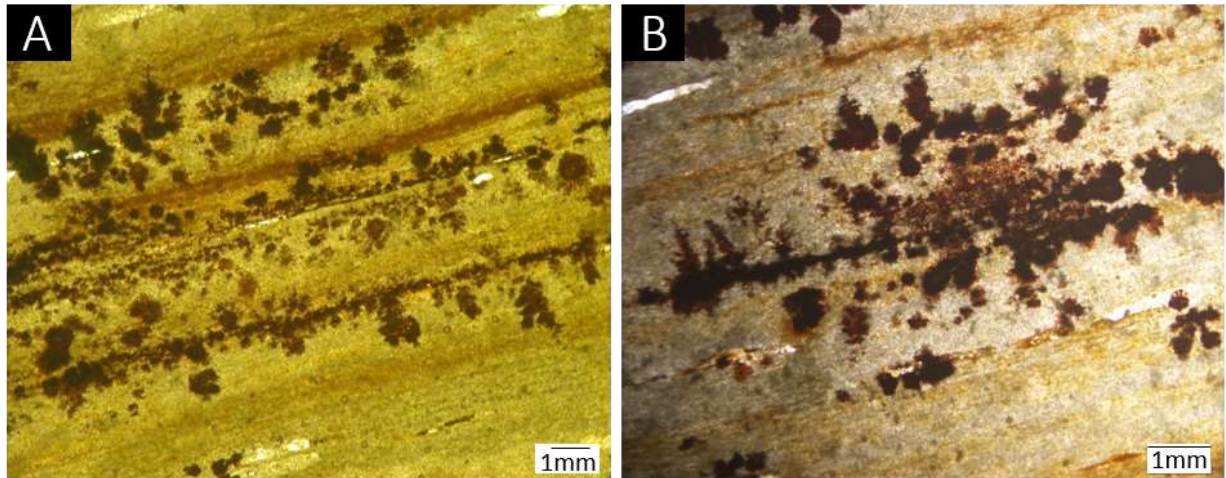
Fonte: a autora (2019).

Figura 18 – Calcário laminado com pseudomorfo de sal em forma de estrela no AFL 03, em Santana do Cariri.



Fonte: a autora (2019).

Figura 19 – Fotomicrografias das amostras do AFL 3 apresentando pirita. Imagens “A” e “B” (P//).



Fonte: a autora (2019).

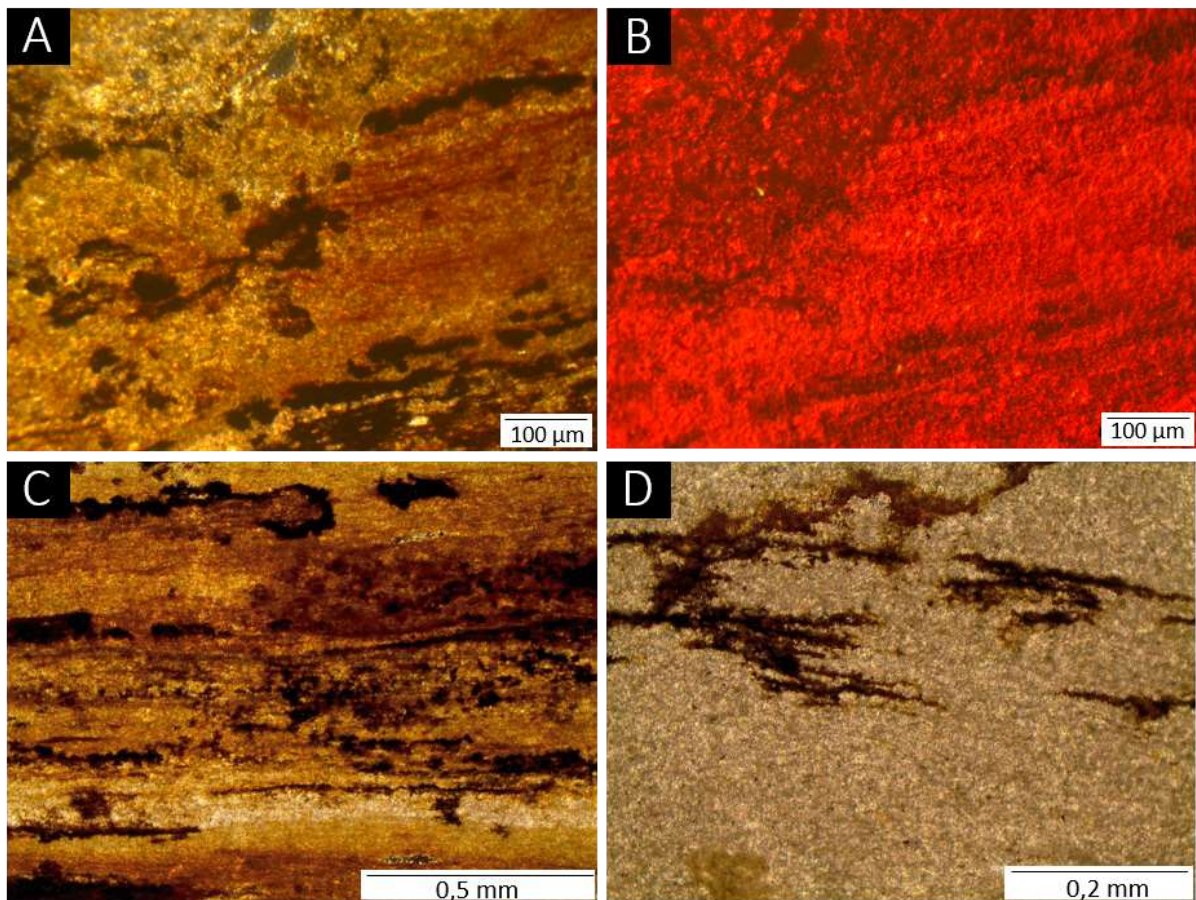
Figura 20 – Afloramento 4, próximo à Mina Conceição Preta (MC), no Município de Santana do Cariri.



Fonte: a autora (2019).

O afloramento 6 (AFL 6), localiza-se no Rio da Batateira (RB), no Município do Crato. Possui 2 m de altura e apresenta calcários com laminações onduladas com uma coloração que varia de bege claro à marrom escuro (Figura 27). Segundo a definição de Cabral (2017), a microfácies (m3) foi encontrada nesse afloramento. Próximo ao leito do rio foi encontrada uma brecha de falha com fragmentos de calcário laminado e estrutura botrioidal em superfícies mais expostas.

Figura 21 - Fotomicrografias das amostras do AFL 4, apresentando processo de piritização: A) pirita disseminada (P//); B) imagem “A” sob catodoluminescência (CL); Imagens “C” e “D” pirita disseminada (PX).



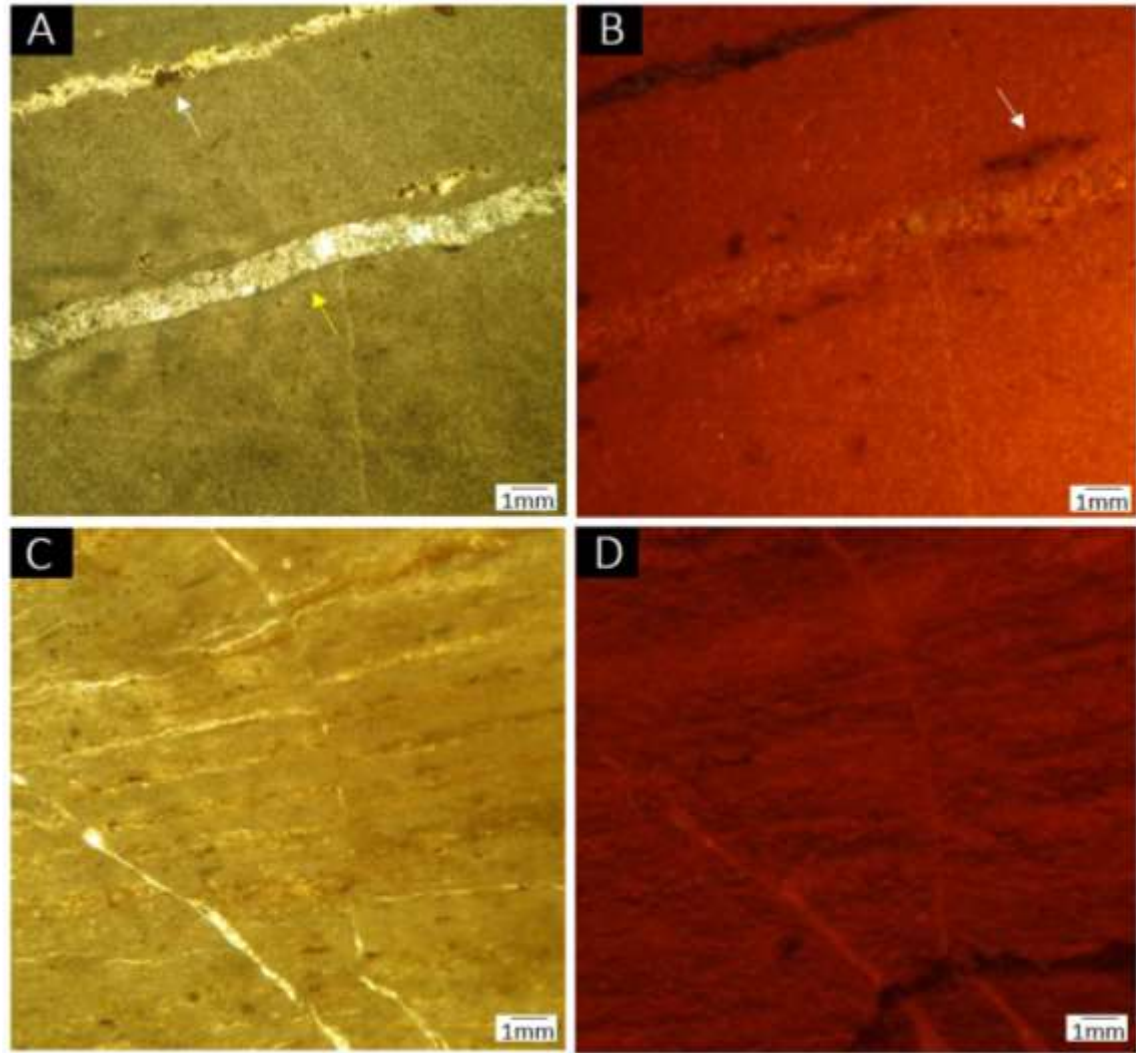
Fonte: a autora (2019).

Nas seções delgadas estudadas foi observada uma grande ocorrência de sílica como: megaquartzo (Figura 28) e calcedônia, que se apresentam de forma fibrosa e em estruturas radiais e/ou esferulíticas (Figura 29). Também foram observados pelóides nesse afloramento (Figura 30).

O afloramento 7 (AFL 7), localiza-se na parte oeste do Município de Porteiras (P). Possui 0,8 m, é caracterizado por calcários laminados com laminações plano-paralelas e onduladas, estas muitas vezes crenuladas, apresentando níveis de coloração que vão de bege à marrom escuro. Esse afloramento exibe uma superfície botrioidal (Figura 31) indicando processo de silicificação. Numa amostra de mão foi possível observar o calcário silicificado com laminações onduladas e crenuladas (Figura 32).

Nas seções delgadas foi possível observar que são calcários ricos em óxido de ferro e pirita, que apresentam microfraturas e microfalhas, muitas vezes preenchidas por calcita e matéria orgânica (Figura 33).

Figura 22 - Fotomicrografias das amostras do AFL 4, apresentando microfalhas e microfraturas preenchidas por calcita e matéria orgânica (MO): A) Microfratura preenchida por calcita espática (no centro da foto, seta amarela) e microfratura com uma parte preenchida por MO substituída por óxido de ferro (P//), seta branca; B) Imagem “A” sob catodoluminescência, a seta branca mostra MO substituída por óxido de ferro; C) Microfalhas deslocando microfraturas preenchidas por calcita espática e matéria orgânica que foi substituída por óxido de ferro (P//); D) Imagem “C” sob catodoluminescência (CL).

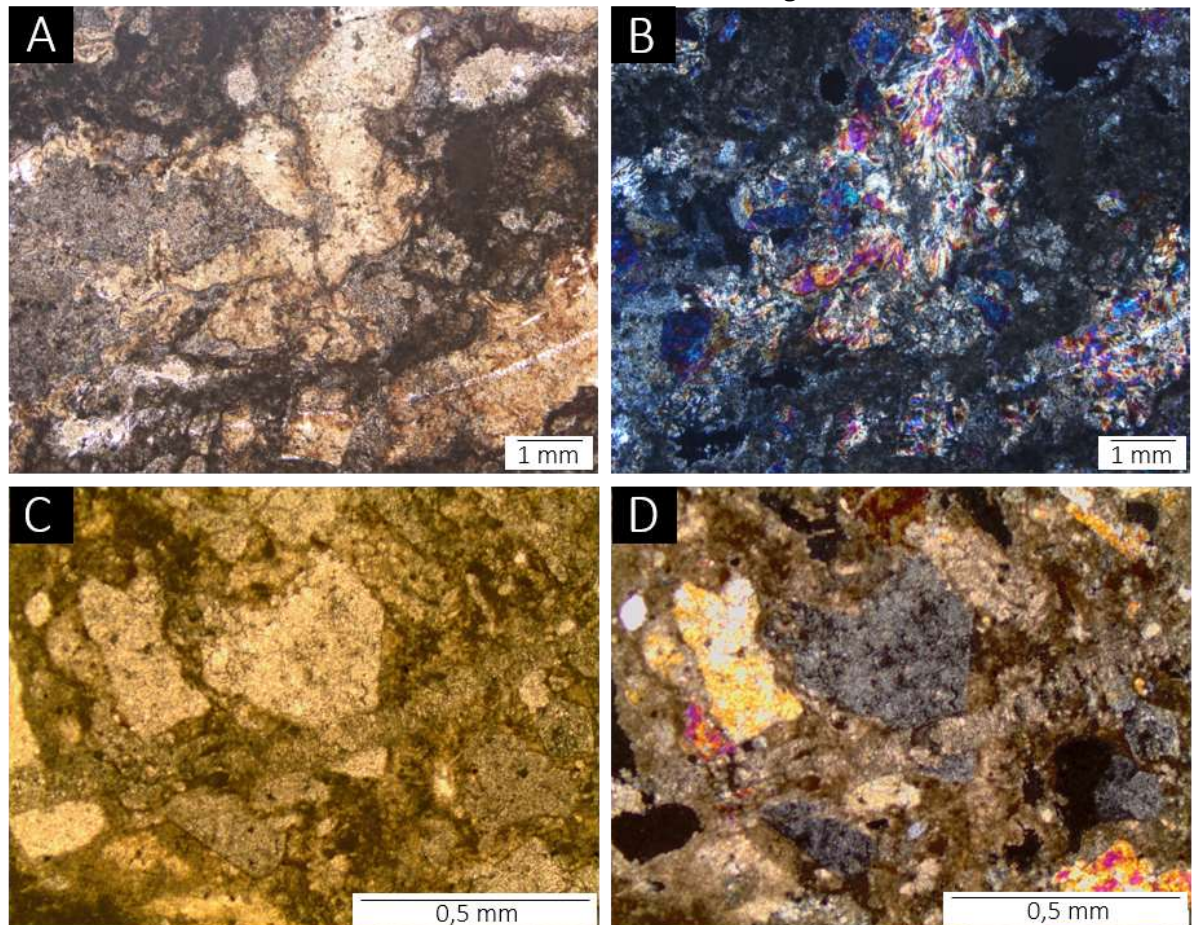


Fonte: a autora (2019).

5.2 ANÁLISES DAS AMOSTRAS DE ROCHAS CARBONÁTICAS SOB MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV)

Nas amostras estudadas sob MEV foi identificado o predomínio de calcita espática e micrítica em todas as amostras, puramente formadas por precipitação química (Figura 34). Em amostras dos afloramentos localizados em Santana do Cariri (AFLs 3 e 4), foi observado o supercrescimento de cristais de calcita espática formando agregados (Figura 35) e nos afloramentos Mina Três Irmãos (AFL1) e Rio da Batateira (AFL6) foram observados cristais de calcita com aspecto filamentosos (Figura 36).

Figura 23 – Fotomicrografias das amostras do AFL 4, apresentando sulfatos: A) Cristais de anidrita (NP); B) Imagem “A” sob polarizadores cruzados (PX); C) Gipsita e anidrita (P//); D) Imagem “C” sob polarizadores cruzados (PX) mostrando minerais de gipsita de coloração cinza e minerais coloridos de anidrita com alta birrefringência.



Fonte: Imagens A e B da autora (2019) e C e D obtidas de Cabral (2017).

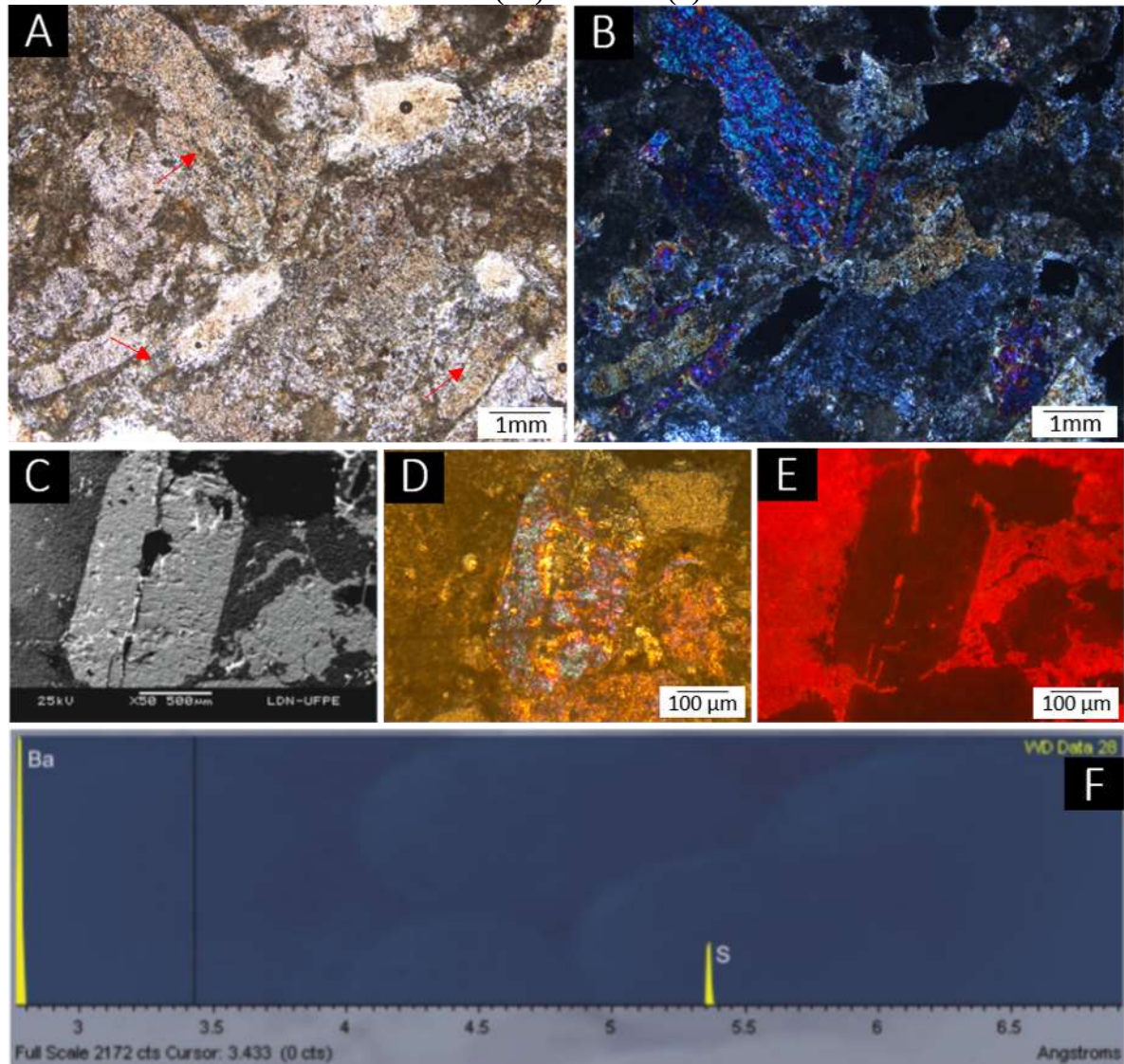
Estruturas radiais de gipsita foram encontradas nas amostras dos afloramentos de Santana do Cariri (AFL 3) e Porteiras (AFL 7), neste último afloramento há uma maior ocorrência dessas estruturas por estar em contato com a Formação Ipubi (Figura 37).

Segundo Vasconcelos et al. (2006), ambientes hipersalinos são adversos à organismos predadores de esteiras microbianas, proporcionando assim, condições ambientais favoráveis ao desenvolvimento e preservação de bactérias. Embora, não tenha sido observado em MEV nenhum organismo, esses afloramentos apresentam matéria orgânica identificadas em seções delgadas sob microscópio óptico.

Catto (2015) identificou na base da Formação Crato carbonato com filmes de matéria orgânica formados por substâncias poliméricas extracelulares (*EPS - Extracellular Polymeric Substances*) de origem microbial (bactérias bentônicas) com presença de gipsita.

Em amostras do AFL 2, na Pedreira do Aurélio, foram observadas calcitas esféricas (Figura 38). No AFL 5, em Mina Caldas, foi observado um possível ostracode (Figura 39).

Figura 24 - Fotomicrografias das amostras do AFL 4, apresentando sulfatos: A) cristais de barita indicados pelas setas vermelhas (P//); B) imagem “A” sob polarizadores cruzados (PX); C) cristais de barita sob MEV; D) Imagem “C” sob polarizadores cruzados (PX); E) Imagem “C” sob catodoluminescência (CL); F) Espectro por comprimento de onda mostrando picos dos elementos Bário (Ba) e Enxofre (S).



Fonte: Imagens C, D, E e F modificadas de Cabral (2017); Cabral et al. (2019).

Nesse afloramento foram identificados vários ostracodes em seções delgadas sob microscópio óptico.

5.3 ISÓTOPOS ESTÁVEIS DE C E O DAS ROCHAS CARBONÁTICAS DO TOPO DO NÍVEL C6 DA FORMAÇÃO CRATO

As análises de isótopos estáveis de C e O realizadas nas amostras de carbonatos do nível C6 da Formação Crato foram realizadas para uma melhor compreensão do ambiente lacustre e regime hidrológico do paleoambiente estudado.

Figura 25 – Afloramento 5, na Mina Caldas (MC), entre os Municípios Arajara-Barbalha.



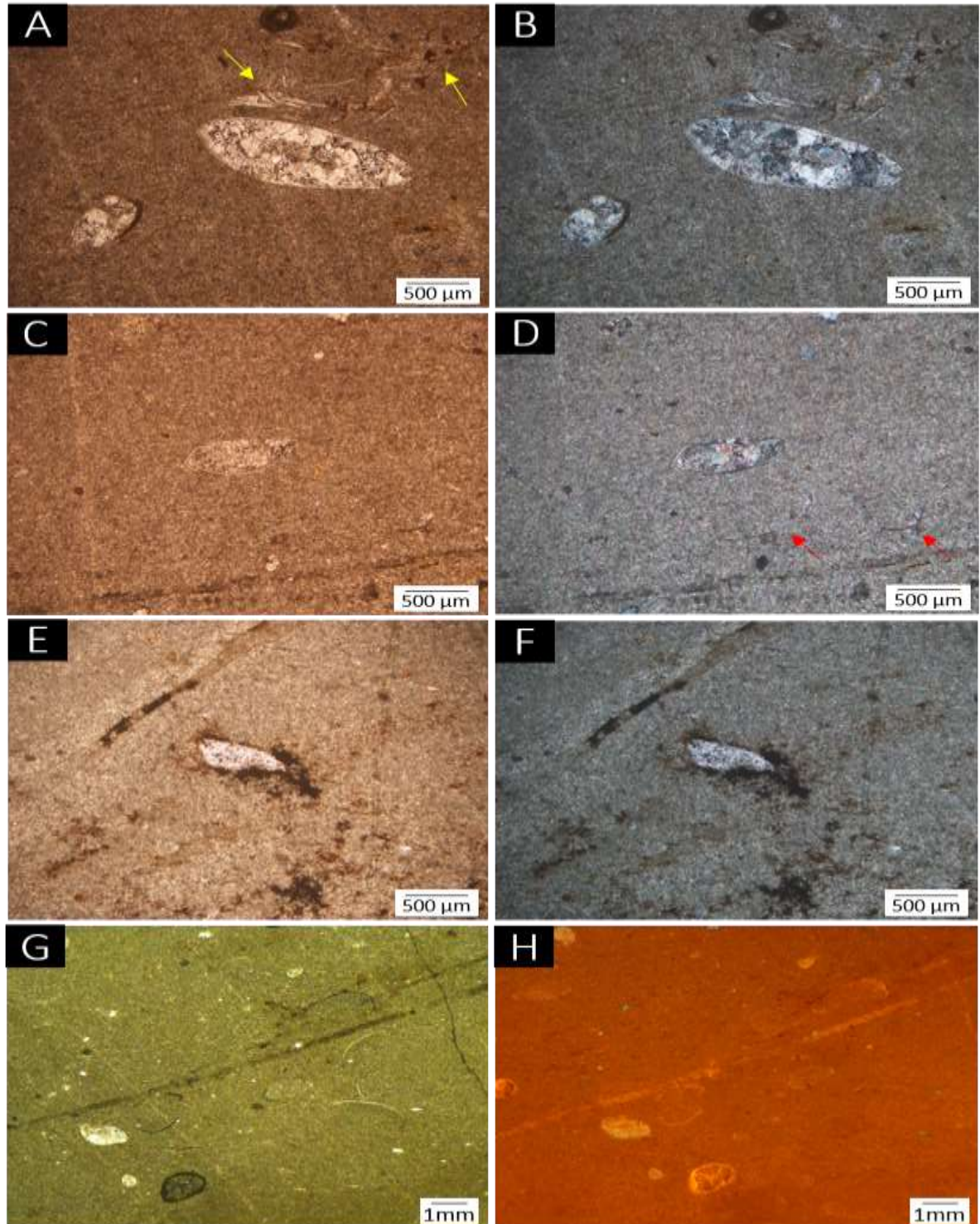
Fonte: a autora (2019).

5.3.1 Isótopos estáveis de C e O e ambiente lacustre

As análises de isótopos estáveis de carbono e oxigênio são de grande importância para o estudo de carbonatos lacustres, pois oferecem informações sobre a dinâmica hídrica do lago, grau de salinidade e organismos presentes neste ambiente (RENAULT; GIERLOWSKI-KORDESCH, 2010). A temperatura e o balanço hídrico são os principais fatores controladores da composição isotópicas em um sistema lacustre (KELTS; TALBOT, 1990; LISTER et al., 1991).

Carbonatos marinhos são isotopicamente mais pesados, com valores de $\delta^{13}\text{C}$ próximos de 0‰ e os carbonatos não marinhos são isotopicamente mais leves, com valores médios de $\delta^{13}\text{C}$ entre 0 e -18‰ (HOEFS, 2004; ARMSTRONG; BRASIER, 2005) (Figura 40).

Figura 26 – Fotomicrografias das amostras do AFL 5, apresentando ostracodes: A) Ostracodes substituídos por calcita espática (P//), com destaque para valvas desarticuladas (setas amarelas); B) imagem “A” sob polarizadores cruzados (PX); C) Ostracode substituído por calcita espática (P//); D) Imagem “C” com destaque para valvas desarticuladas (setas vermelhas) (PX); E) ostracode piritizado (P//); F) Imagem “E” sob polarizadores cruzados (PX); G) Ostracode com valvas articuladas e desarticuladas (P//); H) Imagem “G” sob catodoluminescência (CL).



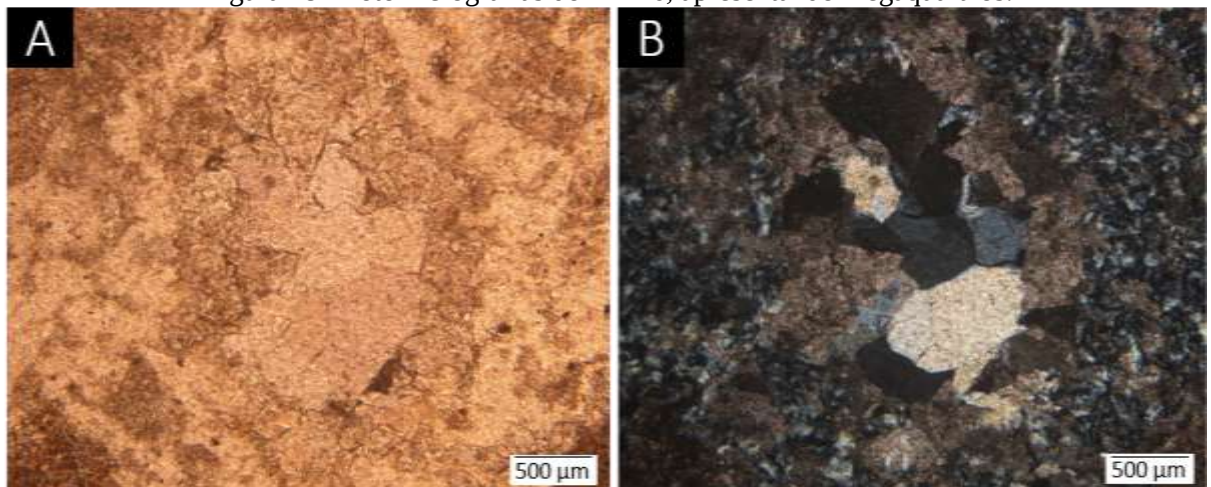
Fonte: a autora (2019).

Figura 27 – Afloramento 6, no Rio da Batateira (RB), Município do Crato.



Fonte: a autora (2019).

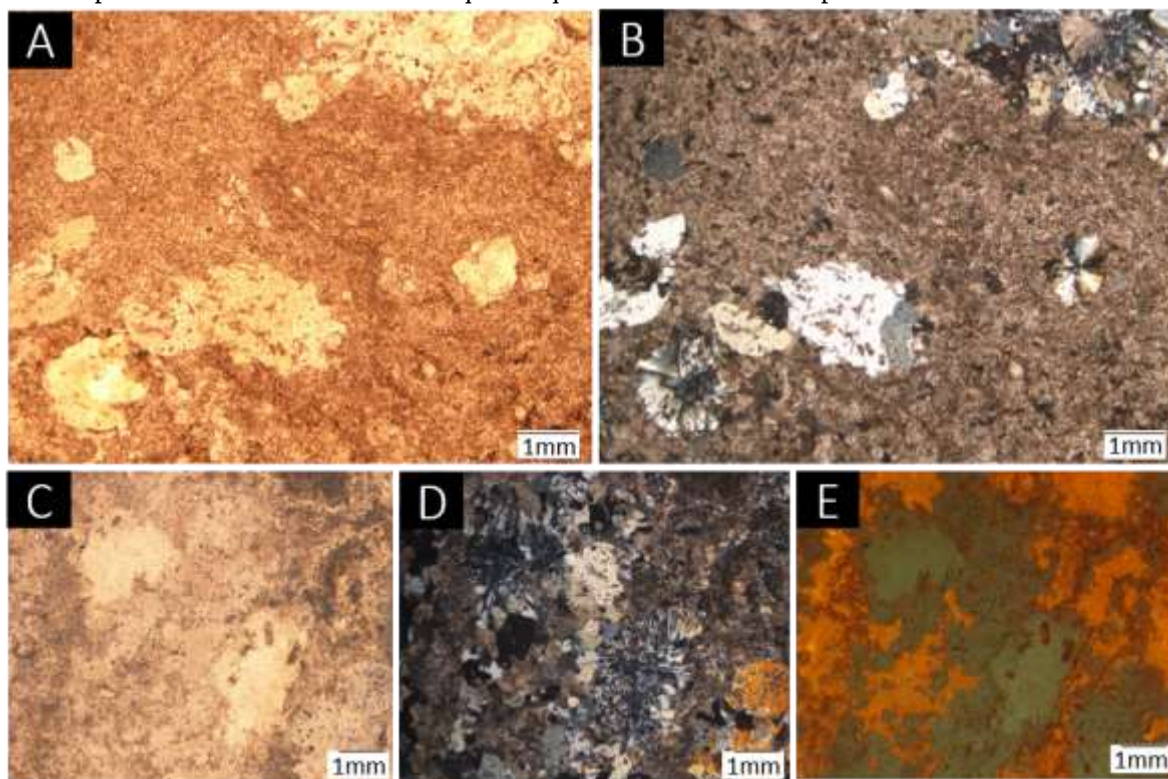
Figura 28 - Fotomicrografias do AFL 6, apresentando megaquartzos.



Fonte: a autora (2019).

Os valores obtidos de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ das amostras carbonáticas do topo do nível C6 da Formação Crato (Tabela 4) mostram valores da composição isotópica do carbono variando entre -18,22 e 2,01‰ VPDB e a de oxigênio entre -8,25 e 0,23‰ VPDB. Os valores encontrados se enquadram dentro da variação normalmente observada em carbonatos lacustres (TALBOT; KELTS, 1989; KELTS; TALBOT 1990; CAMOIN et al., 1997).

Figura 29 – Fotomicrografias do AFL 6, apresentando esferulitos de calcedônia. Imagens A e C sob polarizadores paralelos (P//); B) Imagem “A” sob polarizadores cruzados (PX); D) Imagem “C” sob polarizadores cruzados (PX); E) Imagem “C” sob catodoluminescência (CL), onde a calcedônia se apresenta sem luminescência enquanto que a matriz micrítica apresenta luminescência.



Fonte: a autora (2019).

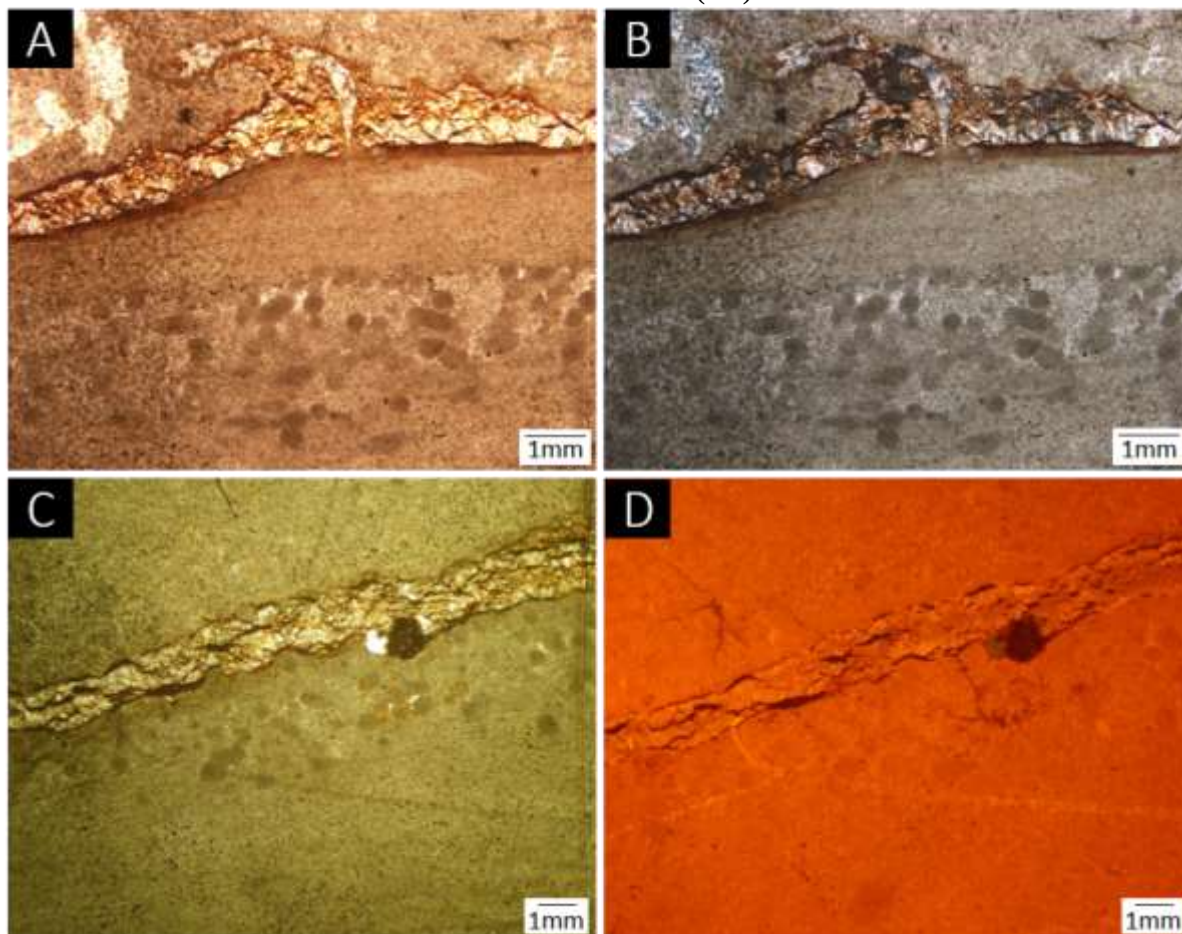
5.3.2 Isótopos estáveis de C e O e o comportamento hidrológico do paleolago nos afloramentos estudados

As variações nos valores isotópicos de C e O auxiliam no estudo do comportamento hidrológico do paleolago. A covariância dos valores isotópicos indica o comportamento de um lago hidrológicamente fechado e quando a variação desses valores é distinta, indica o comportamento de um lago hidrológicamente aberto de acordo com os valores encontrados por Valero-Garcés et al. (1997).

Para cada afloramento estudado foi feito um perfil isotópico de C e O para verificar o comportamento hidrológico do paleolago no topo do nível C6 da Formação Crato. Sendo assim, foram estudados 09 perfis de 07 afloramentos, que são descritos a seguir:

O comportamento isotópico do afloramento estudado na Mina Três Irmãos (AFL 01) apresenta valores de $\delta^{13}\text{C}$ menos negativos e mais próximos de zero, entre -3,55 e -0,07‰ (V-PDB), enquanto que os valores de $\delta^{18}\text{O}$ são mais negativos entre -9 e -6‰ (V-PDB) (Figura 41). Os valores isotópicos de C e O são covariantes na base do perfil (nas amostras 1 e 2), onde na curva de O houve um suave decréscimo de -6,9 para -6,10‰ (V-PDB), acompanhado de um

Figura 30 – Fotomicrografias do AFL 6, apresentando pelóides: A) Nível de pelóides (P//); B) Imagem “A” sob polarizadores cruzados (PX); C) Pelóides oxidando (P//); D) Imagem “C” sob catodoluminescência (CL).



Fonte: a autora (2019).

acréscimo na curva de C, de -3,55 para -2,58‰ (V-PDB), ao mesmo tempo que os valores de CaO aumentam (Tabela 5). Isto pode significar que não houve influência externa do lago, já que os valores de SiO₂ e Al₂O₃ diminuem. Os valores de MgO também diminuem indicando que não há presença de dolomita.

No topo da seção (nas amostras 3, 4, e 5) os valores de C e O não são covariantes. A curva de C tem um suave incremento de -0,14 para -0,07‰ (V-PDB), enquanto que a curva de O tem uma excursão negativa de -8,11 para -8,14‰ (V-PDB) e uma excursão positiva brusca na amostra do topo com -6,84‰ (V-PDB) (ver Figura 41).

Os valores de SiO₂ e Al₂O₃ sofrem um decaimento nas amostras 3 e 4 e um leve incremento na amostra do topo, sendo assim covariantes com a curva de O. Os valores de CaO não são covariantes com os valores de MgO, uma vez que os valores de CaO sofrem uma excursão positiva, depois uma excursão negativa e novamente uma excursão positiva na amostra do topo, enquanto ocorre o inverso com os valores de MgO.

Figura 31 – Afloramento 7, oeste do Município de Porteiras (P).



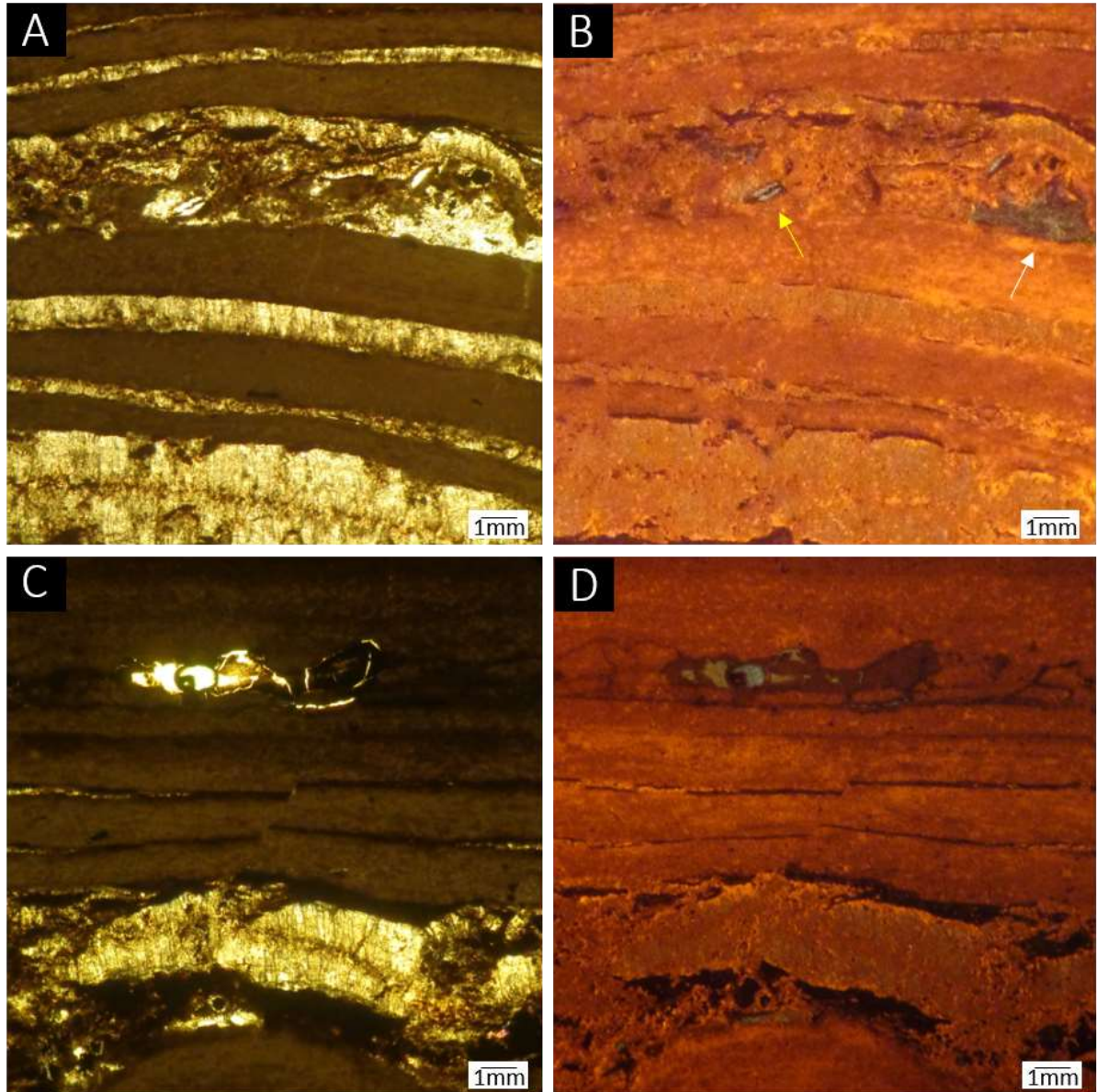
Fonte: a autora (2019).

Figura 32 – Amostra de mão do AFL 7, apresentando calcário silicificado com laminações onduladas e crenuladas.



Fonte: a autora (2019).

Figura 33 – Fotomicrografias do AFL 7, exibindo várias microfalhas e microfraturas preenchidas por calcita recristalizada e matéria orgânica: A) Fraturas preenchidas por calcita recristalizada (P//); B) Imagem “A” sob catoluminescência (CL), com destaque para um possível ostracode silicificado (seta amarela) e a presença de sílica (seta branca). C) Microfraturas preenchidas por calcita recristalizada e matéria orgânica sendo deslocadas por microfalha (PX); D) Imagem “C” sob catoluminescência (CL), onde as áreas sem luminescência (escuras) indicam a presença de matéria orgânica.

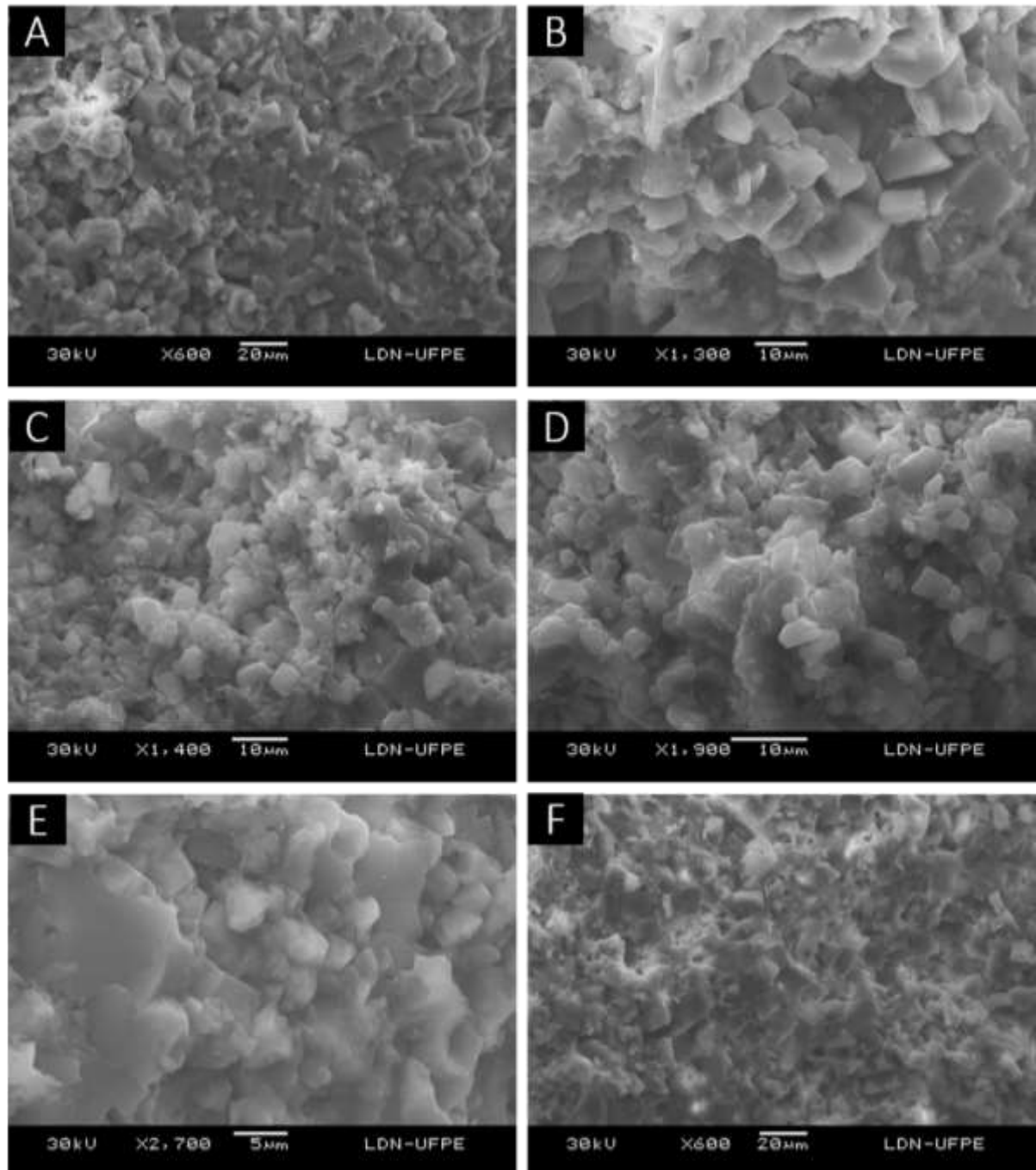


Fonte: a autora (2019).

Isso pode indicar um aumento do nível de água no lago. Esses valores indicam que nessa área o comportamento hidrológico se inicia como um sistema fechado passando posteriormente para um sistema aberto (ver Tabela 5).

O afloramento estudado na Pedreira do Aurélio (AFL 02), apresenta valores de $\delta^{13}\text{C}$ variando entre -4,17 e 2,01‰ (V-PDB) e valores de $\delta^{18}\text{O}$ sempre negativos que variam de -7,24 a -4,54‰ (V-PDB) (Tabela 6).

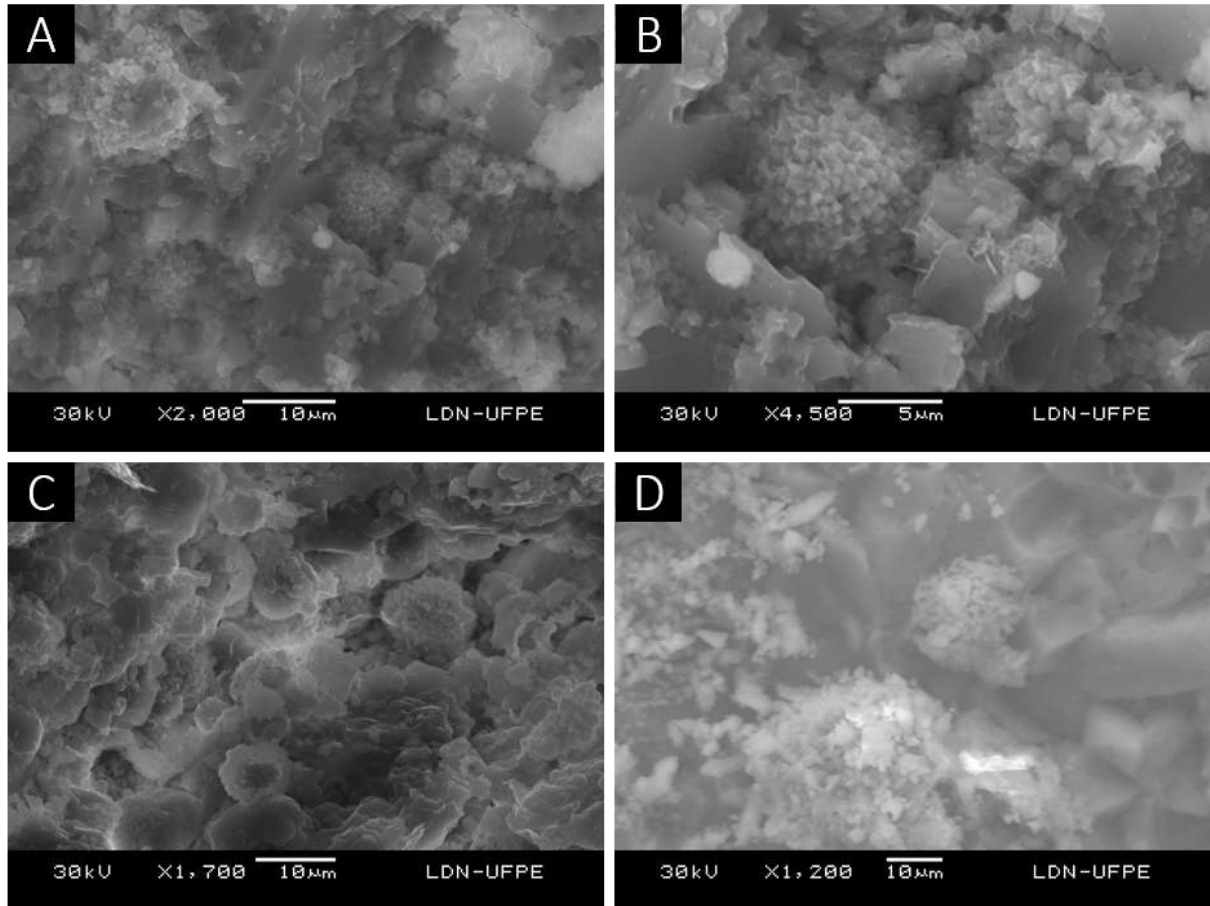
Figura 34 – Fotomicrografias mostrando cristais de calcita formados por precipitação química visualizados sob MEV. Imagens A e B são de amostras do AFL 2, Pedreira do Aurélio; imagens C e D são de amostras do AFL 5, Mina Caldas; E) amostra do AFL 6, Rio da Batateira; F) amostra do AFL 1, Mina Três Irmãos.



Fonte: a autora (2019).

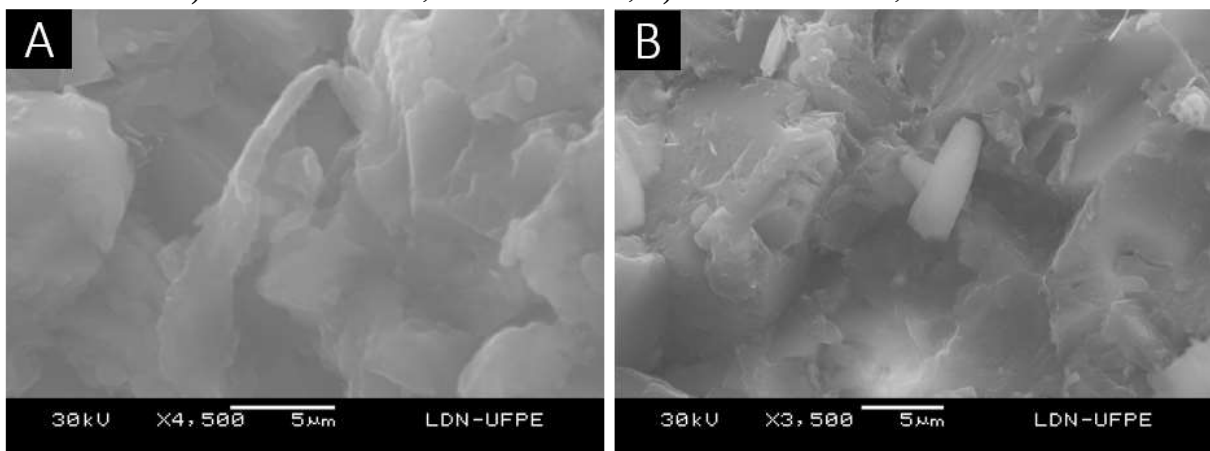
Os valores isotópicos de C e O não são covariantes, exceto no topo do perfil. Na base do perfil (nas amostras 1, 2, 3 e 4 correspondentes às amostras 1a, 1b, 1c e 2 da Tabela 6), as curvas de C e O não são covariantes, enquanto há uma excursão positiva na curva de C de -4,17 a -0,03‰ (V-PDB), ocorre o inverso na curva de O, passando de -4,77 para -6,18 (Figura 42).

Figura 35 – Fotomicrografias mostrando supercrescimento de cristais de calcita espática formando agregados e possíveis pelóides visualizados sob MEV. Nas imagens A e D foram observados agregados de cristais de calcita; B) Imagem “A” mais aproximada; C) Cristais de calcita agregados possivelmente formando pelóides. Imagens A, B, e C são amostras do AFL 4, Mina Conceição Preta; D) Imagem de amostra do AFL 3, Santana do Cariri.



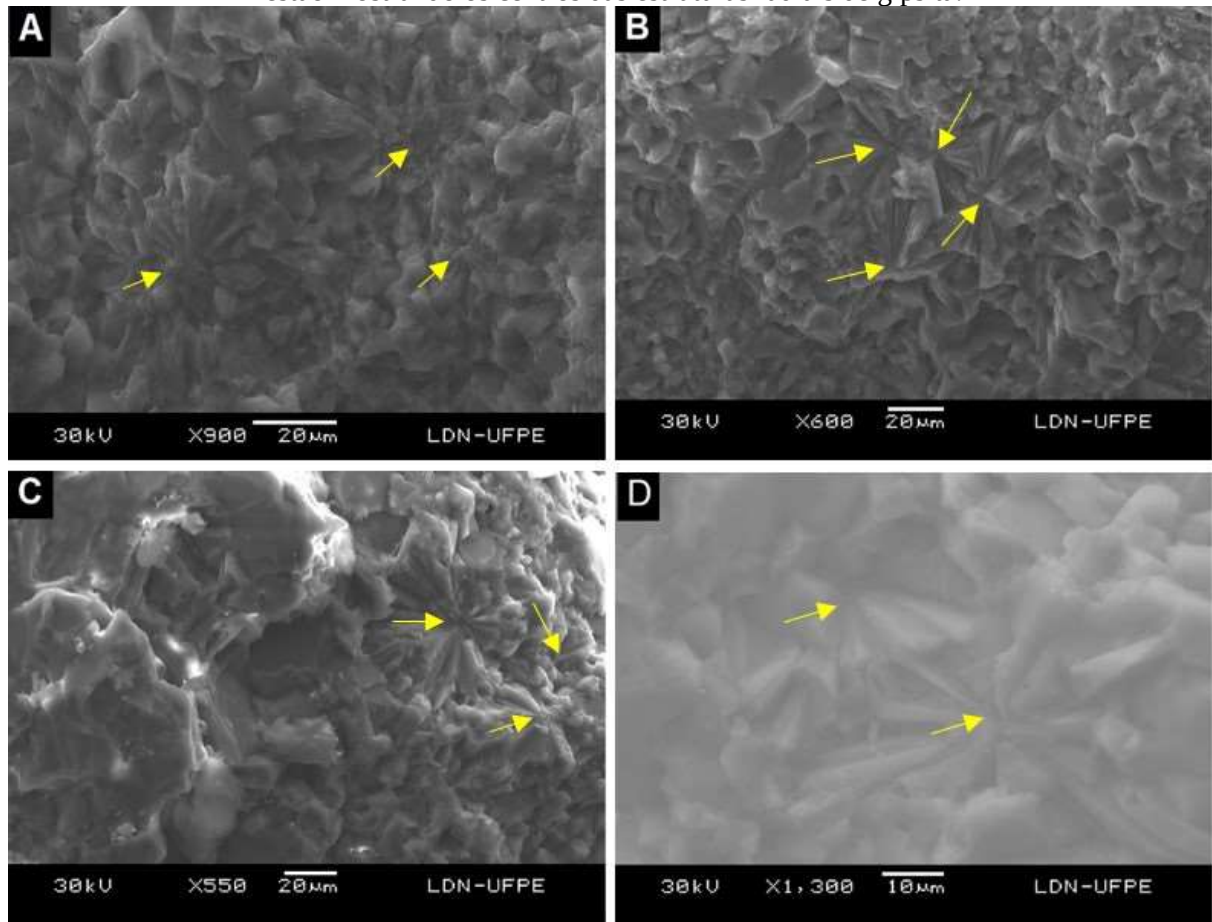
Fonte: a autora (2019).

Figura 36 – Fotomicrografias mostrando cristais de calcita com aspecto filamentosos visualizados sob MEV: A) amostra do AFL 6, Rio da Batateira; B) amostra do AFL 1, Mina Três Irmãos.



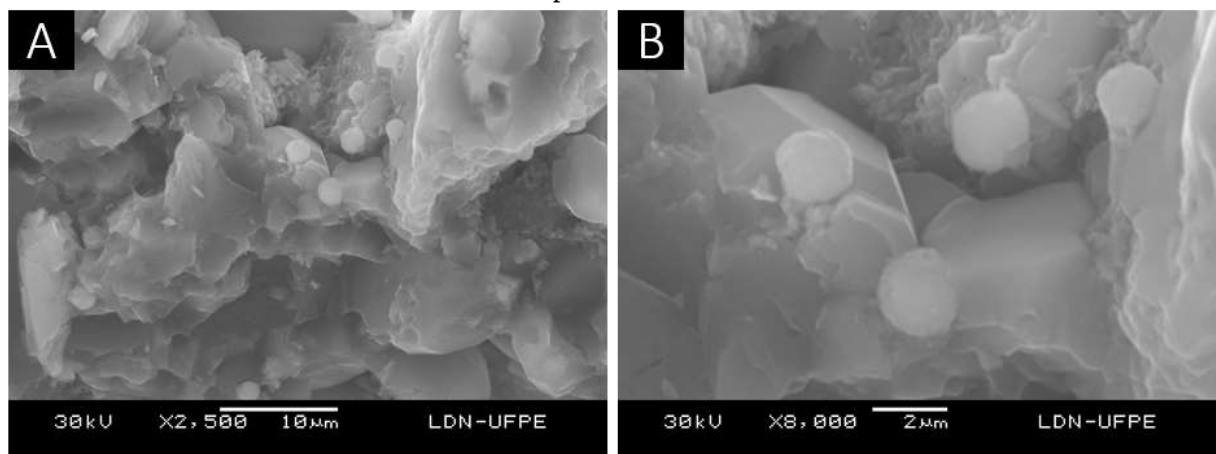
Fonte: a autora (2019).

Figura 37 – Fotomicrografias mostrando estruturas radiais de gipsita visualizados sob MEV. Imagens A, B e C são das amostras do AFL 7, Porteiras; D) amostra do AFL 3, Santana do Cariri. As setas estão mostrando os centros das estruturas radiais de gipsita.



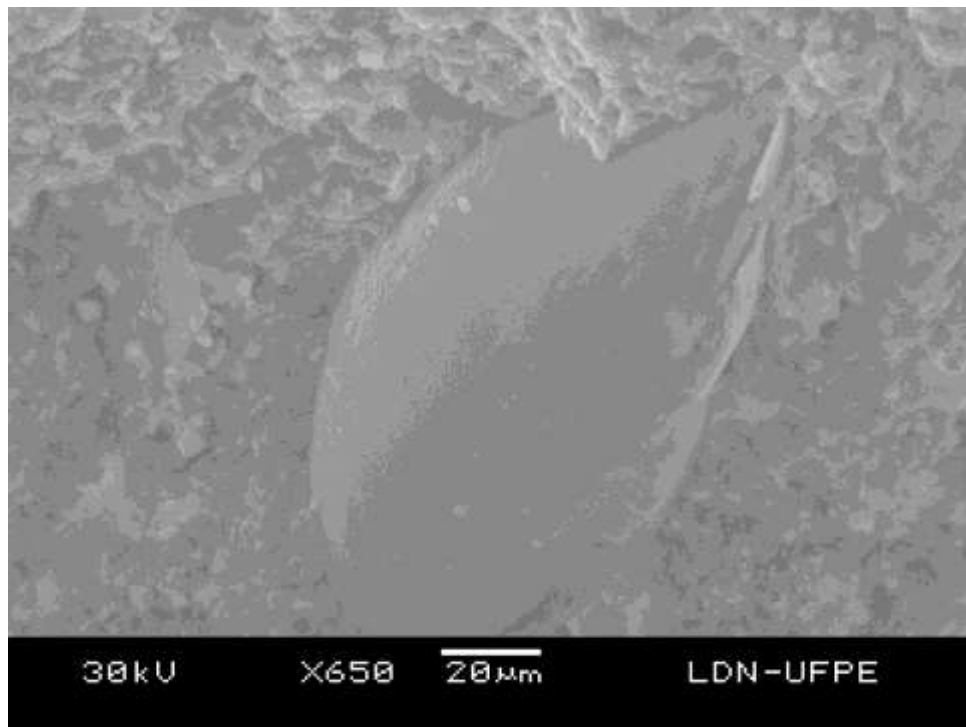
Fonte: a autora (2019).

Figura 38 – Fotomicrografias mostrando calcitas esféricas visualizadas sob MEV: A) cristais esféricos/subesféricos de calcita em amostras do AFL 2, Pedreira do Aurélio; B) imagem “A” mais aproximada.



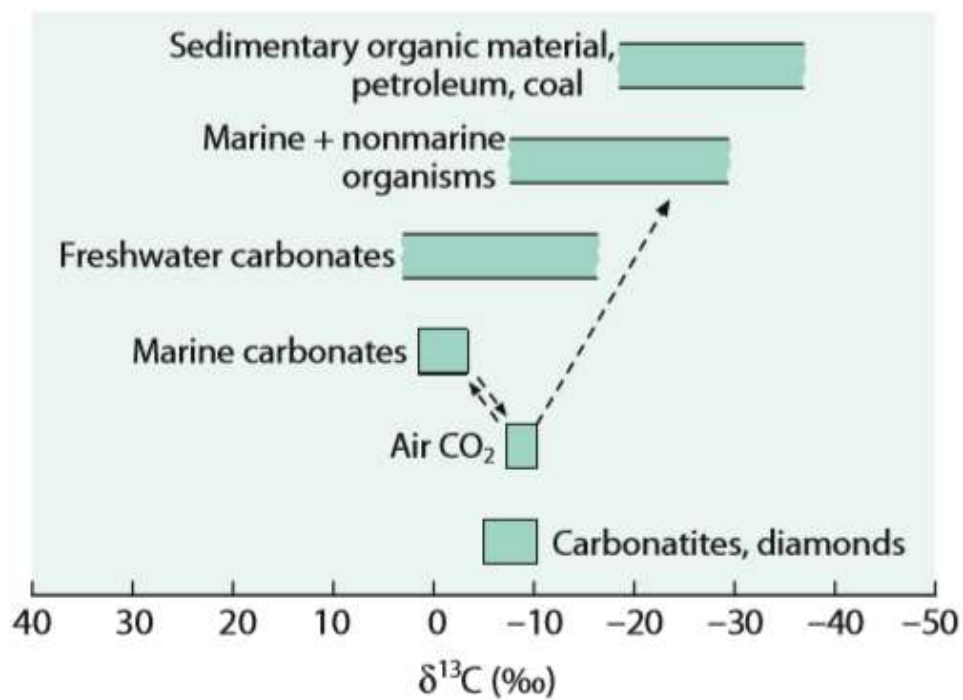
Fonte: a autora (2019).

Figura 39 – Fotomicrografia mostrando ostracode sob MEV, encontrado no AFL 5, Mina Caldas.



Fonte: a autora (2019).

Figura 40 – Valores de $\delta^{13}\text{C}$ em carbonato marinho próximos de 0‰ e em carbonatos não-marinhos entre 0 e -18‰.



Fonte: Hoefs (2018).

Tabela 4 – Resultados isotópicos de C e O das amostras de rochas carbonáticas do topo do nível C6 da Formação Crato.

AMOSTRA	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}\text{‰}$
TI 01	-3,55	-6,09
TI 02	-2,58	-6,10
TI 03	-0,14	-8,11
TI 04	-0,13	-8,14
TI 05	-0,07	-6,84
PA A 01a	-4.17	-4.77
PA A 01b	-3.35	-5.34
PA A 01c	-2.90	-6.10
PA A 02	-0.03	-6.18
PA A 03	-3.93	-4.54
PA A 04	1.27	-7.24
PA A 05	2.01	-6.99
PA A 06	1.38	-7.03
SC A 01	-10,74	-6,24
SC A 02	-1,80	0,23
SC A 03	-13,70	-6,90
SC A 04	-13.45	-6.97
SC A 05	-12,36	-5,82
CP A 01	-6,02	-8,25
CP A 02	-13,63	-6,19
CP B 01	-14,45	-6,03
CP C 01	-4,53	-6,65
CP C 02	-12,48	-6,68
CP D 01	-12,72	-6,83
CP D 02	-14,32	-6,78
CP D 03	-13,59	-6,75
MC A 01	-1,65	-2,38
MC A 02	-1,81	-2.38
MC A 03	-3,32	-3,73
MC B 01	-0,39	-3,03
RB A 01	-13,94	-6,57
RB A 02	-13,63	-6,43
RB A 03	-13,79	-6,12
RB A 04	-13,79	-6,70
RB B 01	-13,74	-6,06
RB B 02	-13,20	-7,79
P 01	-13,95	-7,21
P 02	-18,22	-6,75

Fonte: a autora (2019).

Figura 41 – Perfil quimioestratigráfico (isótopos estáveis de C e O) da seção da Mina Três Irmãos (Nova Olinda, CE). Legenda: cor azul – calcário; cor verde – folhelho.

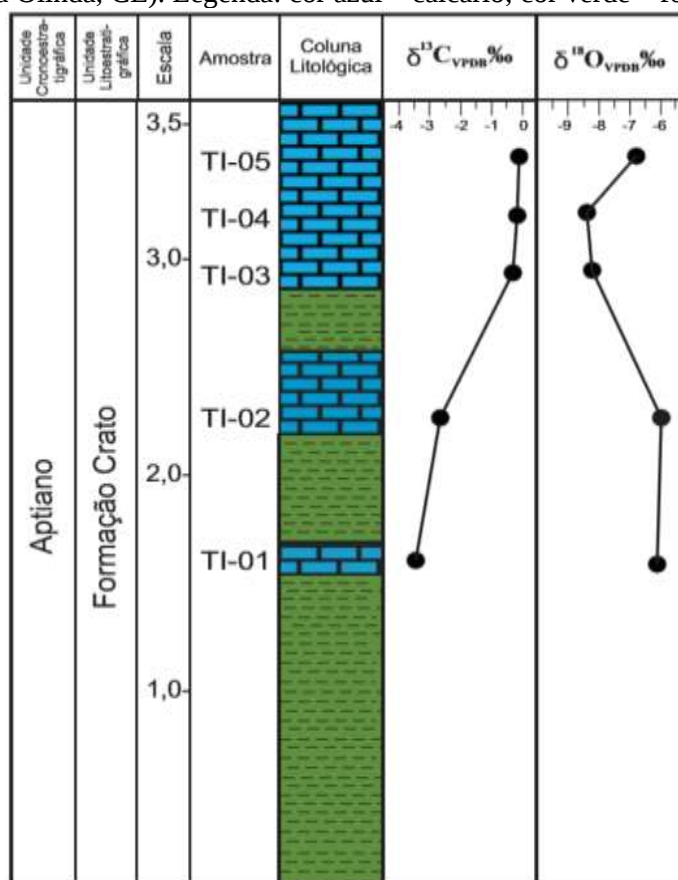


Tabela 5 – Resultados isotópicos de C e O e de análises químicas de elementos maiores (em %) obtidas por FRX de amostras carbonáticas da Mina Três Irmãos (AFL 1).

AMOSTRA	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}\text{‰}$	SiO_2	Al_2O_3	MgO	CaO
TI 01	-3,55	-6,09	0,83	0,27	0,14	51,82
TI 02	-2,58	-6,10	0,15	0,05	0,10	54,02
TI 03	-0,14	-8,11	0,12	0,04	0,05	55,08
TI 04	-0,13	-8,14	0,11	0,04	0,14	53,43
TI 05	-0,07	-6,84	0,13	0,05	0,15	54,37

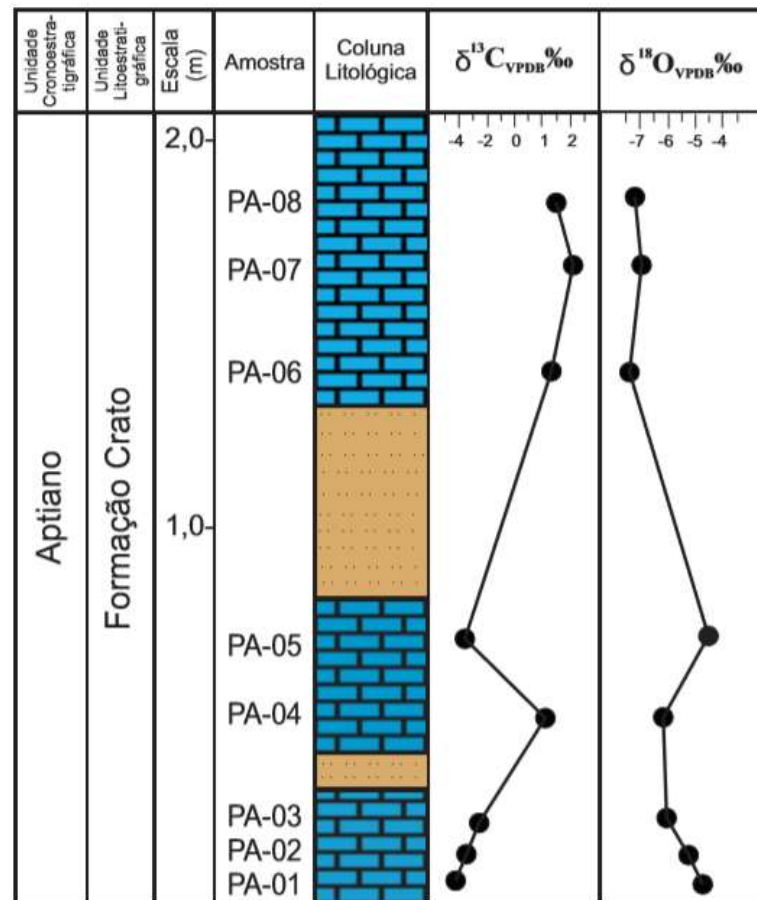
Fonte: a autora (2019).

Tabela 6 – Resultados isotópicos de C e O e de análises químicas de elementos maiores (em %) obtidas por FRX de amostras carbonáticas da Pedreira do Aurélio (AFL 2).

AMOSTRA	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}\text{‰}$	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO
PA A 01a	-4,17	-4,77	0,16	0,05	1,74	1,74	52,77
PA A 01b	-3,35	-5,34	0,15	0,05	2,11	2,11	53,11
PA A 01c	-2,90	-6,10	0,87	0,30	1,68	1,68	51,53
PA A 02	-0,03	-6,18	0,44	0,18	0,62	0,62	53,43
PA A 03	-3,93	-4,54	0,12	0,04	0,65	0,65	53,95
PA A 04	1,27	-7,24	0,14	0,05	0,94	0,94	54,12
PA A 05	2,01	-6,99	0,24	0,08	0,60	0,60	54,01
PA A 06	1,38	-7,03	0,19	0,06	0,79	0,79	54,18

Fonte: a autora (2019).

Figura 42 – Perfil quimioestratigráfico (isótopos estáveis de C e O) da seção da Pedreira do Aurélio (Nova Olinda, CE). Legenda: cor azul – calcário; cor bege – argilito.



Fonte: a autora (2019).

Os valores de SiO_2 e Al_2O_3 são covariantes seguindo uma sequência de uma excursão negativa, depois uma excursão positiva e outra excursão negativa. O MgO segue a mesma sequência de forma mais suave, enquanto o CaO segue uma sequência invertida. Este comportamento pode indicar um influxo de aporte de terrígenos com Fe_2O_3 , uma vez que seus valores acompanham a mesma sequência de SiO_2 e Al_2O_3 (ver Tabela 6).

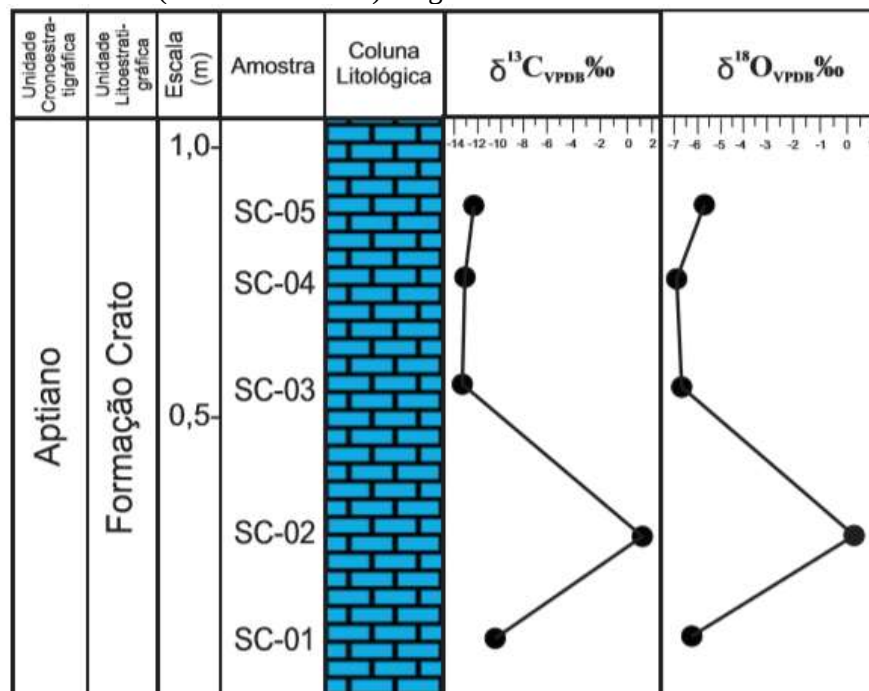
Na amostra do centro do perfil (amostra 5, correspondente à amostra 3 da Tabela 6) os valores de C e O continuam sem covariância, sendo que nesta amostra o valor de C tem uma excursão negativa brusca de -0,03 para -3,93‰ (V-PDB), e o valor de O apresenta uma excursão positiva brusca de -6,18 para -4,54‰ (V-PDB). Os valores de SiO_2 e MgO sofrem um decaimento, enquanto os valores de Al_2O_3 sofrem um incremento modesto (ver Figura 42 e Tabela 6).

No topo da seção (amostras 6, 7 e 8 correspondentes às amostras 4, 5 e 6 da Tabela 6), surge uma covariância nas curvas de C e O, onde ocorre um incremento nos valores de C e O e uma excursão negativa na amostra do topo, acontecendo o mesmo com os valores de SiO_2 e

Al_2O_3 . Os valores de MgO sofrem uma excursão negativa até o topo, enquanto o CaO permanece constante até o topo. Esse comportamento da parte basal e intermediária da seção sugere um desempenho hidrológico de sistema aberto, em que o lago recebe influências externas, e no topo os valores de C e O covariam, indicando um comportamento hidrológico de sistema fechado ver Figura 42 e Tabela 6).

O afloramento estudado na entrada da cidade de Santana do Cariri (AFL 03) apresenta valores isotópicos covariantes em todo o perfil, com valores para $\delta^{13}\text{C}$ de -13,70 para -1,80‰ (V-PDB), e para $\delta^{18}\text{O}$ de -6,90 para 0,23‰ (V-PDB) demonstrando um comportamento hidrológico de um lago de sistema fechado (Figura 43).

Figura 43 – Perfil quimioestratigráfico (isótopos estáveis de C e O) da seção de Santana do Cariri, CE (entrada da cidade). Legenda: cor azul – calcário.



Fonte: a autora (2019).

Os valores de SiO_2 , Al_2O_3 e MgO sofrem um incremento na base do perfil (nas amostras 1, 2 e 3) e covariam com os valores isotópicos de C e O. Exceto os valores de CaO , que sofrem uma excursão negativa suave. Este comportamento indica que o MgO está associado à fase siliciclástica e não à fase carbonática, como seria o caso da presença de dolomita (Tabela 7).

Na porção intermediária do perfil todos esses valores diminuem, exceto o de CaO que sofre um aumento suave. No topo do perfil, os valores das curvas de C e O covariam e estabelecem uma constância. Os valores de Al_2O_3 seguem essa mesma tendência enquanto que os valores SiO_2 , e MgO sofrem uma excursão positiva. O CaO segue essa tendência de forma mais discreta (ver Figura 43 e Tabela 7).

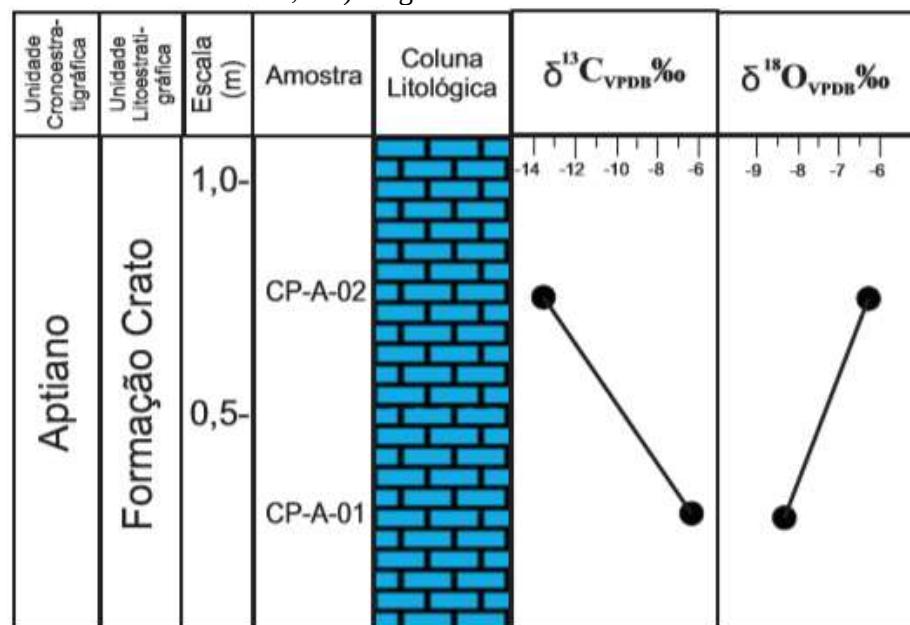
Tabela 7 – Resultados isotópicos de C e O e de análises químicas de elementos maiores (em %) obtidas por FRX de amostras carbonáticas da entrada da cidade de Santana do Cariri (AFL 3).

AMOSTRA	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}\text{‰}$	SiO_2	Al_2O_3	MgO	CaO
SC A 01	-10,74	-6,24	0,30	0,07	0,11	54,39
SC A 02	-1,80	0,23	2,47	0,52	0,18	52,75
SC A 03	-13,70	-6,90	0,31	0,06	0,11	53,38
SC A 04	-13,45	-6,97	4,37	0,05	0,21	56,60
SC A 05	-12,36	-5,82	2,80	0,08	0,18	56,38

Fonte: a autora (2019).

No afloramento Mina Conceição Preta (AFL 04), também localizado em Santana do Cariri, foram estudados três perfis (A, B e C), apresentando valores de $\delta^{13}\text{C}$ entre -14,45 a -4,53‰ (V-PDB), e de $\delta^{18}\text{O}$ entre -8,25 e -6,03‰ (V-PDB). No perfil A, os valores de C decaem abruptamente, já os de O ficam menos negativos, não apresentando covariância entre eles (Figura 44). Os valores de SiO_2 , Al_2O_3 têm a mesma tendência de decaimento sutil. O CaO e o MgO se comportam de forma oposta (Tabela 8).

Figura 44 – Perfil quimioestratigráfico (isótopos estáveis de C e O) da seção A da Mina Conceição Preta, CE). Legenda: cor azul – calcário.



Fonte: a autora (2019).

No perfil B foi coletada apenas uma amostra, a qual apresenta os valores de -14,45‰ (V-PDB) para $\delta^{13}\text{C}$ e de -6,03‰ (V-PDB) para $\delta^{18}\text{O}$, bem semelhantes aos valores isotópicos da amostra 2 (CP-A-02) do perfil A. Os valores de SiO_2 e CaO são valores elevados, 4,05% e 56,35%, respectivamente (ver Tabela 8).

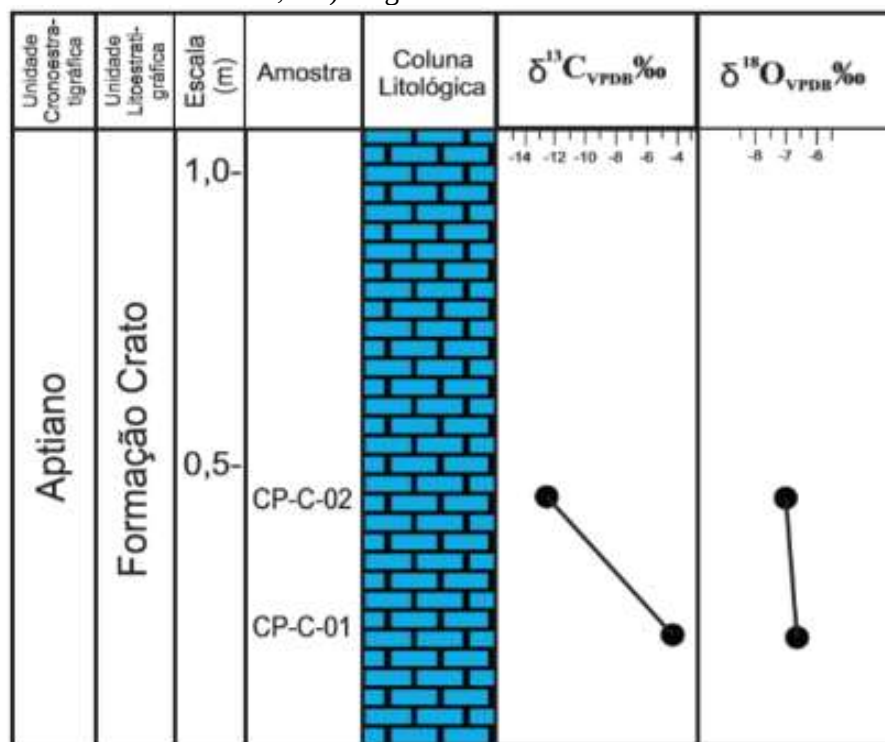
Tabela 8 – Resultados isotópicos de C e O e de análises químicas de elementos maiores (em %) obtidas por FRX de amostras carbonáticas da Mina Conceição Preta (AFL 4).

AMOSTRA	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}\text{‰}$	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO
CP A 01	-6,02	-8,25	1,12	0,20	0,30	0,13	51,86
CP A 02	-13,63	-6,19	0,94	0,06	0,60	0,25	54,95
CP B 01	-14,45	-6,03	4,05	0,08	4,45	0,23	56,35
CP C 01	-4,53	-6,65	1,21	0,17	0,42	0,12	51,23
CP C 02	-12,48	-6,68	0,73	0,09	0,82	0,22	54,42
CP D 01	-12,72	-6,83	0,75	0,16	0,64	0,24	54,19
CP D 02	-14,32	-6,78	1,39	0,16	0,64	0,25	53,53
CP D 03	-13,59	-6,75	3,14	0,34	0,30	0,31	53,33

Fonte: a autora (2019).

No perfil C, os valores isotópicos de C e O seguem a mesma tendência que o perfil A (Figura 45), não covariam, como também se assemelham ao comportamento dos valores de SiO_2 , Al_2O_3 , CaO e MgO (ver Tabela 8).

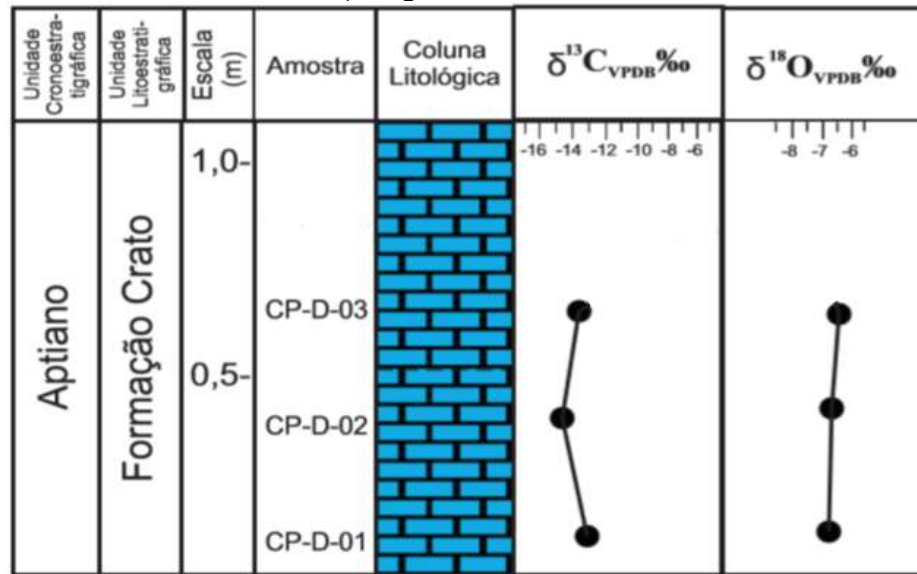
Figura 45 – Perfil quimioestratigráfico (isótopos estáveis de C e O) da seção C da Mina Conceição Preta, CE). Legenda: cor azul – calcário.



Fonte: a autora (2019).

O perfil D apresenta valores das curvas isotópicas de C e O com melhor covariância em relação aos perfis A e C, e apresentam pouca variação (Figura 46). Nesse perfil houve um acréscimo significativo de SiO_2 e uma tendência ascendente sutil para os valores de Al_2O_3 e MgO , enquanto que ocorre um decréscimo, também sutil, nos valores de CaO e Fe_2O_3 (ver Tabela 8).

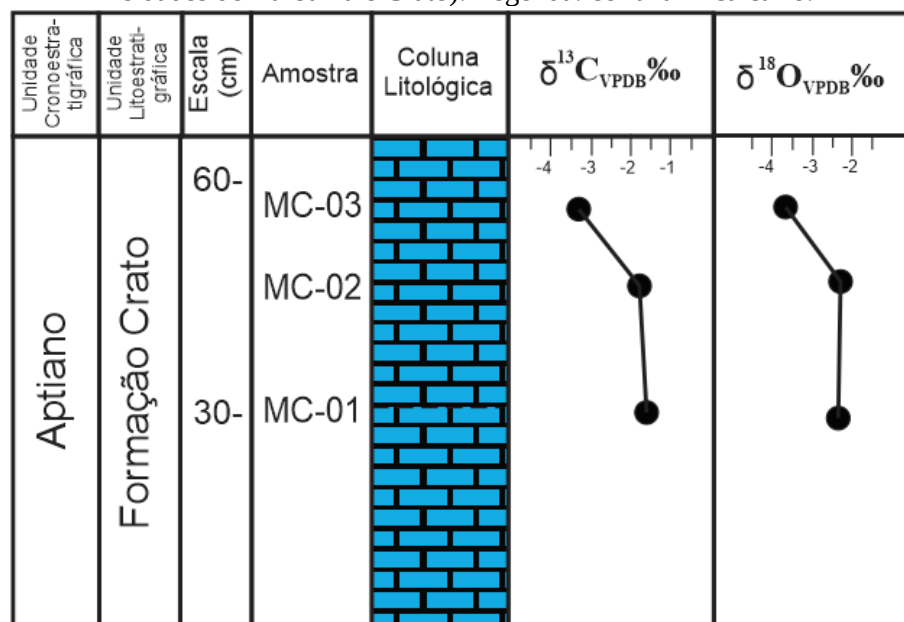
Figura 46 – Perfil quimioestratigráfico (isótopos estáveis de C e O) da seção D da Mina Conceição Preta, CE). Legenda: cor azul – calcário.



Fonte: a autora (2019).

O comportamento isotópico do afloramento estudado na Mina Caldas (AFL 05), apresenta valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ covariantes, com tendências de valores mais negativos (Figura 47). Assim como os valores isotópicos de C e O, os valores de CaO também variam sutilmente para valores mais negativos. Enquanto que os valores de SiO_2 , Al_2O_3 e MgO têm uma tendência crescente (Tabela 9). Conforme este comportamento o desempenho hidrológico nesse ambiente demonstra um lago de sistema fechado.

Figura 47 – Perfil quimioestratigráfico (isótopos estáveis de C e O) da seção da Mina Caldas (entre as cidades de Barbalha e Crato). Legenda: cor azul – calcário.



Fonte: a autora (2019).

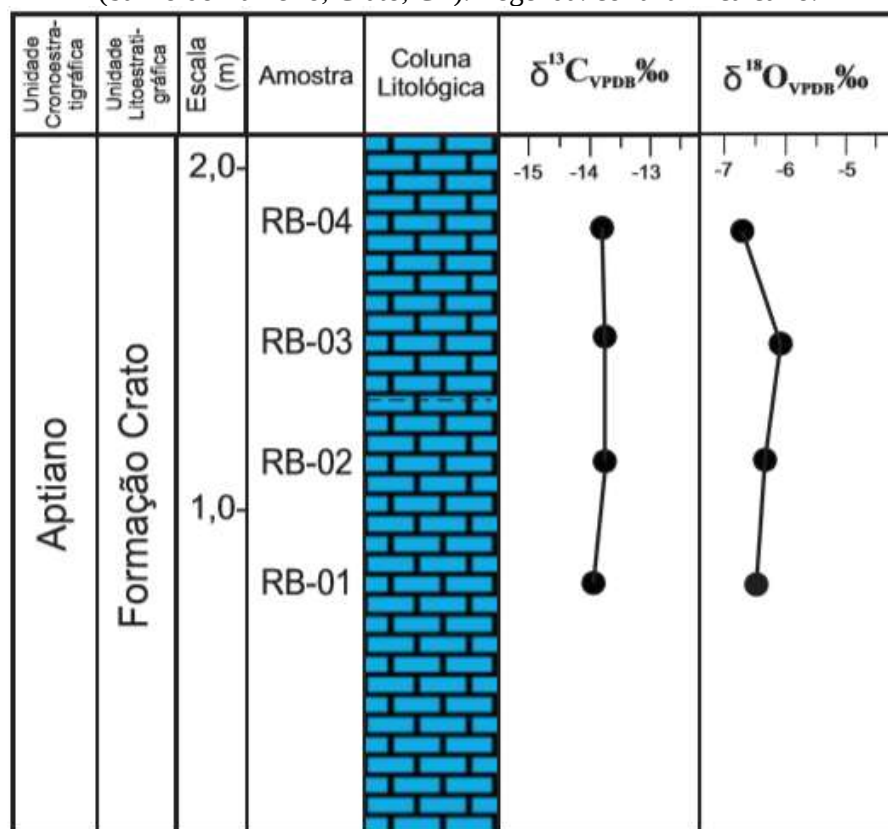
Tabela 9 – Resultados isotópicos de C e O e de análises químicas de elementos maiores (em %) obtidas por FRX de amostras carbonáticas da Mina Caldas (AFL 5).

AMOSTRA	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}\text{‰}$	SiO_2	Al_2O_3	MgO	CaO
MC A 01	-1,65	-2,38	1,85	0,37	0,17	53,98
MC A 02	-1,81	-2,38	1,98	0,39	0,17	53,97
MC A 03	-3,32	-3,73	2,30	0,46	0,20	52,59
MC B 01	-0,39	-3,03	1,27	0,25	0,16	54,40

Fonte: a autora (2019).

O afloramento estudado no Rio da Batateira (AFL 06), apresenta valores isotópicos covariantes. Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ são bem constantes, enquanto que os valores da curva de $\delta^{18}\text{O}$ apresenta uma leve variação na amostra do topo da seção (amostra 4), mas permaneceram entre -7 e -6‰ (V-PDB) como nas outras amostras (Figura 48).

Figura 48 – Perfil quimioestratigráfico (isótopos estáveis de C e O) da seção do Rio da Batateira (bairro do Lameiro, Crato, CE). Legenda: cor azul – calcário.



Fonte: a autora (2019).

Os valores de Al_2O_3 , MgO e CaO sofrem um incremento na base da seção, enquanto os valores de SiO_2 , decaem. Em direção ao topo da seção, esse valor tem um aumento, do mesmo modo ocorre esse aumento nos valores de CaO (Tabela 10). Com esse comportamento isotópico é sugerido que o lago nesse ambiente tinha um desempenho hidrológico de sistema fechado.

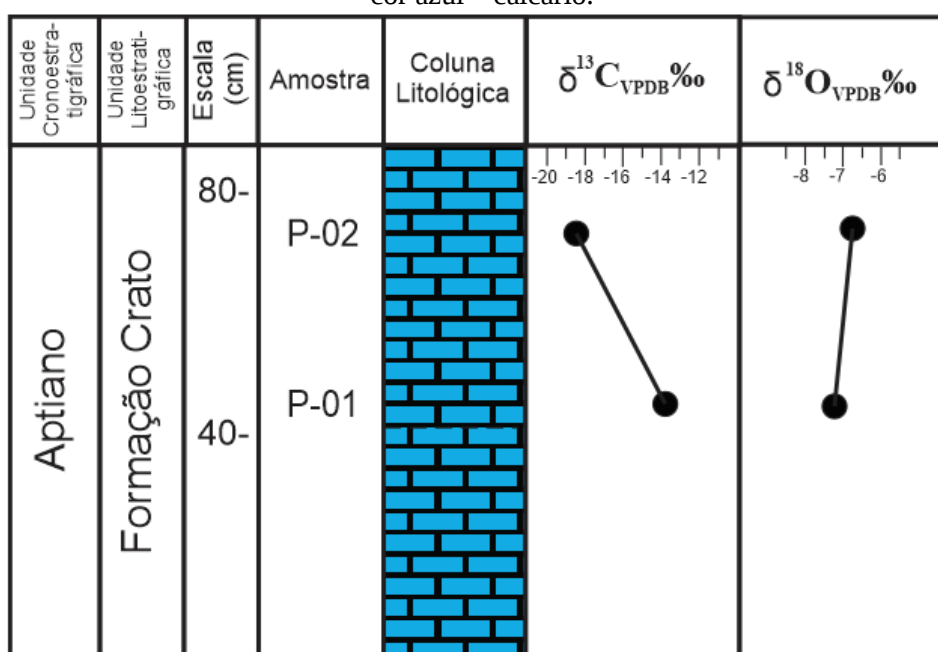
Tabela 10 – Resultados isotópicos de C e O e de análises químicas de elementos maiores (em %) obtidas por FRX de amostras carbonáticas do Rio da Batateira (AFL 6).

MOSTRA	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}\text{‰}$	SiO_2	Al_2O_3	MgO	CaO
RB A 01	-13,94	-6,57	5,87	0,05	0,19	52,93
RB A 02	-13,63	-6,43	3,44	0,16	0,23	54,25
RB A 03	-13,79	-6,12	7,20	0,06	0,20	55,95
RB A 04	-13,79	-6,70	0,77	0,08	0,19	55,14
RB B 01	-13,74	-6,06	4,29	0,04	0,21	55,91
RB B 02	-13,20	-7,79	1,72	0,12	0,25	55,27

Fonte: a autora (2019).

O afloramento estudado em Porteiras (AFL 07), apresenta valores não covariantes, onde o valor de $\delta^{18}\text{O}$ no topo fica bem mais negativo, o que indica um lago com comportamento hidrológico de sistema aberto (Figura 49). Além disso, porque há uma tendência crescente nos valores de SiO_2 , MgO e CaO (Tabela 11).

Figura 49 – Perfil quimioestratigráfico (isótopos estáveis de C e O) da seção de Porteiras. Legenda: cor azul – calcário.



Fonte: a autora (2019).

Tabela 11 – Resultados isotópicos de C e O e de análises químicas de elementos maiores (em %) obtidas por FRX de amostras carbonáticas de Porteiras (AFL 7).

AMOSTRA	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}\text{‰}$	SiO_2	Al_2O_3	MgO	CaO
P 01	-13,95	-7,21	1,97	0,07	0,19	55,73
P 02	-18,22	-6,75	2,33	0,33	0,37	53,20

Fonte: a autora (2019).

Quase todos os perfis estudados apresentaram uma covariância nos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$, o que sugere um comportamento de um sistema lacustre fechado correspondente ao balanço hídrico devido aos efeitos da evaporação (TALBOT; KELTS, 1989; VALERO-GARCÉS et al., 1997).

As amostras dos afloramentos de Santana do Cariri (SC) e Rio da Batateira (RB) apresentam valores isotópicos de C e O bem semelhantes, muito negativos, os quais indicam características de um lago de nível alto com água doce e com comportamento hidrológico fechado. Entretanto, nesses afloramentos foram observadas gretas de dessecação com registros de marcas onduladas com silcretes e calcretes, que são processos resultantes, respectivamente, da precipitação de SiO_2 e CaO causados pela oscilação climática em regiões áridas e semiáridas.

Essas observações sugerem que o lago sofreu uma descida no nível da água pelos efeitos da evaporação e, conseqüentemente, a estratificação e mistura reduzida das águas pela ausência de influxo por se tratar de um lago hidrologicamente fechado.

Os valores de $\delta^{18}\text{O}$, de uma forma geral, indicam condições de água doce durante a precipitação dos carbonatos. Os valores negativos de $\delta^{18}\text{O}$ confirmaram a presença de uma água mais doce, enquanto que os valores positivos de $\delta^{18}\text{O}$ indicaram que o ambiente lacustre continha uma água mais salina, confirmando alguns resultados semelhantes descritos por Talbot (1990) e Lister et al. (1991), que observaram que o balanço entre influxo e evaporação provoca extremas mudanças na composição isotópica de um lago.

A evaporação promove enriquecimento da água do lago em ^{18}O já que o ^{16}O é mais leve e escapa para a atmosfera. Em contrapartida, o elevado influxo de água resulta no retorno ao lago do ^{16}O proveniente da atmosfera, causando a diminuição relativa dos valores de ^{18}O nas águas do lago. Sendo assim, valores baixos (mais negativos) de $\delta^{18}\text{O}$ têm sido relacionados a níveis mais elevados do lago, enquanto que valores elevados (mais para o positivo) de $\delta^{18}\text{O}$ são atribuídos a níveis mais baixos do lago, parâmetros que têm sido relacionados ao clima (PAZ; ROSSETTI, 2006).

Dessa forma, valores mais positivos de $\delta^{18}\text{O}$ têm sido associados com aridez, enquanto valores mais negativos de $\delta^{18}\text{O}$ indicam climas relativamente mais úmidos (KELTS; TALBOT, 1990; VALERO-GARCÉS et al., 1997).

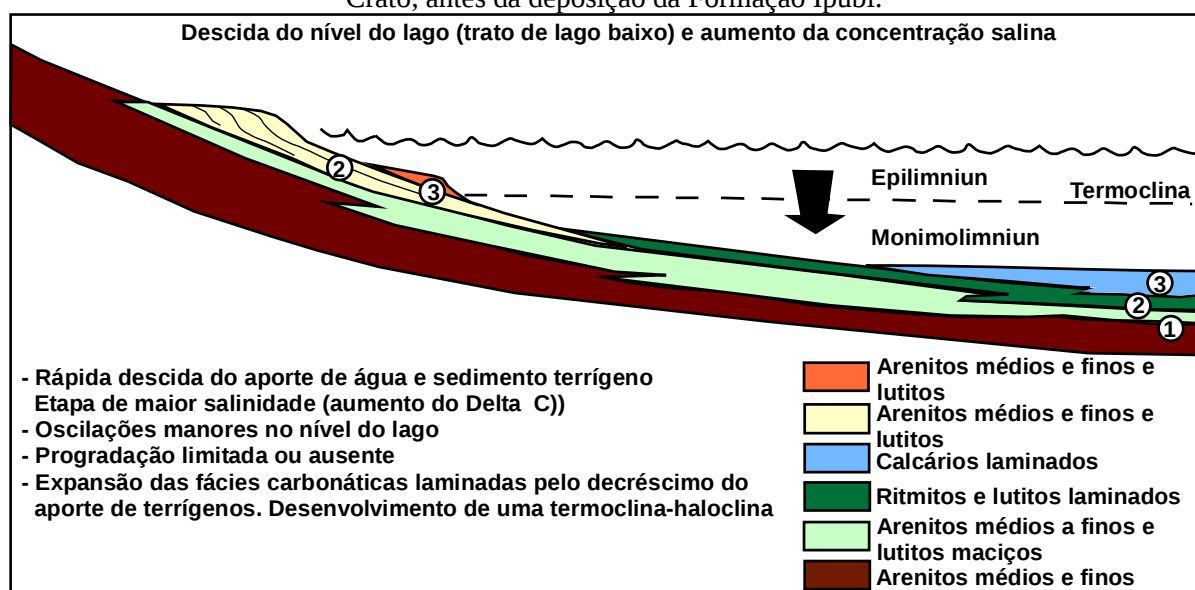
5.3.3 Isótopos estáveis de C e O e o descenso do nível do lago.

Depois que foi sedimentada a última unidade carbonática (nível C6) do sistema lacustre Aptiano da Formação Crato e de sua estabilização o balanço de aportes hídricos e evaporação

pode ter sido negativo em algumas ocasiões, tal como é sugerido pelos dados sedimentológicos e dos valores isotópicos do $\delta^{13}\text{C}$ nas fácies carbonáticas.

A partir de um sistema de lago alto, uma descida rápida do nível da água lacustre, provoca um trato de lago baixo, devido a uma queda nos aportes de água e sedimento, incrementando as condições salinas do lago (valores de $\delta^{13}\text{C}$ mais positivos). Nesta situação, o lago teria um monimolimnium persistente salino (Figura 50).

Figura 50 – Etapa de descida “rápida” do nível do paleolago Aptiano do topo do nível C6 da Formação Crato, antes da deposição da Formação Ipubi.



Fonte: Modificado de Neumann (1999).

Esta interpretação é baseada no fato de que o clima árido favorece a evaporação, provocando maior influência da vegetação terrestre e menor influxo, favorecendo a estratificação do lago, o que acabará por levar à preservação de matéria orgânica, com o consequente empobrecimento de ^{12}C no sedimento do lago.

A produtividade biológica em relação à estratificação da coluna de água pode ter impacto significativo sobre o $\delta^{13}\text{C}$ do carbono inorgânico dissolvido (CID) em ambientes lacustres. A absorção preferencial de ^{12}C por organismos fototróficos promove empobrecimento do carbono das águas superficiais. Ao mesmo tempo, a estratificação e mistura reduzida impede o reabastecimento das águas da superfície ricas em ^{12}C , resultando em valores mais positivos de $\delta^{13}\text{C}$ do CID e, em consequência, precipitados autigênicos (MCKENZIE, 1985; LENG; MARSHALL, 2004).

5.4 ANÁLISES GEOQUÍMICAS DOS PRINCIPAIS ÓXIDOS DAS ROCHAS CARBONÁTICAS DO TOPO DO NÍVEL C6 DA FORMAÇÃO CRATO

Neste tópico são apresentados os resultados obtidos das análises por FRX e o comportamento químico dos principais óxidos (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , P_2O_5 , MnO e PF) das rochas carbonáticas do topo do nível C6 da Formação Crato (Tabela 12).

As primeiras observações feitas a respeito dos dados obtidos foram:

- A) Os conteúdos de TiO_2 , Na_2O , K_2O e P_2O_5 são muito baixos e até não detectados, em sua maioria (caso do TiO_2 e Na_2O);
- B) Os teores de CaO são bastante elevados (acima de 50 %), o que é normal e de se esperar para as rochas carbonáticas consideradas calcários puros;
- C) A perda ao fogo (PF) também é alta, em torno de 40%, acima dos valores normais esperados, que são em torno de 35%. Entretanto, os valores altos obtidos também podem ser considerados normais para um calcário puro, devido à liberação de CO_2 em se tratando de amostras de rochas sedimentares;
- D) Os teores de MgO são muito baixos, demonstrando a ausência de dolomita em todas as amostras estudadas. Se houve dolomitização, aconteceu uma posterior dedolomitização, transformando a dolomita em calcita.

A matriz de correlação (Tabela 13) apresenta os resultados das relações dos elementos maiores estudados. Analisando essa matriz de correlação, é possível verificar que existe uma forte correlação diretamente proporcional entre o Al_2O_3 e o K_2O , indicando a presença de argilomineral potássico, como a esmectita.

Numa análise mais geral, observa-se que SiO_2 apresenta uma relação inversa à PF, embora não seja uma forte relação, confirmando se tratar de calcário com influência de terrígenos, corroborando com as análises petrográficas onde foi verificada a presença de megaquartzos e calcedônia em amostras do afloramento no Rio da Batateira, como também, calcário silicificado no afloramento de Porteiras.

Tabela 12 – Resultados de análises químicas de elementos maiores (em %) obtidas por Fluorescência de raios - X (FRX) das amostras de rochas carbonáticas dos afloramentos do topo do nível C6 da Formação Crato. CP = Conceição Preta. P = Porteiras. SC = Santana do Cariri. TI = Três Irmãos. MC = Mina Caldas. PA = Pedreira do Aurélio. RB = Rio da Batateira. LD = limite de detecção (LD para Na₂O e TiO₂ = 0,01). PF = perda ao fogo.

Amostras	Resultados de Fluorescência de raios-X dos principais óxidos expressos em peso %										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	PF
T1-01	0,83	0,27	2,17	0,14	51,82	<LD	0,08	<LD	0,03	2,58	27,60
T1-02	0,15	0,05	1,15	0,10	54,02	<LD	0,01	<LD	0,02	0,71	56,63
T1-03	0,12	0,04	0,66	0,05	55,08	<LD	0,01	<LD	0,02	0,67	43,13
T1-04	0,11	0,04	0,50	0,14	53,43	<LD	0,01	<LD	0,01	0,62	42,84
T1-05	0,13	0,05	0,68	0,15	54,37	0,01	0,01	<LD	0,01	0,60	42,70
PA-01a	0,16	0,05	1,74	0,09	52,77	0,005	0,01	0,01	0,01	1,07	42,12
PA-01b	0,15	0,05	2,11	0,09	53,11	0,005	0,01	0,01	0,01	0,93	43,15
PA-01c	0,87	0,30	1,68	0,14	51,53	0,005	0,08	0,01	0,02	1,83	42,11
PA-02	0,44	0,18	0,62	0,14	53,43	0,005	0,04	0,01	0,02	0,62	41,34
PA-03	0,12	0,04	0,65	0,08	53,95	0,005	0,01	0,01	0,02	0,78	43,68
PA-04	0,14	0,05	0,94	0,17	54,12	0,005	0,01	0,01	0,01	0,58	41,70
PA-05	0,24	0,08	0,60	0,12	54,01	0,005	0,01	0,01	0,02	0,34	43,48
PA-06	0,19	0,06	0,79	0,13	54,18	0,005	0,01	0,01	0,01	0,50	43,08
SC-A-01	0,30	0,07	1,37	0,11	54,39	0,01	0,01	0,01	0,04	0,47	43,24
SC-A-02	2,47	0,52	1,39	0,18	52,75	0,01	0,14	0,05	0,05	0,45	41,65
SC-A-03	0,31	0,06	1,86	0,11	53,38	<LD	0,01	<LD	0,05	0,52	42,22
SC-A-04	4,37	0,05	0,74	0,21	56,60	<LD	0,01	<LD	0,03	0,30	38,18
SC-A-05	2,80	0,08	0,84	0,18	56,38	0,01	0,01	<LD	0,05	0,32	37,83
CP-A-01	1,12	0,20	4,14	0,13	51,86	<LD	0,08	0,01	0,12	0,45	41,68
CP-A-02	0,94	0,06	0,30	0,25	54,95	<LD	0,01	0,01	0,02	0,39	40,62
CP-B-01	4,05	0,08	0,60	0,23	56,35	0,01	0,01	0,01	0,03	0,30	41,71
CP-C-01	1,21	0,17	4,45	0,12	51,23	<LD	0,03	0,01	0,07	0,53	41,07
CP-C-02	0,73	0,09	0,42	0,22	54,42	<LD	0,02	0,01	0,03	0,48	42,42
CP-D-01	0,75	0,16	0,82	0,24	54,19	0,01	0,03	0,01	0,03	0,44	42,60
CP-D-02	1,39	0,16	0,64	0,25	53,53	<LD	0,03	0,01	0,03	0,38	42,24
CP-D-03	3,14	0,34	0,64	0,31	53,33	<LD	0,09	0,01	0,04	0,46	40,52
MC-A-01	1,85	0,37	0,65	0,17	53,98	<LD	0,11	0,06	0,03	0,39	41,66
MC-A-02	1,98	0,39	0,71	0,17	53,97	<LD	0,11	<LD	0,04	0,41	41,65
MC-A-03	2,30	0,46	1,40	0,20	52,59	<LD	0,14	0,04	0,04	0,65	41,66
MC-B-01	1,27	0,25	0,47	0,16	54,40	<LD	0,10	0,03	0,02	0,45	42,33
RB-A-01	5,87	0,05	0,44	0,19	52,93	0,01	0,01	0,01	0,02	0,40	35,02
RB-A-02	3,44	0,16	4,28	0,23	54,25	0,01	0,02	0,01	0,03	0,46	35,76
RB-A-03	7,20	0,06	0,75	0,20	55,95	0,01	0,01	0,01	0,02	0,42	40,24
RB-A-04	0,77	0,08	0,21	0,19	55,14	0,005	0,02	0,01	0,02	0,33	40,86
RB-B-01	4,29	0,04	0,54	0,21	55,91	0,01	0,01	0,01	0,02	0,43	32,47
RB-B-02	1,72	0,12	0,41	0,25	55,27	0,01	0,03	0,01	0,02	0,35	39,24
P-01	1,97	0,07	1,15	0,19	55,73	0,01	0,02	0,01	0,02	0,66	38,20
P-02	2,33	0,33	1,04	0,37	53,20	0,02	0,09	0,01	0,03	0,37	41,12

Fonte: a autora (2019).

Tabela 13 – Matriz de correlação dos elementos maiores.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O _{3t}	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	PF
SiO ₂	1										
Al ₂ O ₃	0,10	1									
Fe ₂ O _{3t}	-0,07	0,15	1								
MgO	0,50	0,31	-0,22	1							
CaO	0,36	-0,47	-0,54	0,23	1						
Na ₂ O	0,21	0,12	0,01	0,51	0,30	1					
K ₂ O	0,07	0,97	0,12	0,25	-0,46	0,06	1				
TiO ₂	0,08	0,66	-0,06	0,02	-0,15	-0,03	0,69	1			
P ₂ O ₅	0,09	0,35	0,61	0,02	-0,33	0,02	0,37	0,12	1		
MnO	-0,28	0,14	0,24	-0,34	-0,50	-0,20	0,16	-0,10	-0,14	1	
PF	-0,45	-0,09	-0,12	-0,29	-0,05	-0,09	-0,08	0,06	-0,06	-0,28	1

Fonte: a autora (2019).

Dentro deste contexto, observa-se, também, que a relação entre CaO e a PF aparece com valor negativo muito baixo, demonstrando justamente que há influência de terrígenos, uma vez que, por se tratar de um calcário, deveria apresentar uma relação forte diretamente proporcional.

6 CONCLUSÕES

Após associar todos os dados obtidos sugere-se que o nível C6, como apresentado por Neumann (1999), representa a maior expansão da segunda fase lacustre aptiana da tectonosequência Pós-rifte I (Formação Crato) da Bacia do Araripe.

O topo da unidade C6 ficou exposta subaereamente após a descida do nível da água desse paleolago aptiano, deixando em alguns afloramentos (Mina Caldas, Santana do Cariri e Conceição Preta) o registro desta exposição com a presença de gretas de contração (dessecação). Nos afloramentos de Porteiras, Rio da Batateiras, Conceição Preta e Santana do Cariri foram observadas as exposições subaéreas com o registro de marcas onduladas com “silcretes” e “calcretes”, indicando não só a exposição subaérea, mas os efeitos pedogenéticos. Também foi observada a presença de uma brecha carbonática no Rio da Batateira, em Conceição Preta e na Mina Caldas.

Esses aspectos caracterizam um ambiente de clima árido, pelo forte processo de evaporação, favorecendo a precipitação de carbonáticos autigênicos no topo do nível C6 da Formação Crato, os quais foram embasados pelos resultados isotópicos de C e O e de FRX.

Os resultados obtidos pelas análises petrográficas realizadas, principalmente sob MEV, mostraram a forte presença de cristais de calcita em diferentes fases de precipitação e pedogenéticas e a ausência de micro-organismo do tipo algálico como os encontrados e estudados por Catto (2015) e Warren et al. (2017), como bactérias cocóides, EPS e estruturas orgânicas semelhantes.

Dessa forma, os carbonatos do nível C6 do topo da Formação Crato, apresentam características que indicam que sua origem está ligada apenas à precipitação autigênica sob condições hipersalinas, de acordo com os estudos de Heimhofer e Martill (2007) e Heimhofer et al. (2010).

No entanto, sugere-se que sejam realizados estudos mais aplicados à identificação de micro-organismos no nível C6 da Formação Crato para endossar a hipótese que a sua origem esteja ligada tanto à precipitação química como à origem microbial, pois existe a possibilidade de que tenha ocorrido influência microbial na gênese dos laminitos do topo C6, uma vez que foi verificada a presença de matéria orgânica em alguns afloramentos aqui estudados.

REFERÊNCIAS

- ARAI, M. Revisão estratigráfica do Cretáceo Inferior das Bacias Interiores do Nordeste do Brasil. **Geociências**, v.25, n. 1, 2006, p. 7-15.
- ARMSTRONG, H. A.; BRASIER, M. D. **Microfossils**. 2. ed. Malden, Oxford, Carlton: Blackwell Publishing, 2005. 296 p.
- ASSINE, M. L.; PERINOTTO, J. A. J.; A. LDRIOLLI, M. C.; NEUMANN, V. H.; MESCOLOTTI, P. C.; VAREJÃO, F. G. Sequências deposicionais do Andar Alagoas da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. **Boletim de Geociências da Petrobras**, n. 22, 2014. p. 3-28.
- ASSINE, M. L. Bacia do Araripe. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, 2007, v. 15, n. 2, p. 371-389.
- ASSINE, M. L. Paleocorrentes e paleogeografia da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v 24, 1994, p. 223-232.
- ASSINE, M. L. Análise estratigráfica da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 22, n. 3, 1992, p. 289-300.
- ASSINE, M. L. **Sedimentação e tectônica da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil**. 1990. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Rio Claro, 1990.
- BARDOLA, T. P. **Caracterização dos carbonatos microbiais do Membro Crato, Formação Santana, Aptiano-Albiano da Bacia do Araripe**. 2015. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- BERTHOUS, P. Y. **Le Bassin d'Araripe et les petits bassins intracontinentaux voisins (NE du Brésil) formation et évolution dans le cadre de l'ouverture de l'Atlantique Equatorial: Comparaison avec les bassins Ouestafricains dans le même contexte**. Atas I Simpósio Bacia do Araripe e Bacias Interiores do Nordeste, Crato (CE), 1990.
- BEURLIN, K. A Geologia da Chapada do Araripe. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.34, 1962, p. 365-370.
- BRITO NEVES, B. B.; SANTOS, E. J.; VAN SCHMUS, W. R. Tectonic history of the Borborema Province, Northeastern Brazil. In: Cordani, U. G., Milani, E. J., Thomaz Filho, A., Campos, D. A. (eds). Rio de Janeiro. **Tectonic evolution of South America**, 31st International Geological Congress, 2000, p. 151-18.
- BUDD, D. A. et al. Cathodoluminescence in calcite cements: new insights on Pb and Zn sensitizing, Mn activation, and Fe quenching at low trace-element concentrations. **Journal of Sedimentary Research**, v. 70. p. 217-226. 2000.

CABRAL, F. A. A. **Caracterização das microfácies e evolução diagenética dos calcários do topo da Formação Crato, Bacia do Araripe, NE do Brasil**. 2017. 71 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade Federal De Pernambuco, Recife, 2017.

CABRAL, F. A. A.; SILVEIRA, A. C.; RAMOS, G. M. S.; MIRANDA, T. S.; BARBOSA, J. A.; NEUMANN, V. H. M. L. Microfácies e evolução diagenética dos calcários da parte superior da Formação Crato, Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geologia**, v. 49, n. 1. 2019. ISSN 2317-4692.

CAMOIN, G.; CASANOVA, J.; ROUCHY, J. M.; BLANC-VALERON, M. M.; DECONINCK, J. F. Environmental control on perennial and ephemeral carbonate lakes: the central Palaeo-Andean basin of Bolivia during Late Cretaceous to Early Tertiary times. **Sedimentary Geology**, v. 113, p. 1-26, 1997.

CATTO, B. **Laminitos microbiais no Membro Crato (Neaptiano), Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual de São Paulo – UNESP, Rio Claro, 111p, 2015.

COSTA, J. A.; MEXIAS, A. S.; GOMES, M. E. B. Caracterização dos argilominerais usados em matéria-prima cerâmica, da Formação Rio do Rasto, Bacia do Paraná, no município de Turvo, SC. **Cerâmica**, v. 56 n. 340, 2010, p. 360-367.

CRAIG, H. Isotopic Stable for carbon and oxygen and correction factors for mass-spectrometric analysis of carbon dioxide. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 12, p. 133-149, 1957.

DEDAVIT, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

DUNHAM, R. J. **Classification of carbonate rocks according to depositional texture**. Memoir AAPG 1, 1962, p: 108-121.

FRONVAL, T.; JENSEN, N. B.; BUCHARDT, B. Oxygen isotope disequilibrium of calcite in lake Arreso, Denmark. **Geology**, v. 23, p. 463–466, 1995.

GASPARY, J.; ANJOS, N. F. R. Estudo hidrogeológico de Juazeiro do Norte: Ceará. Recife: SUDENE, 1964. p. 25. (Hidrogeologia, 3).

GRABAU, A. W. **On the classification of sedimentary rocks**. American Geologist 33, 1904, p: 228-247.

GRATZER, R.; NEUMANN, V. H.; VORTISCH, W.; ROCHA, D. E. G. A. **Stable isotopes of organics and inorganics, clay mineralogy and chemical environment of Aptian lacustrine succession in northeastern Brazil**. In: Bojar, A. V.; Melinte-Dobrinescu, M. C. e Smit, J. (eds) 2013. Isotopic Studies in Cretaceous Research. Geological Society, London, Special Publications, 382 p. 2013.

HASHIMOTTO, A. T.; APPI, C. J.; SOLDAN, A. L.; CERQUEIRA, J. R. **O Neo-Alagoas nas Bacias do Ceará, Araripe e Potiguar (Brasil): caracterização estratigráfica e paleoambiental**. RBG, 1987, 17(2): 118-122.

HOEFS, J. **Stable Isotope Geochemistry**. Göttingen, Springer. 2018. 460p.

HOEFS, J. **Stable Isotope Geochemistry**. Springer Verlag, Berlim, 2004. p. 1-244.

HEIMHOFER, U.; ARIZTEGUI, D.; LENNIGER, M.; HESSELBO, S. P.; MARTILL, D. M.; RIOS-NETTO, A. M. **Deciphering the depositional environment of the laminated Crato fossil beds (Early Cretaceous, Araripe Basin, North-eastern Brazil)**. *Sedimentology*, Oxford, v. 57, n. 2, 2010, p. 677-694.

HEIMHOFER, U.; MARTILL, D. M. The sedimentology and depositional environment of the Crato Formation. In: **The Crato Fossil Beds of Brazil – Window into an Ancient World** (Eds D. M. Martill, G. Bechly and R. F. Loveridge). Cambridge University Press, Cambridge, p. 44-62, 2007.

JARDIM DE SÁ, E. F.; LEGRAND, J. M.; HACKSPACHER, P. C. Contraste de estilos estruturais e metamórficos na Faixa Dobrada Sergipana. **Revista Brasileira de Geociências**, 11. 1981. p. 128-137.

KELTS, K.; TALBOT, M. Lacustrine carbonates as geochemical archives of environmental changes and biotic/abiotic interactions. In: TILZER, M.M. E SERRUYA, C. (eds.), **Large Lakes: ecological structure and function**. Spring-Verlag, Berlin, 314p. 1990.

LENG, M. J.; MARSHALL, J. D. Paleoclimate interpretation of stable isotope data from lake sediment archives. **Quaternary Science Reviews**, n. 23, p. 811-831, 2004.

LIMA, M. R.; PERINOTTO, J. A. J. Palinologia de sedimentos da parte superior da Formação Missão Velha, Bacia do Araripe. **Revista Geociências**, v. 3, p. 67-76, 1984.

LISTER, G. S.; KELTS, K.; CHEN, K. Z.; YU, J.-Q.; NIESSEN, F. Lake Qinghai, China: closed-lake basin levels and the oxygen isotope record for ostracoda since the latest Pleistocene. **Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.** v. 84, p. 141-162, 1991.

MABESOONE, J. M. Sedimentary Basins of NE Brazil. Federal University of Pernambuco, Recife, Brazil, **Geological Department Special Publication**, 2, 1994.

MABESOONE, J. M.; TINOCO, I. M. Paleoecology of Aptian Santana Formation (Northeastern Brazil). **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, Amsterdam**, v. 14, n. 2, p. 87-118, 1973.

MARSHALL, D. J. **Catodoluminescence of Geological Materials**. Unwin & Hyman Ltda. Boston, 146 p. 1988.

MARTILL, D. M. **Fossils of the Santana and Crato Formations, Brazil**. Field Guides to Fossils, n. 5, London: The Palaeontological Association, 1993.

MASLEN, E.; GRICE, K.; LE METAYER, P.; DAWSON, D.; EDWARDS, D. Stable carbon isotopic compositions of individual aromatic hydrocarbons as source and age indicators in oils from western Australian basins. **Organic Geochemistry**, v. 42, n. 4, 2011, p. 387-398.

MATOS, R. M. D. The NE Brazilian rift system. **Tectonics**, v. 11, p. 766-791, 1992.

MATSUDA, N. S.; MUTTI, M.; CAMPINHO, V. S.; DOS ANJOS, S. M. C.; BONTIGNALI, T.; MCKENZIE, J. A.; PACTON, M.; VASCONCELOS, C. **Combining microbial fossil and mineral assemblages to reconstruct paleoenvironmental conditions during formation of Aptian lacustrine carbonate platform, Brazil**. 19. International Sedimentological Congress, Geneva, Switzerland, 2014.

MCKENZIE, J. A. Stable-isotope mapping in Messinian evaporate carbonates of central Sicily. **Geology**, v. 13, p. 851-854, 1985.

MEYERS, W. J. Carbonate cement stratigraphy of the Lake Valley Formation, Mississippian, Sacramento Mountains, New Mexico. **J. Sediment. Petrol.**, v. 44, p. 837-861, 1974.

NAGATANI, T.; SAITO, S.; SATO, M.; YAMADA, M. Development of an ultra high resolution scanning electron microscope by means of a field emission source and in-lens system. **Scanning Microscopy**. v.11, p. 901-909, 1987.

NEUMANN, V. H. M. L.; ASSINE, M. L. Stratigraphic Proposal to the Post-Rift I Tectonic-Sedimentary Sequence of Araripe Basin, Northeastern Brazil. In: **STRATI**, 2015, Graz. Abstracts of the 2nd LD International Congress on Stratigraphy. Graz: Ber. Inst. Erdwiss. K.-F.-Univ. Graz, 2015. v. único, 2015, p. 274-274.

NEUMANN, V. H. **Estratigrafia, Sedimentologia, Geoquímica y Diagénesis de los Sistemas Lacustres Aptiense-Albienses de La Cuenca de Araripe (Noreste de Brasil)**. Tesis Doctoral. Departament d'Estratigrafia i Paleontologia y Departament de Geoquímica, Petrologia i Prospecció Geològica. Facultat de Geologia. Universitat de Barcelona. 250p, 1999.

NEUMANN, V. H.; CABRERA, L. **Uma nova proposta estratigráfica para La tectonosequencia post-rifte de La Cuenca de Araripe, Noreste de Brasil**. In: Simpósio do Cretáceo Brasileiro, 5, Serra Negra. UNESP, Boletim de Resumos: p. 279-285, 1999.

OLIVEIRA, A. E.; Frota, M. N. **Confiabilidade metrológica na determinação de espécies químicas em materiais siderúrgicos por espectrometria de fluorescência de raios-X**. 2011. 115 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

PAZ, J. D. S.; ROSSETTI, D. F. Paleohydrology of an Upper Aptian lacustrine system from northeastern Brazil: integration of facies and isotopic geochemistry. **Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.**, v. 241, p. 247-266, 2006.

PONTE, F. C.; PONTE FILHO, F. C. **Evolução tectônica e classificação da Bacia do Araripe**. Boletim do 4º Simpósio Sobre o Cretáceo do Brasil, Águas de São Pedro – Rio Claro, 1996.

PONTE, F. C.; APPI, C. J. **Proposta de revisão da coluna litoestratigráfica da Bacia do Araripe**. In: XXXVI Congresso Brasileiro de Geologia, Natal – Rio Grande do Norte. Anais... Sociedade Brasileira de Geologia, v.1, 1990, p. 211-226.

REINHARDT, E. G.; FITTON, R. J. E.; SCHWARCZ, H. P. Isotopic (Sr, O, C) indicators of salinity and taphonomy in marginal marine systems. **Journal of Foraminiferal Research**, v. 33, p. 262-272, 2003.

RENAULT, R. W.; GIERLOWISK- KORDESCH, E. **Lakes**. In: James N.P., Dalrymple R.W. (eds.) Facies models 4. Geological Association of Canada, p. 541-577, 2010.

SCHOLLE, P. A. **A color guide to the petrography of carbonate rocks: grains, textures, porosity, diagenesis**, AAPG Memoir 77. 2003.

SILVA, A. L.; NEUMANN, V. H. Formação Crato da Bacia do Araripe: um reservatório análogo ao Calcário Trairí (Formação Paracuru), Bacia do Ceará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PED EM PETRÓLEO E GÁS. 2., Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Associação Brasileira de PeD em petróleo e gás: Rio de Janeiro, 2003.

SILVA, T. L. S. **Geocronologia, geoquímica isotópica Re-Os e elemental em folhelhos pirobetuminosos da Formação Ipubi, Bacia do Araripe**. 2017. 95 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade Federal De Pernambuco, Recife, 2017.

SILVEIRA, A. C.; VAREJÃO, F. G.; NEUMANN, V. H.; SIAL, A. N.; ASSINE, M. L.; FERREIRA, V. P.; FAMBRINI, G. L. Químioestratigrafia de Carbono e Oxigênio dos Carbonatos Lacustres Aptianos da Serra do Tonã, Sub-bacia de Tucano Norte, NE do Brasil. **Estudos Geológicos**, v. 24, n. 2, 2014, p. 47-63.

TALBOT, M. R. A review of the paleohydrological interpretation of carbon and oxygen isotope ratios in primary lacustrine carbonates. **Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)**, v. 80, p. 261-279, 1990.

TALBOT, M. R.; KELTS, K. R. The Phanerozoic record of lacustrine basins and their environmental signals. **Palaeogeog. Palaeoclimat. Palaeoecol**, v. 70, p. 1-304, 1989.

TORRES, M. M.; CRISTOFOLETTI, S. R.; SARDINHA, D. S.; GODOY, L. H. Análise geoquímica de rochas sedimentares argilosas a partir do conteúdo dos elementos maiores, perda ao fogo e difração de raios-X. São Paulo, UNESP, **Geociências**, v. 37, n. 1, p. 39-53, 2018.

VALERO-GARCES, B.; LAIRD, K. R.; FRITZ, S. C.; KELTS, K.; ITO, E.; GRIMM, E. C. Holocene climate in the northern Great Plains inferred from sediment stratigraphy, stable isotopes, carbonate geochemistry, diatoms, and pollen at Moon Lake, North Dakota. **Quaternary Research**, v. 48, p. 359-369, 1997.

VASCONCELOS, C. O.; WARTHMAN, R.; MCKENZIE, J. A.; VISSCHER, P. T.; BITTERMANN, A. G.; LITH, Y. Lithifying microbial mats in Lagoa Vermelha, Brazil: Modern Precambrian relics? **Sedimentary Geology**, v. 185, 2006, p. 175-183.

VIANA, M. S., NEUMANN, V. H. L. **Membro Crato da Formação Santana, Chapada do Araripe, CE - Riquíssimo registro de fauna e flora do Cretáceo.** In: Schobbenhaus, C.; Campos, D. A.; Queiroz, E. T.; Winge, M.; Berbert-Born, M. L. C. (Edits.) *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*. 1. ed. Brasília: DNPM/CPRM - Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP), 2002. v. 01, p. 113-120.

WARREN, L. V.; VAREJÃO, F. G.; QUAGLIO, F.; SIMÕES, M. G.; FÜRSICH, F. T.; POIRÉ, D. G.; CATTO, B.; ASSINE, M. L. Stromatolites from the Aptian Crato Formation, a hypersaline lake system in the Araripe Basin, northeastern Brazil, **Facies**, v. 63, n. 3, 2017.