

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**ESTUDO PETROGRÁFICO DAS ROCHAS FOSFÁTICAS DA FORMAÇÃO  
BOCAINA (GRUPO CORUMBÁ) NA SERRA DA BODOQUENA – MATO GROSSO  
DO SUL**

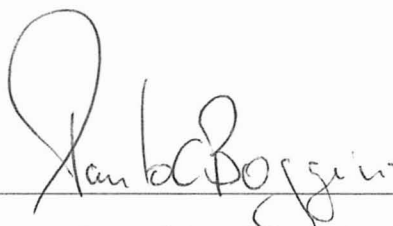
Paulo Eiji Koki

Orientador: Paulo César Boggiani

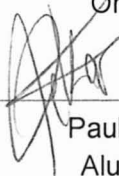
Monografia de Trabalho de Formatura  
(TF - 2017/40)

São Paulo  
2017

São Paulo, 07 de novembro de 2017.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Paulo César Boggiani', written over a horizontal line.

Paulo César Boggiani  
Orientador

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Paulo Eiji Koki', written over a horizontal line.

Paulo Eiji Koki  
Aluno de TF

## AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho de formatura a todas as pessoas e grupos da qual fiz contato, que me ajudaram durante a graduação e em especial neste ano (2017).

Primeiramente à minha família, meus pais (Paulo e Helena) me deram total apoio a todas as minhas escolhas. Também em especial, aos meus tios (Leonardo e Yuquiko) que me acolheram em sua residência em 2017.

Agradeço enormemente ao meu orientador (Paulo César Boggiani) por me receber no projeto e me ajudar durante todas as etapas e, conjuntamente, Leonardo C. Joven, mestrando do IGc, que me auxiliou também com o projeto.

Ao Prof. Ricardo Trindade, professores e pós-graduandos do projeto temático “O Sistema Terra e a evolução da vida no Neoproterozoico”, que possibilitaram minha visita à área de estudo (MS) em maio de 2017 e financiamento do presente trabalho.

À empresa EDEM Agromineral, que possibilitou a visita às áreas de pesquisas e muito nos ajudaram com informações.

A todos os relatores deste projeto, por me ajudarem com críticas e correções, fundamentais para minha formação.

Aos professores, funcionários e toda equipe técnica que me ajudaram na graduação e trabalhos referentes ao projeto.

Agradeço também a todos os amigos de Campinas e São Paulo que me ajudaram ao longo desses anos. Ao pessoal da república Grauvaca onde morei 4 anos, aos meus queridos amigos do ‘Nois’, da família Geoatlética, do eterno Eneas 5656, e toda turma 56.

Também a todos, que não citei, mas que passaram pela minha experiência na Universidade de São Paulo, muito obrigado.

## RESUMO

Fosforitos são rochas ricas em fosfato podendo ser de natureza ígnea e sedimentar, que apresentam importância econômica e científica. No caso das rochas fosfáticas sedimentares, existe uma grande gama de trabalhos científicos, justamente por elas fornecerem dados sobre a evolução sedimentar e geoquímica do paleoambiente na sedimentação e diagênese. Sabe-se ainda que grandes depósitos sedimentares fosfáticos formaram-se em eventos específicos no tempo geológico, sendo o período transicional entre o Cambriano e Ediacarano um dos principais. O depósito Ressaca possui exposições representativas da Formação Bocaina - Grupo Corumbá (Neoproterozoico) e neste presente trabalho, estudou-se as variações faciológicas encontradas dando destaque para o nível fosfático localizado no topo estratigráfico da formação. Aproveitando a abertura de trincheiras nas proximidades da área de estudo, obteve-se novas informações sobre as rochas fosfáticas da Formação Bocaina, e um novo nível fosfático foi descrito na base da Formação Guaicurus. Com base em todas informações coletadas do presente trabalho em conjunto com recentes interpretações bibliográficas, novas releituras de trabalhos anteriores na mesma área de estudo foram realizadas e algumas mudanças na coluna estratigráfica do depósito Ressaca foram propostas. Análises faciológicas indicam de modo geral ambiente de águas rasas e agitadas. Para a fosfogênese, discute-se uma diagênese complexa associada a processos biogênicos e diagenéticos. Dados geoquímicos dos fosforitos da Formação Bocaina indicam que anomalias positivas de cério, as quais seriam indicativas de ambiente redutor, porém a análise de fácies sedimentar indica condições de águas oxigenadas, conseqüentemente, as condições redutoras devem estar associadas à diagênese. Com relação à análise petrográfica, realizada em amostras do topo da Formação Bocaina, interpreta-se a seguinte sequência genética para explicar a origem dos fosforitos – 1) O fosfato dissolvido seria trazido para as águas através dos óxi-hidróxidos de ferro; 2) após a deposição, ocorreria liberação do elemento fósforo até sua saturação nas águas intersticiais, o que proporcionaria a precipitação autigênica do fósforo, em ambiente redutores (verificados pela anomalia positiva de Ce); 3) retrabalhamento dos sedimentos com fosforito autigênico e concentração dos intraclastos de fosforito; 4) os intraclastos teriam sido cimentados por calcita, com a possibilidade de ocorrência de dolomita primária. Ainda, os fosforitos da Formação Bocaina estariam associados a correntes de ressurgências marinhas numa condição específica de transição entre processos fosfogenéticos precambrianos e fanerozoicos, diferentes entre si.

**Palavras-chave:** fosforitos, fosfogênese, Formação Bocaina, petrografia, Ediacarano.



## ABSTRACT

Phosphorites are igneous or sedimentary rocks enriched with phosphorus, that present economic and scientific importance. Sedimentary phosphorites provide data about the geochemical and sedimentary evolution along with depositional and diagenetic processes, and for this reason, there are a lot of papers about this type of rock. Large phosphatic sedimentary deposits formed in specific events on geological time scale, and the Ediacaran-Cambrian transition is one of the most important of them. Ressaca deposit have expositions that are representative of the Bocaina Formation - Corumba Group (Neoproterozoic). In this thesis, faciological investigation based on petrography were studied, highlighting the phosphatic layer on top of the Bocaina Formation. Trench

investigations on Ressaca deposit proximities brought new informations about the phosphatic layer, and the recent discovery of a new phosphatic layer in Guaicurus Formation. Based on all the information gathered in this present work and recent papers, some reinterpretations were proposed on past works done in the same area and a few changes were proposed on the faciological column of the Bocaina Formation. The paleoenvironment is interpreted as shallow and agitated waters. The phosphogenesis is discussed as a complex diagenesis associated with biogenic processes. Isotopic Ce anomalies on phosphorites samples indicate an oxic marine environment with redox conditions probably associated to diagenesis. A genetic sequence based on petrographic analysis were proposed to explain the origin of Bocaina's phosphorites; 1) Dissolved phosphate was brought to the deep waters adsorbed on Fe-(oxyhydr)oxides structures; 2) After deposition, phosphorus on sediments were liberated and saturated the pore waters, permitting the authigenic precipitation of phosphatic minerals; 3) Reworking processes would have accumulated phosphatic sediments and intraclasts; 4) These intraclasts would have been cemented with calcite and probably primary dolomite. Still, Bocaina's phosphorites would be associated with marine upwellings in a specific condition, like a transition between phanerozoic and proterozoic phosphogenic processes.

**Keywords:** phosphorites, phosphogenesis, Bocaina Formation, petrography, Ediacaran.

# Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>7</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>8</b>
<b>3. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>8</b>
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>9</b>
4.1 Revisão bibliográfica .....	9
4.2 Trabalho de campo.....	9
4.3 Petrografia .....	10
<b>5. REVISÃO BILIOGRÁFICA .....</b>	<b>10</b>
5.1 Contexto Geológico .....	10
5.1.1 Serra da Bodoquena .....	10
5.1.2 Grupo Corumbá .....	11
5.2 Fosforitos.....	13
5.2.1 Ciclo do fósforo .....	14
5.2.2 Fosfogênese .....	14
5.3 Classificação de fosforitos e rochas carbonáticas.....	17
5.3.1 Evolução das classificações .....	17
5.3.2 Principais constituintes de rochas carbonáticas e fosfáticas .....	19
5.4 Estudos de fosforitos neoproterozoicos .....	20
5.5 Elementos terras-raras associados .....	23
<b>6. RESULTADOS .....</b>	<b>23</b>
6.1 Fácies da Formação Bocaina .....	23
6.2 Fácies da Formação Bocaina na Fazenda Ressaca.....	27
6.2.1 Fácies de Ooid Grainstone .....	27
6.2.2 Fácies de Boundstone LLH.....	29
6.2.3 Fácies de Mudstone.....	30
6.2.4 Fácies de Boundstone SH .....	31
6.2.5 Fácies de Rudstone .....	33
6.2.6 Fácies de Mudstone Phosphorite.....	35
6.2.7 Fácies de Brecha (base da Formação Tamengo) .....	39
6.3 Fosforitos da Formação Guaicurus .....	41
<b>7. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO.....</b>	<b>41</b>
<b>8. CONCLUSÕES .....</b>	<b>44</b>
<b>9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>46</b>

# 1. INTRODUÇÃO

Fosforitos e rochas fosfáticas apresentam significativa importância econômica, pelo seu uso na agricultura, mas também relevante importância científica. Para a Ciência, a importância advém do seu conteúdo paleontológico e, principalmente, pelo seu potencial para interpretações das condições geoquímicas durante a deposição (Filipelli, 2008).

No Brasil há carência de rochas fosfáticas. A produção brasileira de fosfato, segundo o sumário mineral do DNPM (2015), foi de aproximadamente 6,5 milhões de toneladas em 2015, enquanto que a produção mundial foi de aproximadamente 217 milhões de toneladas, com quase metade desse valor produzido apenas pela China.

Fato marcante da produção de fosfato no Brasil é que, ao contrário do resto do mundo, as jazidas são essencialmente de rochas ígneas (intrusões alcalinas), enquanto a maior produção mundial se dá a partir da lavra de rochas sedimentares (Pufahl e Groat, 2016).

No presente trabalho de formatura, do curso de Geologia do Instituto de Geociências da USP, apresentam-se estudos petrográficos de jazida de fosforito da Formação Bocaina (Grupo Corumbá – Ediacarano), conhecida como Fazenda Ressaca, em Bonito, Mato Grosso do Sul, acrescidos da reinterpretção de dados já existente, de estudos anteriores (Justo, 2000; Fontaneta, 2012), e apresentação de novo modelo genético.

Durante as atividades de campo, referentes ao presente projeto, foram coletadas novas amostras, disponibilizadas pela abertura de novas trincheiras para a pesquisa mineral em curso na área e, também, verificada ocorrência de novo nível estratigráfico de fosforito na base da Formação Guaicurus.

Recentemente, foram descobertos novos icnofósseis escavadores nas formações Tamengo e Guaicurus (Parry et al. 2017). A associação desses organismos escavadores com a hipótese da "Revolução Agronômicas" (Kerber et al., 2013) abre novas perspectivas de interpretações genéticas, aliado ao fato de que, novas datações radiométrica na Formação Bocaina (Parry et al. 2017), confirmam a correlação estratigráfica com a Formação Doushantuo, na China (Cui et al., 2016; Condon et al. 2005), conhecidas pela presença dos fósseis metazoários mais antigos conhecidos, colocando os fosforitos em questão com potencial para estudos paleontológicos.

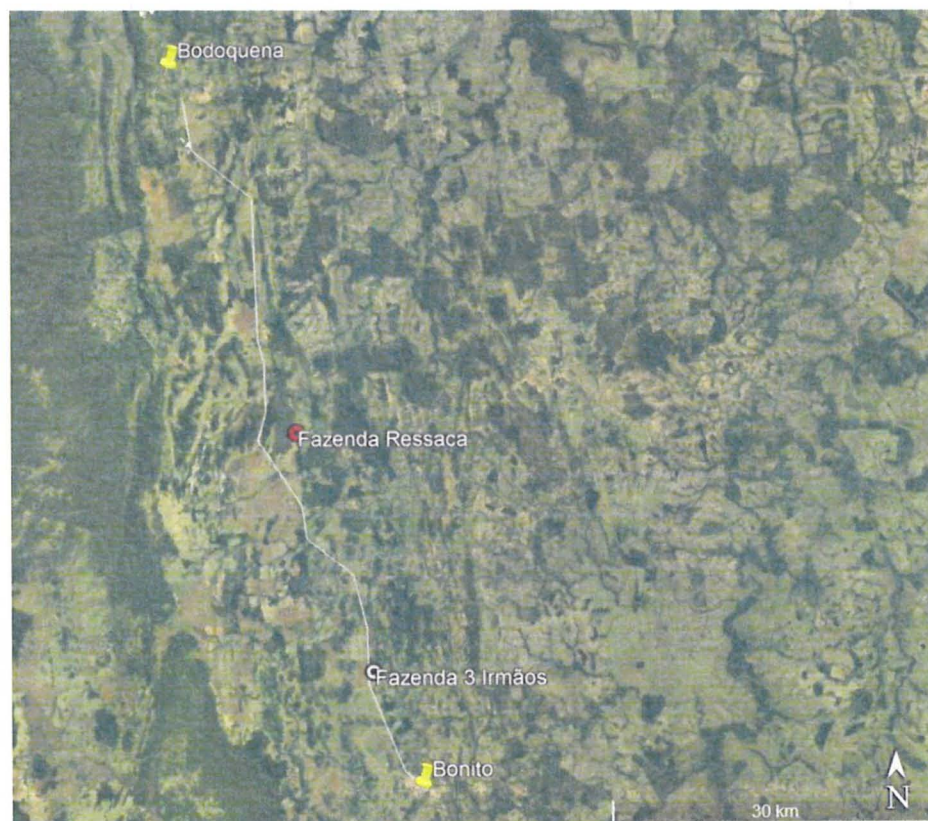
## 2. OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho de formatura é o de estudar depósitos de fosforitos do topo da Formação Bocaina (Grupo Corumbá – Ediacarano), localizados na Fazenda Ressaca no município de Bonito (MS), com ênfase na sua caracterização petrográfica e nas interpretações paleoambientais, que levaram à sua formação.

## 3. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Os depósitos estudados localizam-se, principalmente, na Fazenda Ressaca (N7695933, E542824) e arredores. A fazenda tem acesso a partir da rodovia MS – 178), asfaltada, que liga Bonito à Bodoquena, com acesso à fazenda, a partir da entrada da Fazenda Pitangueiras, de onde se percorre, por estrada de terra, por mais 5 quilômetros aproximadamente, até próximo ao atrativo turístico Ceita Corê (Figura 1).

Outro depósito estudado foi a recente descoberta de novo nível de fosforito na base da Formação Guaicurus, localizado na Fazenda Três Irmãos (N7674036, E549080).



**Figura 1** – Localização da Fazenda Ressaca, Fazenda 3 irmãos e dos municípios de Bonito e Bodoquena ligados pela MS-178 (linha branca). Modificado de Google Earth, 2017.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Revisão bibliográfica

Antes e após o trabalho de campo (maio de 2017), a revisão bibliográfica foi necessária para amparar a pesquisa e desenvolvimento do projeto de formatura. Para tal, foram pesquisadas diversas teses de dissertação, artigos e livros sobre os fosforitos da Fazenda Ressaca, sobre a geologia regional da Serra da Bodoquena e Grupo Corumbá, e principalmente sobre os fosforitos, no âmbito conceitual (ciclo, gênese, exemplos no Brasil e no mundo). Esquemas, tabelas, imagens foram tratadas e modificadas pelo software de vetorização Inkscape (v.9.1) gratuito.

### 4.2 Trabalho de campo

Durante o período de 18 a 23 de maio de 2017, realizou-se trabalho de campo para os municípios de Corumbá e Bonito (MS). O trabalho de formatura foi desenvolvido em paralelo ao projeto de mestrado de Leonardo Ceballos Joven no Programa de Pós Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia do IGC-USP.

No campo, foi empregado teste rápido e prático para identificação da presença de fosfato com uso de molibdato de amônio ( $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$ ). O pó do molibdato é colocado na rocha previamente e desagregada com o martelo seguido e a rocha dissolvida com gotas de ácido nítrico ( $HNO_3$ ) na concentração 1 para 1. Na presença de fosfato, a reação resulta num precipitado amarelo característico (figura 2).

A retomada dos trabalhos de pesquisa mineral pela empresa detentora do título mineral – EDEM Agromineral – com abertura de novas trincheiras, permitiu novas observações e coleta de novas amostras.





**Figura 2** – Teste de campo com uso de molibdato de amônio que, em contato com fosfato, reage com precipitado amarelo de amostra de nova ocorrência, na base da Formação Guaicurus.

## 4.3 Petrografia

Foram coletadas 20 novas amostra para petrografia. A petrografia das seções delgadas foram realizadas pelos microscópios petrográficos Zeiss AXIOPLAN 2 e as fotomicrografias coletadas pelo software LAS V.4.4.0 (Leica Application Suite), ambos no laboratório de Petrografia Sedimentar do Instituto de Geociências da USP IGc – USP. As classificações utilizadas para rochas carbonáticas e fosfáticas, como detalhado no item 3.4, são as de Embry e Klován (1971) baseado em Dunham (1962) e de Cook e Shergold (1986) respectivamente.

Algumas das seções delgadas escolhidas para laminação, tanto para descrição (revisão) deste presente projeto são referentes aos trabalhos de Boggiani (1998, 2010) e Fontaneta (2012) na Fazenda Ressaca, como as amostras FR-09 a FR-12, FR-15, FR-17 e FR-25.

## 5. REVISÃO BILIOGRÁFICA

### 5.1 Contexto Geológico

#### 5.1.1 Serra da Bodoquena

A Serra da Bodoquena está inserida no contexto geotectônico da Faixa Paraguai (figura 3), que consiste em uma faixa de dobramentos de idade neoproterozoica com aproximadamente 1200 km de extensão nos estados de Mato Grosso e Mato Grosso do sul (Alvarenga e Boggiani, 2004). Sua divisão estratigráfica é dada por sua porção meridional,

onde o Grupo Corumbá está inserido, e a porção setentrional, abrangendo o Grupo Araras, Grupo Alto Paraguai e Grupo Cuiabá. A geologia estrutural é dividida por Almeida (1968) em 3 estágios, sendo o mais antigo associado ao Grupo Cuiabá, pelas suas rochas metamórficas em fácies xisto verde intensamente dobradas. O segundo estágio marcado pelos diamictitos da Formação Puga (denominado antigamente como Grupo Jangada) recobertos pelas rochas carbonáticas e fosfáticas do Grupo Corumbá e Araras. O último estágio é representado pelo Grupo Alto Paraguai, com sedimentações continentais predominantemente siliciclásticas em contexto de molassa.

A oeste da Faixa Paraguai, ocorrem gnaisses e migmatitos ortoderivados (TTG) do Bloco do Rio Apa (Maciço do Rio Apa) de idade paleoproterozóica e representa a porção meridional do Cráton Amazônico. No Maciço Rio Apa encontram-se também as rochas metamórficas do Grupo Alto Tererê e ígneas do Grupo Amoguijá (Godoy et al., 2009).

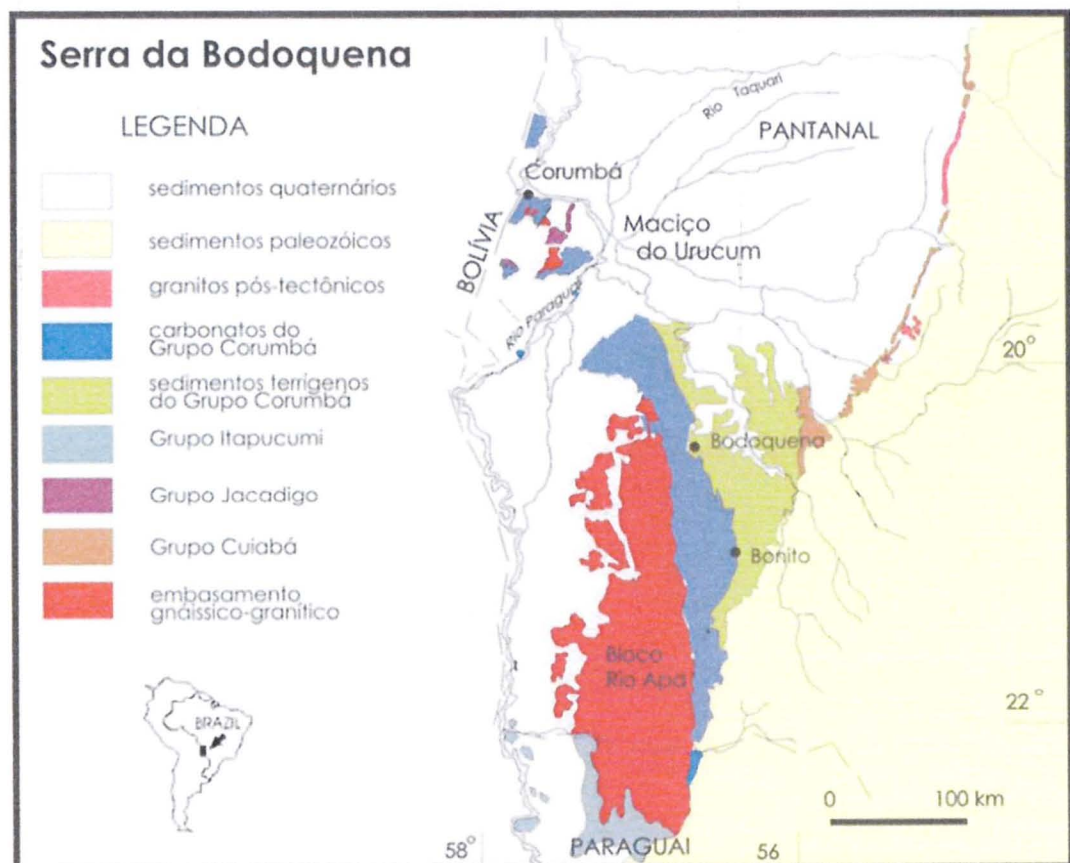


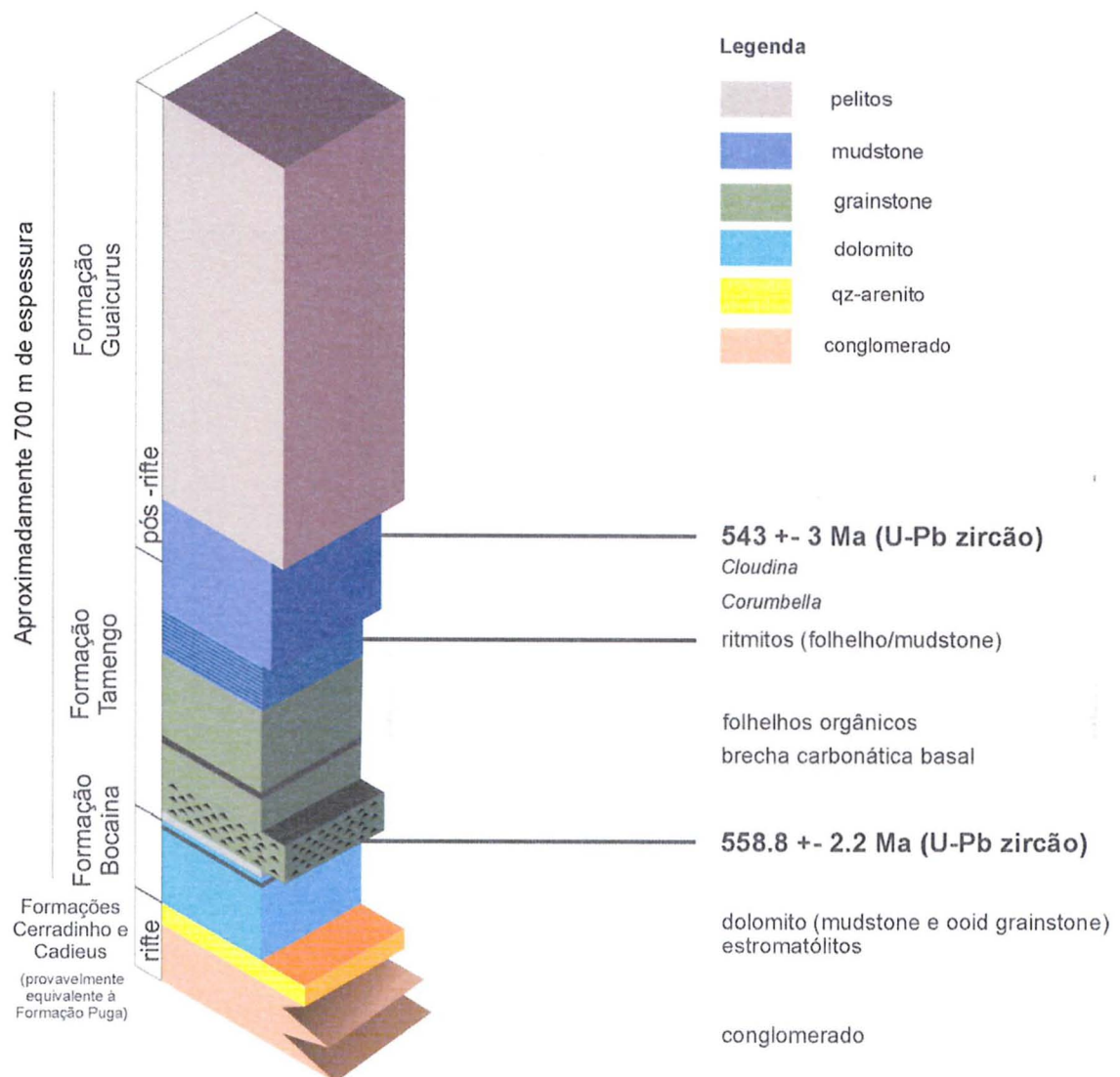
Figura 3 - Localização da Serra da Bodoquena. Extraído de Alvarenga e Boggiani, 2004.

### 5.1.2 Grupo Corumbá

O Grupo Corumbá representa uma sucessão sedimentar de 700 metros espessura (Almeida, 1965; Boggiani, 1998) que recobre quase totalmente o planalto da Serra da Bodoquena. Essas rochas metassedimentares siliciclásticas e carbonáticas são datadas do Ediacarano e afloraram no leste da Serra. A estratigrafia (figura 4) adotada aqui segue a



proposta por Almeida (1965) com a inserção da Formação Cadiueus por Boggiani (1998), e é composta da base para o topo, pelas formações Cadiueus, Cerradinho, Bocaina, Tamengo e Guaicurus.



**Figura 4** - Subdivisão estratigráfica do Grupo Corumbá. Modificado de Boggiani, 2010; baseada em Almeida 1965, com idade do topo da Formação Bocaina de Parry et al., 2017.

As rochas da Formação Cadiueus são conglomerados e arcósio expostos na borda oeste do Planalto da Bodoquena (Almeida, 1965) e interpretados como originados por fluxos de sedimentos de alta energia associados a leques aluviais (Boggiani, 1998).

A Formação Cerradinho apresenta rochas arenosas, siltosas e argilosas com presença de rochas carbonáticas e sílex (Almeida, 1965). É interpretada como transicional entre ambientes deposicionais terrestres e marinhos.

Na Formação Bocaina, predominam rochas carbonáticas dolomitizadas associadas à atividade biológica (Fontaneta, 2012), com presença de estruturas como oóides e estromatólitos (Almeida, 1965). É na Formação Bocaina que são verificados fácies fosfáticas



em bandas pouco espessas (Boggiani, 1998), originalmente interpretadas como formadas de ambiente costeiro marinho associado a correntes de ressurgência (*upwellings*).

Na Formação Tamengo, predominam-se calcários calcíticos de cor preta que se intercalam ritmicamente com folhelhos (Boggiani, 1997) e com brechas polimíticas na porção basal. Outra característica é a presença de fácies fossilíferas com presença de metazoários como o *Cloudina* e o *Corumbella*. Quanto ao ambiente deposicional, Boggiani (1998) interpreta as brechas polimíticas da porção basal como representativa de um rebaixamento do nível do mar seguida de transgressão.

No topo do Grupo Corumbá, ocorrem folhelhos da Formação Guaicurus locados a leste do Planalto da Bodoquena (Almeida, 1965). O aumento do nível do mar devido à transgressão marinha, iniciada na Formação Tamengo, assim como uma diminuição deposicional de sedimentos carbonáticos, possibilitou a formação do pacote de folhelhos da ordem de centenas de metros de espessura (Boggiani, 1998).

Três diferentes posicionamentos estratigráficos de fosforitos vêm sendo observados no Grupo Corumbá. O principal deles é o do topo da Formação Bocaina, objeto do presente estudo. Um significativo evento erosivo, provavelmente associado à regressão, proporcionou o retrabalhamento do topo da Formação Bocaina e deposição de expressiva brecha polimítica com clastos de dolomito e de fosforito. Essa brecha, posicionada na base da Formação Tamengo (Boggiani, 2010), é considerada também depósito econômico. Outro nível estratigráfico seriam intercalações centimétricas de fosforitos nos ritmitos da Formação Tamengo e, recentemente, com os trabalhos de pesquisa mineral na área, foi possível constatar a presença de fosforitos intercalados a pelitos da base da Formação Guaicurus.

## 5.2 Fosforitos

Fosforitos sedimentares são as rochas que contêm teores de  $P_2O_5$  maiores do que 18%, com influência biogênica, e ocorrem quase que exclusivamente no Fanerozoico, mas com importantes depósitos precambrianos (Pufahl, 2010). Além de possuírem grande importância econômica, essas rochas têm grande relevância para a reconstrução paleoambiental da transição do Neoproterozoico ao Fanerozoico, pois o ciclo do fósforo e dos sedimentos fosfáticos está diretamente associado aos ciclos biológicos, químicos e geológicos da época (Filipelli, 2008; Pufahl e Groat, 2016).

São formados pela fosfogênese e seus minerais mais comuns são a francolita  $((Ca, Mg, Sr, Na)_{10}(PO_4, SO_4, CO_3)_6F_{2-3})$ , que é facilmente substituída por carbonato-fluorapatita  $(Ca_{10-a-b}Na_aMg_b(PO_4)_{6-x}(CO_3)_{x-y-z}(CO_3.F)_{x-y-z}(SO_4)_zF_2)$ . A francolita é uma fluorapatita carbonática autigênica e também conhecida como FCA. Há também a variedade criptocristalina e amorfa (portanto, um mineralóide) da apatita, denominada colofana, que é um dos principais componentes de ossos fósseis. Em processos

hidrotermais, é comum a ocorrência de hidroxiapatita ( $Ca_5(PO_4)_3(OH)$ ) típicos de esteiras microbiais e também da wavelita ( $Al_3(PO_4)_2(OH,F)_3 \cdot 5H_2O$ ), como na Formação Sete Lagoas (Drummond et al., 2015).

### 5.2.1 Ciclo do fósforo

O fósforo ocorre comumente nas rochas ígneas, na forma de fluorapatita, enquanto nas sedimentares, como francolita (Pufahl e Groat, 2016). Seu ciclo pode ser resumidamente descrito pela liberação do elemento dos minerais para o solo, seu transporte até as águas oceânicas, e fixação nos sedimentos marinhos. A liberação do fósforo dos minerais pode ocorrer de diversas maneiras, como a acidificação do solo pela respiração biogênica e exudação de raízes de plantas. Uma vez no solo, são facilmente capturadas e estocadas pelas plantas, e após sua morte, a atividade de fungos e bactérias liberam o fosfato para o solo. O transporte para os oceanos ocorre pelos rios, tanto na estrutura de minerais, adsorvidos em óxi-hidroxidos e em dissolução ( $H_2PO_4^-$ ,  $HPO_4^{2-}$ ,  $PO_4^{3-}$ ). Nos oceanos, o fósforo dissolvido, além de acelerar a atividade biológica, tende a se concentrar em maiores profundidades e se empobrecer próximo à superfície (Filipelli, 2008). Outra forma de ocorrência nos oceanos é nos próprios seres vivos, como nos fitoplânctons (cerca de 0,3 a 2% de  $P_2O_5$ ; Baturin, 2003).

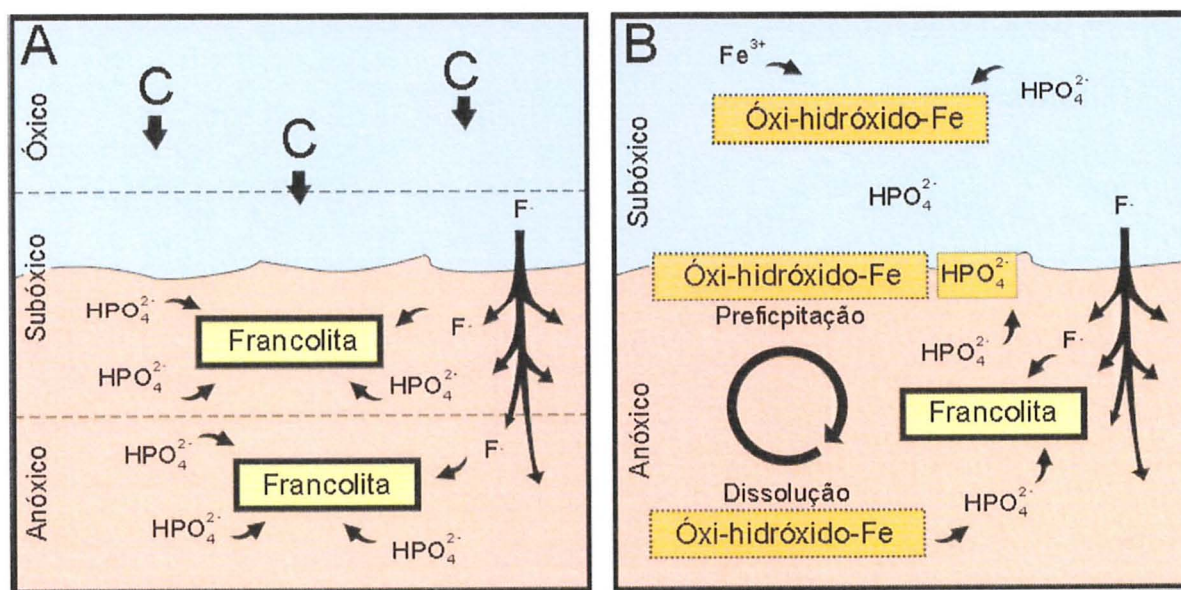
Eventos climáticos contribuíram para formação de rochas ricas em fosfato ao longo do tempo geológico. A Formação Phosphoria (Permiano) é um exemplo de grande acúmulo de fosfato, devido às extremas condições de efeito estufa, que acelerou o ciclo hidrológico e intensificou o intemperismo químico. Consequentemente, aumentou-se o fluxo de fósforo para os oceanos, que, combinado com uma configuração propícia para correntes de ressurgência, permitiu-se a configuração geológica atual (Pufahl e Groat, 2016).

### 5.2.2 Fosfogênese

Pufahl e Groat (2016) descrevem diversos cenários ao longo do tempo geológico associando-os aos tipos de depósitos fosfáticos e processos associados. Depósitos fosfáticos de intermaré, por exemplo, foram formados somente no Cambriano, pela fosfogênese microbiana e abiótica associada às marés, com concentração do fosfato em camadas plano-paralelas próximas ao ambiente costeiro (Drummond et al., 2015). Do Neoproterozoico ao Fanerozoico, os depósitos considerados de alta concentração, são associados às correntes de ressurgência ricas em fósforo. Essa precipitação de sedimento orgânico produz uma zona de oxigênio mínimo, favorecendo assim o processo fosfogenético. Ainda associado às correntes de ressurgência, a fosfogênese em mares

epicontinentais produziu grandes depósitos de fosforitos (tipicamente granular) pela sedimentação lagunar em ambiente evaporítico (Pufahl, 2010).

Os modelos fosfogênicos detalhados por Pufahl e Groat (2016), estão baseados na classificação de Follmi et al. (1991), onde há as litofácies fosfáticas não retrabalhadas (*pristine*), e as litofácies fosfáticas retrabalhadas. Nessas litofácies retrabalhadas, a precipitação de minerais fosfáticos autigênicos é dominada pela taxa de sedimentação e pela degradação microbial da matéria orgânica sedimentar, que jogam o fósforo nos sedimentos marinhos. Essa degradação por sua vez ocorre por diversos processos microbiais associados às reações de estado redox, como a respiração óxica e redução de Fe e Mn. A figura 5 esquematiza a fosfogênese em ambientes calmos descritos como não retrabalhados. Nas litofácies retrabalhadas ocorrem os depósitos tipicamente granulares, de sedimentos fosfáticos. São ambientes como planícies rasas de maré e de correntes de fundo oceânico associados a eventos de tempestade que produzem os depósitos mais espessos de fosforito, pois conseguem remover, retrabalhar e redepositar os grãos da litofácie não retrabalhada (*pristine*), sendo muito comuns em depósitos de mares epicontinentais (Pufahl, 2010; Pufahl e Groat, 2016). Desse modo, a duração e frequência de eventos turbulentos regem a disposição (intercalação) e espessura das litofácies não retrabalhadas e retrabalhadas. No modelo biogeoquímico, o fosfato dissolvido na coluna d'água (oxidante) por ressurgência ou pelo aporte fluvial, é incorporado ou adsorvido nos óxi-hidróxidos de ferro ( $FeOOH$ ) e sedimentos orgânicos, que são levados até o fundo marinho.



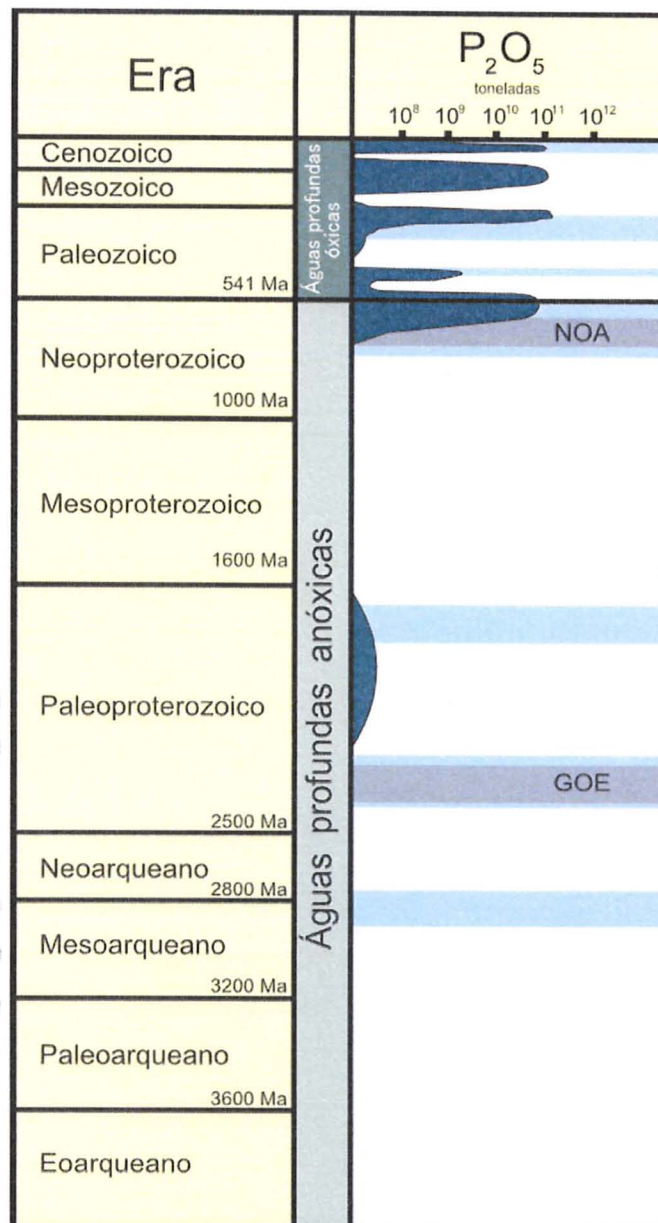
**Figura 5** – Fosfogênese de litofácies não-retrabalhadas (*pristine*) em ambiente com correntes de ressurgência (A) e sem ressurgência (B). Para ambos os casos ocorre a difusão do íon  $F^-$  das águas marinhas, que é um fator limitante. Em (A), a degradação microbial induz a precipitação de francolita autigênica. Em (B), o fosfato adsorvido em óxi-hidróxidos de Fe se deposita no fundo oceânico mantendo uma alta concentração no sistema. Retirado de Pufahl e Groat, 2016.

Após o soterramento, os sedimentos enriquecidos em fosfato podem então precipitar os minerais fosfáticos por sulfato-redução microbiana. Em ambiente euxínico (águas estagnadas, anaeróbicas e com presença de  $H_2S$ ), a ligação do fosfato com os sedimentos ferruginosos é rompida, fazendo com que esse sulfato não seja incorporado nos sedimentos marinhos (Cui et al., 2016). Além de potencializar a liberação de fosfato nos sedimentos, a presença de sulfato nos sedimentos pode acarretar na precipitação de sulfetos.

A distribuição temporal dos eventos fosfogênicos sedimentares está sintetizada na figura 6 abaixo, onde o evento do Paleoproterozoico coincide com o grande evento de oxidação (GOE), limitando a fosfogênese em ambientes rasos e produzindo finos depósitos estratiformes paralelos à linha de costa da época. A deposição do fosfato e precipitação da francolita autigênica se dava por autotrofia ou heterotrofia (atividade da matéria orgânica), ou adsorvidos em óxidos e hidróxidos de Fe (Drummond et al., Hiatt et al., 2015; Pufahl e Groat, 2016).

No Ediacarano, a oxigenação dos oceanos devido ao Evento de Oxigenação do Neoproterozoico (NOA) iniciou um novo ciclo biogeoquímico de deposição do fósforo. Nesse ciclo, a interação de fatores como a dinâmica das bacias, oceanos, clima e da evolução biológica ofereceram um suporte para a geração de grandes depósitos fosfáticos (em grande parte associado às correntes de ressurgências) durante a transição entre os eons Neoproterozoico e Fanerozoico e ao longo do Fanerozoico em si (Pufahl, 2010; Pufahl e Groat, 2016). Estudos como o de Cui et al. (2016; seção 5.4) sugerem que a fosfogênese ediacarana foi fortemente influenciada pela atividade microbiana.





**Figura 6** – Distribuição temporal dos eventos fosfogenéticos baseado nas idades, recursos estimados e grandes eventos terrestres. NOA (Neoproterozoic Oxygen Event) é Evento de Oxigenação do Neoproterozoico e GEO (Great Oxygenation Event) é o Grande Evento de Oxigenação. As faixas em azul indicam as grandes glaciações terrestres. Modificado de Pufahl, 2010 e Drummond et al., 2015.

## 5.3 Classificação de fosforitos e rochas carbonáticas

### 5.3.1 Evolução das classificações

A caracterização petrográfica de rochas fosfáticas é semelhante às de rochas carbonáticas. Segundo Trappe (2001), existe uma dificuldade em fixar um sistema de classificação e de nomenclatura que seja amplamente aceito, fácil de ser usada e compatível com outras classificações de rochas sedimentares, agregado ao fato de que essas rochas se formam por processos deposicionais complexos. O autor cita que o sistema de classificação de Dunham (1962), com extensões de Embry e Klován (1971), é mais indicado para casos onde os sedimentos fosfáticos tiveram uma maior associação com as

variações de energia das águas (regimes hidrodinâmicos), e o considera mais prático em termos sedimentológicos, por abordar nomenclaturas mais simples, além de abranger composições e relações texturais. Posteriormente, Cook e Shergold (1986) realizaram uma nova nomenclatura de fosforitos, baseada na classificação de Dunham (1962) e Embry & Klovan (1971) para rochas carbonáticas, com ênfase nas propriedades texturais. Assim, essa classificação vem sendo utilizada no presente projeto, resumida no Quadro 1.

**Quadro 1:** Classificação de fosforitos, com base em classificação para rochas carbonática de Dunham, 1962; modificado por Embry & Klovan, 1971. Retirado de Terra et al., 2010.

Dunham (1962) modificado por Embry & Klovan (1971) para Calcários									
CALCÁRIOS ALÓCTONES					CALCÁRIOS AUTÓCTONES				
Componentes originais não-ligados organicamente durante a deposição (<10% grão >2 mm)			Textura deposicional não-reconhecível	Componentes originais não-ligados organicamente durante a deposição		Componentes originais ligados organicamente durante a deposição			
Contém Matriz (Partículas tamanho argila/silte fino)				>10% grãos >2 mm		Organismos que atuam como obstáculos	Organismos que encrustam e ligam	Organismos que constroem um arcabouço rígido	
Suportado por matriz		Sem matriz, grão-suportado		Suportado pela matriz	Suportado por componentes maiores que 2 mm				
Menos de 10% de grãos	Mais de 10% de grãos								O arcabouço é grão-suportado com matriz
Mudstone	Wackestone	Packstone	Grainstone	Crystalline	Floatstone	Rudstone	Bafflestone	Bindstone	Framestone

Cook & Sheergold (1986) para Fosforitos					
Textura Depositional Reconhecível				Textura Depositional Não Reconhecível	
Contém Matriz (Partículas de fração argila ou silte fino)		Sem Matriz	Componentes originais ligados organicamente durante a deposição		
Suportado por matriz					
Matriz > 75%	Matriz < 75%	Suportado por grãos			
Mudstone Phosphorite	Wackestone Phosphorite	Packstone Phosphorite	Grainstone Phosphorite	Boundstone Phosphorite	Phosphorite (Uso de qualificadores para descrição)

Outros termos comumente utilizados são os de classificações como as de Garrison e Kastner (1990), que avalia o grau de endurecimento dessas rochas, como os fosfatos tipo F, D e P. É uma classificação adequável aos depósitos modernos, mas não para os antigos ou do Neógeno (Trappe, 2001). Os do tipo F seriam nódulos e pelóides de francolita ou CFA friáveis *in situ* e também lâminas fosfáticas. Os tipos D e P seriam os mais litificados, produtos do retrabalhamento de clastos de sedimentos fosfáticos em fração areia ou cascalho. Follmi et al.(1991) definiu três classes genéticas (litofácies), aplicáveis para sedimentos siliciclásticos e carbonatos ricos em fosfato. O termo *pristine* designa as fácies fosfáticas sem sinais de retrabalhamento. Os condensados seriam as partículas e lâminas retrabalhadas e acumuladas por processos de fluxo e bioturbação por exemplo. Os alóctones seriam as partículas fosfáticas redepositadas por fluxos turbulentos e fluxos gravitacionais.

### 5.3.2 Principais constituintes de rochas carbonáticas e fosfáticas

É indispensável a identificação e descrição de alguns componentes de rochas carbonáticas e fosfáticas, de tal modo a serem utilizadas em suas classificações (Terra et al., 2010). Dentre os principais:

- **Matriz** – Pode ser micrítica, uma lama carbonática microcristalina, quando os cristais são menores do que 0,0625 mm. Sua origem é comumente listada por alguns mecanismos como a abrasão mecânica ou biológica, desintegração de organismos calcários frágeis, bioacumulação e intervenção de organismo durante a precipitação.
- **Cimento** – Outro componente muito comum em rochas carbonáticas e fosfáticas. Desenvolve-se pelo preenchimento de espaços porosos na rocha por fluidos supersaturados com a fase cimentante. Normalmente os minerais típicos são aragonita e calcita magnesiana.
- **Grãos aloquímicos** – Constituem os oólitos, oncólitos, pelóides, esferulitos, intraclastos e bioclastos.
  - **Oólitos** – são clastos ou partículas envelopadas concêntricamente de formato esférico ou subesférico com tamanhos normalmente entre 0,2 mm a 1,0 mm. São originados pela acreção físico-química em torno de um núcleo (partícula). Os de origem marinha costumam indicar a energia deposicional, que é de águas rasas e agitadas pela maré e ondas. No presente trabalho, emprega-se o termo oóide ou *ooid* para essas partículas.
  - **Oncólitos** – São clastos originados da acreção organo-sedimentar de cianobactérias, e ao contrário dos oólitos, apresentam envelopes subesféricos descontínuos em torno de um núcleo aloquímico ou terrígeno. Pode apresentar sedimentos presos entre envelopes e também uma matriz associada. Possuem tamanhos variados (0,5 mm a 5 mm).
  - **Pelóides** – Definidos como grãos subesféricos sem estrutura interna, de grãos aloquímicos micritizados, fragmentos de lama ou de bioclastos arredondados. Possuem tamanhos na ordem de 0,1 a 0,5 mm. Quando são de origem fecal, é reconhecido pelo termo *pellet*.
  - **Esferulitos** – Partículas aloquímicas esféricas ou subesféricas com contorno liso ou lobado, menores do que 2 mm em geral. Não possuem núcleo e sua estrutura interna é variada. Costumam ocorrer soltos ou amalgamados.



- **Intraclastos**– São fragmentos de sedimentos carbonáticos provenientes de erosão penecontemporânea. Sua composição varia de lama parcialmente consolidada ou de sedimentos carbonáticos parcialmente litificados.
- **Bioclastos** – São os fósseis ou fragmentos de estruturas calcárias de origem biótica. Sua composição e forma são variadas, mas costuma-se identificá-las por petrografia através do contexto deposicional, forma, microestrutura e composição do grão.

## 5.4 Estudos de fosforitos neoproterozoicos

Drummond et al. (2015) descrevem os fosforitos da Formação Sete Lagoas (610 Ma) do Grupo Bambuí, inseridos em sucessão de rochas siliciclásticas e carbonáticas, de sequência deposicional de intermaré. Essa sequência teria sido depositada e acumulada durante o episódio fosfogenético da transição Cambriano-Ediacarano (Pufahl, 2010). A Formação Sete Lagoas é composta basicamente por três sequências, uma basal, de rochas calcárias, uma mediana, de siltitos fosfáticos e arenitos e no topo, uma sucessão de rochas fosfáticas com espessura de aproximadamente 150 a 200 metros fechando um ciclo marinho completo. Essa sequência fosfática foi induzida pelas progradações marinhas com planícies de intermarés ricas em fósforo, e é composta por sete litofácies, sendo 1) siltitos fosfáticos com laminações microbiais, 2) semelhantes à fácies 1, porém com intraclastos maiores, 3) brechas intraclásticas e wackes feldspáticas ricas em quartzo com presença de estruturas *flaser*, 4) siltitos arenosos laminados com estruturas tipo *wavy*, 5) *mudstone* laminado, 6) *mudstone* siltoso com calcário, 7) Arenitos com estratificação tipo *Hummocky*. O padrão de empilhamento vertical e lateral dessas fácies indicam que essa acomodação se deu principalmente por uma transgressão marinha marcada por grandes flutuações do nível do mar. Esse evento fosfogenético permitiu concentração de fósforo distais, influenciando no ciclo de fósforo associado ao ciclo biológico.

Os autores realizaram estudo petrográfico de fosforitos com viés econômico, que por sua vez revelou cinco estágios paragenéticos complexos associados principalmente a processos de soterramento e à tectônica, desde a fosfogênese em si, processos diagenéticos, metamorfismo, hidrotermalismo e laterização. De modo geral, os fosforitos econômicos foram produzidos quando os átomos de fósforo foram remobilizados hidrotermalmente e reprecipitados em minerais como a hidroxiapatita e a wavelita que é o principal mineral que preenche veios e cavidades nas rochas de fácies clásticas.

Caird et al. (2017) descrevem estromatólitos e fosforitos da Formação Salitre (Bacia do Irecê, Bahia) durante a fosfogênese associada ao evento de oxidação do Cambriano -



Neoproterozoico (NOE, do inglês *Neoproterozoic Oxygenation Event*). A Formação Salitre (610 Ma) está inserida no Grupo Una, composta pelos membros Nova América, Gabriel, Jussara e Irecê. Os autores estudaram os membros Nova América e Gabriel, compreendidos por litofácies carbonáticas e fosfáticas. O Membro Nova América possui estromatólitos fosfáticos de intermarés com teor de  $P_2O_5$  próximo a 25%. Metodologicamente, os autores analisaram 144 amostras de rochas, e 41 seções delgadas, resultando na interpretação de seis litofácies. A fácies 1 é um *grainstone* oolítico, rico em intraclastos (oolíticos e micríticos) comumente substituídos por dolomita. É interpretado de ambiente inframaré raso, e a abundância de intraclastos sugerem retrabalhamento de tempestades. A fácies 2 é um *grainstone* com estratificações cruzadas, oóides e intraclastos de micrita, com cimentação tipicamente dolomítica. É interpretada de ambiente inframaré raso. A fácies 3 é composta por níveis de *grainstone* com estruturas tipo *flaser* e *mudstone* carbonático. Devido a estruturas como *tepees*, gretas de contração e pseudomorfos de evaporitos, a fácies é interpretada em ambiente com exposição sub-aérea de clima árido. A fácies 4 é composta por estromatólitos colunares semiesferoidais, interpretado como ambiente de inframaré na zona fótica. Na fácies 5 ocorrem biostromas tabulares (estruturas sedimentares de crescimento de recifes), e também os fosforitos econômicos (francolita e fluorapatita) nas lâminas microbiais. Os biostromas são interpretados da planície de intermaré mais baixa, e os estromatólitos indicam a influência de marés. A fácies 6 é descrita como *grainstone* com estratificação cruzada do tipo *Hummocky*, intercalados com níveis de *mudstone* carbonáticos.

Condon et al., (2005) descreveram a Formação Doushantuo (China) como uma sucessão de carbonatos, folhelhos e fosfatos derivados de sequências transgressivas. Datação de zircões por métodos U-Pb em níveis de cinzas vulcânicas, proporcionaram idades deposicionais de 635 e 551 Ma na base e no topo respectivamente, o que permitiu associar a deposição logo após a glaciação global Marinoana, em conjunto com anomalias de  $\delta^{13}C$ . No membro dolomítico basal, ocorrem excursões positivas (2‰) e negativas (-5‰), enquanto que no topo há anomalias negativas (-8‰).

Cui et al. (2016) estudaram amostras de fosforitos do topo da Formação Doushantuo para tentar correlacionar evidências de atividade microbial (processos de redução por respiração anaeróbica) com os eventos de fosfogênese do Ediacarano. Os autores utilizaram métodos isotópicos de Carbono ( $\delta^{13}C$ ) e petrografia associada à catodoluminescência. As amostras desses fosforitos normalmente contêm fosfatos intraclásticos, calcita autigênica, barita, pirita e minerais silicáticos, e muitas delas encontram-se dolomitizadas ou silicificadas, sugerindo diversos estágios diagenéticos.

O uso de catodoluminescência associado à petrografia permitiu a elaboração de uma sequência paragenética, onde os autores estimam que, primeiramente, o fosfato dissolvido

na coluna d'água tenha sido transportado aos sedimentos numa associação com o óxi-hidróxidos de ferro ( $FeOOH.PO_4^-$ ). Após o rompimento dessa ligação com o ferro, o fósforo presente nos poros propiciou a precipitação de fosfato autigênico. Na sequência de eventos, a presença de fosfato intraclástico é indicativa de que houve um retrabalhamento e transporte para outros locais e posteriormente cimentação por minerais como a barita, pirita, calcita e sílica. Num último estágio, os fosforitos da Formação Doushantuo foram, localmente, dolomitizados e tiveram recristalizações de pirita. A presença de pirita suporta a ideia de que a sulfato-redução microbial (descrito no item 5.2.1) teve grande influência na fosfogênese.

Nas amostras de fosforitos, os resultados geoquímicos indicaram que houve uma heterogeneidade de valores de  $\delta_{13}C$ , com predominância de valores negativos nos nódulos de calcita autigênica (de -7,3‰ até -34‰), mas também presença de valores positivos (+1,2‰) na matriz dolomítica. O empobrecimento de  $\delta_{13}C$  sugere que a fosfogênese do Ediacarano (na Formação Doushantuo) foi controlada e facilitada por processos de redução microbial de sulfato e ferro nos sedimentos marinhos, consequentemente às mudanças de estado Redox. Uma das hipóteses discutidas pelos autores é de que a excursão Shuram, associada à sedimentação da Formação Doushantuo, teria resultado no empobrecimento avançado de  $\delta_{13}C$  (valores negativos) em consequência da mineralização carbonática autigênica alimentada pela redução de sulfato microbial e de ferro, no contexto da oxigenação atmosférica global.

Valores de  $^{87}Sr/^{86}Sr$  nos nódulos de calcita das amostras fosfáticas se assemelham com os valores típicos de águas marinhas do Ediacarano (valores em torno de 0,7083), indicando que esses nódulos autigênicos eram de ambientes marinhos rasos não influenciados por fluidos hidrotermais. Petrograficamente, todos esses nódulos se encontraram envoltos por uma crosta de sílica autigênica e também por barita, ambos de crescimento centrípeto.

Cui et al. (2015) realizou análises de  $Ce/Ce^*$  em carbonatos e fosforitos da mesma área de estudo, e chegaram na interpretação de que o ambiente estava numa transição do estado oxidante para redutor. Porém essa interpretação é inconsistente no estudo de Cui et al. (2016), devido a presença de oóides e intraclastos, indicadores de ambiente oxidante. Uma possível interpretação para conciliar os dois resultados, é a estratificação das águas, onde as porções mais superficiais seriam oxidantes, e o fundo marinho anóxico, o que poderia afetar os valores de  $Ce/Ce^*$  ou que esse resultado estaria associado às condições de diagênese e não de sedimentação.

## 5.5 Elementos terras-raras associados

Os elementos terras-raras (ETR ou, em inglês REE de *rare earth elements*) compõem um grupo de 15 elementos químicos, do Lantânio (Z=57) ao Lutécio (Z=71) fundamental para tecnologias de ponta e indústrias diversas. Por isso são considerados estratégicos. Podem informalmente divididos em dois grupos: elementos terras-raras leves (ETRL) e elementos terras-raras pesados (ETRP). Os leves vão de Lantânio até o Samário (Z=62), e os pesados de Európio (Z=63) a Lutécio (Long et al., 2010).

Outro grande propósito de ETR é a sua relevância para compreensão paleoambiental conjuntamente com rochas fosfáticas, pois uma análise química detalhada poderia ajudar a definir a fonte do fósforo, por exemplo, se a fonte é marinha ou continental. Apesar de haver um grande debate sobre as causas de concentrações e normalizações de ETR nos fosforitos, uma das hipóteses é de que a recarga esteve associada a variações históricas e episódicas na química dos oceanos (Emsbo et al., 2014; Hein et al., 2016).

No presente estudo, resultados prévios de ETR (Fontaneta, 2012), foram reinterpretados.

## 6. RESULTADOS

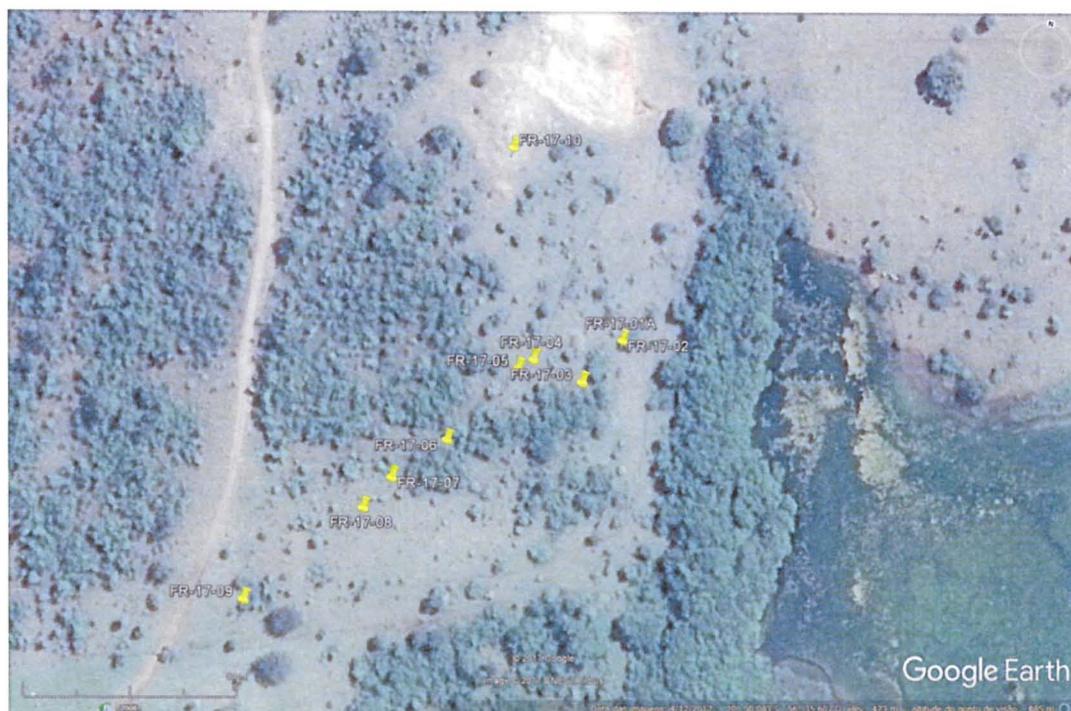
### 6.1 Fácies da Formação Bocaina

As fácies sedimentares da Formação Bocaina foram descritas por Boggiani (1998) e Fontaneta (2012). Segundo Boggiani (1998; Quadro 2) a Formação Bocaina apresenta na base estromatólitos LLH (laminação ligada lateralmente), com pseudocolunas circulares (3 a 4 cm de diâmetro), parcialmente dolomitizada. Acima, estaria a fácies de *mudstones* dolomíticos estratificados, marcadas pela estratificação plano-paralela e, com algumas porções de intercalação entre dolomititos com laminação fenestral, com estruturas do tipo *bird's eyes* de calcita espática ou sílica, associada à fácies de *flakestones*, caracterizada por intraclastos na forma de placas, com bordas angulosas, e localmente com estruturas do tipo *tepee*. O ambiente deposicional foi interpretado como associado à transgressão marinha com formação de ambiente lagunar raso e desenvolvimento de planície de maré, sob condições evaporíticas.

**Quadro 2** - Fácies da Formação Bocaina (Grupo Corumbá) proposta por Boggiani (1998) do topo para a base. Retirado de Boggiani(1998).

Fácies	Descrição	Estruturas Sedimentares	Ambiente de Deposição
<i>Pseudorudstones</i>	oóides > 2 mm, córtex concêntrico		costeiro (baixios colíticos)
rochas fosfáticas	microfosforitos maciços, estromatólitos e laminações algáceas fosfatizadas	maciça a estromatolítica	costeiro sujeito à <i>upwellings</i>
Dolomitos estromatolíticos	laminações algáceas, estromatólitos bulbosos e colunares	maciça, laminada e estromatolítica	inframaré
<i>mudstones</i> alternados com silexitos	camadas centimétricas de <i>mudstones</i> dolomíticos alternadas com camadas de silexito incolor	estratificação plano-paralela	inframaré
<i>flakestones</i>	brecha carbonática com clastos na forma de placas	placas imbricadas <i>teepee</i>	intra e supramaré
<i>Mudstones</i> dolomíticos estratificados	estratificação plano-paralela (1-2 cm de espessura)	estratificação plano-paralela	inframaré
estromatólitos LLH	espesso pacote basal de estromatólitos com laminação ligada lateralmente (LLH) formando pseudo-colunas	estromatolítica	inframaré

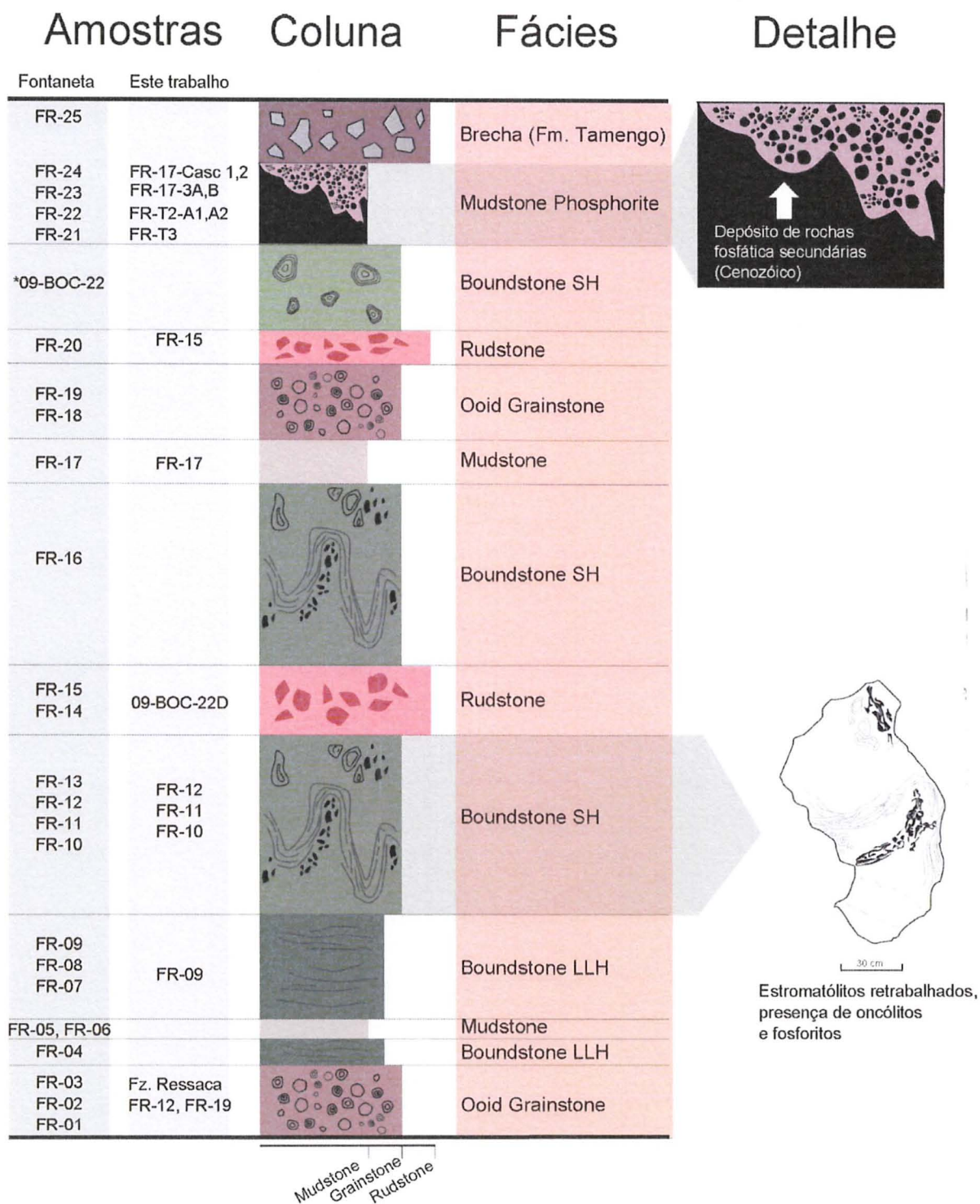
O trabalho de Fontaneta (2012), mais restrito às seções com fosforito, consistiu no detalhamento do depósito da Fazenda Ressaca, onde apresentou seção estratigráfica mais detalhada, complementada com descrições petrográficas. Em sua descrição, ocorrem na base, a fácies de *grainstones* oolítico inferior seguida da fácies *boundstone* LLH, descrita como dolomitos cinzas de estrutura estromatolítica com laminação ligada lateralmente. Intercalado a esta fácies, encontra-se a fácies de *mudstone* maciço, homogêneos. Sobre estas segue a fácies *boundstone* SH com dolomitos com estromatólito colunares e pseudo-colunares e ocorrências de oóides na base e oncólitos no topo com intercalações da fácies *rudstone* Intraclástico. No topo da coluna a fácies *grainstones* oolítico superior é composta por dolomitos e presença de estratificações plano-paralelas e cruzadas. Por fim, a fácies de fosforito com predominância de fosfalutito com porções estromatolítica. Interpretou o ambiente deposicional como ambiente de águas rasas agitadas tendo no topo a influência das correntes de ressurgência marinha, que teriam sido a fonte da fosfogênese. A dolomitização foi interpretada como eodiagenética.



**Figura 7** - Perfil NE-SW realizado nas proximidades da Fazenda Ressaca em Bonito (MS). Retirado de Google Earth 2017, com localização dos pontos de observação e de coleta de novas amostras.

No presente trabalho, foi realizado novo levantamento (perfil de NE para SW da figura 7) na Fazenda Ressaca, com revisão e complemento do trabalho anterior de Fontaneta (2012) com nova subdivisão de fácies, segundo coluna da Figura 8.





\* Amostra pertencente à antiga subdivisão de Fontaneta (2012)

**Figura 8** – Coluna estratigráfica do topo da Formação Bocaina, com proposta de subdivisão de fácies elaborada no presente trabalho.

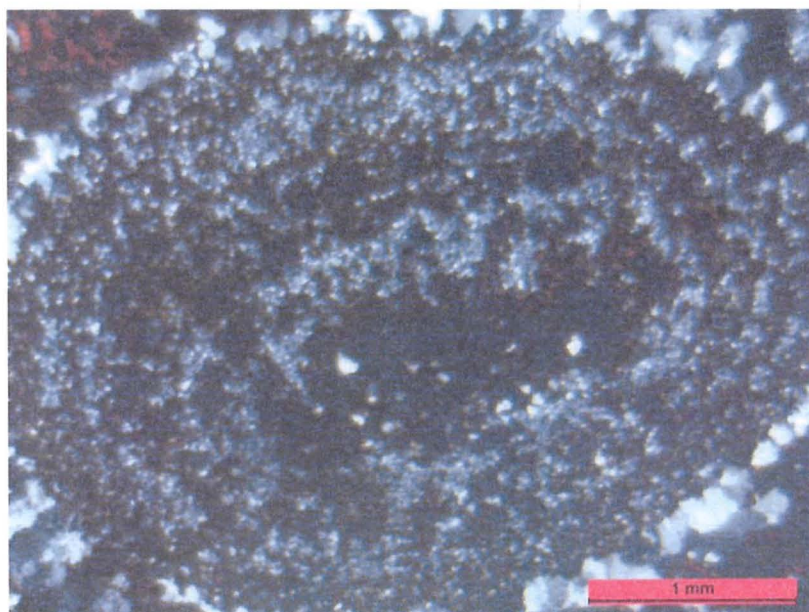
## 6.2 Fácies da Formação Bocaina na Fazenda Ressaca

### 6.2.1 Fácies de Ooid Grainstone

A Fácies de *Ooid Grainstone* é uma das predominantes na Formação Bocaina como um todo, junto com a Fácies de *Dolomite Mudstone*. No entanto, na seção da Fazenda Ressaca não é a predominante. Nesta seção, os oóides apresentam-se com laminação concêntrica com núcleo carbonático no centro e partes encontram-se silicificadas (figura 9). Outra forma de oóide são os com núcleo carbonático envolto por apenas uma lâmina de material micrítico (figura 10) ou matéria orgânica (figura 11). Estes oóides são disformes e com tamanhos distintos entre si.

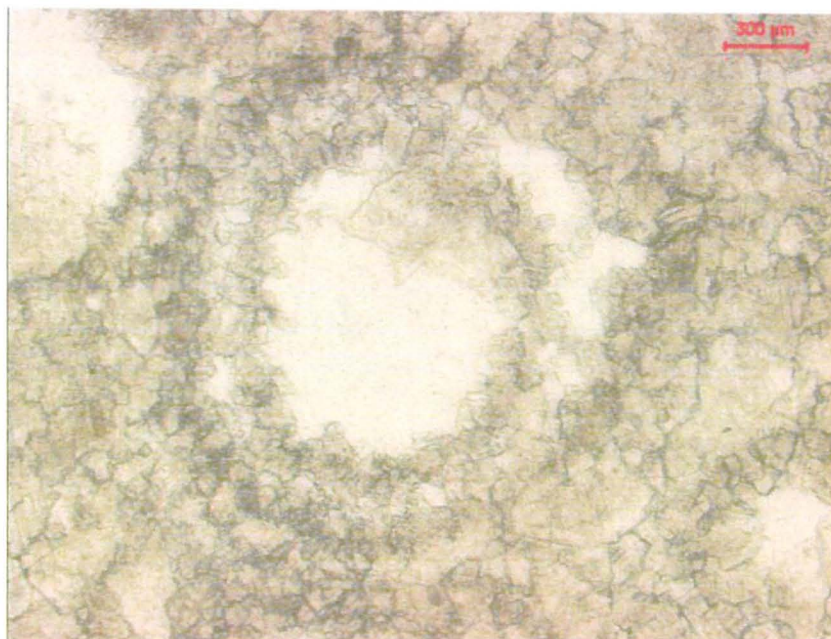
Macroscopicamente, a fácies foi vista nos pontos FR-17-06 e FR-17-07 do perfil, onde um bloco estratificado de textura sacaroidal (semelhante a um quartzito) com presença de oóides foi descrito com uma aparência arenosa com cimentação dolomítica.

Petrograficamente, a amostra Fz. Ressaca, (figura 9) apresenta alto grau de alteração, com presença de muitos oóides silicificados com zoneamento preservado, apresentando em média, diâmetros de 4 mm. O preenchimento dessas estruturas é composto por cristais de quartzo interlobados (silicificação).

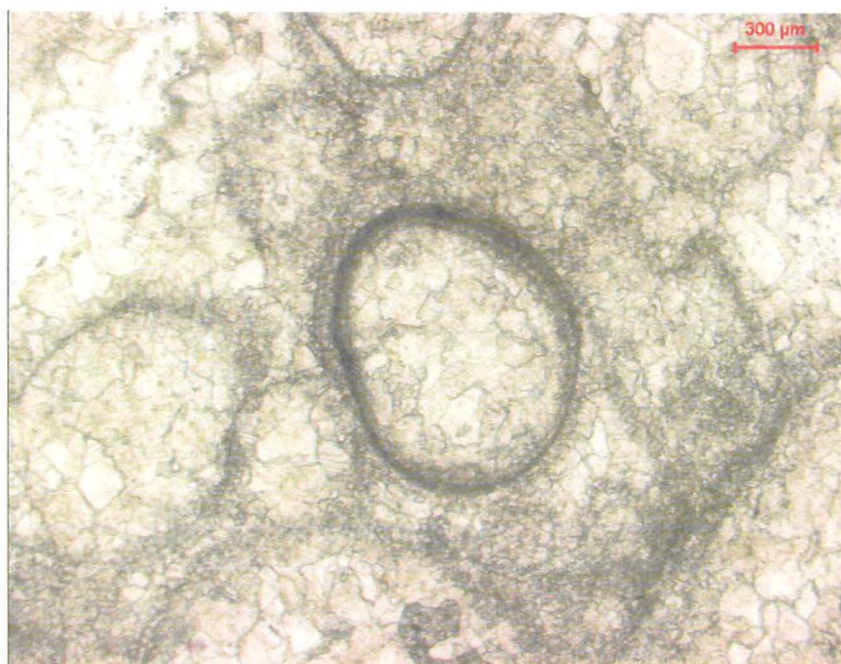


**Figura 9** – Oóide da fácies *Ooid Grainstone* com estrutura bem concêntrica, silicificada. Amostra Fz. Ressaca, com nicóis cruzados.





**Figura 10** – Ooid da fácies *Ooid Grainstone*, onde apenas algumas lâminas se encontram com cristais romboédricos de dolomita (Amostra FR-12).



**Figura 11** - Oóide da Fácies *Ooid Grainstone* da Seção da Fazenda Ressaca com envoltório de matéria orgânica preservada com núcleo carbonático (amostra FR 19). Notar que onde o filme de matéria orgânica foi preservado, não ocorrem cristais de dolomita.

### ***Interpretação***

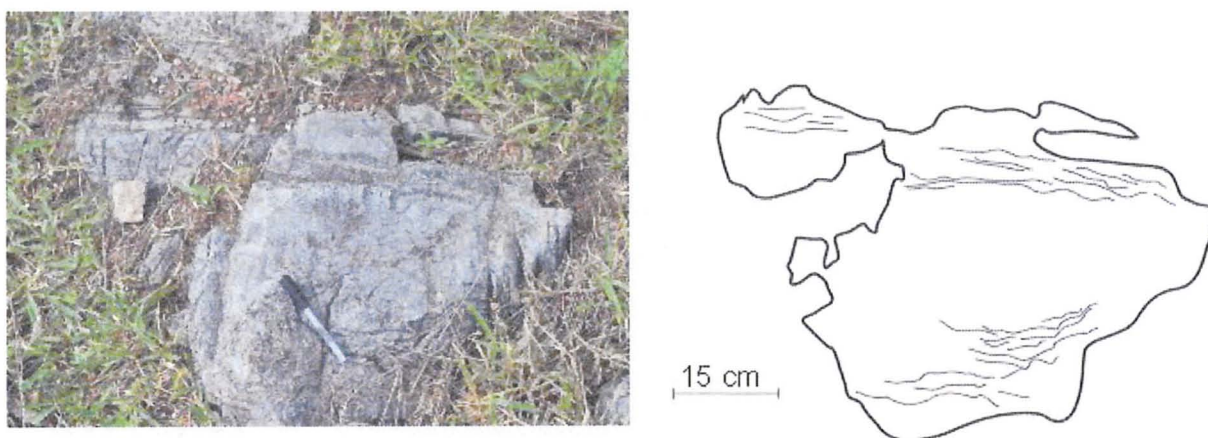
A abundância de *ooids* evidencia águas agitadas durante a deposição. No caso dos oóides da Formação Bocaina, o que chama a atenção é a presença de romboedros de dolomita em lâminas específicas. Wright (2000), em estudo de oóides de dolomitos na Escócia descreveu o processo de degradação microbiana em ambiente anóxico associado



às cianobactérias para interpretar a envoltória escura (figura 11) nos oóides. Essa degradação liberaria magnésio nos ambientes diagenéticos, possibilitando a dolomitização não microbiana sem a sulfato-redução. Logo, não há evidências de dolomitização onde ocorrem as estruturas microbianas preservadas, o que demonstraria que a decomposição da matéria orgânica é que levaria a formação da dolomita. Wright (1997) relata que nesses dolomititos originados pela sulfato-redução microbiana, os valores esperados de  $\delta^{13}C_{PDB}$  seriam negativos, já os dados disponíveis para a Formação Bocaina apresentam-se próximos de zero (Boggiani, 1998, Fontaneta, 2012).

### 6.2.2 Fácies de Boundstone LLH

O termo *Boundstone LLH* é caracterizado para a rocha carbonática *in situ* com componentes ligados durante a deposição (Dunham, 1962), no caso os estromatólitos, onde os componentes da trama original foram ligados lateralmente em pseudo-colunas, tomando aspecto de um domo. Na Formação Bocaina, ocorre na porção basal acima da fácies *Ooid Grainstones*, e com pacotes de *Mudstones* intercalados. Na Fazenda Ressaca, laminação aproximadamente plano-paralela com ondulações foi observada no ponto FR-17-04 do perfil NE-SW (figura 12), onde os diversos blocos em laje (até 30 cm) mostraram as laminações forte e fracamente marcadas, e a presença de intraclastos (aproximadamente 1 mm) de fosforito cimentados por dolomita. Caminhando para SW, no ponto FR-17-05 do perfil, foi encontrada uma variação faciológica da fácies, onde um bloco em laje apresentava um nível estromatolítico do tipo dômico (LLH), em contato com um nível estromatolítico do tipo colunar (SH) com intercalação de um nível arenoso com cimentação dolomítica.



**Figura 12** – Afloramento em laje do perfil NE-SW da Fazenda Ressaca, representativo da fácies Boundstone LLH. Na foto modificada, estão destacadas as laminações laterais do tipo LLH de estromatólitos. Ponto FR-17-04.

Petrograficamente, os estromatólitos são descritos como totalmente recrystalizados por minerais carbonáticos, com os minerais de dolomita preservando a estrutura ondulada

aproximadamente plano-paralela. Essa orientação definida pelos cristais carbonáticos foi observada na amostra FR-09, predominantemente carbonática (98% em área), com três modas granulométricas distinguíveis. A primeira e maior, com cristais variando entre 0,25 a 0,5 mm, é constituída por cristais euédricos com contato poligonal bem definido. Demarcam faixas de aproximadamente 2,5 mm e aparentam definir algum tipo de orientação. A segunda granulometria ocorre adjacente às faixas descritas acima, e os cristais possuem em média 0,1 mm, com contato não muito bem definido. A última granulometria ocupa 25% da seção, e pode ser considerada uma matriz micrítica.

### ***Interpretação***

Os estromatólitos LLH dessa fácies representam condições de águas relativamente mais rasas, relativamente agitadas e oxigenadas. Os estromatólitos com alternância de laminações dolomítica e de fosfato são interpretados como possíveis variações nas condições diagenéticas em função de maior e menor concentração de matéria orgânica em cada lâmina.

### ***6.2.3 Fácies de Mudstone***

Mudstone é o termo proposto por Dunham (1962) para rochas carbonáticas suportadas pela matriz, onde existem menos de 10% dos grãos em fração areia ou maior. Na coluna estratigráfica, a fácies *Mudstone* ocorre intercalada na fácies *Boundstone LLH* e acima da fácies *Boundstone SH* em pacotes pouco espessos (1 ou 2 metros), além de ocorrências como sub-fácies em diversas porções da coluna.

Petrograficamente, como observado na seção delgada FR -17, trata-se de material fino com predominância de calcita.

### ***Interpretação***

Fácies *Mudstones* são interpretadas como ambientes de baixa energia, normalmente lagunares ou marinhos profundos. Assim como na Fazenda Ressaca, Boggiani (1998) descreveu a fácies *mudstones* dolomíticos plano paralelas, ocorrendo em diversas localidades na Serra da Bodoquena, associadas com estromatólitos. No caso específico da Fazenda Ressaca, a associação com estromatólitos sugere condições relativamente rasas, protegidas da ação das ondas, em lagunas.



#### 6.2.4 Fácies de Boundstone SH

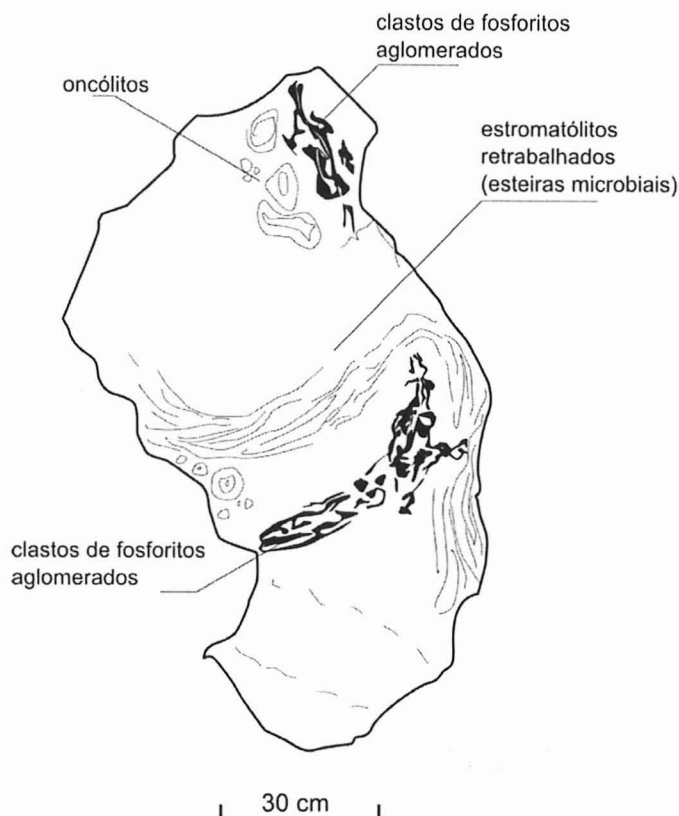
O termo *Boundstone SH* se refere no caso, aos estromatólitos empilhados do tipo colunar, do inglês *stacked hemispheroids* (Logan et al., 1964), que ocorrem em boa parte da porção média na Formação Bocaina, e intercalados em sub-fácies na coluna. Na Fazenda Ressaca, esses estromatólitos colunares, ocorrem constantemente alternados com lâminas de dolomitos e de fosforitos, e com oncólitos associados (figura 13). No perfil NE-SW realizado na viagem de campo (maio de 2017), essas associações foram vistas em diversos pontos (FR-17-03, FR-17-09). No ponto FR-17-03 (figura 14), um grande bloco alterado em laje possuía porções aglomeradas de oncólitos com até 5 cm de diâmetro, e uma faixa ondulada de aproximadamente 15 cm de uma estromatólito.



**Figura 13** - Associação típica na fazenda Ressaca, de estromatólitos colunares com oncólitos e níveis fosfáticos. Fotografia referente ao ponto FR-13.

Petrograficamente, a amostra FR-10 é composta basicamente por minerais carbonáticos (75%) romboédricos de granulometria média 0,05 mm, e quartzo (25%). Os cristais de quartzo parecem ocorrer no que seriam porosidades aproximadamente esféricas, entre os aglomerados carbonáticos. Essa porosidade é uniforme na lâmina, com diâmetro aproximado e 0,15 mm e normalmente é preenchido por apenas um cristal de quartzo. A amostra FR-11 apresenta quartzo e minerais carbonáticos em ordem inversa (75:25 respectivamente; figura 15 A e B). O quartzo aparenta substituir antigos nódulos elipsoidais (0,5 mm de diâmetro), sendo mais euédrico no núcleo (cristais de quartzo com aprox. 0,1 mm) e mais microcristalino nas bordas (0,0075 mm). Os minerais carbonáticos são posteriores à substituição dos nódulos por quartzo por estarem superpostos aos mesmos. A

seção FR-12 é muito semelhante à amostra FR-10, porém com maior proporção de quartzo do que minerais carbonáticos (20:80 respectivamente; figura 15 C e D).



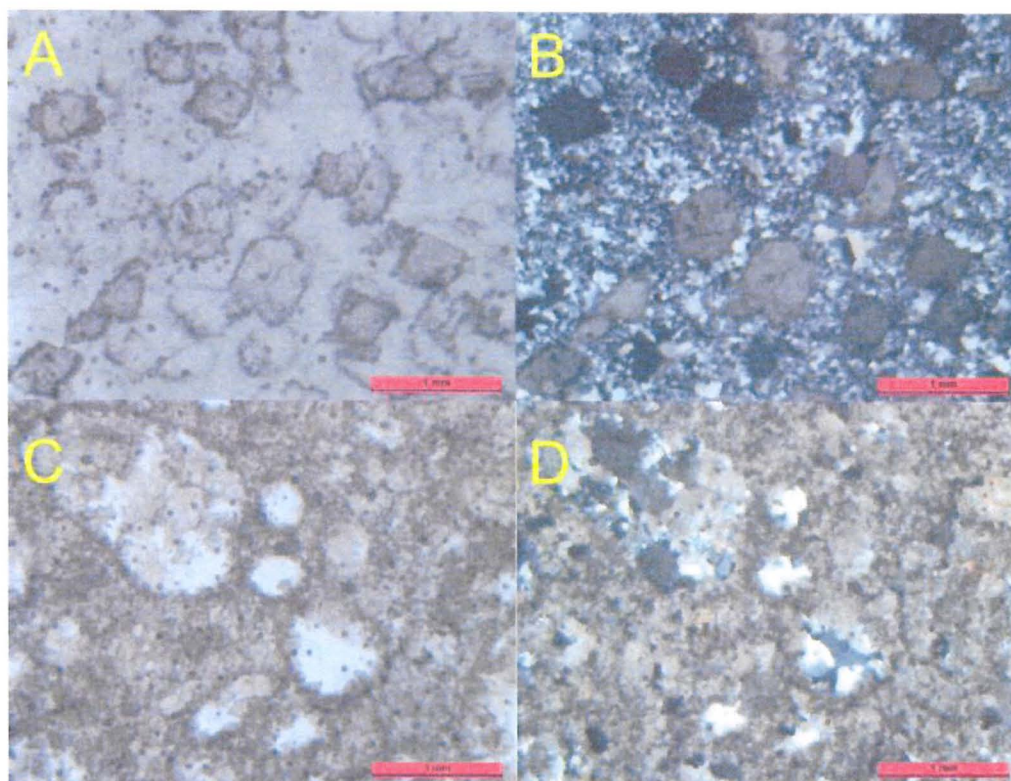
**Figura 14** - Esquema do bloco em laje, referente ao ponto FR-17-03 na Fazenda Ressaca. Na imagem, estão destacadas as ocorrências de estromatólitos da fácies *Boundstone SH* com níveis fosfáticos e presença de oncólitos de grande dimensão.

Há uma porção na lâmina onde se concentram oóides micritizados, com forma razoavelmente bem preservada, porém substituído pela matriz micrítica e ocasionalmente um cimento espático nas regiões próximas ao núcleo. Ao contrário da seção FR-10, o quartzo ocorre em granulometria ligeiramente menor, com contato interlobado entre grãos. Pela classificação de Embry e Klovan (1971), as amostras FR-10 e FR-12 seriam um *grainstone* oolítico.

### **Interpretação**

Petrograficamente, a seção delgada FR-10 guarda semelhanças com os oóides com lâminas com cristais de dolomita da fácies *Ooid Grainstone* (seção 6.2.1), o que poderia sugerir a degradação microbiana em ambientes anóxicos descrita por Wright (1997). Tanto essa seção delgada, como a FR-11 e Fr-12, e a presença de oncólitos sugerem ambientes costeiros rasos e agitados.





**Figura 15** – Seções delgadas representativas das amostras FR-11a e FR-12. A e B: Referentes à amostra FR-11 com nicóis paralelos e cruzados respectivamente, onde é possível visualizar resquícios de formas nodulares (A) e a silicificação (B). C e D: Referente à amostra FR-12, e semelhante às amostras FR-10 e FR-17. Na seção, formas nodulares sendo preenchidas por quartzo e minerais carbonáticos (D).

### 6.2.5 Fácies de Rudstone

Definido como rocha carbonática suportada pelos grãos, com mais de 10% desses grãos maiores do que 2 mm (Embry e Klován, 1971). Ocorrem na seção estratigráfica levantada, intercalado na fácies *Boundstone LLH* e na porção superior, próximo às fácies *Ooid Grainstones* e *Boundstone*. Fontaneta (2012) em sua coluna apontou duas fácies *rudstone*, sendo uma intraclástica e outra pisolítica, e ainda, mais algumas sub-fácies desta última. Devido à grande variação lateral (observada em campo e na bibliografia), optou-se neste trabalho por reunir todas essas variações em uma única fácies (*Rudstone*).

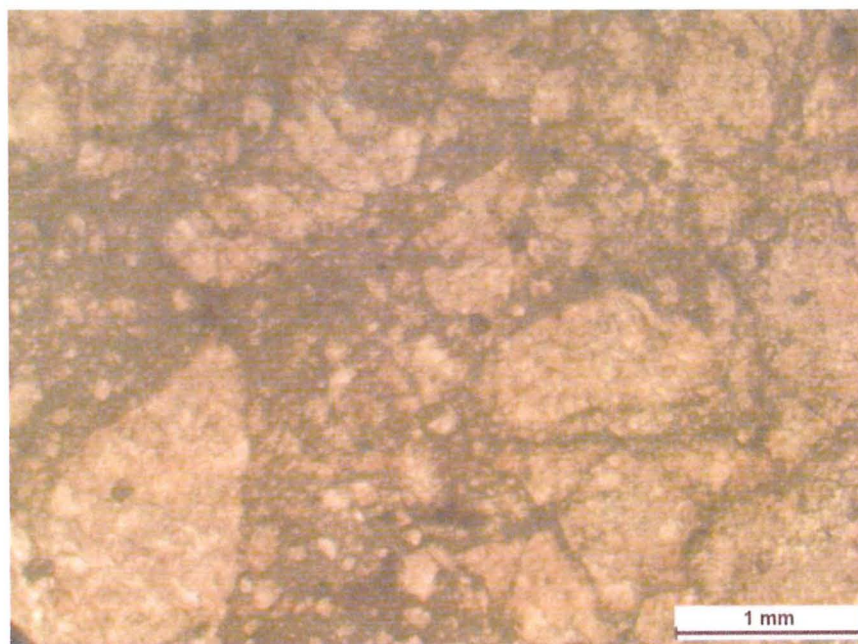
Em campo, a fácies *Rudstone* foi observada nos pontos FR-17-01 e FR-17-08. No ponto FR-17-01 ocorre um bloco onde quatro níveis diferentes foram observados (figura 16), com intercalação de fosforito, duas camadas de estromatólito do tipo dômico e outra camada com clastos milimétricos de fosforitos associados a gretas, podendo indicar algum tipo de retrabalhamento. No ponto FR-17-08, mais a SW, foi observado bloco representativo de uma brecha com grandes clastos semelhantes a algum dos tipos de estromatólitos.





**Figura 16** – Afloramento FR-17-01, onde o bloco apresenta grande variedade de estruturas. Identificadas como (A), (B), (C) e (D).

Petrograficamente, a seção delgada FR-15, apresentou 98% (em área) de minerais carbonáticos e 2% de quartzo, preenchendo eventuais poros e algumas fraturas (0,1 mm). Os minerais carbonáticos ocorrem de duas maneiras, cristais euédricos agregados e uniformes (0,1 mm), e a segunda, como uma matriz micrítica, que em alguns casos se assemelha a um 'brechamento' da primeira (figura 17). Na seção delgada 09-BOC-22-D, classificada como sub-fácies *rudstone* pisolítico com fosfato por Fontaneta (2012), ocorrem muitas estruturas arredondadas descontínuas (pisólitos e/ou oncólitos) eventualmente micritizadas, variando de 2 a 5 mm de diâmetro. Há presença de fragmentos fosfáticos que em conjunto com os oncólitos são suportados por uma matriz carbonática.



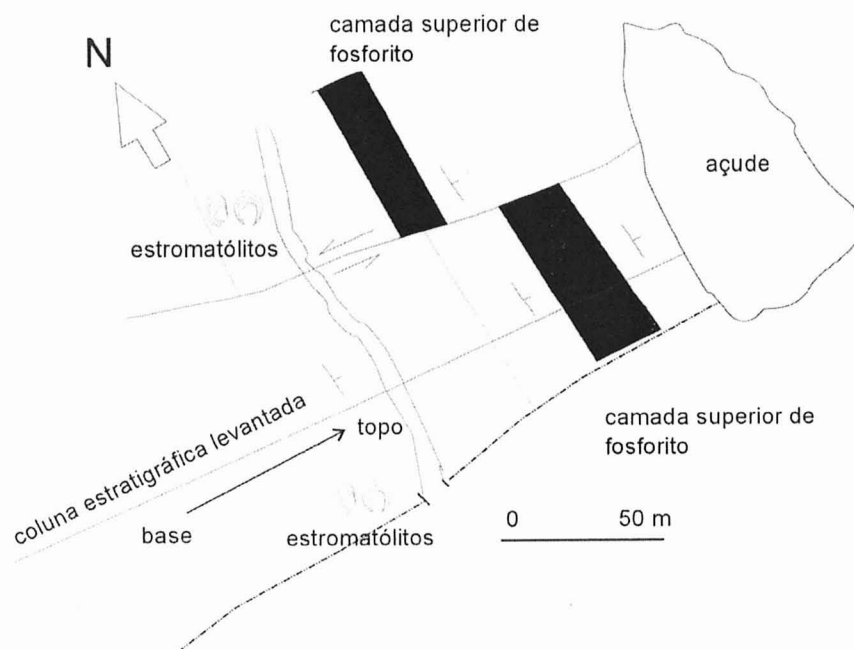
**Figura 17** – Predominância de minerais carbonáticos, com duas modas granulométricas, sendo os cristais euédricos sendo suportados por uma matriz micrítica, se assemelhando a um brechamento. Seção FR-17.

## Interpretação

Esta fácies ocorre intercalada e associada a diversas outras fácies como *wackestones*, *mudstones* e *grainstones* (Boggiani, 1998) na região de Bonito e Corumbá, e também na Fazenda Ressaca (Fontaneta, 2012). Boggiani (1998) interpretou a fácies *rudstone* com clastos arredondados, como retrabalhamento sedimentar de talude e também uma variação de fácies brecha intradeformacional. Fontaneta (2012) interpretou os pisólitos e oncólitos da fácies *rudstone* pisolítico como formados em zona vadosa e dolomitização secundária (substituição de calcita), enquanto os níveis mais fosfatizados teriam se dado em ambientes e épocas de maior concentração de matéria orgânica na zona de fosfogênese. Para a fácies *rudstone* intraclástico, o ambiente interpretado foi costeiro raso, com exposições subaéreas e posteriores retrabalhamento.

### 6.2.6 Fácies de Mudstone Phosphorite

O termo *Mudstone Phosphorite* provém da classificação de Embry e Klovan (1968), para rochas fosfáticas suportadas (>75%) por uma matriz fina (fração silte ou argila). A fácies é representada pelo nível fosfático no topo da Formação Bocaina e as melhores exposições dessa fácies ocorrem na Fazenda Ressaca (Figura 18).



**Figura 18** – Esquema geológico da ocorrência Mudstone Phosphorite do topo da Formação Bocaina, na Fazenda Ressaca (Bonito, MS).

Justo (2000) observou as rochas fosfáticas em trincheiras abertas na época e denominou esta fácies de tipo chert preto, provavelmente, pela semelhança com silixitos, mas o que não se considera apropriado, e também de fosforito tipo microbrecha associada a oóides e estromatólitos. Fontaneta (2012) definiu a fácies de fosforito durante um perfil na Fazenda Ressaca através de afloramentos fragmentados, e estipulou uma espessura média de 10 metros. Esses fosforitos mais puros, primários, seriam os que Follmi et al. (1991) denominam como *pristine*, para se contraporem aos retrabalhados

No presente trabalho, alguns afloramentos no perfil NE-SW também continham camadas relativamente menos espessas de fosforito, porém, as camadas de fosforitos foram melhores observadas em uma localidade denominada 'Casalheira' (figura 19) (amostras FR-17-casc1 e FR-17-casc2) e nas trincheiras abertas. Nesses casos, o fosforito se apresentou bem alterado de coloração preta com algumas porções esbranquiçadas, com presença de muitos vazios e fraturas preenchidas.

Na seção delgada FR-17-3A, observou-se grãos de fosforitos lenticulares orientados numa direção preferencial, possuindo em média, 0,5 a 1 mm no maior eixo, e também uma matriz micrítica preenchendo 35 ou 40% da lâmina em área. Uma melhor observação desses grãos foi com os nicóis cruzados, onde eram praticamente isotrópos. Eventualmente, encontra-se calcedônia no interior desses grãos alterados, e raramente cristais de muscovita (0,05 mm). Já na seção FR-17-3B, os mesmos nódulos lenticulares de fosforitos se encontram orientados numa direção preferencial, variando de 0,3 a 2 mm, na presença da mesma matriz microcristalina descrita. Pela classificação de Embry e Klován (1986), essa variação granulométrica e razão matriz – clasto suportado se encaixa em *Packstone Phosphorite*, ou próximo de um *Wackestone Phosphorite*.

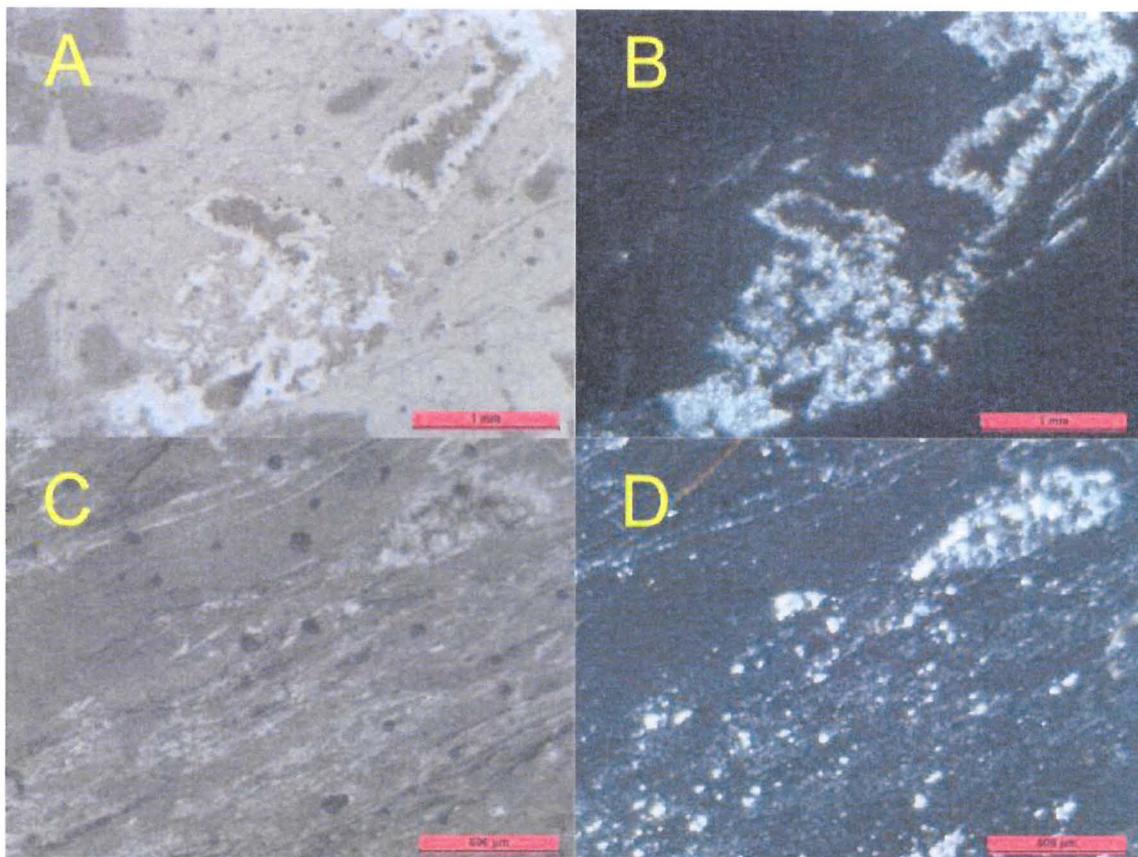
Nas seções FR-17-Casc1 e FR-17-Casc2, observa-se matriz microcristalina (figura 20 A) suportando grãos silicificados, isotrópa com nicóis cruzados (figura 20 B). Na lâmina FR-17-Casc2, é evidente uma laminação (figuras 20 C e D) da matriz microcristalina com alguns grãos de quartzo suportados.

Nas seções delgadas das trincheiras ocorrem minerais fosfáticos (preto-amarronzados) de tamanhos variados (0,5 mm até 2 mm , suportados por uma matriz bege-amarronzada (figura 21). Na lâmina, FR-T2-A1, existe uma porção com marcas alongadas e onduladas (figura 22), que sugerem atividade microbiana, porém não foi encontrada novamente em outras seções da mesma trincheira.



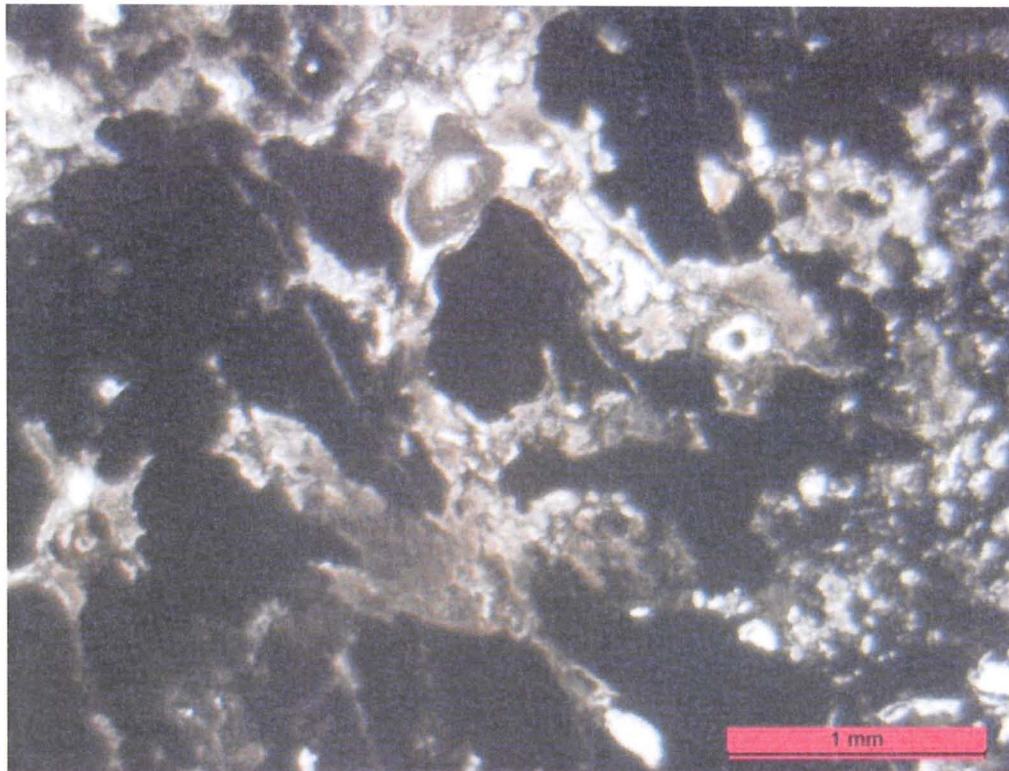


**Figura 19**– Afloramento nas proximidades da Fazenda Ressaca, intitulado 'casalheira', com presença de material fosfático alterado (Fácies de *Mudstone Phosphorite*).

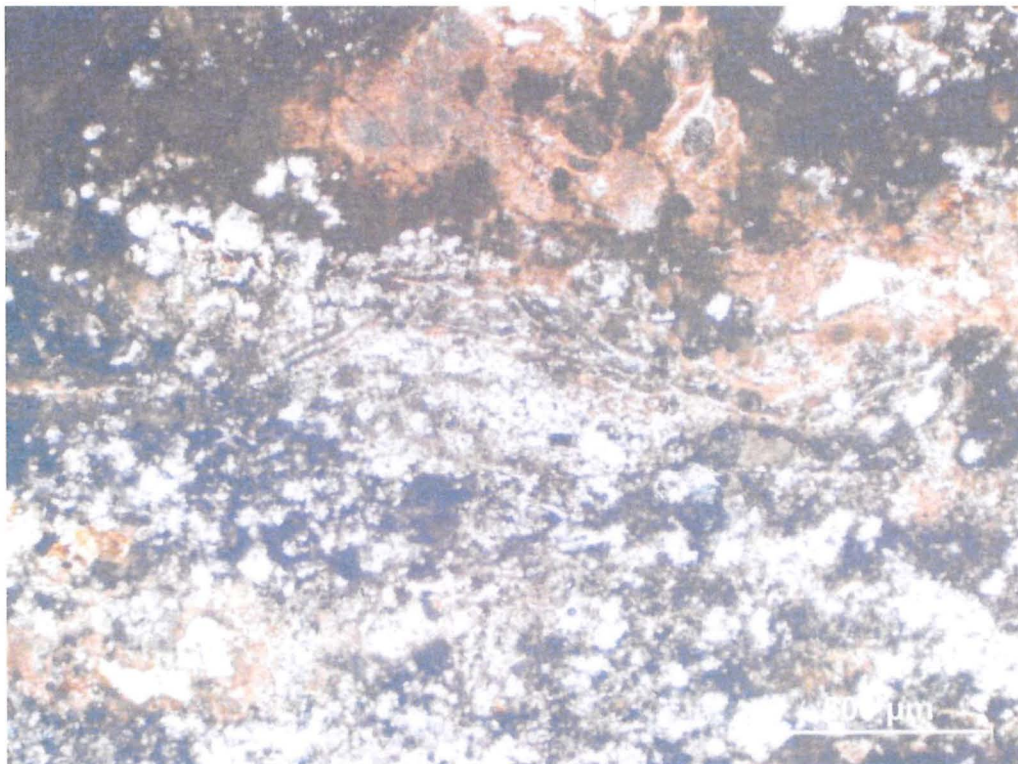


**Figura 20** – Seções delgadas representativas das amostras FR-17-Casc1 e 2. A e B: Referentes à amostra FR-17-Casc1, ocorre um possível cristal de fosforito silicificado, imerso numa massa bege-amarronzada, isótropa com os nicóis cruzados. C e D: Referente à amostra FR-17-Casc2, a uma laminação é visível com os nicóis paralelos.





**Figura 21** – Seção delgada representativa dos *Mudstones Phosphorites* de amostra da trincheira 2 (FR-T2-A1), onde os fosforito encontra-se em porções disformes, meio a matriz carbonática.



**Figura 22** – Seção delgada do Mudstone Phosphorite (amostra FR-T2-A1) mostrando uma porção alterada, com estrutura laminar (meio da foto) semelhante a esteiras microbianas.

## **Interpretação**

Apesar de ocorrer variações composicionais e granulométricas na fácies de *Mudstone Phosphorite* (como na amostra FR-17-03), o fosforito suportado por uma matriz muito fina é o que predomina. Como detalhado no item 5.2.2 (fosfogênese), vem sendo desenvolvido o modelo biogeoquímico no Neoproterozoico (Pufahl e Groat, 2016) associado às correntes de ressurgência. Nesse modelo, os fosforitos podem ser interpretados como não retrabalhados, depositando-se em camadas mais plano-paralelas, de ambientes mais calmos, ou como retrabalhados (por eventos de tempestade ou correntes) tornando-se mais granulares. Na Fazenda Ressaca, a fácies *Mudstone Phosphorite* pode ser interpretada como a alternância dessas fácies mais retrabalhadas e pouco retrabalhadas, onde os minerais fosfáticos não necessariamente estariam consolidados, mas sim num aspecto gelatinoso, o que teria produzido as porções disformes tão características.

### **6.2.7 Fácies de Brecha (base da Formação Tamengo)**

Esta fácies é observada logo acima da fácies *Mudstone Phosphorite* da Formação Bocaina. As ocorrências são restritas na Fazenda Ressaca, mas muito comuns nos arredores, sendo bem observada na mina Laginha (N7885994, E431975) em Corumbá (MS) (figura 23). O contato com a Formação Bocaina subjacente é interpretado como erosivo e essa brecha se estende desde Bonito, passando por Bodoquena, até Corumbá, tendo a estrada Bonito – Bodoquena como referência.

Na seção delgada FR-25 (figura 24) do presente projeto, ocorrem muitos grãos de minerais fosfáticos nodulares bem arredondados, variando de 1 a 1,5 mm, eventualmente com poros preenchidos por quartzo ou carbonato. Esses fosforitos são suportados por uma matriz micrítica, que eventualmente substituíram os nódulos fosfáticos. Pela classificação de Embry e Klován (1971), a amostra seria um *floatstone*, e na classificação de Cook e Shergold (1986), um *mudstone Phosphorite*, reforçando o contato entre as duas formações geológicas.

## **Interpretação**

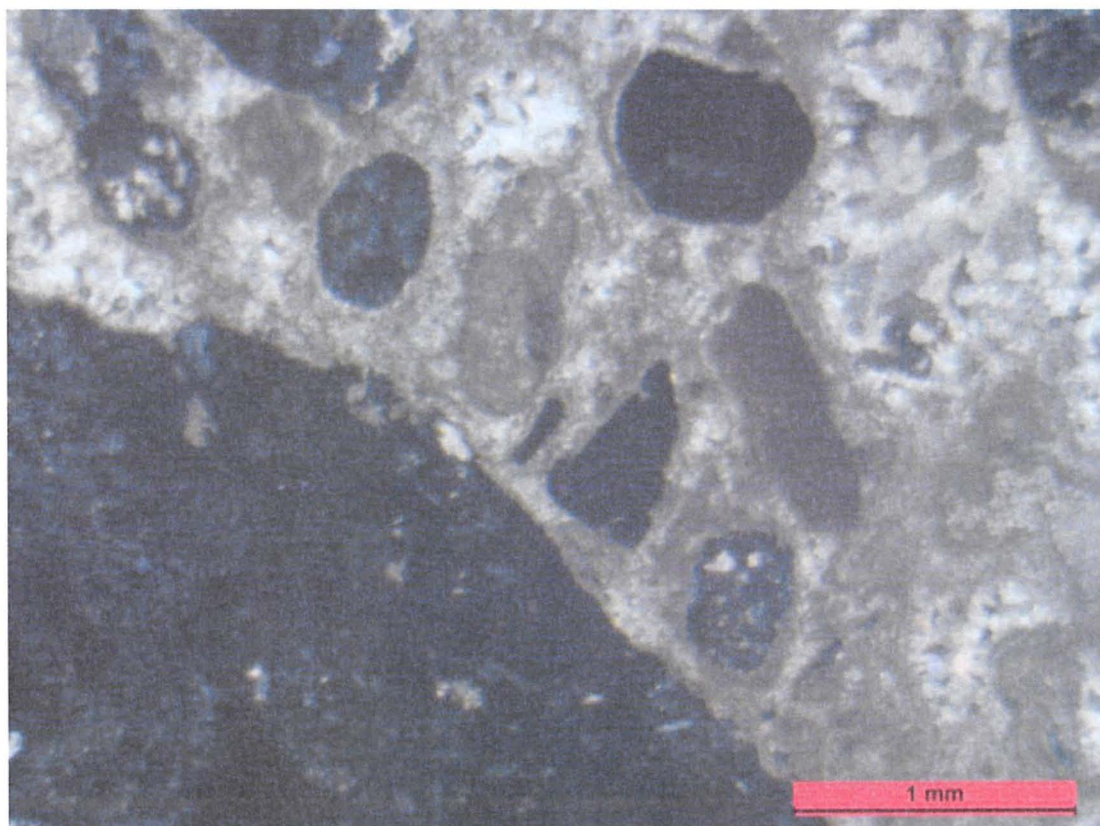
Apesar de suas ocorrências na região de Corumbá e Bonito, coincidirem com o limite da faixa de dobramento do Cráton, a brecha não é interpretada como tectônica, pela matriz não deformada e clastos angulosos preservados (Boggiani, 1998). Ainda, Boggiani (1998) interpreta essa fácies como formada pelo rebaixamento do nível eustático e retrabalhamento e deposição dos clastos polimíticos na borda da plataforma.

Por ser uma fácies de retrabalhamento, essas brechas podem constituir depósitos econômicos pela maior concentração de clastos de fosforito.





**Figura 23** – Bloco na mina Laginha (Corumbá – MS) representativa da brecha da fácies Brecha, da Formação Tamengo, logo em contato com o topo da Formação Bocaina, como constatado em campo. Os clastos de tamanhos variados variam entre fosforitos e minerais carbonáticos.



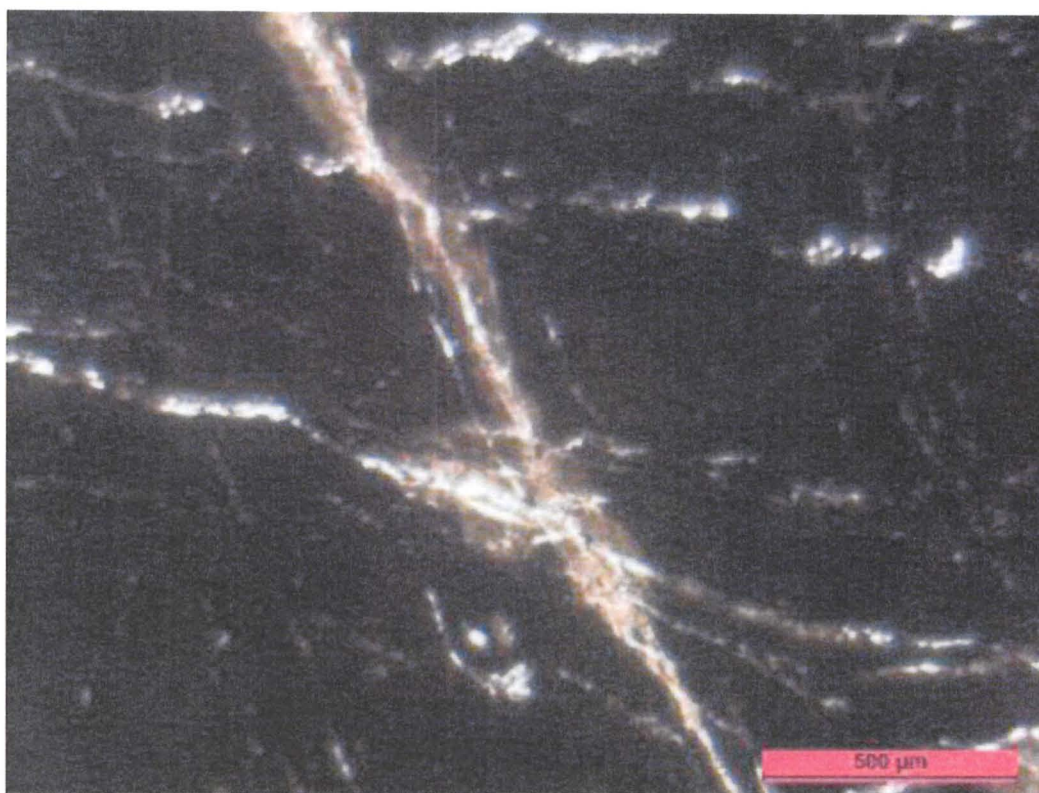
**Figura 24** – Clastos (angulares e arredondados) de fosforito e carbonatos suportados por uma matriz micrítica. Amostra FR-25, do presente projeto.



### 6.3 Fosforitos da Formação Guaicurus

Durante a escavação de nova trincheira na Fazenda 3 Irmãos, relativamente próximo a Fazenda Ressaca, observou-se nível fosfático dentre os folhelhos típicos da Formação Guaicurus.

Petrograficamente, a amostra da Fazenda 3 irmãos (Fz.3I.05) apresentou 97% em área, de minerais fosfáticos opacos (identificados também por amostra de mão) e isotrópicos (figura 25), com presença de muitas fraturas milimétricas preenchidas, e aparentam seguir alguma direção preferencial. O preenchimento desses veios é composto por quartzo granular, calcedônia e muscovita. Há mínima presença de minerais opacos granulares (aprox. 0,25 mm) de coloração vermelho-escuro.



**Figura 25** – Seções delgadas representativas amostra coletada na Fazenda 3 Irmãos, da Formação Guaicurus. O fosforito em questão se encontra maciço, com presença de fraturas preenchidas por quartzo.

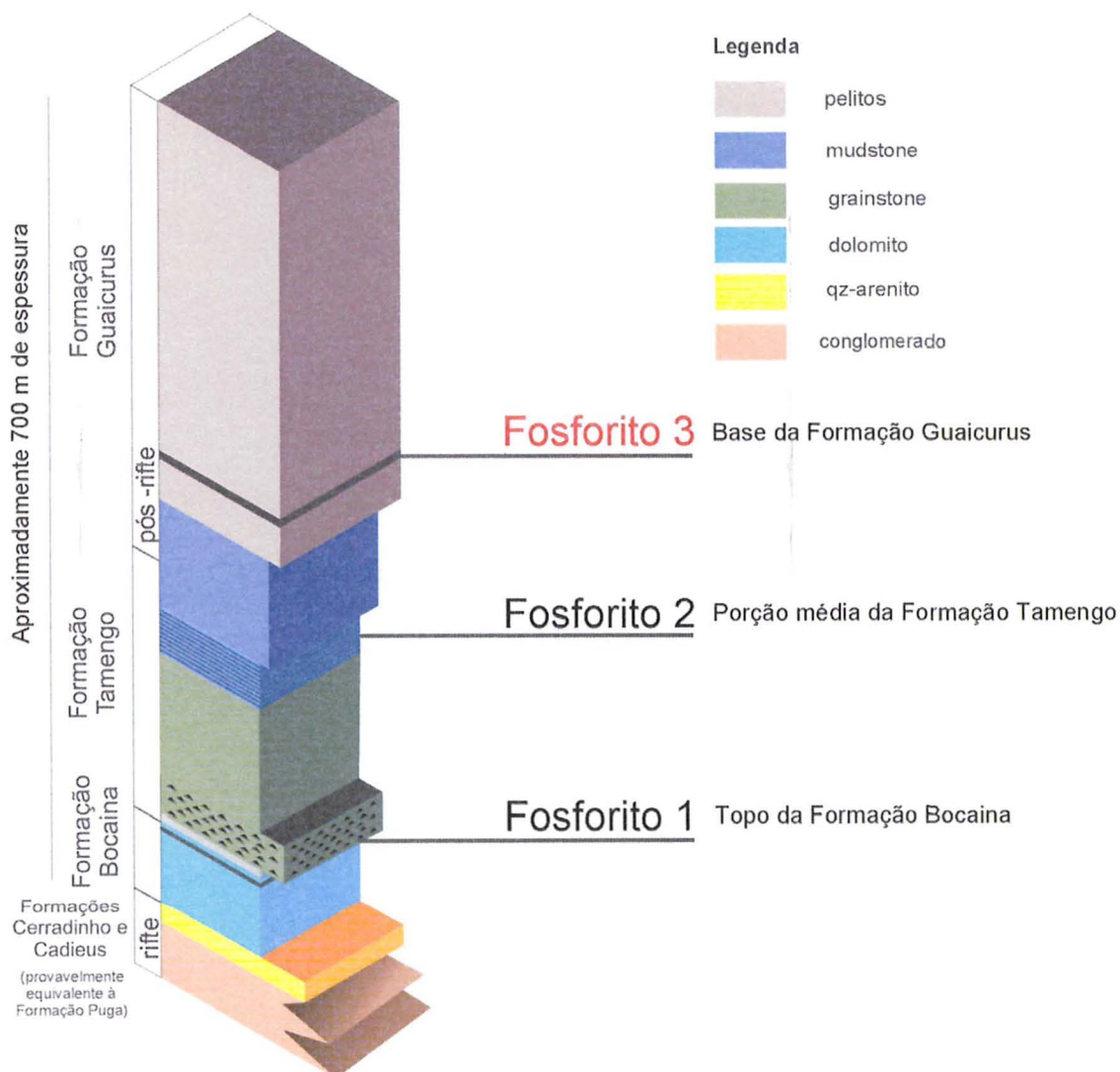
## 7. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO

Interpretações parciais foram apresentadas na descrição de cada fácies sedimentar, o que demonstram contexto de águas rasas e agitadas para as fácies como um todo.

No geral, com base na sistematização dos dados existentes sobre os fosforitos e rochas fosfática do Grupo Corumbá, pode-se dizer que ocorrem em duas unidades estratigráficas distintas – depósitos mais expressivos no topo da Formação Bocaina (fosforito 1) e na porção média da Formação Tamengo (que seriam os depósitos estudados pela CPRM na

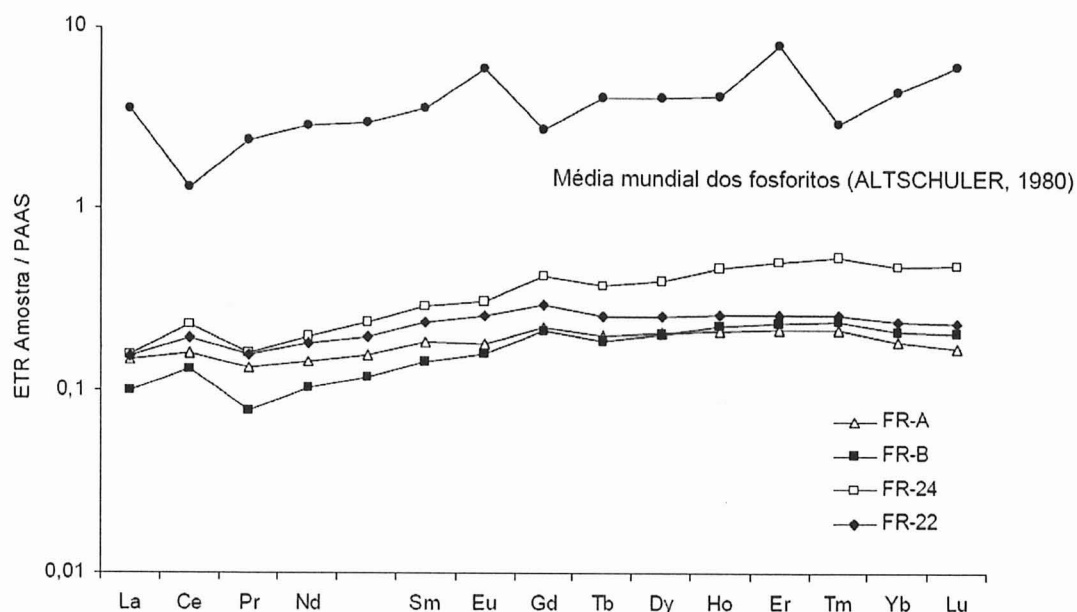
década de 1980) e o recente depósito descoberto na base da Formação Guaicurus (figura 26).

A esses três posicionamentos estratigráficos, no Grupo Corumbá, acrescenta-se um quarto, descoberto recentemente, de idade cenozoica e produto da alteração e retrabalhamento pedogenético de depósitos precambrianos, os quais estão sendo denominados “foscretes” (em detalhe na figura 8), já que são nodulares e lembram os depósitos de calcretes da Formação Xaraés, que não são objeto de estudo do presente trabalho de graduação.



**Figura 26** – Coluna estratigráfica simplificada do Grupo Corumbá, com os níveis fosfáticos conhecidos (1 e 2) e também o novo nível encontrado (3) pela empresa EDEM – Agromineral na Fazenda 3 Irmãos em Bonito (MS) na base da Formação Guaicurus. Modificado de Boggiani, 2010; baseada em Almeida 1965.

Resultados anteriores de Elementos de Terras Raras (Fontaneta 2012), em amostras de fosforito normalizadas para o folhelho PAAS (McLennan, 1989) geraram curvas com anomalias positivas de  $Ce/Ce^*$  variando de 1,085 a 1,317 (figura 27), enquanto as curvas para demais fosforitos apresentam curvas com anomalias negativas.



**Figura 27** - Curvas de elementos terras-raras (ETR) dos fosforitos da Fazenda Ressaca, normalizadas pelo padrão PAAS, e também a curva da média mundial para os mesmos elementos em fosforitos (Altschuler, 1980). Retirado de Fontaneta, 2012.

Análises isotópicas de  $Ce/Ce^*$ , também foram realizadas por Cui et al. (2015) na tentativa de testar uma das hipóteses de reconstrução do estado redox no Ediacarano do topo da Formação Doushantuo (China). As razões de  $Ce/Ce^*$  (normalizadas no padrão PAAS – *Post Archean Australian Shale*) nas amostras variaram de 0,3 até 0,9, e em conjunto com outras análises realizadas ( $\delta^{13}C$ ,  $\delta^{34}S$  e  $^{87}Sr/^{86}Sr$ ), os autores sugerem que a seção estudada, interpretada com plataforma interna rasa está incompleta, e que o ambiente deposicional transitou de oxidante para redutor. Cui et al. (2016) discutem que apesar da anomalia de  $Ce/Ce^*$  indicar um ambiente transicional de oxidante para redutor e, os oóides e intraclastos sugerirem ambiente oxidante, um modelo de estratigrafia de águas pode ser usado, com águas superficiais oxidantes e fundo marinho anóxico.

As anomalias de Ce apresentadas por Cui et al. (2015) são relativamente inferiores às obtidas para a Formação Bocaina. A princípio, poderiam ser resultante de alterações intempéricas. Novas amostras obtidas nas escavações da pesquisa mineral encontram-se em análise, inclusive do novo nível estratigráfico da base da Formação Guaicurus, porém com resultados ainda não disponíveis.

Uma reinterpretação dos dados de Ce do trabalho de Fontaneta (2012) é que a indicação de condições anóxicas da anomalia, seria referente ao ambiente diagenético de formação dos fosforitos, não de sedimentação, já que as evidências faciológicas indicam águas agitadas e, consequentemente, oxidantes.

As rochas fosfáticas têm muito a dizer sobre o paleoambiente e condições geoquímicas relacionadas aos elementos redox-sensitivos (indicadores de níveis de oxigênio) da época em que foram formadas, porém já é sabido que, para as unidades precambrianas, os



modelos fosfogenéticos se contrapõem às de unidades fanerozóicas (Nelson et al., 2010). Modelos como os de ressurgência marinha são aceitos nas unidades fanerozóicas, porém nas unidades precambrianas, a falta de evidências como a não comunicação com um paleoceano (Misi e Kyle, 1994) sugerem condições não atualísticas do Neoproterozoico. Logo, os fosforitos da Formação Bocaina, que ocorrem em borda de paleocontinente, poderiam ser associados a essas correntes de ressurgência, ou no mais, a uma específica condição de transição entre os tipos de processos fosfogenéticos precambrianos (rochas fosfáticas o Grupo Bambuí e Grupo Uma) e fanerozoicos.

Outra frente de estudo que é importante ser abordada é quanto às investigações dos dolomitos e estromatólitos associados a essas rochas fosfáticas pré-cambrianas. Os dolomitos podem ser secundários (por substituição) ou primários de origem organogênica (Wright, 1997). No caso da Formação Bocaina, Boggiani (2010) interpretou os dolomitos como primários. Com relação à associação com estromatólitos, os fosforitos do Grupo Una foram formados através de uma evolução diagenética muito complexa, onde as concentrações primárias de fosfato estariam associadas a processos biogênicos em ambientes anóxicos (Misi e Kyle, 1994), sendo que esse tipo de associação, com microbialitos, pode ser também a origem dos fosforitos do topo da Formação Bocaina.

## 8. CONCLUSÕES

A Fazenda Ressaca (MS) é um dos poucos lugares na Serra da Bodoquena onde afloram boas exposições da Formação Bocaina representada pela coluna faciológica (figura 8), principalmente do nível fosfático. Através da viagem de campo em maio de 2017 para a Fazenda, foi possível complementar a coluna faciológica proposta por Fontaneta (2012), individualizando as fácies com base na bibliografia da área e nas feições macro e microscópicas obtidas do presente trabalho, reinterpretando-as como representativas de ambientes com águas agitadas e oxidantes, fortemente evidenciada, através da petrografia, de clastos retrabalhados de fosforitos.

Com base em informações isotópicas das rochas fosfáticas da Fazenda Ressaca obtidas em trabalhos anteriores e da Formação Doushantuo (Cui et al. 2015, 2016), foi comparado as anomalias de cério. A anomalia da Fazenda Ressaca é relativamente maior do que a Formação Doushantuo (Ediacarano), e que poderia ser devido a alterações intempéricas, e utilizando essas novas informações, foi possível reinterpretar essa anomalia de cério no trabalho de Fontaneta (2012). No caso, a anomalia indicativa de condições anóxicas, poderia sugerir que a causa estaria associada à diagênese e não a sedimentação, e isso estaria concordante com as feições faciológicas observadas.

Com relação à análise petrográfica realizada em amostras do topo da Formação Bocaina, interpreta-se a seguinte sequência genética para explicar a origem dos fosforitos –



1) fosfato dissolvido seria trazido para as águas através dos hidróxidos de ferro, 2) após a deposição, ocorreria liberação do elemento fósforo até sua saturação nas águas intersticiais, o que proporcionaria a precipitação autigênica do fósforo, em ambiente redutores (verificados pela anomalia positiva de Ce), 3) retrabalhamento dos sedimentos com fosforito autigênico e concentração dos intraclastos de fosforito 4) os intraclastos teriam sido cimentados por calcita, com a possibilidade de ocorrência de dolomita primária.

Acompanhando o trabalho da empresa EDEM – Agromineral na Fazenda Ressaca, foi possível observar o nível fosfático alterado no topo da Formação Bocaina, e também o nível mais superficial denominado 'foscrete', produto de alteração pedogenética (Cenozoico).

Ainda nas observações de campo, e, aproveitando a oportunidade acompanhar a abertura de trincheira na Fazenda 3 Irmãos (MS) pela mesma empresa, foi possível identificar um novo nível fosfático inserido nos folhelhos da Formação Guaicurus. Petrograficamente, as amostras coletadas evidenciaram uma rocha fosfática maciça, podendo ser classificada como *Mudstone Phosphorite* na classificação de Cook e Shergold (1986).

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, F. 1965. Geologia da Serra da Bodoquena (Mato Grosso). *Boletim da Divisão de Geologia e Mineralogia, DNPM*, 219. 137p.
- Almeida, F. D. 1968. Evolução tectônica do centro-oeste brasileiro no Proterozoico Superior. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 40 (suplemento).
- Altschuler, Z. S. 1980. The geochemistry of trace elements in marine phosphorites: Part I. Characteristic abundances and enrichment. In: Bendor, Y. K. (Ed.). *Marine Phosphorites*. Oklahoma, USA: The Society of Sedimentary Geology, 1980, v.29, p.19-30.
- Alvarenga, C. J. S., Boggiani, P. C. 2004. Faixa Paraguai. In: Mantesso Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C. D. R., Brito-Neves, B. B. (Eds.) *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo; Editora Beca, 99-113.
- Baturin, G. N. 2003. Phosphorus cycle life in ocean. *Lithology and Mineral Resources*, v.38, p.101-119
- Boggiani, P. C. 1998. Análise Estratigráfica da bacia Corumbá (Neoproterozoico) – Mato Grosso do Sul. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências – USP, São Paulo, 181p.
- Boggiani, P. C. 2010. Sedimentação Autigênica Neoproterozoica e mineralizações associadas – Um registro não uniformitarista. Tese de Livre Docência. São Paulo: Departamento de geologia Sedimentar e ambiental do Instituto de Geociências, USP. 119p.
- Caird, R. A., Pufahl, P. K., Hiatt, E. E., Abram, M. B., Rocha, A. J. D., Kyser, T. K. 2017. Ediacaran stromatolites and intertidal phosphorite of the Salitre Formation, Brazil: Phosphogenesis during the Neoproterozoic Oxygenation Event. *Sedimentary Geology*, 350, 55-71.
- Condon, D., Zhu, M., Bowring, S., Wang, W., Yang, A., & Jin, Y. 2005. U-Pb ages from the neoproterozoic Doushantuo Formation, China. *Science*, 308(5718), 95-98.
- Cook, P. J., Shergold, J. H. 1986. *Phosphate deposits of the World, 1, Proterozoic and Cambrian phosphorites*: (Cambridge: Cambridge University Press.).
- Cuadros, L. J. E. C. 1999. Fosfato da Bodoquena – Mato Grosso do Sul. Programa de Avaliação Geológico-econômico de insumos minerais para agricultura no Brasil. *Série Insumos Minerais para Agricultura - PIMA nº2*. Goiânia. 31p.
- Cui, H., Kaufman, A.J., Xiao, S., Zhu, M., Zhou, C., Liu, X.-M., 2015. Redox architecture of an Ediacaran ocean margin: integrated chemostratigraphic ( $\delta^{13}\text{C}$ – $\delta^{34}\text{S}$ – $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ – $\text{Ce}/\text{Ce}^*$ ) correlation of the Doushantuo Formation, South China. *Chemical Geology* 405, 48–62.
- Cui, H., Xiao, S., Zhou, C., Peng, Y., Kaufman, A. J., & Plummer, R. E. 2016. Phosphogenesis associated with the Shuram Excursion: Petrographic and geochemical observations from the Ediacaran Doushantuo Formation of South China. *Sedimentary Geology*, 341, 134-146.

- Dardenne, M. A., Schobenhau, C. 2001. Metalogênese do Brasil. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 392p.
- Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). 2015. Sumário Mineral 2015. Brasília, v. 35. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2015/view>. Acesso em abril 2017.
- Drummond, J. B., Pufahl, P. K., Porto, C. G., Carvalho, M. 2015. Neoproterozoic peritidal phosphorite from the Sete Lagoas Formation (Brazil) and the Precambrian phosphorus cycle. *Sedimentology*, 62(7), 1978-2008.
- Dunham, R. J. 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In W. E. Ham (Ed.), *Classification of carbonate rocks*. (pp. 108-121). Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists Memoir.
- Embry III, A. F., Klován, J. E. 1971. A late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, NWT. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 19(4), 730-781.
- Emsbo, P., McLaughlin, P. I., Breit, G. N., Bray, E.A., Koenig, A. E. 2014. Rare earth elements in sedimentary phosphate deposits: solution to the global REE crisis?. *Gondwana Research*, 27 (2015), 776-785.
- Filippelli, G. M. 2008. The global phosphorus cycle: past, present, and future. *Elements*, 4(2), 89-95.
- Follmi, K. B. e Garrison, R. E. 1991. Phosphatic sediments, ordinary or extraordinary deposits? The example of the Miocene Monterey Formation (California). In: *Controversies in Modern Geology*. Academic Press, London, 55-84.
- Fontaneta, G. T. 2012. Dolomitização e fosfogênese na Formação Bocaina, Grupo Corumbá (Ediacarano). Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica. São Paulo: Instituto de Geociências, USP. 143p.
- Garrison, R. E., Kastner, M. 1990. Phosphatic sediments and rocks recovered from the Peru margin during ODP Leg 112. In *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results* (Vol. 112, pp. 111-134).
- Godoy, A. M.; Manzano, J. C.; Araújo, L. M. B.; Silva, J. A. 2009. Contexto geológico e estrutural do Maciço Rio Apa, sul do Cráton amazônico – MS. *Geociências*, v.28, n.4, p. 485-499.
- Hein, J. R., Koschinsky, A., Mikesell, M., Mizell, K., Glenn, C. R., Wood, R. 2016. Marine phosphorites as potential resources for heavy rare earths elements and yttrium. *Minerals*, 6,88, 1-22.
- Hiatt, E. E., Pufahl, P. K., Edwards, C. T. 2015. Sedimentary phosphate and associated fossil bacteria in a Paleoproterozoic tidal flat in the 1.85 Ga Michigamme Formation, Michigan, USA. *Sedimentary Geology*, 319, 24-39.

- Justo, L.J.E.C. 2000. Fosfato da Serra da Bodoquena – Mato Grosso do Sul. Programa de Avaliação Geológico-Econômico de insumos minerais para agricultura no Brasil. *Série Insumos Minerais para Agricultura – PIMA*, nº2. Goiânia. 31p.
- Kerber, B. B., da Rosa, A. L. Z., Gabas, S. G., de Moraes Leme, J., Pacheco, M. L. A. F. 2013. O registro fóssilífero de metazoários ediacaranos na América do Sul e suas implicações nos estudos sobre origem e complexificação da vida animal. *Geologia USP. Série Científica*, 13(3), 51-64.
- Logan, B.W.; Rezak, R.; Ginsburg, R. N. 1964. Classification and environmental significance of algal stromatolites. *Journal of Geology*, v.72. p.68-83.
- Long, K.R., Van Gosen, B.S., Foley, N.K., Cordier, D. 2010. The principal rare earth elements deposits of the United States – A summary of domestic deposits and global perspective. *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report*, 2010-5220.
- McLennan, S. M. 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes. *Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements*, 169-200.
- Misi, A., Kyle, J. R., 1994. Upper Proterozoic carbonate stratigraphy, diagenesis, and stromatolitic phosphorite formation, Irecê Basin, Bahia, Brazil: *Jour. Sed. Research.*, v. A 64(2):299-310.
- Nelson, G. J., Pufahl, P. K., Hiatt, E. E. 2010. Paleooceanographic constraints on Precambrian phosphorite accumulation, Baraga Group, Michigan, USA. *Sedimentary Geology*, 226(1), 9-21.
- Parry, L. A., Boggiani, P. C., Condon, D. J., Garwood, R. J., Leme, J. D. M., McIlroy, D., Diniz, C. Q. 2017. Ichnological evidence for meiofaunal bilaterians from the terminal Ediacaran and earliest Cambrian of Brazil. *Nature Ecology & Evolution*, 1(10), 1455.
- Pufahl, P. K. 2010. Bioelemental sediments, in James, N. P., Dalrymple, R. W. eds., *Facies Models*, 4<sup>th</sup> ed.: Geological Association of Canada, p.477-503.
- Pufahl, P. K., Groat, L.A. 2016. Sedimentary phosphate deposits: Formation and exploration: An invited paper. *Bulletin of the society of economic geologists*, 112, 3, 483-516.
- Terra, G. J. S., Spadini, A. R., Franca, A. B., Sombra, C. L., Zambonato, E. E., Juschaks, C. S., Winter, W. R. 2010. Classificação de rochas carbonáticas aplicável às bacias sedimentares brasileiras. *Boletim de Geociências Petrobrás*, Rio de Janeiro, V. 18, n. 1, p. 9-29.
- Trappe, J. 2001. A nomenclature system for granular phosphate rocks, according to depositional texture. *Sedimentary Geology* (45), 135-150.
- Wright, D.T. 1997. An organogenic origin for widespread dolomite in the Cambrian EileanDubh Formation, Northwestern Scotland. *Journal of Sedimentary Research*, 67(1):54-64.



Wright, D. T. 2000. Benthic microbial communities and dolomite formation in marine and lacustrine environments - a new dolomite model. In: Glenn, C. R.; Prévot-Lucas, L; Lucas, J. (Ed.). *Marine Authigenesis: From Global to Microbial*. Tulsa, Oklahoma: SEPM Special Publication, 2000, p.7-20.