

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE – UERN  
FACULDADE DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS – FANAT  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS NATURAIS – PPGCN  
MESTRADO EM CIÊNCIAS NATURAIS – MCN

JULIANA CARLA SILVA DE CARVALHO

**ASPECTOS FOSSILDIAGENÉTICOS, GEOQUÍMICOS E PALEOAMBIENTAIS  
DOS VERTEBRADOS DO PLEISTOCENO FINAL-Holoceno INICIAL DE  
TAPEROÁ, ESTADO DA PARAÍBA**

MOSSORÓ - RN

2018

JULIANA CARLA SLVA DE CARVALHO

**ASPECTOS FOSSILDIAGENÉTICOS, GEOQUÍMICOS E PALEOAMBIENTAIS  
DOS VERTEBRADOS DO PLEISTOCENO FINAL-Holoceno INICIAL DE  
TAPEROÁ, ESTADO DA PARAÍBA**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Ciências Naturais – PPGCN da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte – UERN, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências Naturais.

Linha de Pesquisa: Diagnóstico e Conservação Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Kleberson de Oliveira Porpino

Coorientador: Prof. Dr. Hermínio Ismael de Araújo Júnior

MOSSORÓ - RN

2018

© Todos os direitos estão reservados a Universidade do Estado do Rio Grande do Norte. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do(a) autor(a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu(a) respectivo(a) autor(a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

### **Catálogo da Publicação na Fonte.**

#### **Universidade do Estado do Rio Grande do Norte.**

C331a Carvalho, Juliana Carla Silva de  
ASPECTOS FOSSILDIAGENÉTICOS, GEOQUÍMICOS  
E PALEOAMBIENTAIS DOS  
VERTEBRADOS DO PLEISTOCENO FINAL-Holoceno  
INICIAL DE TAPEROÁ, ESTADO DA PARAÍBA. / Juliana  
Carla Silva de Carvalho. - Mossoró, RN, 2018. 77p.

Orientador(a): Prof. Dr. Kleber de Oliveira Porpino.

Coorientador(a): Prof. Dr. Hermínio Ismael de Araújo  
Júnior.

Dissertação (Mestrado em Programa de PósGraduação  
em Ciências Naturais). Universidade do Estado do Rio  
Grande do Norte.

1. Fossilização. 2. Quaternário. 3. Depósitos de  
tanque. 4. Paleoambiente. 5. Elementos Terras Raras. I.  
Porpino, Kleber de Oliveira. II. Universidade do Estado  
do Rio Grande do Norte. III. Título.

JULIANA CARLA SLVA DE CARVALHO

**ASPECTOS FOSSILDIAGENÉTICOS, GEOQUÍMICOS E PALEOAMBIENTAIS  
DOS VERTEBRADOS DO PLEISTOCENO FINAL-Holoceno INICIAL DE  
TAPEROÁ, ESTADO DA PARAÍBA**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Ciências Naturais – PPGCN da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte – UERN, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências Naturais.

Linha de Pesquisa: Diagnóstico e Conservação Ambiental

Aprovada em 15 de março de 2018

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Kleberon de Oliveira Porpino  
(Membro Interno - Orientador)

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Ana Bernadete Lima Fragoso  
(Membro Interno)

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Lilian Paglarelli Bergqvist  
(Membro Externo - UFRJ)

À minha família, dedico.

## AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Naturais (PPCN), pela oportunidade da realização do mestrado.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Kleber de Oliveira Porpino (UERN) e Prof. Dr. Hermínio Ismael de Araújo Júnior (UERJ), pela amizade, estímulo e apoio nesta jornada, além de todo conhecimento que puderam dividir. Se tornaram meus exemplos de profissionais.

À Profa. Dra. Lílian Paglarelli Bergqvist (UFRJ), uma grande pesquisadora. Sem ela, não teria sido possível trabalhar com o material de Taperoá (PB), uma vez que foi através dela que os fragmentos fósseis, utilizados no presente trabalho, foram coletados.

Ao Prof. Dr. José Agnelo Soares (UFCG) e ao seu aluno Gleyser Átilla Victor Ribeiro pelo apoio logístico no trabalho de campo e ao meu amigo escoteiro Cláudio Roberto Araújo de Arruda Júnior.

À Prof<sup>ra</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Bernadete Lima Fragoso pelo incentivo e contribuições ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos alunos de química do Laboratório de Análises Magnéticas e Ópticas (LAMOp-UERN), em especial Ernani Silva, pela disposição e paciência em ensinar as técnicas necessárias para análises realizadas neste trabalho e ao técnico João Neto.

Aos meus colegas de mestrado, pelo incentivo que deram uns aos outros, pela amizade, momentos de descontração e força nos momentos difíceis e aos demais amigos que contribuíram com apoio e torcida para o sucesso deste trabalho.

Finalmente, um especial agradecimento à minha família, principalmente aos meus pais: Adelaide Sancho de Carvalho e Afonso Carlos da Silva; às minhas irmãs Daiana Carla Silva de Carvalho e Jusciana Carla Silva de Carvalho, por sempre me apoiarem na realização dos meus sonhos; e ao meu esposo, Ednaldo Barbosa Laurentino Junior, por suportar a minha ausência e oferecer muito incentivo para a conclusão deste trabalho.

E tudo quanto pedirdes ao Pai em meu nome,  
que seja justo, acreditando que recebereis, eis  
que vos será dado.

**3 Néfi 18:20**

## RESUMO

Os estudos sobre a acumulação fossilífera em Taperoá estavam focados em questões taxonômicas e bioestratinômicas. Este trabalho buscou estudar processos fossildiagnéticos e geoquímicos dos vertebrados fósseis do depósito de tanque em Taperoá para identificar a origem de padrões e diferenças diagenéticas em depósitos de tanque e refinar o contexto paleoambiental da região de Taperoá e do Quaternário do nordeste brasileiro. O tanque está localizado na Fazenda Pau Leite (anteriormente denominada Fazenda Campo Alegre), onde foram coletados fragmentos fósseis do sedimento do entorno do tanque previamente retirado de seu interior. Amostras foram classificadas de acordo com o padrão de coloração e então submetidas à confecção de lâminas delgadas, análises de Fluorescência e Difractometria de raios-X, além do uso da Análise de Componentes Principais (PCA), para verificar a relação da coloração com a composição química dos fósseis. Com as lâminas delgadas foi possível identificar microfraturas e diferentes estágios de preservação, onde o principal processo de fossilização é a permineralização por sedimentos siliciclásticos e por  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{FeO}_2$  e  $\text{MgO}_2$ , porém, com alguns casos de substituição por sílica,  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{FeO}_2$ . De maneira geral, a microestrutura óssea se encontra bem preservada. A análise de Fluorescência de raios-X mostrou seis elementos mais representativos: cálcio, fósforo, silício, alumínio, ferro e manganês, sendo os dois últimos responsáveis pela maior variação de coloração dos fósseis. Com o uso do PCA foi observado principalmente que os espécimes com maior percentual de manganês são os mais escuros (tons de preto); as demais colorações não apresentaram um padrão de agrupamento. A presença de Elementos Terras Raras também foi observada principalmente pelos representantes dos ETR-Médios e podem indicar a ocorrência de mistura temporal. A análise de Difração de raios-X mostrou que espécimes com diferentes padrões de colorações apresentavam predomínio de hidroxiapatita, mostrando que os fósseis preservam a composição mineral original. Marcas de raízes e algas também foram observadas, além de branqueamento por exposição solar que podem indicar retrabalhamento e mistura temporal. Desta forma, concluímos que o tanque de Taperoá pôde ter passado por diferentes condições ambientais. De circunstâncias oxidantes a redutoras e de úmidas a secas, causando diferenças diagenéticas; provavelmente os ossos sofreram mineralização e impregnação de substâncias em diferentes momentos, condições comuns em depósito de tanque.

**Palavras-chaves:** Fossildiagnese, Quaternário, depósitos de tanque, paleoambiente, Elementos Terras Raras.

## ABSTRACT

Studies on the fossil accumulation of Taperoá were focused on taxonomic and biostratigraphic issues. This work aimed to study fossilization and geochemical processes of fossil vertebrates from the fossiliferous deposit of Taperoá to identify the origin of diagenetic patterns and differences in tank deposits and to refine the paleoenvironmental context of the region of Taperoá and northeastern region of Brazil during the Quaternary. The tank is located in Pau Leite Farm (formerly Campo Alegre Farm), where fossil fragments were collected from the sediment surrounding the tank previously removed from its interior. Samples were classified according to the staining pattern and then submitted to the preparation of thin sections, Fluorescence and X-ray diffractometry analyzes, in addition to the use of Principal Component Analysis (PCA), to verify the relationship of staining to chemical composition of fossils. With the thin sections, it was possible to identify microfractures and different stages of preservation, where the main fossilization process is permineralization by siliciclastic sediments and  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{FeO}_2$  and  $\text{MgO}_2$ , but with some cases of replacement by  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaCO}_3$  and  $\text{FeO}_2$ . In general, the bone microstructure is well preserved. X-ray Fluorescence analysis showed six most representative elements: calcium, phosphorus, silicon, aluminum, iron and manganese, the latter two being responsible for the greater color variation of the fossils. With the use of PCA, it was possible to observe mainly that the specimens with the highest percentage of manganese are the darkest ones (shades of black); the other stains did not present a grouping pattern. The presence of Rare Earth Elements was also observed mainly by representatives of the Middle Rare Earth Elements (MREE) and may indicate the occurrence of temporal mixing. The analysis of X-ray diffraction showed that the specimens utilized with different staining patterns had a predominance of hydroxyapatite, showing that the fossils preserve the original mineral composition. Root and algae marks have also been observed, in addition to sun exposure bleaching which may indicate reworking and temporal mixing. Thus, we conclude that the Taperoá tank underwent different environmental conditions. From oxidizing to reducing and wet to dry conditions, causing diagenetic differences; probably the bones underwent mineralization and staining of substances at different times, a common setting in tank deposit.

**Keywords:** Fossilization, Quaternary, tank deposits, paleoenvironment, Rare Earth Elements.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Principais vias tafonômicas que levam a transformação de restos orgânicos em fósseis (ARAÚJO-JÚNIOR; BISSARO-JÚNIOR, 2017)..... 19
- Figura 2: Mapa e visão panorâmica do Sítio Paleontológico Pau Leite, Taperoá, Estado da Paraíba. (Modificado de ARAÚJO-JÚNIOR et al., 2017). ..... 28
- Figura 3: Mapa geológico do Município de Taperoá (modificado de CPRM, 2005). ..... 29
- Figura 4: Corte esquemático do TFPL (modificado de ARAÚJO-JÚNIOR, 2015). ..... 30
- Figura 5: Fotos do trabalho de coleta do material fóssil do tanque de Taperoá-PB. A e B: fotos panorâmicas do tanque de Taperoá. C: foto panorâmica da faixa de sedimentos retirados do interior do tanque no qual foram feitas as trincheiras; D: Fragmento fóssil encontrado no interior da trincheira; E: fragmentos fósseis retirados da faixa de sedimentos; F: foto do trabalho realizado em uma das trincheiras (da esquerda para a direita: Juliana C. S. Carvalho, Profa. Dra. Lílian P. Bergqvist e José Marcos - ajudante na abertura da trincheira). ..... 31
- Figura 6: Aparelhos usados para as análises geoquímicas. A: Fluorescência de raios-X (EDX-7000); B: Difração de raios-X (XRD-600). ..... 33
- Figura 7: Amostra de fósseis utilizados na confecção das lâminas delgadas. A) espécime 301-V-UERN (cor 5YR 2/1); B) espécime 309-V-UERN (cores 5YR 2/1 e 10Y 8/2); C) espécime 310-V-UERN (cor 5YR 2/2); D) espécime 314-V-UERN (cores 10R 3/4 e 5YR 2/1); E) espécime 315-V-UERN (cor 5YR 3/4); F) espécime 318-V-UERN (cores 10YR 5/4 e 10YR 8/2); G) espécime 319-V-UERN (cores 10YR 5/4 e 5YR 2/1); e H) espécime 324-V-UERN (cores 10YR 8/2 e 5YR 2/1) . Escala = 2 cm. .... 35
- Figura 8: Desenho esquemático de medida de FRX (Modificado de SOUSA-FILHO, 2011; modificado de SHIMADZU CORPORATION, 2013). ..... 37

|   |    |
|---|----|
| Figura 9: Preparação do material para a análise de DRX. A: pulverização de um dos espécimes;<br>B: todas as amostras usadas na DRX (utilizada numeração provisória). .....  | 38 |
| Figura 10: Realização do refinamento dos dados da DRX através do programa MAUD ao<br>comparar a carta do mineral encontrado (hidroxiapatita) com os demais picos de comprimentos<br>de ondas obtidos em cada espécime usado na difração de raios-X. ....  | 39 |
| Figura 11: Fotos de lâminas delgadas do espécime 301-V-UERN. Presença de substituição e<br>permineralização em todas as fotos (A-G: aumento em 5x e G1: aumento em 10x). Cal: Calcita;<br>Qz: Quartzo; Ox: Óxido; OF: Óxido de Ferro; CH: Canal de Harvers; Si: Sílica. Escala = 200<br>µm.....   | 42 |
| Figura 12: Fotos de lâmina da amostra 309-V-UERN. (A, B e C) Presença de permineralização<br>e (B) de pouca substituição (A, B: aumento em 5x e C: aumento em 10x). Cal: Calcita; OF:<br>Óxido de Ferro. Escala = 200 µm.....   | 43 |
| Figura 13: Fotos de lâminas da amostra 310-V-UERN. (A, B e B1) Permineralização<br>siliciclástica (A-B: aumento em 5x e B1: aumento em 10x). Qz: Quartzo, Si: Sílica. Escala =<br>200 µm.....   | 44 |
| Figura 14: Fotos de lâmina delgada da espécime 314-V-UERN e de zoom de microestruturas<br>(A1-A3, B1). A, B e C: presença de permineralização e microfraturas (A, A1 e B: aumento em<br>5x; A3, B1 e C: aumento em 10x; e A2: aumento em 20x). Cal: Calcita; Fr: Fratura; OMn:<br>Óxido de manganês; OF: Óxido de ferro; Os1: Ósteon primário; Os2: Ósteon secundário. Escala<br>= 200 µm. .... | 46 |
| Figura 15: Fotos de lâmina do espécime 315-V-UERN. Corte perpendicular. A, B e C: presença<br>de substituição (A-C: aumento em 5x). Cal: Calcita; CH: Canal de Harvers; VC: Canais de<br>Volkman. Escala = 200 µm .....   | 47 |
| Figura 16: Fotos de Lâmina do espécime 318-V-UERN. A-D: presença de substituição e<br>permineralização por óxido de ferro (FeO <sub>2</sub> ; A-D: aumento em 5x). OF: Óxido de ferro. Escala<br>= 200 µm. ....   | 48 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 17: Fotos de lâmina do espécime 319-V-UERN. A, A1 e B: presença de substituição e permineralização (A,B: aumento em 5x; e B1: aumento em 10x). Fel: Feldspato; Qz: Quartzo; OF: Óxido de ferro. Escala = 200 µm. ....   | 49 |
| Figura 18: Fotos de lâmina da amostra 324-V-UERN. A e B: presença de permineralização (A, B: aumento em 5x). OF: Óxido de ferro. Escala = 200 µm.....  | 50 |
| Figura 19: Gráficos com proporções entre elementos químicos analisados quantitativamente por FRX. A, média da proporção de elementos químicos mais representativos dos espécimes selecionados para a realização da FRX (sem presença de incrustações); B, Média da proporção de elementos químicos mais representativos presentes nas incrustações.....  | 51 |
| Figura 20: Gráfico comparativo entre os valores obtidos através da FRX e os seis elementos químicos mais representativos. A numeração indica os números de registros dos espécimes estudados e as letras referem-se aos pontos analisados pelo aparelho de FRX em cada espécime. ....  | 51 |
| Figura 21: Distribuição da concentração de elementos majoritários (Al, Ca, Fe, Mn, P e Si) em relação a cada ponto de análise dos 31 espécimes utilizados na FRX através da PCA. A: agrupamento com os elementos Ca e P.; B: agrupamento com o elemento Mn.; e C: agrupamento com os elementos Fe, Si e Al. Pontos representam cores aproximadas da classificação de coloração de Munsell Color (2009), porém, pontos em azul claro representam a coloração branca nos fósseis. Setas indicam incrustações ferruginosas (avermelhadas) e siliciclásticas (acinzentada, esverdeada e amarelada). .... | 56 |
| Figura 22: Gráfico da presença de ETR que ocorreram na amostra da FRX. ....  | 57 |
| Figura 23: Resultados da análise de DRX. A e B: difratogramas gerados para os espécimes 280-V-UERN e 275-V-UERN, respectivamente, sendo sobrepostos pelo perfil da hidroxiapatita.   | 58 |
| Figura 24: Média de valores obtidos nas análises de DRX. A: espécime 270-V-UERN; B: espécime 273-V-UERN; C: espécime 274-V-UERN; D: espécime 275-V-UERN; E: espécime 280-V-UERN; F: espécime 282-V-UERN; e G: espécime 283-V-UERN.....   | 59 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 25: Exemplo de espécimes que possuem bioerosões por raízes e algas. A: espécime 273-V-UERN; B: espécime 295-V-UERN; C: espécime 314-V-UERN; e D: espécime 315-V-UERN. Escala = 2 cm.....                      | 60 |
| Figura 26: Exemplo de fóssil submetido ao branqueamento pela exposição aos raios solares (276-V-UERN). A: porção que sofreu incidência de raios solares; e B: porção que permaneceu soterrada. (Escala = 2cm). ..... | 60 |
| Figura 27: Diagrama esquemático resumindo os processos da história fossildiagenética observados nos fósseis coletados no TFPL na fase chuvosa. ....  | 66 |
| Figura 28: Diagrama esquemático resumindo os processos da história fossildiagenética observados nos fósseis coletados no TFPL na fase de estiagem. ....  | 67 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| TABELA 1: CORES OBSERVADAS NOS ESPÉCIMES SUBMETIDOS A CONFECÇÃO DAS LÂMINAS DELGADAS. ....  | 34 |
| TABELA 2: VARIAÇÃO DE CORES OBSERVADAS NOS ESPÉCIMES SUBMETIDOS A FRX .....   | 36 |
| TABELA 3: FEIÇÕES DIAGENÉTICAS IDENTIFICADAS NAS LÂMINAS DELGADAS .....   | 40 |
| TABELA 4: RESULTADO QUANTITATIVO DE ESPÉCIMES SUBMETIDOS À FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X EM RELAÇÃO À REPRESENTAÇÃO DOS SEIS ELEMENTOS MAJORITÁRIOS NAS AMOSTRAS. .... | 52 |
| TABELA 5: <i>EIGENVALUES</i> RESULTANTES DA ANÁLISE DE PCA EM TODOS OS COMPONENTES PRINCIPAIS EM MATRIZ DE CORRELAÇÃO. ....                                       | 55 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**(Número)-V-UERN** – Coleção de vertebrados fósseis do Laboratório Paleontologia da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte.

**DRX** – Difractometria de raios-X.

**ETR** – Elementos Terras Raras.

**FRX** – Fluorescência de raios-X.

**LABPALEO-UERJ** – Laboratório de Paleontologia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

**PALEOLAB-UERN** – Laboratório de Paleontologia da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte.

**LAMOp-UERN** – Laboratório de Análises Magnéticas e Ópticas da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte.

**LGPA-UERJ** – Laboratório Geológico de Processamento de Amostras da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

**MAUD** – *Material Analysis Using Diffraction*.

**MN/UFRJ** – Museu Nacional da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

**PAST** – *PAleontological STatistics*.

**PCA** – Análise de Componentes Principais.

**TFPL** – Tanque fossilífero da Fazenda Pau Leite, Taperoá, Paraíba.

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>16</b> |
| 1.1 TANQUES FOSSILÍFEROS .....   | 16        |
| <b>1.1.1 Breve histórico de pesquisas em tanques fossilíferos.</b> ..... | <b>17</b> |
| 1.2 TAFONOMIA .....  | 18        |
| <b>1.2.1 Estudos fossildiagnéticos em depósitos de tanque</b> .....      | <b>23</b> |
| <b>1.2.2 Tanque fossilífero em Taperoá</b> .....                         | <b>25</b> |
| <b>2 OBJETIVOS</b> .....   | <b>27</b> |
| 2.1 OBJETIVO GERAL.....  | 27        |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....  | 27        |
| <b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....  | <b>28</b> |
| 3.1 ÁREA DE ESTUDO E CONTEXTO GEOLÓGICO.....                             | 28        |
| 3.2 MATERIAL .....   | 30        |
| 3.3 MÉTODOS.....   | 32        |
| <b>3.3.1 Preparação e triagem do material</b> .....                      | <b>32</b> |
| <b>3.3.2 Lâminas delgadas</b> .....                                      | <b>33</b> |
| <b>3.3.3 Fluorescência de raios-X</b> .....                              | <b>36</b> |
| <b>3.3.4 Difratomia de raios-X</b> .....                                 | <b>38</b> |
| <b>4 RESULTADOS</b> .....  | <b>40</b> |
| 4.1 ANÁLISE DE LÂMINAS DELGADAS .....                                    | 40        |
| <b>4.1.1 Espécime 301-V-UERN</b> .....                                   | <b>41</b> |
| <b>4.1.2 Espécime 309-V-UERN</b> .....                                   | <b>43</b> |
| <b>4.1.3 Espécime 310-V-UERN</b> .....                                   | <b>43</b> |
| <b>4.1.4 Espécime 314-V-UERN</b> .....                                   | <b>44</b> |
| <b>4.1.5 Espécime 315-V-UERN</b> .....                                   | <b>47</b> |
| <b>4.1.6 Espécime 318-V-UERN</b> .....                                   | <b>47</b> |
| <b>4.1.7 Espécime 319-V-UERN</b> .....                                   | <b>48</b> |
| <b>4.1.8 Espécime 324-V-UERN</b> .....                                   | <b>49</b> |
| 4.2 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X .....                                       | 50        |
| <b>4.2.1 Análise de Componentes Principais - PCA</b> .....               | <b>55</b> |
| <b>4.2.2 Elementos Terras Raras (ETR)</b> .....                          | <b>57</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.3 DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X.....                                   | 58        |
| 4.4 OUTRAS FEIÇÕES TAFONÔMICAS .....                                | 59        |
| <b>4.4.1 Marcas de raízes e algas.....</b>                          | <b>59</b> |
| <b>4.4.2 Branqueamento por exposição solar.....</b>                 | <b>60</b> |
| <b>5 DISCUSSÃO .....</b>  | <b>61</b> |
| 5.1 PROCESSOS FOSSILDIAGENÉTICOS .....                              | 61        |
| 5.2 HISTÓRIA FOSSILDIAGENÉTICA DO DEPÓSITO DO TANQUE DE TAPEROÁ ... | 66        |
| 5.2 PERSPECTIVAS FUTURAS .....                                      | 67        |
| <b>6 CONCLUSÕES.....</b>  | <b>68</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>  | <b>69</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 TANQUES FOSSILÍFEROS

No Brasil, depósitos fossilíferos do Quaternário caracterizam-se por conter restos de uma fauna de vertebrados bem conhecida e diversificada, como répteis, aves, anfíbios (ARAÚJO-JÚNIOR; MOURA, 2014) e mamíferos, sendo esses últimos os mais abundantes (ARAÚJO-JÚNIOR; PORPINO; BERGQVIST, 2013) e incluindo, principalmente, representantes da extinta megafauna pleistocênica (BERGQVIST, 1989).

No nordeste do Brasil, tanques naturais são as feições geomorfológicas mais comuns para encontrar fósseis. Se formam pela erosão e intemperismo físico-químico produzido ao longo de fraturas em afloramentos de rochas cristalinas que sazonalmente acumulam água da chuva, produzindo pequenos reservatórios de água (SANTOS-JÚNIOR; PORPINO; SILVA, 2008; XIMENES, 2009; ARAÚJO-JÚNIOR; PORPINO; BERGQVIST, 2013; 2015). A origem dos depósitos do interior dos tanques é bastante discutida, mas destacam-se os eventos de preenchimento por sedimentos e restos de vertebrados, além do intemperismo da própria rocha matriz e ação eólica durante as estações secas, mas principalmente por ações hidráulicas repentinas que começaram durante o Pleistoceno Final (ARAÚJO-JÚNIOR; PORPINO; BERGQVIST, 2013, 2015, 2017; ARAÚJO-JÚNIOR et al., 2017).

Waldherr e colaboradores (2017) destacam a origem das formas dos tanques naturais que pode ser analisada em dois grupos: tanque monofásico e polifásico. O primeiro se desenvolve através do contato direto com a água estagnada sobre a rocha cristalina que possui uma depressão preexistente e se desenvolve através de fraturas ou distribuição de xenólitos retrabalhados e intemperismo físico, químico e/ou biológico; e o segundo, desenvolve-se através de um ambiente subedáfico e apresenta duas etapas para sua formação: em subsuperfície, que sofre corrosão devido a água de percolação, e quando há exposição subaérea, onde continua o desenvolvimento ao longo do tempo ao receber água pluvial (MAYOR-RODRIGUEZ, 2011; WALDHERR; ARAÚJO-JÚNIOR; RODRIGUES, 2017)

Ximenes (2009) ressalta a importância do estudo de tanques fossilíferos em virtude do conhecimento referente à diversidade fossilífera, da geomorfologia devido às formas de relevo peculiares, e a importância para o estudo paleoambiental por se caracterizarem como paleorrefúgios ecológicos.

### 1.1.1 Breve histórico de pesquisas em tanques fossilíferos.

Os primeiros relatos sobre tanques fossilíferos no Nordeste remontam à primeira metade do século XVIII, quando escavações em depósitos de tanque, para acumulação de águas pluviais, resultaram na descoberta de ossadas no Ceará (FERNANDES; XIMENES; ANTUNES, 2013). No século XIX, as primeiras descobertas de fósseis de mamíferos em tanques ocorreram no estado de Sergipe, sendo identificados como restos pertencentes a proboscídeos (DANTAS; ZUCON; RIBEIRO, 2005).

Em geral, no século XIX, as notícias de achados fossilíferos no Brasil eram esporádicas e limitavam-se apenas a notificar o achado ou quando as descobertas ocorriam acidentalmente durante escavações para aumentar a capacidade de armazenamento dos tanques (DANTAS, 2008; CASSAB, 2010; FERNANDES; XIMENES; ANTUNES, 2013; SCHERER et al., 2017).

Na primeira metade do século XX, as pesquisas ainda eram raras, com achados bastante pontuais. De um modo geral, entre as pesquisas do século passado destacam-se os estudos realizados por Carlos de Paula Couto. Entre as décadas de 1950 e 1980, esse pesquisador realizou os principais registros da ocorrência de fósseis da megafauna pleistocênica em tanques do Nordeste (PAULA-COUTO, 1953; SIMPSON; PAULA COUTO, 1957; BERGQVIST, 1989; DANTAS; ZUCON; RIBEIRO, 2005).

No final do século XX, tendo como base os espécimes coletados por Paula-Couto, foram realizadas pesquisas sobre acumulações fossilíferas em tanques do Nordeste brasileiro, como o trabalho de Magalhães e colaboradores (1991), o qual descreve e identifica taxonomicamente os espécimes de cervídeos fósseis no nordeste brasileiro, incluindo achados em tanques. Destacam-se também os trabalhos realizados por Bergqvist (1989, 1993), que apresentou a listagem de depósitos fossilíferos e espécies da megafauna pleistocênica encontrados no estado da Paraíba, destacando a necessidade de mais estudos paleontológicos na região. Por fim, Bergqvist et al. (1997) apresentam um estudo mais detalhado em contexto geológico, bioestratigráfico e paleoambiental de acumulações fossilíferas dos estados da Paraíba e Ceará.

No início do século XXI, observa-se um maior número de estudos envolvendo novas escavações, com uma preocupação tafonômica envolvendo o estudo bioestratigráfico e com controle estratigráfico (SANTOS et al., 2002; XIMENES, 2008; PORPINO; SANTOS-JÚNIOR; SANTOS, 2009), o que permitiu um detalhamento do conhecimento a respeito dos

vertebrados quaternários, da origem dos depósitos de tanque e implicações paleambientais para a Região Intertropical Brasileira (e.g. DANTAS et al., 2011; ARAÚJO-JÚNIOR, 2012, 2015; ARAÚJO-JÚNIOR et al., 2013; 2017; ARAÚJO-JÚNIOR; PORPINO; BERGQVIST, 2013; ARAÚJO-JÚNIOR; MOURA, 2014;). Porém, embora seja muito importante para o refinamento do conhecimento sobre padrões da história tafonômica das acumulações fossilíferas, a investigação de dados fossildiagnéticos e geoquímicos em tanques fossilíferos ainda é escassa (ARAÚJO-JÚNIOR, 2012).

## 1.2 TAFONOMIA

A tafonomia é o estudo dos processos de fossilização e como estes afetam as informações do registro fossilífero (BEHRENSMEYER; KIDWELL, 1985). Tem como objetivo compreender a fossilização desde a morte dos organismos até sua preservação, permitindo conhecer os processos atuantes na história de preservação dos restos esqueléticos (HOLZ; SIMÕES, 2002; PORPINO; SANTOS, 2002).

Em um contexto interdisciplinar, a pesquisa tafonômica utiliza conhecimentos de diversas áreas (Geologia, Biologia, Ecologia, Física e Química), em um contexto temporal e geográfico, para fornecer informações úteis para o conhecimento da diversidade dos organismos do passado, processos de fossilização e para reconstruções paleoambientais e paleoecológicas.

A tafonomia compreende duas grandes divisões de estudo: a bioestratinomia, que envolve a história dos restos antes do soterramento final (incluindo as causas da morte, necrólise, desarticulação, necrofagia, intemperismo, pisoteio, abrasão, transporte e soterramento dos organismos); e a diagênese dos fósseis (ou fossildiagênese), que abarca os processos físicos e químicos que alteram os restos esqueléticos após a deposição e soterramento final (Fig. 1; BEHRENSMEYER, 1978; BEHRENSMEYER; KIDWELL, 1985; HOLZ; SIMÕES, 2002; MEDEIROS, 2010)

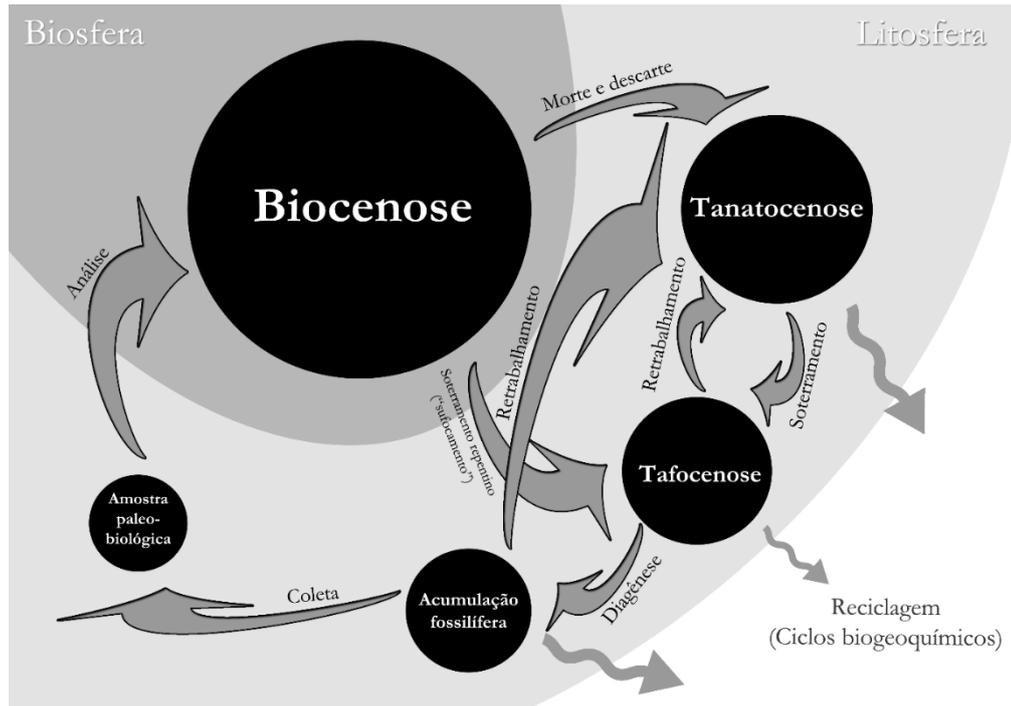


Figura 1: Principais vias tafonômicas que levam a transformação de restos orgânicos em fósseis (retirado de ARAÚJO-JÚNIOR; BISSARO-JÚNIOR, 2017).

Os processos que atuam nos restos orgânicos até sua preservação e posteriormente descoberta, são como filtros de informações paleontológicas (Fig. 1). Além disso, a fossilização dos organismos está fortemente ligada às condições ambientais (aquáticas ou terrestres) nas quais estavam inseridos (BEHRENSMEYER; KIDWELL, 1985; HOLZ; SIMÕES, 2002); desta forma, os processos tafonômicos se estendem muito além das “leis” que governam a transição da “biosfera para a litosfera”, como anteriormente proposto por Efremov (1940).

Estudos bioestratinômicos e fossildiagnéticos são complementares e necessários para uma reconstrução e interpretação mais completa dos processos de preservação e paleoambientes, paleoclima e outros fatores que influenciam na história preservacional dos fósseis (CASAL et al., 2017).

Em particular, análises fossildiagnéticas são fundamentais para identificar os possíveis processos de fossilização e de formação dos minerais (ARAÚJO-JÚNIOR et al., 2011; PREVITERA, 2017), pois as transformações físico-químicas atuantes sobre as camadas sedimentares afetam os restos orgânicos e determinam o tipo de preservação que os materiais esqueléticos sofrem (HOLZ; SIMÕES, 2002).

Assim, o conhecimento sobre o tipo de fossilização e os aspectos físico-químicos dos fósseis, oriundo das análises fossildiagnéticas e geoquímicas fornece evidências sobre as condições ambientais onde a paleobiota estava inserida (e.g. SILVA, 2001; ARAÚJO-JÚNIOR

et al., 2011; SOUSA-FILHO, 2011; DAUPHIN et al., 2012). Em depósitos fossilíferos brasileiros, os principais processos de fossilização são a permineralização, a substituição, a incrustação e as fraturas e deformações (ARAÚJO-JÚNIOR, 2012).

A permineralização é um processo fossilizante que consiste no preenchimento gradativo dos poros, canais e cavidades dos ossos por substâncias minerais que os percolam através da água, muitas vezes permitindo que a estrutura original do osso seja preservada sem alterações (CASSAB, 2010). Pode ser identificada através da observação macroscópica do preenchimento dos poros por minerais (ALVES et al., 2007) ou através de lâminas delgadas para obter um resultado mais refinado, por meio do reconhecimento dos minerais e do grau de permineralização na microestrutura óssea (CASAL, 2017; PREVITERA, 2017). Os minerais mais comuns que preenchem os espaços vazios dos ossos comuns são calcita, apatita, pirita, argilominerais, quartzo e óxidos. A permineralização reduz a porosidade do osso e, portanto, reduzirá o potencial para uma posterior interação entre o tecido ósseo e a água. Isso pode dificultar a preparação para a análise dos oligoelementos (TRUEMAN; TUROSS, 2002).

A substituição é definida por Cassab (2010) como a modificação gradual da composição química original dos ossos, sendo substituídos por outro mineral, provocando assim a preservação das formas da microestrutura óssea. Diversos métodos podem ser empregados para observar o processo de substituição em fósseis, como análises geoquímicas que permitem identificar a composição mineral (ALVES et al., 2007; PREVITERA, 2017). Alves e colaboradores (2007), por exemplo, definiram apenas com a observação macroscópica das diferenças de colorações no interior dos fósseis a presença de substituição, no entanto, essa análise não permite a identificação dos tipos de substâncias e minerais que substituíram a composição mineral original do osso. Além disso, como observado por Araújo-Júnior et al. (2013b), diferenças na coloração dos espécimes não têm relação com a presença de substituição.

O componente inorgânico (mineral) do tecido ósseo é o fosfato de cálcio  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$  (bioapatita, hidroxiapatita) configurado em uma matriz de colágeno (TOLEDO; PEREIRA, 2001). O cálcio (Ca) do tecido ósseo, uma vez exposto aos processos diagenéticos, pode ser substituído por traços de metais (e.g. Sc, Y, Mg, Mn, Al, Fe, Zn, Na, Ag, Sr, Pb, Ba, Sn, Cd, Sc, Y,) assim como pelos Elementos Terras Raras (TRUEMAN, 1999; TOLEDO; PEREIRA, 2001;). Por outro lado, os tecidos que compõem os dentes são considerados mais resistentes à ação diagenética devido à baixa quantidade de matéria orgânica e ao alto grau de cristalinidade (ZAZZO et al., 2004), porém, Kohn (2008) explica que a dentina se comporta de

modo semelhante ao osso durante a fossilização, diferente do esmalte que apresenta mais dificuldade de sofrerem alteração.

Quanto à incrustação, refere-se à precipitação de substâncias que formam uma crosta protetora sobre a superfície de restos orgânicos que os preservam sem alteração da estrutura e composição química (HOLZ; SIMÕES, 2002; MEDEIROS, 2010). Maldonado et al. (2016) classificam as incrustações de acordo com o grau de impregnação: estágio 0, que indica superfície óssea não coberta por concreções; estágio 1, onde até 50% da superfície óssea está coberta por concreções; e estágio 2, onde mais de 50% da superfície óssea está coberta por concreções.

As fraturas e deformações são alterações físicas que podem ocorrer devido ao peso do sedimento sobre os elementos ósseos (MEDEIROS, 2010), como também, na observação microscópica, podem ser associadas ao crescimento de minerais que distorcem as microestruturas do osso (PREVITERA, 2017).

Trabalhos com análises da etapa fossildiagnética são menos frequentes e mais complexos, porém, nos últimos anos, vêm sendo desenvolvidos com maior frequência, mostrando a importância de abordar tais análises com a finalidade de reconstruir a história preservacional dos fósseis (e. g. CASAL et al., 2017; PREVITERA, 2017; RIBEIRO, 2010, 2014). Os animais vivem em condições ambientais específicas e seus tecidos podem registrar provas químicas dessas condições (CASAL, 2017; TRUEMAN, 2013). Para isso, é requerido o entendimento da bioquímica do animal vivo, da natureza da composição química dos ossos e sua interação com o ambiente de soterramento, além do comportamento das interações químicas a longo prazo. Afinal, à medida que os elementos são incorporados no osso tanto pela dieta, quanto pelo consumo de água pelo animal vivo, as variações nos elementos ambientais também são passadas para o osso e podem servir como indicadores naturais (e.g. habitat geográfico de um animal ou monitoramento da exposição de um determinado elemento). Desta forma a Geoquímica se torna uma ferramenta importante para a Tafonomia, Paleobiologia e Paleoecologia (TRUEMAN; TUROSS, 2002; TRUEMAN, 2013).

Análises geoquímicas que permitem determinar a composição biomineral do fóssil podem ser aplicadas em assembleias fósseis para verificar se uma localidade fossilífera contém ossos derivados de mais de um ambiente de fossilização, assim como identificar a origem geográfica e estratigráfica dos ossos retrabalhados dentro de uma mesma assembleia (TRUEMAN, 2007, 2013).

Trueman (1999, 2007) sugere um modelo de preservação óssea de acordo com o qual, em condições normais, a destruição do osso ocorre quando o colágeno é hidrolisado e os cristais dos minerais ósseos reativos com o ambiente são expostos, culminando na destruição do material. Com condições de soterramento favoráveis à fossilização, as concentrações de fosfato se acumulam no ambiente onde estão localizados os elementos esqueléticos, e os cristais de apatita óssea "recristalizam" de modo quimicamente estável, preenchendo os espaços deixados pelo colágeno, podendo assim, ocorrer a preservação dos ossos. Os ossos que recristalizam em diferentes configurações de deposição podem herdar diferentes composições de elementos. A variação no tamanho do cristal ocorre em diferentes regiões do mesmo osso, entre diferentes ossos no mesmo animal e entre espécies.

Desta forma, Trueman (1999) explica que pode haver variáveis que afetam o conteúdo dos elementos dos ossos fósseis. Os controles que afetam a composição final de qualquer osso exposto podem ser expressos como:

$$[X_i (\text{osso final}) = f (X_i (\text{osso inicial}), X_i (\text{água intersticial}), D_i, K, H, M, T)]$$

“Onde  $X_i$  = concentração de oligoelemento (i) no sistema X, D = coeficiente de partição fluido-apatita, K= química do microambiente de soterramento, H = hidrologia do microambiente de enterramento, M = microestrutura óssea, e T = tempo de exposição.” (traduzido de TRUEMAN, 1999, p. 557).

O grau elevado da estabilidade dos biominerais pode ser aumentado através de dissolução preferencial das fases mais instáveis, recristalização de fases instáveis e/ou crescimento de novas fases (KOHN, 2008; TRUEMAN, 2013). De um modo geral, reflete a degradação da matéria orgânica posteriormente à precipitação e absorção de oligoelementos. Desse modo, a relativa facilidade com a qual o osso pode ser alterado pode fornecer uma impressão geoquímica do ambiente de soterramento. Isso pode ser útil para a reconstrução de condições ambientais (KOHN, 2008; TRUEMAN, 2013).

No entanto, se fechados os poros entre os cristais da apatita durante a diagênese, as superfícies dos cristais serão protegidas contra trocas, e os elementos adsorvidos serão estabilizados dentro do osso (TRUEMAN; TUROSS, 2002). Desta forma, os oligoelementos presentes podem refletir os estágios diagenéticos.

Os processos de substituição e adsorção provavelmente constituem os mais importantes mecanismos para a incorporação de elementos no osso durante a fossildiagênese

(TRUEMAN, 1999). A presença dos Elementos Terras Raras (ETR) em fósseis reflete a associação com a água de percolação durante o período de recristalização, provavelmente devido ao fosfato ósseo possuir uma forte afinidade com os ETR (SUAREZ et al., 2010). Eles são um grupo de óxidos que consistem nos elementos da série dos lantanídeos na tabela periódica dos elementos La ( $Z = 57$ ) ao Lu ( $Z = 71$ ; BRANCO, 2014). Embora sejam denominados de “Elementos Terras Raras”, são muito comuns na crosta terrestre (TRUEMAN, 1999, 2007). Aparentemente, em ambientes terrestres, a concentração final dos ETR nos fósseis pode ser do ambiente inicial de soterramento, por serem um dos primeiros elementos a se incorporarem nos ossos (TRUEMAN, 1999; TRUEMAN et al., 2006, 2011).

### **1.2.1 Estudos fossildiagnéticos em depósitos de tanque**

Estudos com enfoque em fossildiagnese de fósseis oriundos de depósitos de tanque ainda são escassos e sucintos, em contraste com as análises bioestratinômicas (ARAÚJO-JÚNIOR et al., 2017).

Silva (2001) realizou um trabalho sobre fossildiagnese com a aplicação de métodos como a classificação de cores dos fósseis (branco, preto, creme e amarelo); a confecção de lâminas delgadas, que indicou um bom grau de preservação da microestrutura óssea; o uso da difração de raios-X, a qual mostrou a predominância da apatita óssea. O autor concluiu que a diagnese inicial se deu por adipocera, que desencadeou cinco fases de transformação óssea: 1) sulfetação; 2) carbonização; 3) compactação; 4) fosfatização e 5) calcificação.

Alves et al. (2007) fizeram estudos bioestratinômicos e fossildiagnéticos em fósseis pleistocênicos de um tanque localizado em Brejo da Madre de Deus, no estado de Pernambuco. Através de análises de difração de raios-X, concluíram que, mesmo com a presença de substituição e permineralização por diferentes minerais, que podem ter provocado a presença de diferentes colorações, o material ainda conserva a composição original do osso (hidroxiapatita). Porém, não houve o uso em conjunto de lâminas delgadas, o que permitiria uma melhor determinação dos tipos específicos de minerais que preencheram e substituíram os espécimes.

No tanque natural de Alagoinha, também em Pernambuco, os fósseis apresentaram a coloração preta, baseado apenas em características macroscópicas. Desta forma, atribuíram ao depósito eventos onde houve um único episódio de impregnação de minerais opacos, como o Ferro (Fe), uma vez que as cores podem ser usadas para inferir a ocorrência de retrabalhamento

e impregnações de minerais durante a fossilização (ARAÚJO-JÚNIOR; PORPINO; BERGQVIST, 2013). Os autores concluíram que, segundo a característica da ausência de retrabalhamento significativo, a acumulação fossilífera de Alagoinha possui pouco tendenciamento tafonômico. Porém também não foram realizadas análises de lâminas delgadas para um esclarecimento quanto aos minerais que preenchem ou substituem as microestruturas ósseas.

No tanque natural de Jirau, Ceará, para a análise fossilização, foram produzidas lâminas delgadas para cada padrão de cor encontrado (branco, branco e preto, bege, vermelho e azul) buscando o diagnóstico do grau de preservação da microestrutura óssea e processos de fossilização (ARAÚJO-JÚNIOR et al., 2013b). Os autores observaram que: 1) os fósseis com coloração branca são parcialmente preenchidos por carbonato de ferro e, em menor quantidade, por mineral opaco e parcialmente substituído por calcita ( $\text{CaCO}_3$ ); 2) os ossos preto e branco são ligeiramente permineralizados por carbonato de ferro e mineral opaco; 3) os fósseis beges são totalmente substituídos por calcita e permineralizados por um mineral opaco e carbonato de ferro; 4) os ossos vermelhos são completamente permineralizados por carbonato de ferro minerais opacos e ligeiros sinais de substituição por calcita; e 5) os ossos azuis são preenchidos com calcita e mineral opaco e sem substituição. Desta forma, constataram a predominância de permineralização e que as diferenças mineralógicas e de padrões de cores indicam a ocorrência de mistura temporal (*time-averaging*; ARAÚJO-JÚNIOR et al., 2013b). Este estudo mostra a importância do uso de lâminas delgadas para uma interpretação mais detalhada quanto aos processos de fossilização.

Araújo-Júnior, Porpino e Bergqvist (2015), ao estudarem a tafocenose do depósito de tanque de Curimatãs, em Pocinhos, estado da Paraíba, realizaram (além de estudos bioestratinômicos) uma sucinta análise fossilização através da classificação de cores dos bioclastos: maior quantidade de marrom, seguindo de preto e então branco. Os autores sugerem que as cores podem ser provenientes da impregnação de minerais, como o óxido de ferro nos fósseis de cores marrom e óxido de manganês nos fósseis de coloração preta, em clima úmido após o soterramento final.

É possível perceber que para uma análise fossilização detalhada é preciso o uso em conjunto de diversos métodos. Além do uso de classificação macroscópica da coloração dos fósseis, no presente trabalho, métodos geoquímicos foram empregados de forma pioneira para bioclastos provenientes de tanques naturais (ver item 3.3), bem como a observação da presença dos Elementos Terras Raras para interpretações paleoambientais.

### 1.2.2 Tanque fossilífero em Taperoá

O referido tanque em Taperoá é conhecido desde o ano de 1962, quando os paleontólogos Carlos de Paula Couto e Antônio Ramos realizaram expedições com trabalhos de campo e coletas no estado da Paraíba. Esses pesquisadores escavaram depósitos fossilíferos em diferentes municípios do estado, ocasião em que foram coletados cerca de 200 espécimes, sendo 87 oriundos do município de Taperoá. Atualmente esses fósseis fazem parte do acervo da coleção de Paleovertebrados do Museu Nacional da Universidade Federal do Rio de Janeiro (MN/UFRJ), Rio de Janeiro, Brasil (PAULA-COUTO, 1962; BERGQVIST, 1989, 1993; BERGQVIST et al., 1997; ARAÚJO-JÚNIOR, 2015). Segundo Bergqvist (1993), era a localidade paleontológica que continha as informações mais precisas quanto à localização, aspectos sedimentológicos e estratigráficos, além de ossos completos em bom estado de preservação, embora seja o único que não foi completamente escavado pela equipe do MN entre os demais tanques pesquisados na Paraíba.

Os estudos sobre a acumulação fossilífera de Taperoá até agora realizados estão focados apenas em questões taxonômicas (e.g. BERGQVIST, 1993; BERGQVIST et al., 1997; PORPINO; BERGQVIST, 2002; PORPINO et al., 2014; ARAÚJO-JÚNIOR et al., 2017) e bioestratinômicas (BERGQVIST et al., 1997; ARAÚJO-JÚNIOR et al., 2011; ARAÚJO-JÚNIOR; PORPINO; BERGQVIST, 2017). Estudos fossildiagnéticos detalhados e geoquímicos não foram realizados e poderão ser úteis para a avaliação paleoambiental da região de Taperoá e para entender os processos de fossilização atuantes no depósito de tanque do referido município.

A respeito dos aspectos bioestratinômicos, já foram realizadas diversas análises por Paula-Couto (1980); Bergqvist et al. (1997), posteriormente, por Araújo-Júnior (2012, 2015) e Araújo-Júnior e colaboradores (2011, 2017). Os animais do depósito podem ter morrido *in situ*, por queda ou atolamento, o que explicaria a presença de uma grande quantidade de volume de ossos e esqueletos completos, adicionalmente a forma do tanque que não permite o escoamento dos fósseis (Figs. 2, 4 e 5 A e B; PAULA-COUTO, 1980). Contudo, a presença de abrasão, a relação entre o número mínimo de indivíduos (MNI) encontrados e o número de fragmentos cranianos, a ausência de esqueletos completos, em conjunto com aspectos sedimentológicos, incluindo presença de feldspato inalterados e grãos subangulosos, indicam uma origem da camada fossilífera a partir de área-fonte próxima, sendo a maioria dos restos levada para o

interior do tanque por eventos distintos de alta energia, como enxurradas ocasionais provocadas por chuvas torrenciais (BERGQVIST et al.,1997).

Em um estudo mais recente, foi atualizada a lista da ocorrência dos diversos grupos de animais encontrados no interior do tanque, entre os quais se incluem: *Eremotherium laurillardii* (Pilosa, Megatheriidae), *Glossotherium* sp. (Pilosa, Mylodontidae), *Panochthus* sp. (Cingulata, Glyptodontidae), *Notiomastodon platensis* (Proboscidea, Gomphotheriidae), *Toxodon platensis* (Notoungulata, Toxodontidae), *Xenorhinotherium bahiense* (Litopterna, Macrauchiidae), *Palaeolama major* (Artiodactyla, Camelidae), *Equus (Amerhippus) neogaeus* (Perissodactyla, Equidae), *Hippidion principale* (Perissodactyla, Equidae) e Felinae indet. (Carnivora, Felidae). Sendo que destes, a maioria do material é composto por *Panochthus* sp. (ARAÚJO-JÚNIOR, 2015; et al., 2017).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Compreender os processos de fossilização dos vertebrados fósseis de depósito de tanque na Fazenda Pau Leite em Taperoá, Estado da Paraíba, como ferramenta para explicar a origem de padrões e diferenças diagenéticas no depósito de tanque e inferir aspectos paleoambientais da região de Taperoá no contexto do Quaternário do nordeste brasileiro.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Descrever e interpretar feições fossildiagenéticas através de métodos geoquímicos em elementos esqueléticos de vertebrados quaternários oriundos do depósito de um tanque na cidade de Taperoá/PB;
- Comparar os resultados obtidos com os de outras acumulações fossilíferas de depósitos de tanque;

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO E CONTEXTO GEOLÓGICO

O sítio paleontológico em Taperoá está localizado na Fazenda Pau Leite (anteriormente denominada Fazenda Campo Alegre), situada a 16 km a sudeste da cidade de Taperoá, estado da Paraíba (Fig.2; ARAÚJO-JÚNIOR, 2015, ARAÚJO-JÚNIOR et al., 2017; ARAÚJO-JÚNIOR; PORPINO; BERGQVIST, 2017), entre as coordenadas  $7^{\circ}15'18.55''\text{S}$  e  $36^{\circ}44'26.35''\text{O}$  e situa-se a 500 m acima do nível do mar (ARAÚJO-JÚNIOR et al., 2017; BERGQVIST et al., 1997). O tanque fossilífero da Fazenda Pau Leite (TFPL), também é localmente chamado de lagoa das cabras.

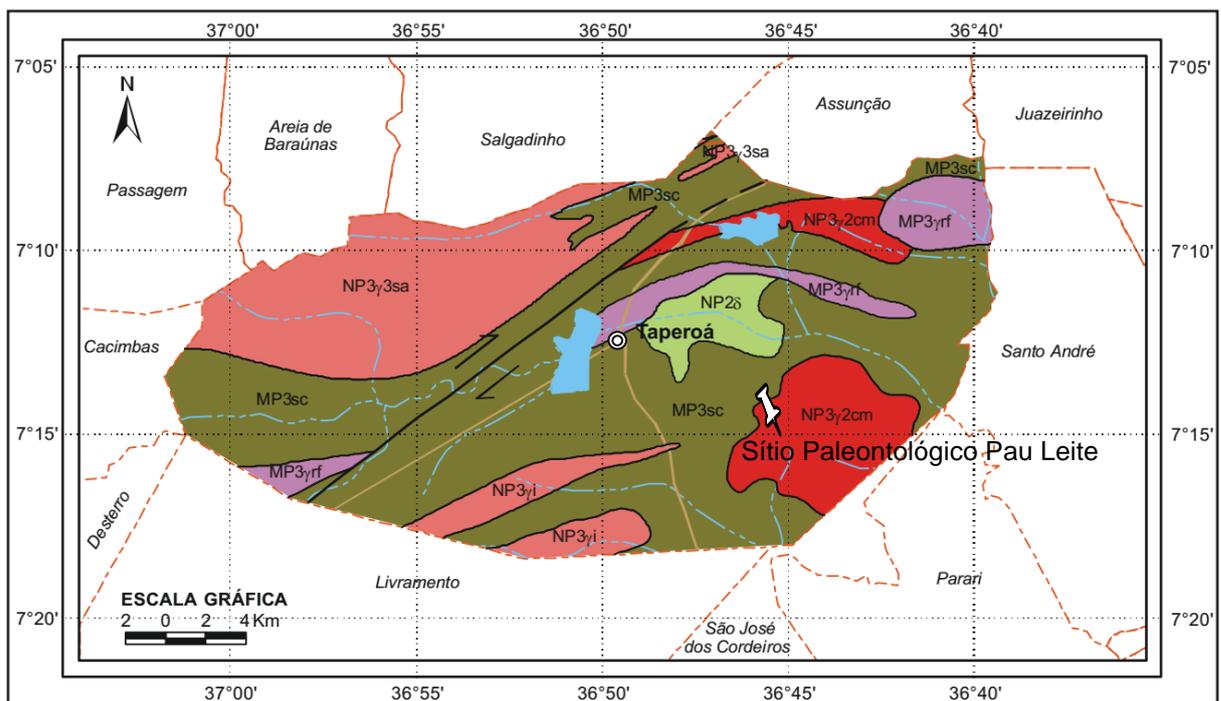


Figura 2: Mapa e visão panorâmica do Sítio Paleontológico Pau Leite, Taperoá, Estado da Paraíba. (Retirado de ARAÚJO-JÚNIOR et al., 2017).

O município de Taperoá está inserido na unidade geoambiental do Planalto da Borborema e Mesorregião da Borborema. A localidade é formada por maciços e altas montanhas, com altitude que variam entre 650 a 1.000 metros, ocupando uma área de arco que percorre o sul de Alagoas até o Rio Grande do Norte. A área é recortada por rios perenes, mas

de pouca vazão. A vegetação é formada por Florestas Subcaducifólica e Caducifólica, tipo caatinga. O clima corresponde ao Tropical Chuvoso, porém com verão seco (CPRM, 2005).

A unidade litoestratigráfica da região onde o tanque de Taperoá está inserido corresponde à Suíte Itaporanga, de litologia granítica calcialcalina de médio a alto potássio (Fig. 3). Esta unidade é caracterizada majoritariamente por granitos e granodioritos grossos a porfíricos associados a dioritos, de idade neoproterozoica (CPRM, 2002, 2005).



Legenda:

#### UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS

##### Neoproterozoico

- NP3<sub>γ</sub>i Granitóides de Quimismo Indiscriminado (i): granitóides diversos.
- NP3<sub>γ</sub>3sa Suíte Transicional Shoshonítica Alcalina Teixeira/Serra Branca (sa): leucogranito e biotita hornblenda sienito.
- NP3<sub>γ</sub>2cm Suíte Calcialcalina de Médio a Alto K Itaporanga: granito e granodiorito porfírico associado a diorito.
- NP2<sub>δ</sub> Suíte Máfica: gabro, diorito e tonalito.

##### Mesoproterozoico

- MP3<sub>γ</sub>rf Granitóides de Quimismo Indiscriminado (i): granitóides diversos.
- MP3<sub>sc</sub> Suíte Granítica-migmatítica Peraluminosa Recanto/Riacho do Forno: ortognaisse e migmatito granodiorítico a monzogranítico.

#### CONVENÇÕES GEOLÓGICAS

- Contato geológico
- Falha ou Fratura, Tracejada Quando Encoberta
- Falha ou Zona de Cisalhamento Transcorrente Dextral

#### CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

- Sede Municipal
- Limite municipal
- Estrada pavimentada
- Estrada não pavimentada
- Estrada de Ferro
- Rio ou Riacho
- Açude

Figura 3: Mapa geológico do Município de Taperoá (modificado de CPRM, 2005).

Segundo Bergqvist et al. (1997), o depósito do tanque da Fazenda Pau Leite (TFPL) era formado por duas camadas de sedimentos distintas (Fig. 4): (a) camada inferior, que consiste

na camada fossilífera, com 1 m de espessura em contato com a rocha matriz e composta por quartzarenito grosso à conglomerático com matriz lamosa, rica em feldspato, mica (biotita e muscovita) e fragmentos de rocha das paredes do tanque (granito e gnaiss), com os grãos de quartzo variando de subangulosos a subarredondados; e (b) camada superior, com 3 m de espessura, afossilífera, porém com a presença de cerâmica indígena e sedimento composto por argila orgânica escura.

O tanque possui formato irregular e extensões de 48 m de comprimento x 4 m de profundidade x 10 m de largura, inserido em rocha cristalina (Fig. 4; BERGQVIST, 1989, et al., 1997), com o formato de fundo similar ao tipo côncavo (WALDHERR, ARAÚJO-JÚNIOR; RODRIGUES, 2017)

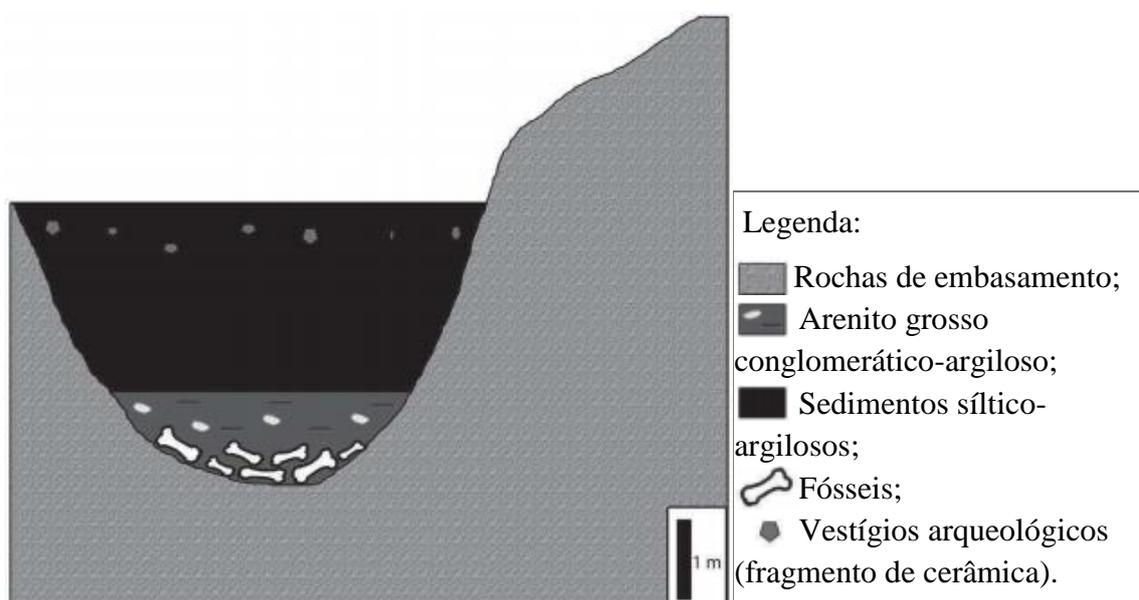


Figura 4: Corte esquemático do TFPL (modificado de ARAÚJO-JÚNIOR, 2015).

### 3.2 MATERIAL

Os espécimes estudados correspondem a fragmentos de fósseis pertencentes a mamíferos quaternários de grande e médio porte encontrados no sítio paleontológico TFPL. Os fragmentos coletados são provenientes de uma faixa de sedimentos - ou “balde” como conhecido pelos moradores locais - com aproximadamente três metros de largura, localizada no entorno do tanque fossilífero. Os sedimentos foram previamente retirados de seu interior para o aumento da capacidade de armazenamento de água (Fig. 5) há mais de trinta anos, segundo morador local. É possível que tal faixa de sedimento também seja proveniente do descarte da escavação do tanque feita pela equipe de Paula Couto (ver item 1.2.2).

Foram abertas duas trincheiras com aproximadamente 30 cm de largura por 50 cm de altura. Os fósseis foram coletados tanto no interior das trincheiras quanto ao longo da superfície da faixa de sedimentos.



Figura 5: Fotos do trabalho de coleta do material fóssil do tanque de Taperoá-PB. A e B: fotos panorâmicas do tanque de Taperoá. C: foto panorâmica da faixa de sedimentos retirados do interior do tanque no qual foram feitas as trincheiras; D: Fragmento fóssil encontrado no interior da trincheira; E: fragmentos fósseis retirados da faixa de sedimentos; F: foto do trabalho realizado em uma das trincheiras (da esquerda para a direita: Juliana C. S. Carvalho, Profa. Dra. Lílian P. Bergqvist e José Marcos - ajudante na abertura da trincheira).

O material fóssil coletado encontra-se depositado no Laboratório de Paleontologia da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (PALEOLAB - UERN). São 1.116 fragmentos com variação de comprimento entre 2 cm e 24 cm, sendo os espécimes menores que 5 cm os mais abundantes. A maioria dos fragmentos não puderam ser identificados devido ao alto grau de fragmentação, porém foi possível identificar 16 dentes, 26 osteodermos, sendo 25 de Cingulata e 1 de Quelônio – ainda não oficialmente publicado em termos taxonômicos – dois

fragmentos de tubo caudal, um fragmento craniano, uma falange, 5 epífises e 5 corpos vertebrais, dentre eles um corpo vertebral de indivíduo juvenil.

### 3.3 MÉTODOS

#### 3.3.1 Preparação e triagem do material

A preparação do material se deu primeiramente com limpeza para a remoção de sedimentos aderidos, seguida da colagem dos ossos fragmentados com adesivo instantâneo. Após esta etapa, foram efetuadas análises de feições macroscópicas para a identificação de marcas de raízes e algas e a separação do material por categorias segundo as cores, para realização das lâminas petrográficas, Fluorescência e Difração de raios-X. A catalogação e identificação dos espécimes foi feita através de comparações com a literatura especializada.

Em virtude de uma grande variedade de cores e tonalidades nos fósseis, muitos apresentando diferentes intensidades de tons e cores em uma única peça, os fragmentos fósseis foram classificados de acordo com o padrão de coloração de Munsell Color (2009) como forma de uma classificação mais precisa (Tabelas 1, 2, 3 e 4).

Os espécimes fazem parte da coleção de vertebrados fósseis do Laboratório de Paleontologia (PALEOLAB - UERN) e compreendem a numeração de registro 270-V-UERN ao 300-V-UERN os fragmentos escolhidos para as análises de Fluorescência de raios-X, dentre os quais sete espécimes foram selecionados para a realização da Difractometria de raios-X (270-V-UERN, 273-V-UERN, 274-V-UERN, 275-V-UERN, 280-V-UERN, 282-V-UERN e 283-V-UERN). Para a confecção das lâminas delgadas, oito espécimes foram selecionados cuja numeração de registro consiste em: 301-V-UERN, 309-V-UERN, 310-V-UERN, 314-V-UERN, 315-V-UERN, 318-V-UERN, 319-V-UERN e 324-V-UERN.

Considerando que algumas das técnicas empregadas neste trabalho são destrutivas (e.g. Difractometria de raios-X e confecção de lâminas delgadas), optou-se pelo uso de fragmentos que não são passíveis de identificação taxonômica.

As análises de Fluorescência e Difractometria de raios-X foram realizadas no Laboratório de Análises Magnéticas e Ópticas (LAMOp) da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN), enquanto que a confecção das lâminas petrográficas foi realizada no Laboratório Geológico de Processamento de Amostras (LGPA), da Faculdade de Geologia

(FGEL), da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). A análise das lâminas delgadas foi realizada no Laboratório de Paleontologia (LABPALEO) da UERJ.

A Fluorescência de raios-X (FRX) foi realizada em um EDX-7000 (*Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer*), o qual identifica apenas os elementos que estão entre Alumínio (Al) e Urânio (U) na tabela periódica dos elementos; para a realização da Difração de raios-X foi utilizado um difratômetro de raios-X *Rigaku MiniflexII 600* (Fig. 6).



Figura 6: Aparelhos usados para as análises geoquímicas. A: Fluorescência de raios-X (EDX-7000); B: Difração de raios-X (XRD-600).

As análises de Fluorescência e Difractometria de raios-X e a confecção de lâminas delgadas permitiram a identificação dos processos atuantes na preservação dos fósseis, assim como o grau de preservação da estrutura óssea e a composição química e mineral dos fósseis, dados importantes para as interpretações fossildiagnéticas e paleoambientais.

### 3.3.2 Lâminas delgadas

Dez seções delgadas foram confeccionadas a partir dos oito espécimes escolhidos (Fig. 7) de acordo com a separação macroscópica de cor (ver item 3.3.1). A confecção das lâminas se deu através do uso de uma serra diamantada, as quais foram inseridas em resina de poliéster. Posteriormente, as amostras foram secas em estufa e novamente cortadas para serem coladas

em lâminas de vidro e desgastada em carbureto, com granulometrias de 320 e 600, até atingir a espessura ideal para a observação em microscópio petrográfico.

A análise de lâminas delgadas dos fósseis foi realizada através de microscópio petrográfico com equipamento fotográfico acoplado para identificar a mineralogia, padrões diagenéticos e microestruturas do tecido ósseo. Fragmentos fósseis de diferentes colorações foram selecionados para a confecção das lâminas afim de reconhecer processos fossildiagenéticos associados a cada cor (Tabela 1).

TABELA 1: CORES OBSERVADAS NOS ESPÉCIMES SUBMETIDOS A CONFECÇÃO DAS LÂMINAS DELGADAS.

| <b>Nº-V-<br/>UERN</b> | <b>CORES (MUNSELL COLOR, 2009)</b>                                      |
|-----------------------|---|
| 301                   | Preto acastanhado (5YR 2/1);  |
| 309                   | Preto acastanhado (5YR 2/1) e amarelo esverdeado pálido (10Y 8/2);      |
| 310                   | Marrom escuro (5YR 2/2);  |
| 314                   | Marrom escuro avermelhado (10R 3/4) e preto amarronzado (5YR 2/1);      |
| 315                   | Marrom moderado (5YR 3/4);  |
| 318                   | Marrom amarelado moderado (10YR 5/4) e laranja muito pálido (10YR 8/2); |
| 319                   | Marrom amarelado moderado (10YR 5/4) e preto acastanhado (5YR 2/1);     |
| 324                   | Laranja muito pálido (10YR 8/2) e preto acastanhado (5YR 2/1).          |

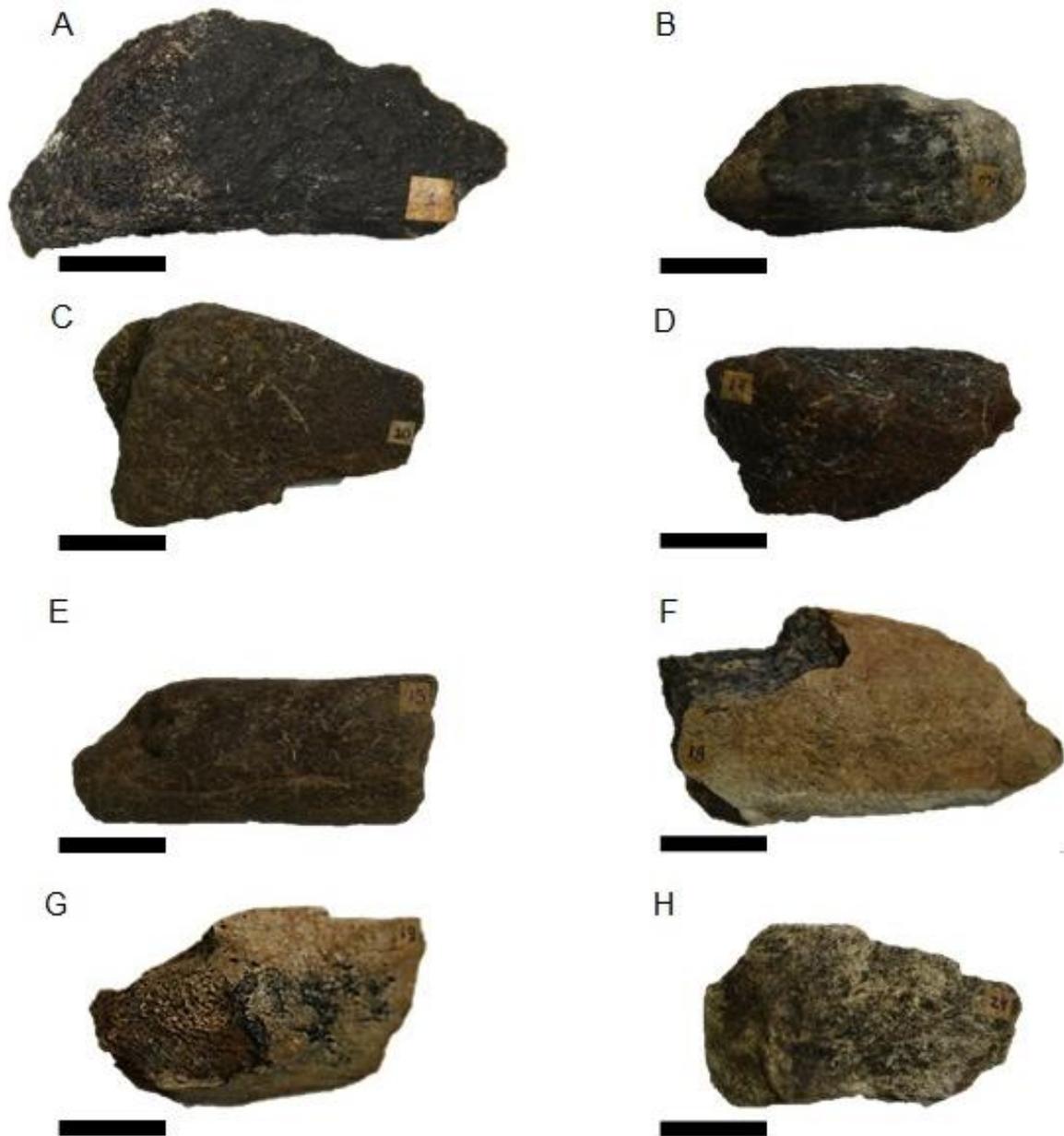


Figura 7: Amostra de fósseis utilizados na confecção das lâminas delgadas. A) espécime 301-V-UERN (cor 5YR 2/1); B) espécime 309-V-UERN (cores 5YR 2/1 e 10Y 8/2); C) espécime 310-V-UERN (cor 5YR 2/2); D) espécime 314-V-UERN (cores 10R 3/4 e 5YR 2/1); E) espécime 315-V-UERN (cor 5YR 3/4); F) espécime 318-V-UERN (cores 10YR 5/4 e 10YR 8/2); G) espécime 319-V-UERN (cores 10YR 5/4 e 5YR 2/1); e H) espécime 324-V-UERN (cores 10YR 8/2 e 5YR 2/1) . Escala = 2 cm.

### 3.3.3 Fluorescência de raios-X

Na superfície de cada fragmento foram selecionadas duas regiões de cores contrastantes para verificar a variação da composição elementar tanto em um mesmo fóssil quanto na amostra como um todo. Foram observadas 28 diferentes tonalidades em 31 espécimes usadas na FRX (Tabela 2).

TABELA 2: VARIAÇÃO DE CORES OBSERVADAS NOS ESPÉCIMES SUBMETIDOS A FRX

| CORES (MUNSELL COLOR, 2009)   | PONTOS DE ANÁLISE |
|---|-------------------|
|  Branco (N9)   | 2                 |
|  Branco (N9) e cinza amarelado (5Y 8/1)                              | 1                 |
|  Branco (N9) e cinza claro médio (N6)                                | 1                 |
|  Cinza amarelado (5Y 7/2)  | 1                 |
|  Cinza amarelado (5Y 8/1)  | 4                 |
|  Cinza claro (N7)  | 1                 |
|  Cinza médio (N5)  | 2                 |
|  Laranja acinzentado (10YR 7/4)                                    | 2                 |
|  Laranja amarelado escuro (10YR 6/6)                               | 1                 |
|  Laranja amarelado pálido (10R 8/6)                                | 1                 |
|  Laranja muito pálido (10YR 8/2)                                   | 7                 |
|  Laranja muito pálido (10YR 8/2) e preto acinzentado (N2)          | 1                 |
|  Marrom amarelado moderado (10YR 5/4)                              | 2                 |
|  Marrom avermelhado escuro (10R 3/4)                               | 1                 |
|  Marrom avermelhado escuro (10R 3/4) e preto acastanhado (5YR 2/1) | 1                 |
|  Marrom avermelhado moderado (10R 4/6)                             | 5                 |
|  Marrom claro (5YR 6/4)  | 1                 |
|  Marrom moderado (5YR 3/4)   | 1                 |
|  Marrom pálido (5YR 5/2)   | 1                 |
|  Preto (N1)  | 5                 |
|  Preto (N1) e cinza muito claro (N8)                               | 1                 |
|  Preto acastanhado (5YR 2/1)                                       | 9                 |
|  Preto acastanhado (5YR 2/1) e laranja amarelado pálido (10YR 8/6) | 1                 |
|  Preto acinzentado (N2)  | 2                 |
|  Preto avermelhado (5R 2/2)  | 1                 |
|  Verde oliva claro (10Y 5/4)                                       | 1                 |
|  Vermelho escuro (5R 3/4)  | 1                 |
|  Vermelho muito escuro (10R 2/2)                                   | 4                 |
| <b>TOTAL</b>  | <b>61</b>         |

Sousa-Filho (2011) explica que a técnica de Fluorescência de raios-X é rápida, precisa e não destrutiva. Consiste na indução de transições eletrônicas entre os orbitais internos dos átomos por meio de radiação eletromagnética dependendo da energia (raios-X ou radiação gama). Tais transições resultam na emissão de raios-X com energia própria do átomo envolvido na transição e na medida de sua abundância - cada elemento químico possui um comprimento de onda e uma energia específicos. A energia da radiação identifica o elemento enquanto a intensidade identifica a concentração.

No interior do aparelho de EDX, cada ponto de análise dos fragmentos de fósseis é irradiado por um feixe de raios-X e cada elemento reflete o que são conhecidos como raios-X "fluorescentes", que são detectados pelo aparelho para então serem identificados os elementos presentes de maneira quantitativa e qualitativa (Fig. 8; SOUSA-FILHO, 2011).

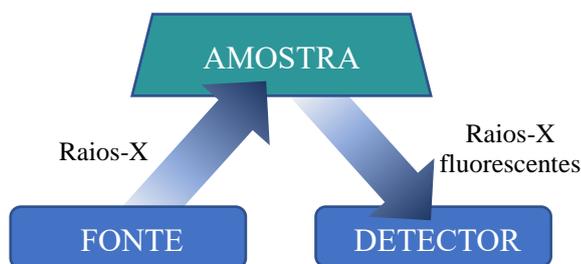


Figura 8: Desenho esquemático de medida de FRX (Modificado de SOUSA-FILHO, 2011; modificado de SHIMADZU CORPORATION, 2013).

### 3.3.2.1 Análise multivariada

Foi utilizado análise estatística multivariada por meio do *software* PAST (*PAleontological STatistics*; versão 2.17; HAMMER; HARPER; RYAN, 2001) através do método da Análise de Componentes Principais (PCA; do inglês *Principal Component Analysis*) na matriz de correlação com o objetivo de observar padrões de associação entre os elementos químicos majoritários e o padrão de coloração macroscópico dos fósseis, de modo a identificar prováveis processos tafonômicos que contribuíram para os agrupamentos encontrados.

Tal método consiste em identificar a relação entre um conjunto de múltiplas variáveis ao transformá-las em outro conjunto de novas variáveis, denominadas de componentes principais, que são funções lineares daquelas no conjunto de dados originais de modo a configurá-los em eixos ortogonais (HAMMER; HARPER, 2006; JOLLIFFE; CADIMA, 2016).

### 3.3.4 Difractometria de raios-X

Os fragmentos selecionados para a Difração de raios-X (ver item 3.3.1) foram pulverizados com o auxílio de almofariz e pistilo de ágata, para evitar a contaminação por impurezas na amostra. Em seguida o material obtido foi acondicionado em eppendorfs (Fig. 9).

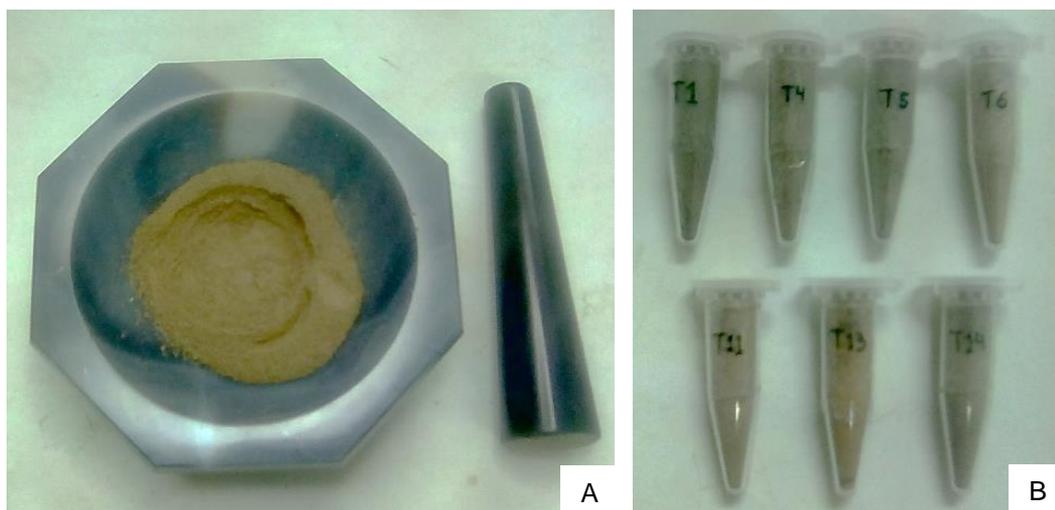


Figura 9: Preparação do material para a análise de DRX. A: pulverização de um dos espécimes; B: todas as amostras usadas na DRX (utilizada numeração provisória).

A análise consiste na incidência de raios-X nos planos cristalinos da amostra, através dos quais se pode obter a difração de raios-X. Com isso, pode-se caracterizar uma estrutura cristalina do mineral e conseqüentemente a identificação da composição mineralógica qualitativa do fóssil através dos picos dos comprimentos de ondas referentes a cada mineral (SILVA, 2001; SOUSA-FILHO, 2011).

Após a obtenção das coordenadas dos picos dos comprimentos de onda, foi utilizado a base de dados *HighScore Plus*, com a qual foi identificado o número referente na carta do mineral. Em seguida, foi usado o *software* MAUD (*Material Analysis Using Diffraction*; Fig. 10) para o refinamento dos dados e o *software* Oringin Pro 8 usado na plotagem dos dados.

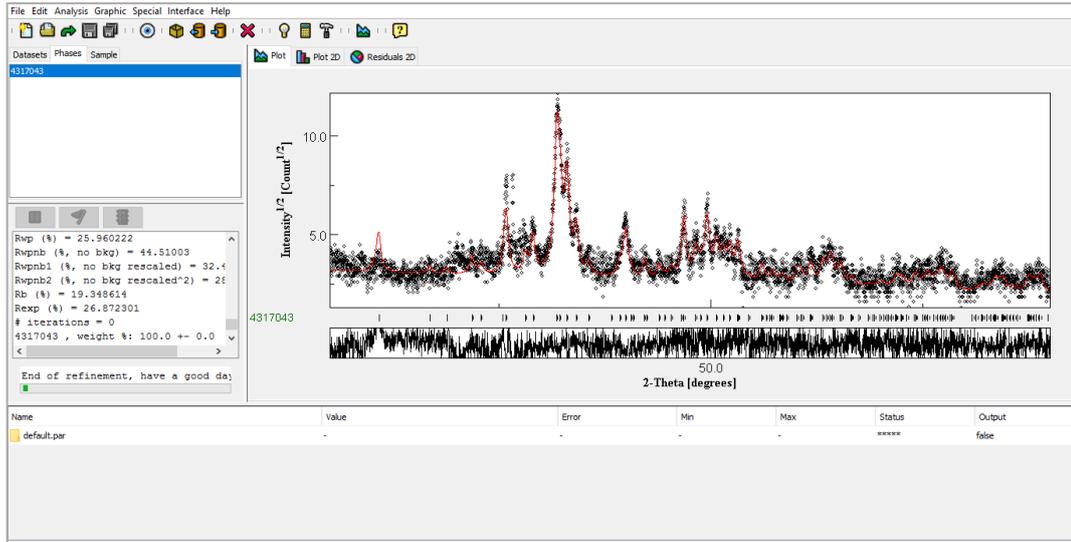


Figura 10: Realização do refinamento dos dados da DRX através do programa MAUD ao comparar a carta do mineral encontrado (hidroxiapatita) com os demais picos de comprimentos de ondas obtidos em cada espécime usado na difração de raios-X.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 ANÁLISE DE LÂMINAS DELGADAS

Através da observação das lâminas delgadas foi possível identificar dois tipos de fossilização em diferentes graus: a substituição e permineralização; e presença de microfaturas (Tabela 3).

TABELA 3: FEIÇÕES DIAGENÉTICAS IDENTIFICADAS NAS LÂMINAS DELGADAS

| <b>ESPÉCIME</b>   | <b>PADRÃO DE COLORAÇÃO SUPERFICIAL (MUNSELL COLOR 2009)</b>             | <b>CARACTERÍSTICAS DIAGENÉTICAS</b>  |
|-------------------|---|--|
| <b>301-V-UERN</b> | Preto acastanhado (5YR 2/1);  | Substituição por calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), Óxido de ferro ( $\text{FeO}_2$ ) e Sílica; Permineralização por quartzo, $\text{CaCO}_3$ e $\text{FeO}_2$ ; |
| <b>309-V-UERN</b> | Preto acastanhado (5YR 2/1) e amarelo esverdeado pálido (10Y 8/2);      | Permineralização por óxido de ferro ( $\text{FeO}_2$ ) e pouca substituição por Calcita ( $\text{CaCO}_3$ );   |
| <b>310-V-UERN</b> | Marrom escuro (5YR 2/2);  | Permineralização por minerais siliciclásticos;   |
| <b>314-V-UERN</b> | Marrom escuro avermelhado (10R 3/4) e preto acastanhado (5YR 2/1);      | Microfaturas e permineralização óxidos de ferro e manganês; Preenchimento inicial por calcita ( $\text{CaCO}_3$ )  |
| <b>315-V-UERN</b> | Marrom moderado (5YR 3/4);  | Substituição por calcita ( $\text{CaCO}_3$ );  |
| <b>318-V-UERN</b> | Marrom amarelado moderado (10YR 5/4) e laranja muito pálido (10YR 8/2); | Presença de substituição e permineralização por óxido de ferro ( $\text{FeO}_2$ );   |
| <b>319-V-UERN</b> | Marrom amarelado moderado (10YR 5/4) e preto acastanhado (5YR 2/1);     | Permineralização por siliciclásticos (feldspato e quartzo) e óxido de ferro ( $\text{FeO}_2$ ); e substituição por óxido de ferro ( $\text{FeO}_2$ )       |
| <b>324-V-UERN</b> | Laranja muito pálido (10YR 8/2) e preto acastanhado (5YR 2/1).          | Permineralização por óxido de ferro.   |

#### 4.1.1 Espécime 301-V-UERN

Foram feitas duas lâminas delgadas de corte transversal cujo fragmento fóssil (Figura 7A) possui padrão de coloração superficial preto acastanhado (5YR 2/1) - (ver MUNSELL COLOR, 2009).

As fotos da microestrutura do espécime 301-V-UERN mostram a região esponjosa do osso (Fig. 11 A-G1), a qual apresenta substituição por calcita e óxido de ferro (Fig. 11 A, C, D, E, F), assim como por sílica ( $\text{SiO}_2$ ; Fig. 11 D, F e G, G1), mas com a preservação da microestrutura óssea, sendo possível observar as lacunas dos osteócitos e ósteons (Fig. 11 G1).

A permineralização nas trabéculas do osso se dá com parcial preenchimento por quartzo (Fig. 11 B) e óxido de ferro ( $\text{FeO}_2$ ; Fig. 11 A, C, D, F). É possível observar os ósteons secundários com canais de Harvers preenchidos por óxido de ferro (Fig. 11 A, D, E).

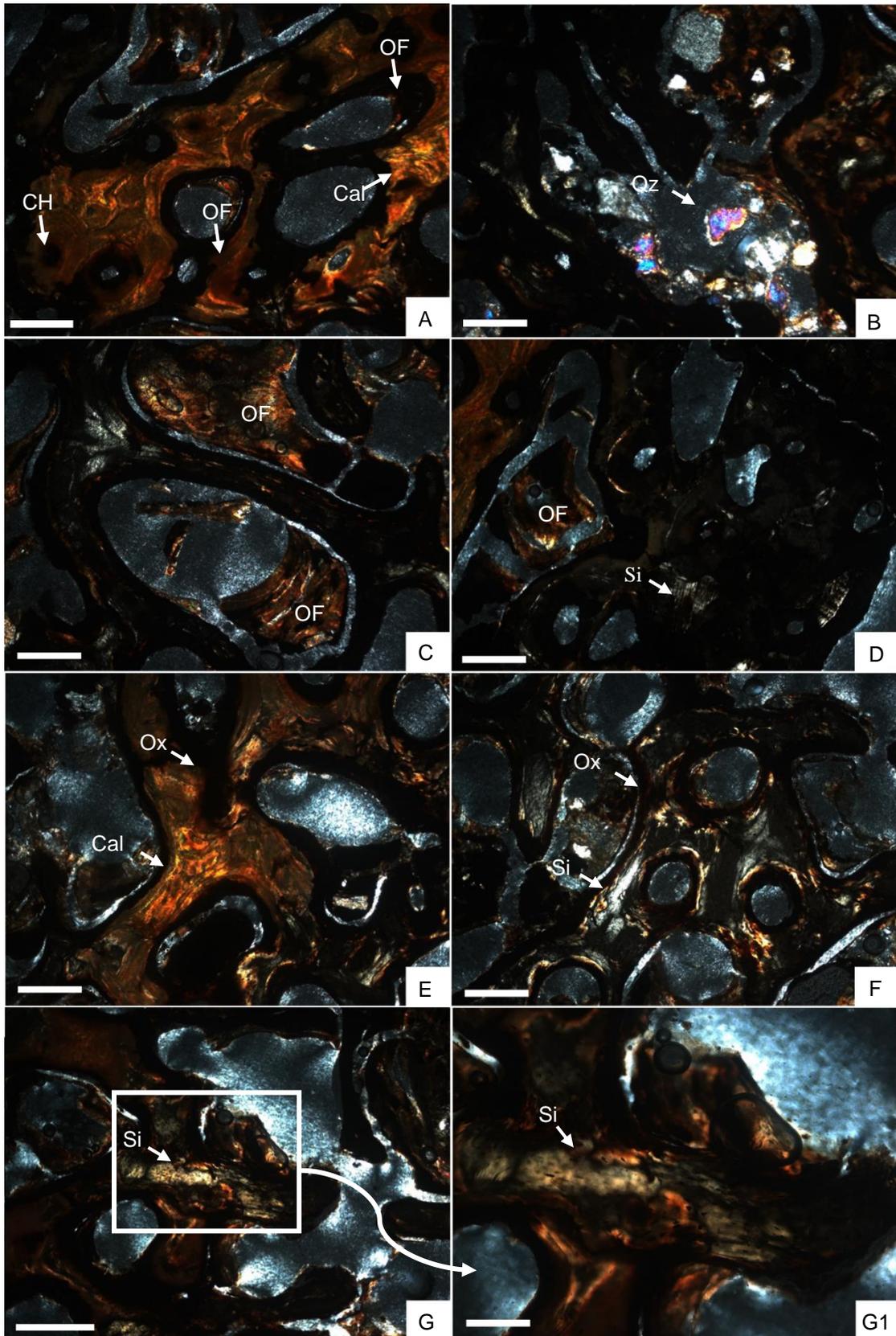


Figura 11: Fotos de lâminas delgadas do espécime 301-V-UERN. Presença de substituição e permineralização em todas as fotos (A-G: aumento em 5x e G1: aumento em 10x). Cal: Calcita; Qz: Quartzo; Ox: Óxido; OF: Óxido de Ferro; CH: Canal de Harvers; Si: Sílica. Escala = 200  $\mu$ m.

#### 4.1.2 Espécime 309-V-UERN

O fragmento fóssil utilizado para a lâmina delgada (Fig. 7 B) possui padrão de coloração superficial preto acastanhado (5YR 2/1) e amarelo esverdeado pálido (10Y 8/2).

O corte transversal da lâmina mostra a região esponjosa do osso com pouca substituição e permineralização (Fig. 12 A-C). É possível observar a microestrutura da matriz óssea bem preservada. Foi observado uma permineralização inicial por óxido de ferro ( $\text{FeO}_2$ ) (Fig. 12 A, C) e pouca substituição por Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) na matriz óssea (Fig. 12 B).

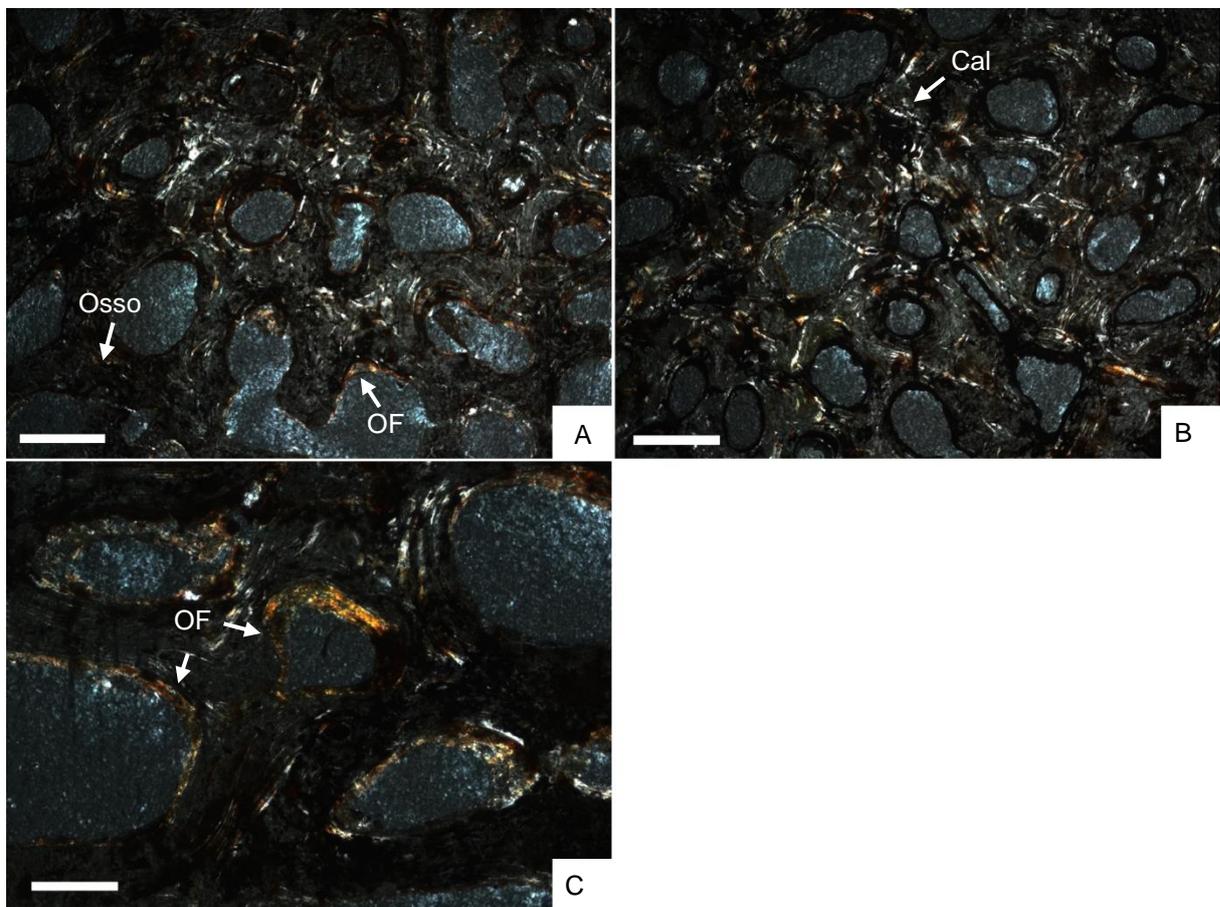


Figura 12: Fotos de lâmina da amostra 309-V-UERN. (A, B e C) Presença de permineralização e (B) de pouca substituição (A, B: aumento em 5x e C: aumento em 10x). Cal: Calcita; OF: Óxido de Ferro. Escala = 200  $\mu\text{m}$ .

#### 4.1.3 Espécime 310-V-UERN

O fragmento fóssil (Fig. 7 C) utilizado para a lâmina delgada produzida apresenta coloração superficial marrom escuro (5YR 2/2).

Nesta seção delgada de corte transversal não foi observado substituição, mas a presença de permineralização por minerais siliciclásticos (Fig. 13 A-B1). Nota-se o preenchimento da trabécula por grão de quartzo (Fig. 13 B e B1).

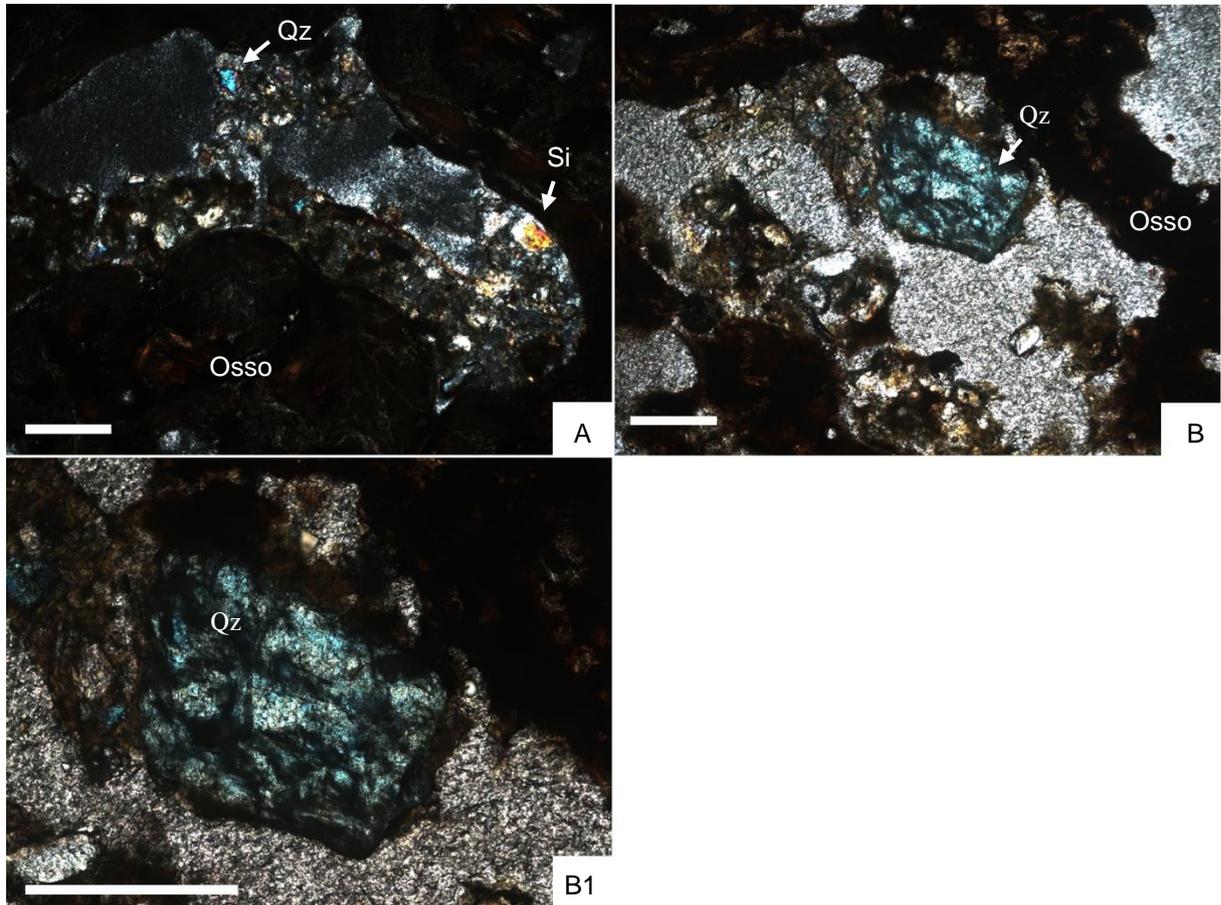


Figura 13: Fotos de lâminas da amostra 310-V-UERN. (A, B e B1) Permineralização siliciclástica (A-B: aumento em 5x e B1: aumento em 10x). Qz: Quartzo, Si: Sílica. Escala = 200  $\mu$ m.

#### 4.1.4 Espécime 314-V-UERN

Lâmina de corte transversal correspondente ao fragmento fóssil 314-V-UERN (Fig. 7 D) com colorações marrom escuro avermelhado (10R 3/4) e preto amarronzado (5YR 2/1).

Nesta sessão delgada observa-se a microestrutura óssea bem preservada, sendo possível observar lacunas e ósteons primários e secundários com sistema de Harvers bem definidos, com canais vasculares com preenchimento inicial por calcita ( $\text{CaCO}_3$ ; Fig. 14 A, C) e óxidos de ferro e manganês (Fig. 14 B-C). Entretanto o tecido ósseo mostra microfraturas radiais nas margens externas dos ósteons secundários (Fig. 14 A-A3) e atravessando o córtex ósseo (Fig. 14 B-C), o que pode ter facilitado o preenchimento por óxidos de ferro e manganês.

Os eventos de permineralização identificados incluem um crescimento inicial de calcita nos canais vasculares (Fig. 14 A1) e, posteriormente, precipitação de óxidos de ferro e manganês com o preenchimento das fraturas (Fig. 14 A-C).

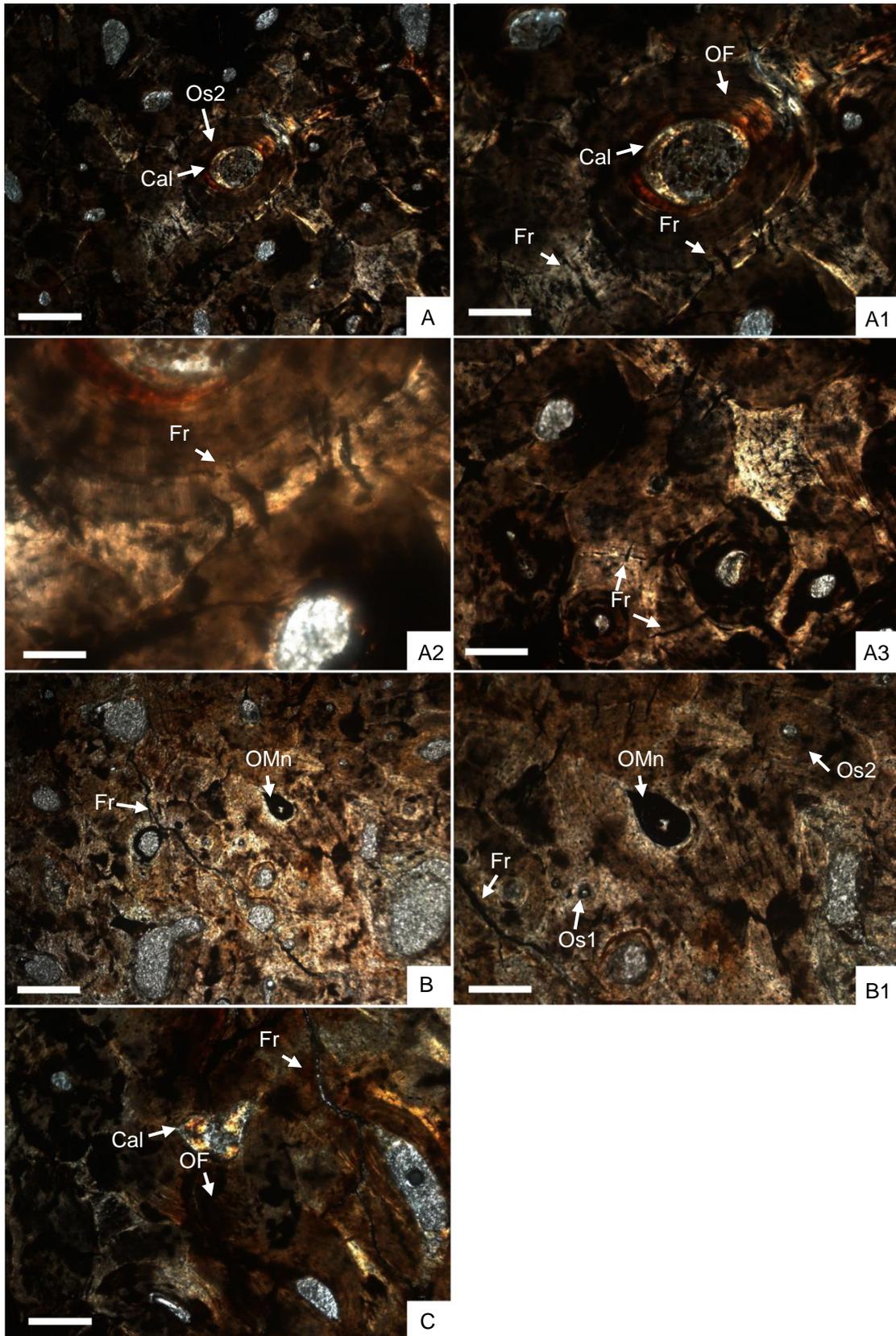


Figura 14: Fotos de lâmina delgada da espécime 314-V-UERN e de zoom de microestruturas (A1-A3, B1). A, B e C: presença de permineralização e microfraturas (A, A1 e B: aumento em 5x; A3, B1 e C: aumento em 10x; e A2: aumento em 20x). Cal: Calcita; Fr: Fratura; OMn: Óxido de manganês; OF: Óxido de ferro; Os1: Ósteon primário; Os2: Ósteon secundário. Escala = 200  $\mu$ m.

#### 4.1.5 Espécime 315-V-UERN

Lâmina de corte longitudinal correspondente ao fragmento fóssil 315-V-UERN (Fig. 7 E) com padrão de coloração marrom moderado (5YR 3/4).

Nesta sessão delgada, as fotos mostram osso compacto com a presença de substituição por calcita ( $\text{CaCO}_3$ ; Fig. 15 A, B e C). Nos trechos onde não há substituição, a matriz óssea e microestruturas se encontram bem preservadas, sendo possível observar as microestruturas ósseas, como os canais de Harvers e Volkman.

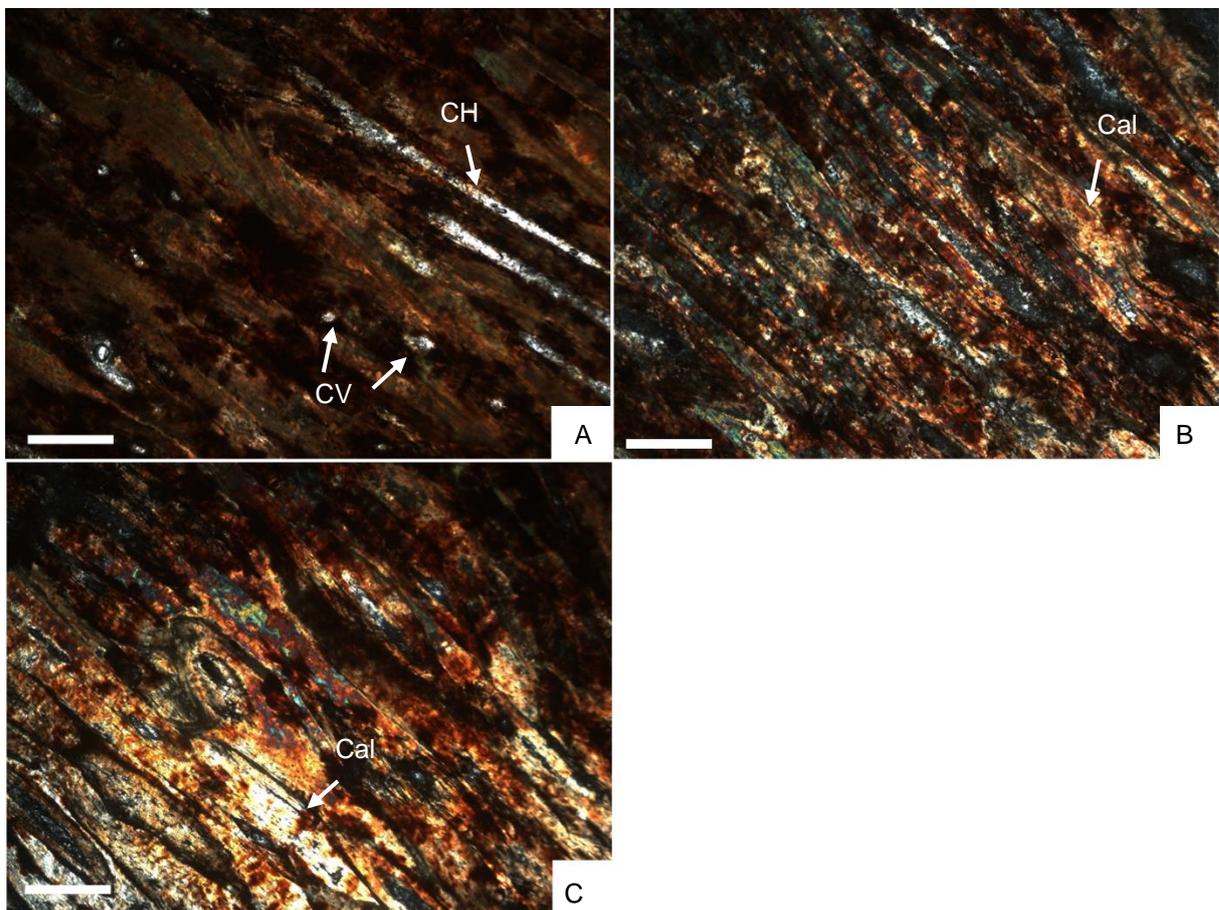


Figura 15: Fotos de lâmina do espécime 315-V-UERN. Corte perpendicular. A, B e C: presença de substituição (A-C: aumento em 5x). Cal: Calcita; CH: Canal de Harvers; VC: Canais de Volkman. Escala = 200  $\mu\text{m}$

#### 4.1.6 Espécime 318-V-UERN

Lâmina de corte transversal correspondente ao fragmento fóssil 318-V-UERN (Fig. 7 F) com padrão de coloração superficial marrom amarelado moderado (10YR 5/4) e laranja muito pálido (10YR 8/2) com coloração interna preto acastanhado (5YR 2/1).

As fotos da microestrutura óssea mostram osso esponjoso com a presença de substituição em maior (Fig. 16 A) e menor graus (Fig. 16 B) e permineralização por óxido de ferro ( $\text{FeO}_2$ ; Fig. 16 A-D). A microestrutura óssea encontra-se alterada devido a presença de alto grau de substituição.

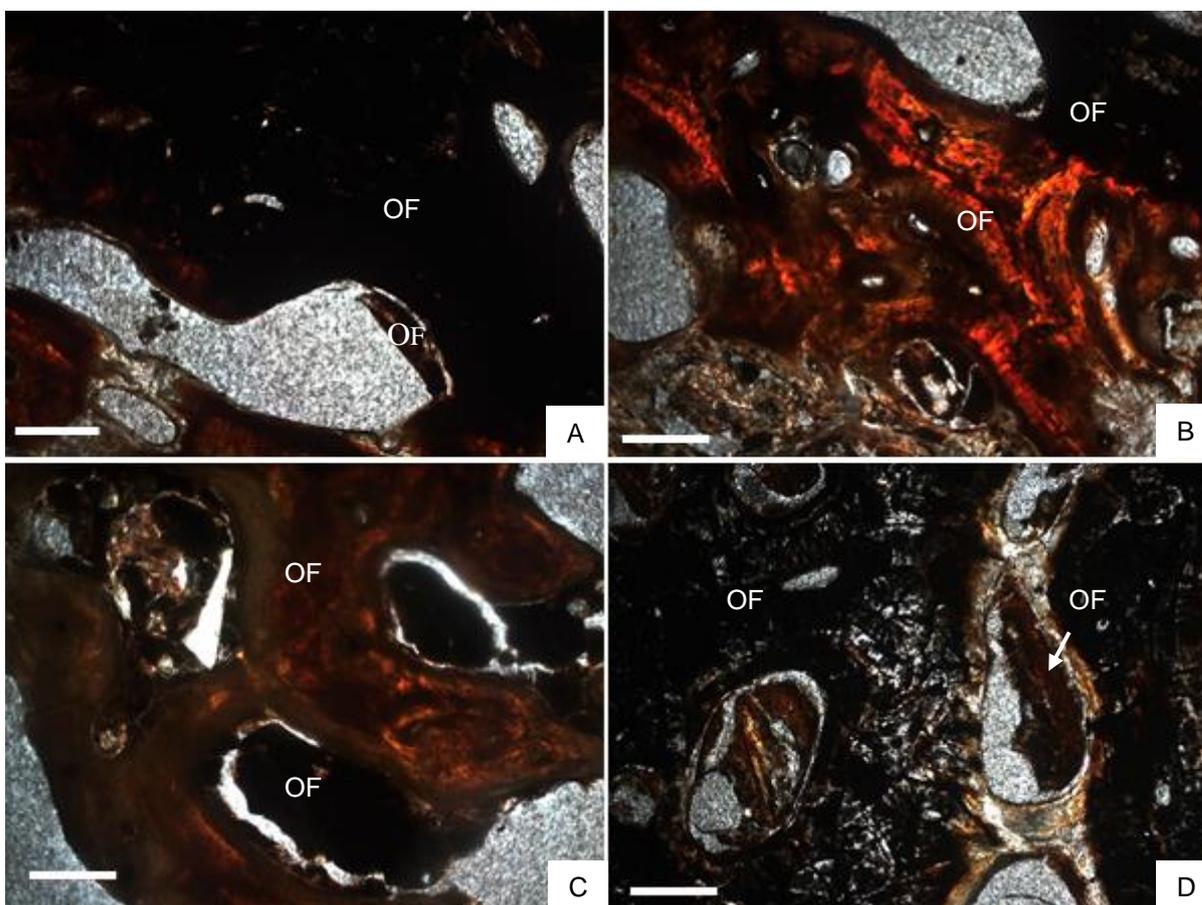


Figura 16: Fotos de Lâmina do espécime 318-V-UERN. A-D: presença de substituição e permineralização por óxido de ferro ( $\text{FeO}_2$ ; A-D: aumento em 5x). OF: Óxido de ferro. Escala = 200  $\mu\text{m}$ .

#### 4.1.7 Espécime 319-V-UERN

Lâmina delgada de corte transversal corresponde ao fragmento fóssil 319-V-UERN (Fig. 7 G). Possui padrão de coloração superficial marrom amarelado moderado (10YR 5/4) e preto acastanhado (5YR 2/1).

Através das fotos da microestrutura óssea do fóssil foi possível observar que o processo de dois tipos de preservação: substituição e permineralização.

A permineralização se deu pelo preenchimento por óxido de ferro ( $\text{FeO}_2$ ; Fig. 17 A, B) e materiais siliciclásticos (feldspato e quartzo; Fig. 17 B, B1). A substituição dos minerais originais da matriz óssea se dá de forma abundante por óxido de ferro ( $\text{FeO}_2$ ; Fig. 17 A, B).

A microestrutura de alguns pontos apresenta trabéculas deformadas devido ao crescimento de cristais siliciclásticos.

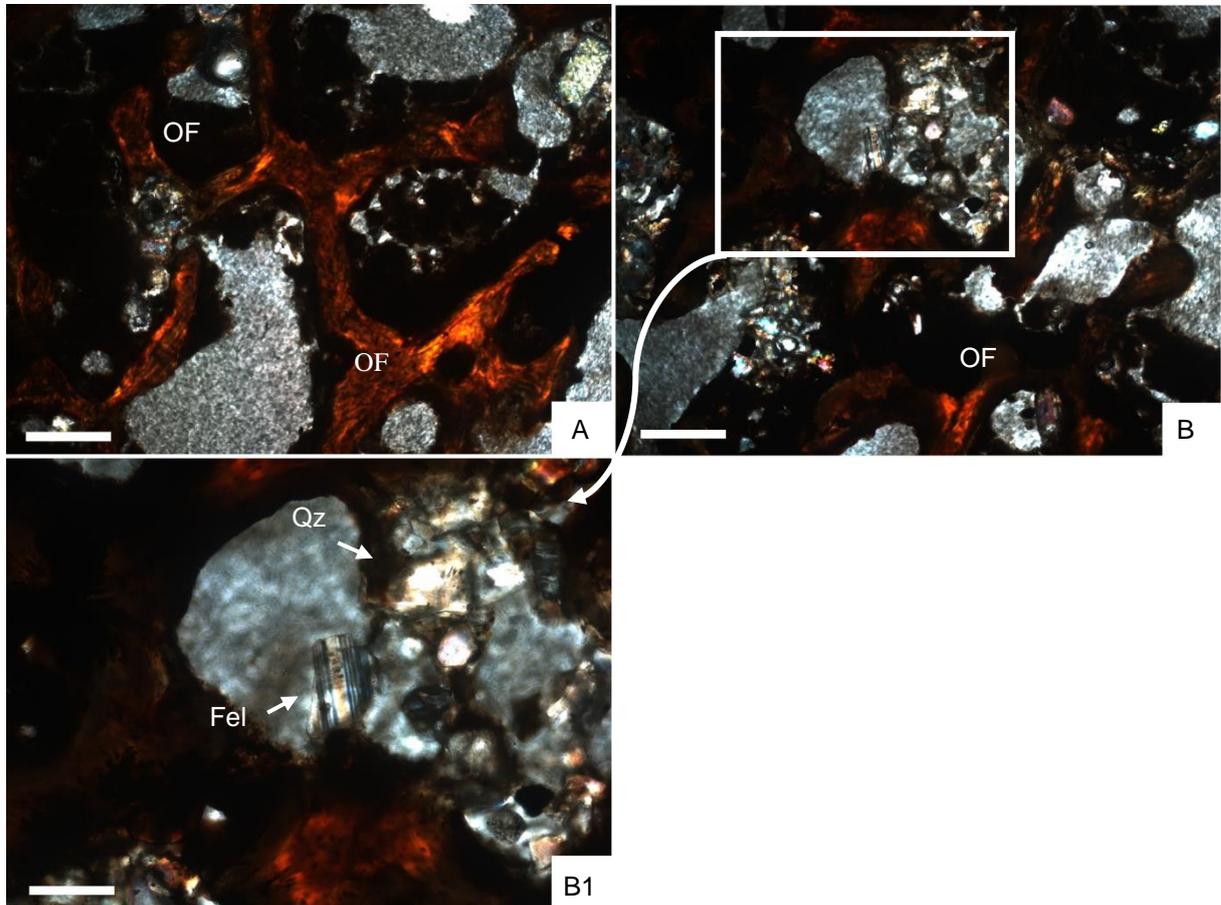


Figura 17: Fotos de lâmina do espécime 319-V-UERN. A, A1 e B: presença de substituição e permineralização (A,B: aumento em 5x; e B1: aumento em 10x). Fel: Feldspato; Qz: Quartzo; OF: Óxido de ferro. Escala = 200  $\mu\text{m}$ .

#### 4.1.8 Espécime 324-V-UERN

Lâmina de corte transversal produzida a partir do fragmento fóssil 324-V-UERN (Fig. 7 H) cujo padrão de coloração superficial consiste em laranja muito pálido (10YR 8/2) e incrustações de padrão de cor preto acastanhado (5YR 2/1).

Devido a espessura da lâmina produzida, as trabéculas apresentam coloração opaca, não sendo possível a visualização de suas microestruturas e se há substituição; porém, observa-se a presença de permineralização por óxido de ferro ( $\text{FeO}_2$ ; Fig. 18 A e B).

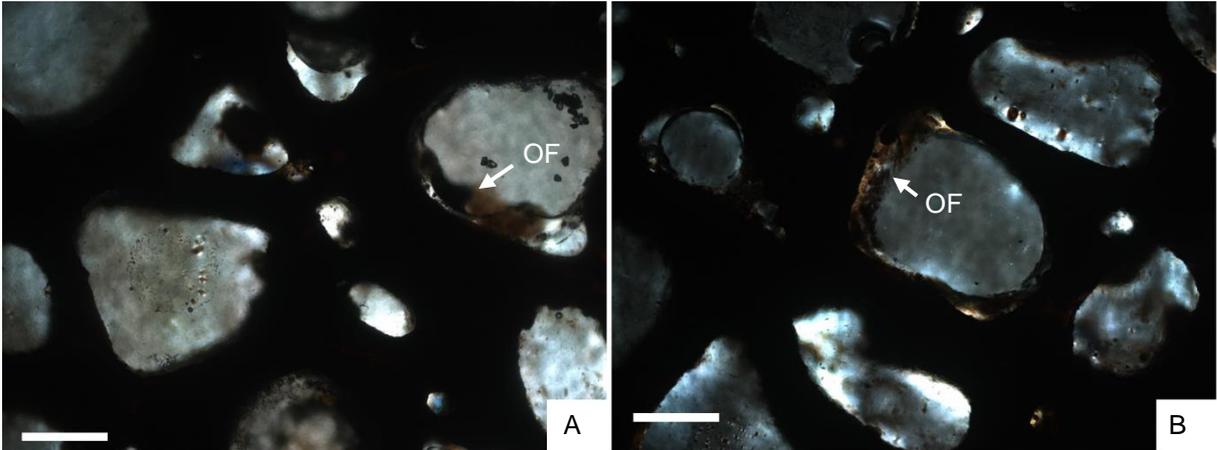


Figura 18: Fotos de lâmina da amostra 324-V-UERN. A e B: presença de permineralização (A, B: aumento em 5x). OF: Óxido de ferro. Escala = 200  $\mu$ m.

#### 4.2 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X

A análise de FRX mostrou que a composição química dos 31 espécimes usados inclui um maior percentual dos seguintes elementos químicos: cálcio (Ca; entre 62,19% e 10,38%), seguido por fósforo (P; entre 36,34% e 4,33%) e silício (Si; entre 50,14 e 3,02%). Além desses, algumas amostras apresentaram quantidades significativas de alumínio (Al; entre 19,02% e 4,68%), ferro (Fe; entre 24,17% e 0,51%) e manganês (Mn; entre 15,94% e 0,08%), compondo, junto com os citados acima, os seis elementos mais representativos (Tabela 4).

Para as análises realizadas no tecido ósseo, a média de elementos (Tabela 4; Fig. 19 A) mostra que o maior índice é encontrado para os elementos cálcio e fósforo, elementos que compõem a hidroxiapatita ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ).

Dos espécimes escolhidos, sete apresentam incrustações classificadas no estágio 1 segundo a classificação de Maldonado et al. (2016); nestes observou-se que a média de elementos como silício (Si), alumínio (Al), manganês (Mn) e ferro (Fe) aumentaram em relação à média total (Fig. 19 B). Isso confirma a presença de incrustações ferruginosas e siliciclásticas. Observa-se que, além de uma variação de elementos entre os espécimes estudados, também uma grande variação entre pontos estudados em um mesmo fóssil (Tabela 4; Figura 20).

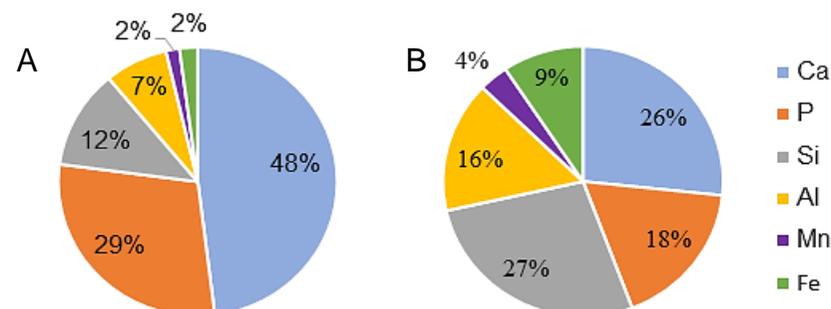


Figura 19: Gráficos com proporções entre elementos químicos analisados quantitativamente por FRX. A: média da proporção de elementos químicos mais representativos dos espécimes selecionados para a realização da FRX (sem presença de incrustações); B: Média da proporção de elementos químicos mais representativos presentes nas incrustações.

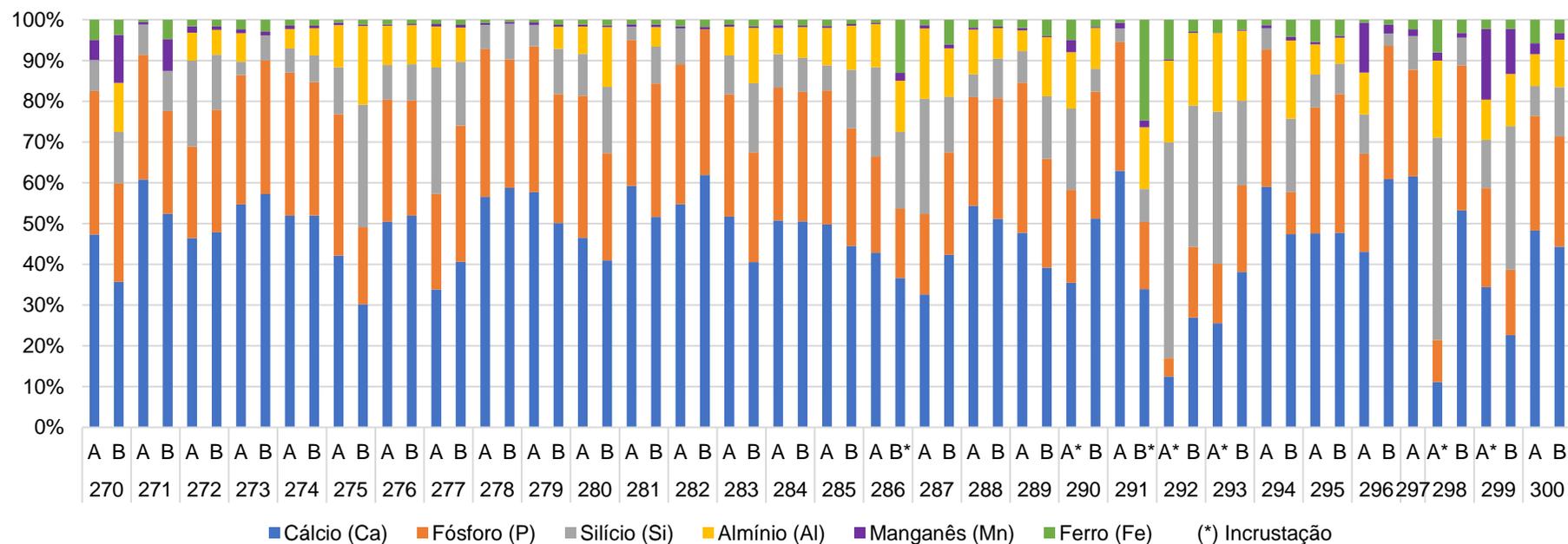


Figura 20: Gráfico comparativo entre os valores obtidos através da FRX e os seis elementos químicos mais representativos. A numeração indica os números de registros dos espécimes estudados e as letras referem-se aos pontos analisados pelo aparelho de FRX em cada espécime.

TABELA 4: RESULTADO QUANTITATIVO DE ESPÉCIMES SUBMETIDOS À FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X EM RELAÇÃO À REPRESENTAÇÃO DOS SEIS ELEMENTOS MAJORITÁRIOS NAS AMOSTRAS.

| Nº-V-<br>UERN |   | Elementos (%) |       |       |       |      |      | PADRÃO DE COLORAÇÃO   | PONTO DE ANÁLISE   |
|---------------|---|---------------|-------|-------|-------|------|------|---|--------------------|
|               |   | Ca            | P     | Si    | Al    | Mn   | Fe   |   |                    |
| 270           | A | 46,18         | 34,31 | 7,45  | 0     | 4,82 | 4,81 | Preto acastanhado (5YR 2/1) e laranja amarelado pálido (10YR 8/6) | Tecido esponjoso   |
|               | B | 33,64         | 22,8  | 11,82 | 11,41 | 11,1 | 3,48 | Preto acastanhado (5YR 2/1)                                       | Superfície do osso |
| 271           | A | 60,21         | 30,3  | 7,35  | 0     | 0,56 | 0,59 | Cinza amarelado (5Y 8/1)  | Superfície do osso |
|               | B | 50,91         | 24,48 | 9,57  | 0     | 7,6  | 4,61 | Preto acastanhado (5YR 2/1)                                       | Superfície do osso |
| 272           | A | 45,9          | 22,2  | 20,81 | 6,76  | 1,05 | 1,58 | Cinza amarelado (5Y 8/1)  | Tecido esponjoso   |
|               | B | 47,27         | 29,73 | 13,27 | 6,04  | 0,8  | 1,67 | Preto acinzentado (N2)  | Osso compacto      |
| 273           | A | 54,3          | 31,49 | 3,24  | 6,94  | 0,99 | 2,32 | Marrom avermelhado escuro (10R 3/4) e Preto acastanhado (5YR 2/1) | Superfície do osso |
|               | B | 56,47         | 32,34 | 6,06  | 0     | 0,87 | 2,93 | Preto acastanhado (5YR 2/1)                                       | Tecido esponjoso   |
| 274           | A | 51,19         | 34,7  | 5,85  | 4,68  | 0,8  | 1,43 | Vermelho muito escuro (10R 2/2)                                   | Superfície do osso |
|               | B | 51,3          | 32,33 | 6,48  | 6,6   | 0,6  | 1,42 | Marrom avermelhado moderado (10R 4/6)                             | Tecido esponjoso   |
| 275           | A | 41,59         | 34,33 | 11,3  | 10,27 | 0,58 | 0,7  | Marrom avermelhado escuro (10R 3/4)                               | Superfície do osso |
|               | B | 29,79         | 18,64 | 29,61 | 19,02 | 0,36 | 1,17 | Cinza amarelado (5Y 8/1)  | Superfície do osso |
| 276           | A | 49,8          | 29,53 | 8,36  | 9,54  | 0,27 | 1,17 | Marrom avermelhado moderado (10R 4/6)                             | Superfície do osso |
|               | B | 51,21         | 27,91 | 8,8   | 9,46  | 0,29 | 1,03 | Laranja muito pálido (10YR 8/2)                                   | Superfície do osso |
| 277           | A | 33,37         | 23,23 | 30,58 | 9,9   | 0,61 | 1,04 | Preto acinzentado (N2)  | Superfície do osso |
|               | B | 40,01         | 32,94 | 15,47 | 8,23  | 0,61 | 1,27 | Branco (N9)   | Superfície do osso |
| 278           | A | 55,98         | 35,87 | 5,88  | 0     | 0,51 | 0,74 | Branco (N9) e cinza claro médio (N6)                              | Superfície do osso |
|               | B | 57,99         | 31,13 | 8,64  | 0     | 0,47 | 0,51 | Branco (N9) e cinza amarelado (5Y 8/1)                            | Superfície do osso |
| 279           | A | 57,13         | 35,34 | 5,15  | 0     | 0,71 | 0,6  | Laranja muito pálido (10YR 8/2)                                   | Superfície do osso |
|               | B | 49,48         | 31,24 | 10,93 | 5,34  | 0,49 | 1,25 | Marrom amarelado moderado (10YR 5/4)                              | Superfície do osso |
| 280           | A | 45,83         | 34,33 | 34,33 | 6,6   | 0,45 | 1,19 | Marrom moderado (5YR 3/4)   | Superfície do osso |
|               | B | 40,18         | 25,81 | 15,98 | 14,39 | 0,38 | 1,39 | Preto acastanhado (5YR 2/1)                                       | Tecido esponjoso   |

TABELA 4: RESULTADO QUANTITATIVO DE ESPÉCIMES SUBMETIDOS À FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X EM RELAÇÃO À REPRESENTAÇÃO DOS SEIS ELEMENTOS MAJORITÁRIOS NAS AMOSTRAS.

| Nº-V-<br>UERN |   | Elementos (%) |       |       |       |      |       | PADRÃO DE COLORAÇÃO                                      | PONTO DE ANÁLISE                 |
|---------------|---|---------------|-------|-------|-------|------|-------|--|----------------------------------|
|               |   | Ca            | P     | Si    | Al    | Mn   | Fe    |  |                                  |
| 281           |  A   | 58,38         | 35,35 | 3,15  | 0     | 0,59 | 1,12  | Preto acastanhado (5YR 2/1)                              | Superfície do osso               |
|               |  B   | 50,96         | 32,32 | 8,9   | 4,73  | 0,6  | 1,2   | Preto acastanhado (5YR 2/1)                              | Superfície do osso               |
| 282           |  A   | 54,03         | 33,87 | 8,61  | 0     | 0,57 | 8,61  | Laranja muito pálido (10YR 8/2) e preto acinzentado (N2) | Superfície do osso               |
|               |  B   | 61,08         | 35,27 | 0     | 0     | 0,62 | 1,7   | Laranja muito pálido (10YR 8/2)                          | Superfície do osso               |
| 283           |  A   | 50,73         | 29,41 | 9,42  | 6,87  | 0,41 | 1,26  | Laranja muito pálido (10YR 8/2)                          | Superfície do osso               |
|               |  B   | 39,96         | 39,96 | 16,72 | 13,38 | 0,32 | 1,63  | Cinza amarelado (5Y 8/1)                                 | Superfície do osso               |
| 284           |  A   | 50,07         | 32,18 | 8,1   | 6,4   | 0,66 | 1,29  | Branco (N9)  | Superfície do osso               |
|               |  B   | 49,68         | 31,16 | 8,26  | 7,35  | 0,39 | 1,41  | Laranja muito pálido (10YR 8/2)                          | Tecido esponjoso                 |
| 285           |  A   | 49,11         | 32,46 | 6,09  | 9,03  | 0,51 | 1,48  | Cinza amarelado (5Y 7/2)                                 | Superfície do osso               |
|               |  B   | 44,01         | 28,51 | 14,18 | 10,71 | 0,37 | 1,07  | Laranja muito pálido (10YR 8/2)                          | Superfície do osso               |
| 286           |  A   | 42,3          | 23,26 | 21,64 | 10,43 | 0,38 | 0,67  | Cinza médio (N5)   | Superfície do osso               |
|               |  B   | 35,58         | 16,47 | 18,27 | 12,26 | 1,81 | 12,67 | Vermelho escuro (5R 3/4)                                 | Superfície do osso (Incrustação) |
| 287           |  A   | 31,89         | 19,32 | 27,68 | 16,93 | 0,8  | 1,27  | Laranja muito pálido (10YR 8/2)                          | Tecido esponjoso                 |
|               |  B   | 41,43         | 24,6  | 13,43 | 11,59 | 0,92 | 5,93  | Laranja acinzentado (10YR 7/4)                           | Tecido esponjoso                 |
| 288           |  A   | 53,85         | 53,85 | 5,58  | 10,83 | 0,51 | 1,92  | Marrom avermelhado moderado (10R 4/6)                    | Superfície do osso               |
|               |  B | 50,46         | 29,22 | 9,58  | 7,32  | 0,41 | 1,67  | Laranja acinzentado (10YR 7/4)                           | Superfície do osso               |
| 289           |  A | 47,12         | 36,34 | 7,6   | 5,02  | 0,57 | 2,03  | Marrom claro (5YR 6/4)                                   | Tecido esponjoso                 |
|               |  B | 38,54         | 26,25 | 15,07 | 14,29 | 0,37 | 3,85  | Preto avermelhado (5R 2/2)                               | Tecido esponjoso                 |
| 290           |  A | 34,58         | 22,21 | 19,48 | 13,48 | 2,95 | 4,8   | Preto acastanhado (5YR 2/1)                              | Tecido esponjoso. (Incrustação)  |
|               |  B | 50,39         | 30,63 | 5,5   | 9,83  | 0,31 | 1,69  | Laranja amarelado escuro (10YR 6/6)                      | Tecido esponjoso                 |

TABELA 4: RESULTADO QUANTITATIVO DE ESPÉCIMES SUBMETIDOS À FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X EM RELAÇÃO À REPRESENTAÇÃO DOS SEIS ELEMENTOS MAJORITÁRIOS NAS AMOSTRAS.

| Nº-V-<br>UERN |   | <i>Elementos (%)</i> |       |       |       |       |       | PADRÃO DE COLORAÇÃO | PONTO DE ANÁLISE                      |                                  |
|---------------|---|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
|               |   | Ca                   | P     | Si    | Al    | Mn    | Fe    |                     |                                       |                                  |
| 291           |    | A                    | 62,19 | 31,15 | 3,33  | 0     | 1,31  | 0,79                | Marrom avermelhado moderado (10R 4/6) | Superfície do osso               |
|               |    | B                    | 33,21 | 16,14 | 7,95  | 14,81 | 1,65  | 24,17               | Vermelho muito escuro (10R 2/2)       | Superfície do osso (Incrustação) |
| 292           |    | A                    | 11,8  | 4,33  | 50,14 | 19    | 0,38  | 9,15                | Laranja amarelado pálido (10R 8/6)    | Tecido esponjoso (Incrustação)   |
|               |    | B                    | 26,03 | 16,86 | 33,51 | 17,26 | 0,26  | 2,86                | Vermelho muito escuro (10R 2/2)       | Tecido esponjoso                 |
| 293           |    | A                    | 24,66 | 14,08 | 36,04 | 18,62 | 0,08  | 3,05                | Cinza claro (N7)                      | Tecido esponjoso (Incrustação)   |
|               |    | B                    | 37,13 | 20,64 | 20,18 | 16,73 | 0,23  | 2,37                | Marrom amarelado moderado (10YR 5/4)  | Superfície do osso               |
| 294           |    | A                    | 58,3  | 33,27 | 5,16  | 0     | 0,71  | 1,32                | Preto acastanhado (5YR 2/1)           | Superfície do osso               |
|               |    | B                    | 44,72 | 9,77  | 17,02 | 18,1  | 0,79  | 3,99                | Preto (N1)                            | Tecido esponjoso                 |
| 295           |    | A                    | 46,83 | 30,43 | 7,98  | 7,24  | 0,64  | 5,34                | Marrom pálido (5YR 5/2)               | Tecido esponjoso                 |
|               |    | B                    | 46,87 | 33,38 | 7,33  | 6,24  | 0,49  | 3,83                | Vermelho muito escuro (10R 2/2)       | Tecido esponjoso                 |
| 296           |    | A                    | 40,71 | 22,68 | 9,14  | 9,75  | 11,57 | 0,65                | Preto (N1)                            | Tecido esponjoso                 |
|               |    | B                    | 59,9  | 32,17 | 3,02  | 0     | 2,14  | 1,15                | Cinza médio (N5)                      | Tecido esponjoso                 |
| 297           |   | A                    | 59,08 | 25,08 | 7,95  | 0     | 1,63  | 2,23                | Preto (N1)                            | Superfície do osso               |
| 298           |  | A                    | 10,38 | 9,73  | 46,62 | 17,71 | 1,83  | 7,57                | Verde oliva claro (10Y 5/4)           | Superfície do osso (Incrustação) |
|               |  | B                    | 52,43 | 35,1  | 6,68  | 0     | 1,16  | 3,16                | Preto (N1)                            | Superfície do osso               |
| 299           |  | A                    | 31,55 | 22,23 | 10,92 | 9,03  | 15,94 | 2,02                | Preto (N1) e cinza muito claro (N8)   | Superfície do osso               |
|               |  | B                    | 20,77 | 14,82 | 32,35 | 11,76 | 10,23 | 2,01                | Preto (N1)                            | Superfície do osso               |
| 300           |  | A                    | 47,46 | 27,63 | 7,19  | 7,68  | 2,64  | 5,68                | Preto acastanhado (5YR 2/1)           | Superfície do osso               |
|               |  | B                    | 43,31 | 26,44 | 11,89 | 11,35 | 1,64  | 3,16                | Marrom avermelhado moderado (10R 4/6) | Osso compacto                    |
| Média         |   |                      | 44,93 | 27,76 | 13,58 | 8,04  | 1,71  | 2,92                |                                       |                                  |

#### 4.2.1 Análise de Componentes Principais - PCA

Dois componentes mais significativos, representando em conjunto 77,87% da variância, foram distinguidos pela análise dos dados obtidos pela FRX. O componente 1 representa 60,64% da variância e corresponde aos níveis dos elementos Ca, P, Fe, Al e Si; enquanto que o componente 2, apresenta 17,22% da variância e os níveis de Mn (Fig. 21; Tab. 5).

De acordo com o diagrama gerado observa-se que ocorrem agrupamentos (A, B e C; Fig. 21) segundo a composição elementar. Para o grupo A, onde está o maior número de pontos analisados pela FRX de cada fóssil, é notável que, mesmo apresentando grandes variações de cores, é o grupo que possui a maior quantidade de Cálcio (Ca) e Fósforo (P). No grupo B, representado pelos pontos: 270 A e B, 271 B, 296 A, 299 A e B, e 300 A (ver Tab. 4), estão as maiores proporções de Manganês (Mn) que variam entre 2,64% e 15,94%; diferente dos demais, os pontos analisados dos espécimes deste grupo apresentam apenas a coloração de tons enegrecidos. O grupo C reúne pontos com os elementos Al, Fe e Si mais abundantes. É observado que os pontos presentes no primeiro quadrante são de tons avermelhados que correspondem às incrustações ferruginosas (286 B, 290 A e 291 B; Tab. 4), são pontos com maiores proporções de Ferro (Fe) que variam entre 4,8% e 24,17%; enquanto que no quarto quadrante estão as incrustações siliciclásticas (292 A, 293 A e 298 A; Tab. 4), pontos com maiores proporções de Alumínio (Al), entre 36% e 50,14%, e Silício (Si), entre 17,71% e 19%.

TABELA 5: *EIGENVALUES* RESULTANTES DA ANÁLISE DE PCA EM TODOS OS COMPONENTES PRINCIPAIS EM MATRIZ DE CORRELAÇÃO.

| PC | <i>Eigenvalues</i> | Variância % |
|----|--------------------|-------------|
| 1  | 3.63895            | 60.649      |
| 2  | 1.03371            | 17.228      |
| 3  | 0.867606           | 14.46       |
| 4  | 0.270014           | 4.5002      |
| 5  | 0.188327           | 3.1388      |
| 6  | 0.0013946          | 0.023243    |

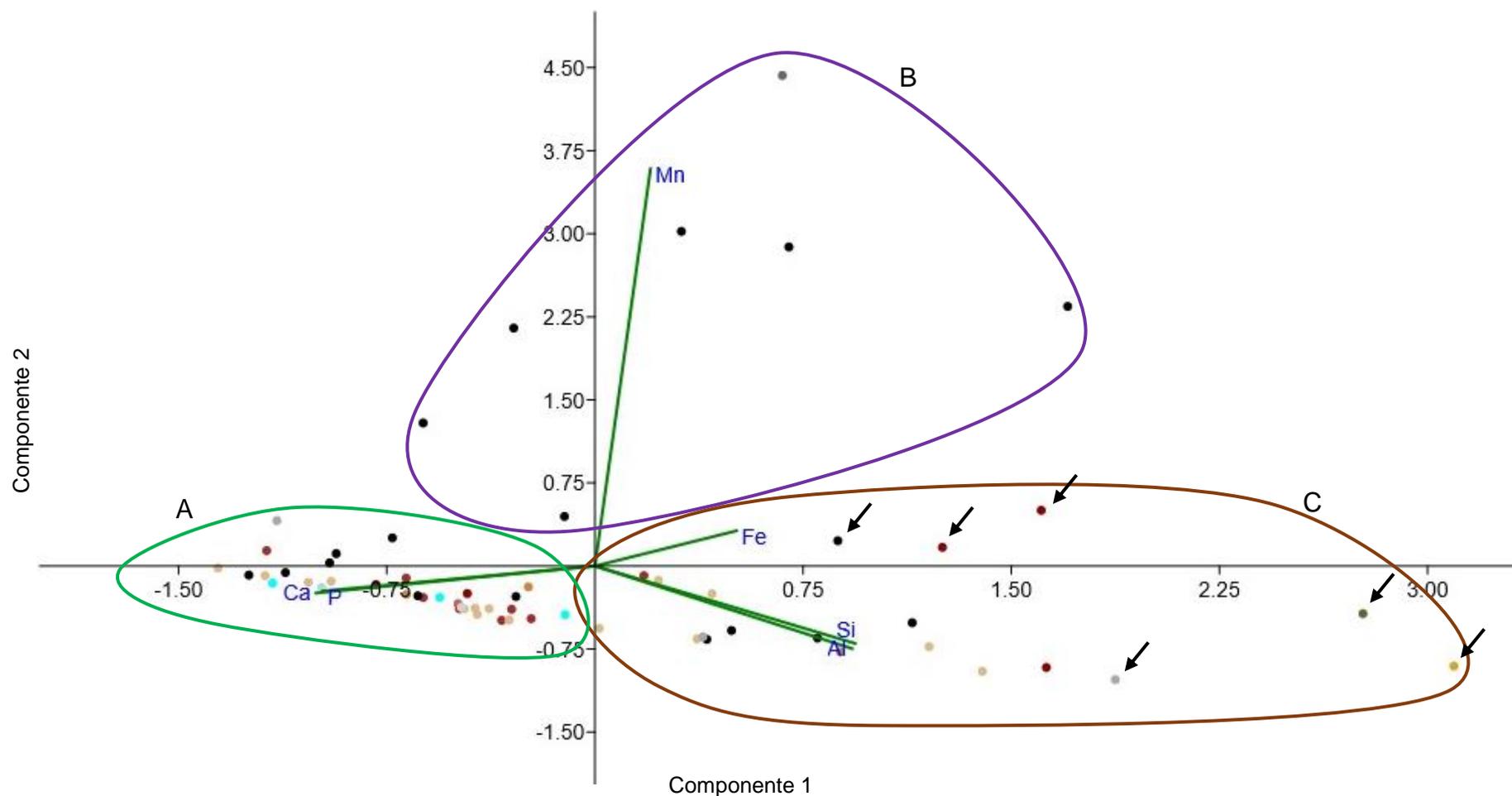


Figura 21: Distribuição da concentração de elementos majoritários (Al, Ca, Fe, Mn, P e Si) em relação a cada ponto de análise dos 31 espécimes utilizados na FRX através da PCA. A: agrupamento com os elementos Ca e P.; B: agrupamento com o elemento Mn.; e C: agrupamento com os elementos Fe, Si e Al. Pontos representam cores aproximadas da classificação de coloração de Munsell Color (2009), porém, pontos em azul claro representam a coloração branca nos fósseis. Setas indicam incrustações ferruginosas (avermelhadas) e siliciclásticas (acinzentada, esverdeada e amarelada).

#### 4.2.2 Elementos Terras Raras (ETR)

Muitas outras substâncias também foram identificadas (e.g. Potássio [K] e Bário [Ba]), contudo em um percentual muito baixo e não quantificado pelo aparelho utilizado na FRX, representadas qualitativamente na maioria das vezes (i.e. a presença do elemento na amostra). O mesmo é válido para os elementos das serie dos lantanídeos (Elementos Terras Raras - ETR): Ítrio (Y); Cério (Ce); Praseodímio (Pr); Neodímio (Nd); Samário (Sm); Európio (Eu); Térbio (Tb).

A presença de ETR em fósseis geralmente variam em concentrações entre 1 e  $10^3$  ppm ou mais, dependendo da química da água de percolação do ambiente de soterramento (TRUEMAN; TUROSS, 2002; COOK, TRUEMAN, 2009; SUAREZ et al., 2010). Assim, para serem mensurados, é necessário testes mais refinados com a utilização de equipamentos capazes de fazerem tal medição. Neste caso, apesar dos ETR da amostra estudada não serem quantificados, uma análise sucinta considerando a ausência e presença desses elementos pode contribuir na interpretação paleoambiental, visto que os elementos Terras Raras são importantes indicadores de condições ambientais na fase fossildiagenética (ver discussão).

Dos 31 espécimes analisados por FRX, 17 apresentaram a presença dos ETR. De acordo com Trueman (2007, et al., 2011), os elementos Terras Raras são classificados como leves (ETRL), de La ao Nd; médios (ETRM) de Sm ao Dy; e pesados (ETRP), de Tb para Lu. Assim, os elementos encontrados na amostra da FRX estão distribuídos entre ETRL e ETRM, porém este último ocorre em uma maior frequência representado principalmente pelo Európio (Eu; Fig. 22).

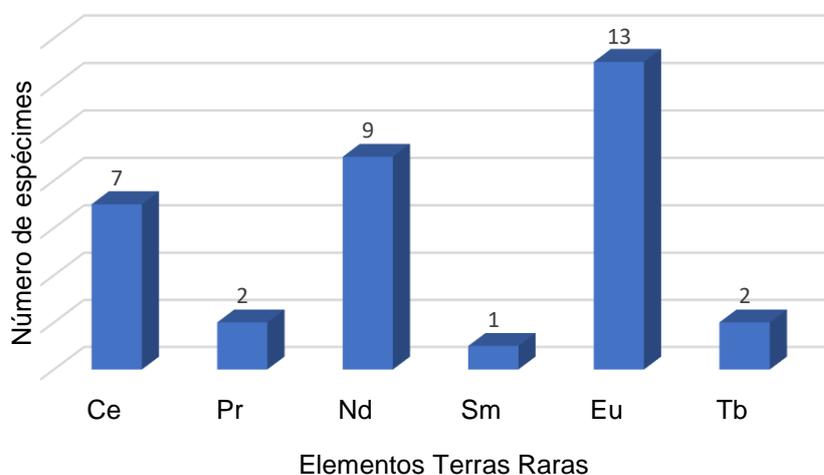


Figura 22: Gráfico da presença de ETR que ocorreram na amostra da FRX.

### 4.3 DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X

O espécime 280-V-UERN foi usado para encontrar sua principal fase mineral: a hidroxiapatita [ $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ ]. Com a posterior comparações nos demais espécimes foi observado que apesar de demonstrarem padrões de colorações superficiais distintas, todos os espécimes apresentaram picos semelhantes em relação ao diagrama da hidroxiapatita (Figs. 23 e 24).

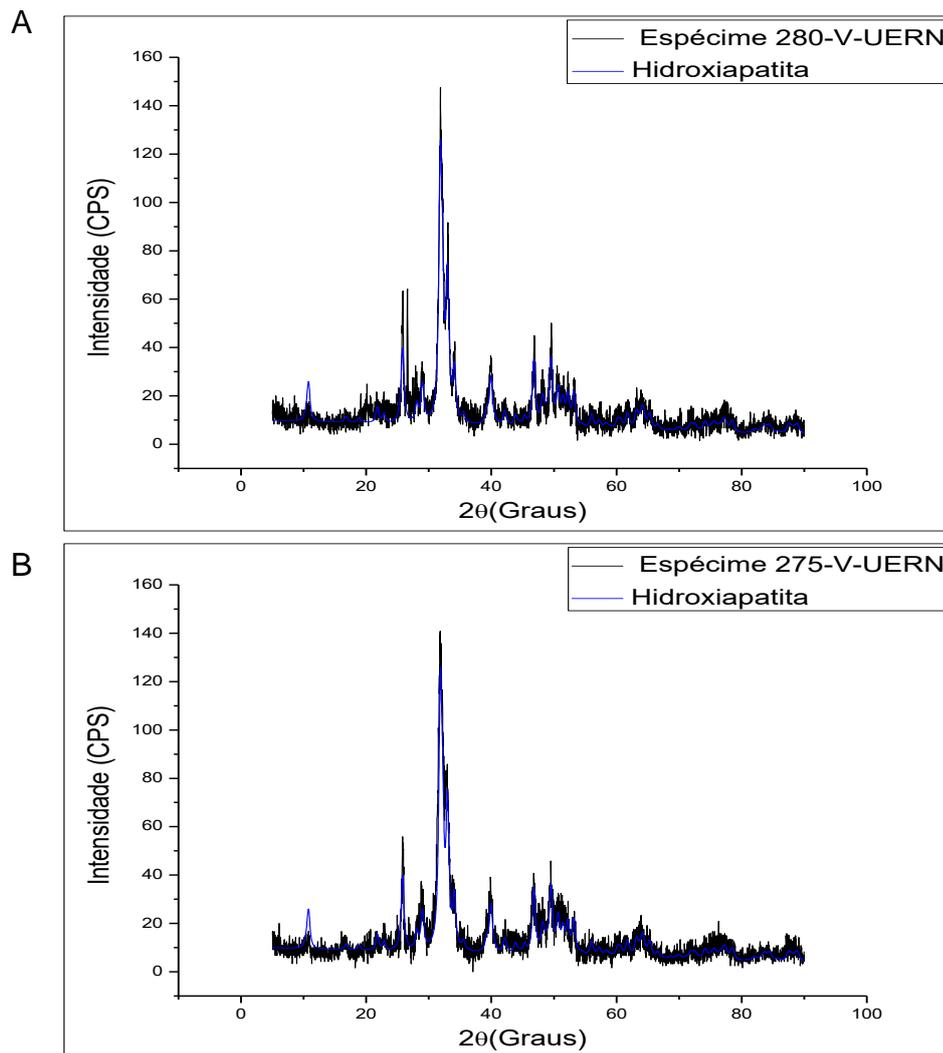


Figura 23: Resultados da análise de DRX. A e B: difratogramas gerados para os espécimes 280-V-UERN e 275-V-UERN, respectivamente, sendo sobrepostos pelo perfil da hidroxiapatita.

Ao realizar a Difração de raios-X, tendo uma quantidade majoritária de hidroxiapatita, a incidência do raio-X se torna muito maior nos planos cristalinos desse mineral (Ernani Silva, técnico do Laboratório de Análises Ópticas LAMOp/UERN, comunicação pessoal, agosto de

2017). Desta forma, não foram identificadas fases de outros componentes minerais que o fóssil pode apresentar, sendo estes considerados, pelo difratômetro, impurezas na amostra.

Os sete espécimes selecionados apresentavam padrões de variações de cores representativas dos demais espécimes (Preto acastanhado (5YR 2/1); marrom escuro avermelhado (10R 3/4); vermelho muito escuro (10R 2/2); cinza amarelado (5Y 8/1); marrom moderado (5YR 3/4); preto acinzentado (N2), laranja muito pálido (10YR 8/2) – respectivamente na figura 24). Ao obter a média dos valores da difração e posterior comparação (Fig. 24), verificou-se semelhança entre os espécimes, com apenas leves deslocamentos nos picos. Isto confirma que a hidroxiapatita está presente em uma elevada proporção nos fósseis mesmo com as diferenças de coloração.

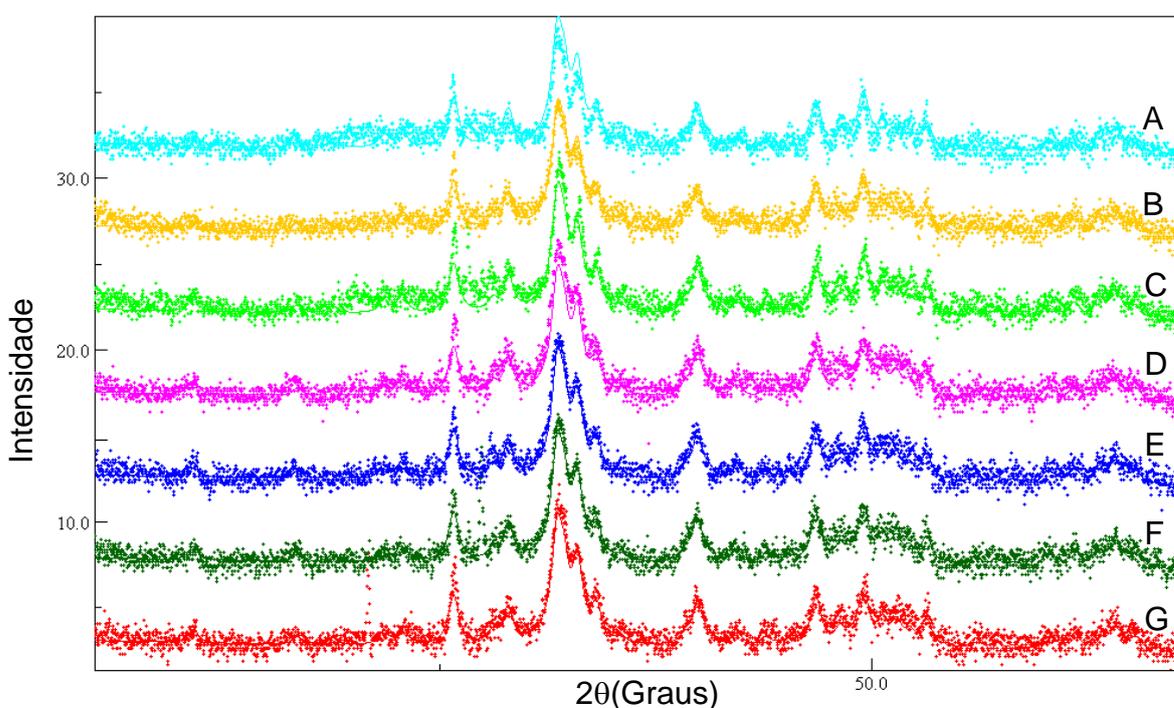


Figura 24: Média de valores obtidos nas análises de DRX. A: espécime 270-V-UERN; B: espécime 273-V-UERN; C: espécime 274-V-UERN; D: espécime 275-V-UERN; E: espécime 280-V-UERN; F: espécime 282-V-UERN; e G: espécime 283-V-UERN.

#### 4.4 OUTRAS FEIÇÕES TAFONÔMICAS

##### 4.4.1 Marcas de raízes e algas

Em grande parte dos fragmentos fósseis coletados no tanque Pau Leite foi observado a presença de bioerosões como marcas de raízes (*rooting*) e algas. Tais alterações biológicas

provocam corrosão externa e geram uma mudança de cor, tornando as áreas afetadas esbranquiçadas (MONTALVO, 2002; Fig. 25), no presente caso, como manchas ramificadas.

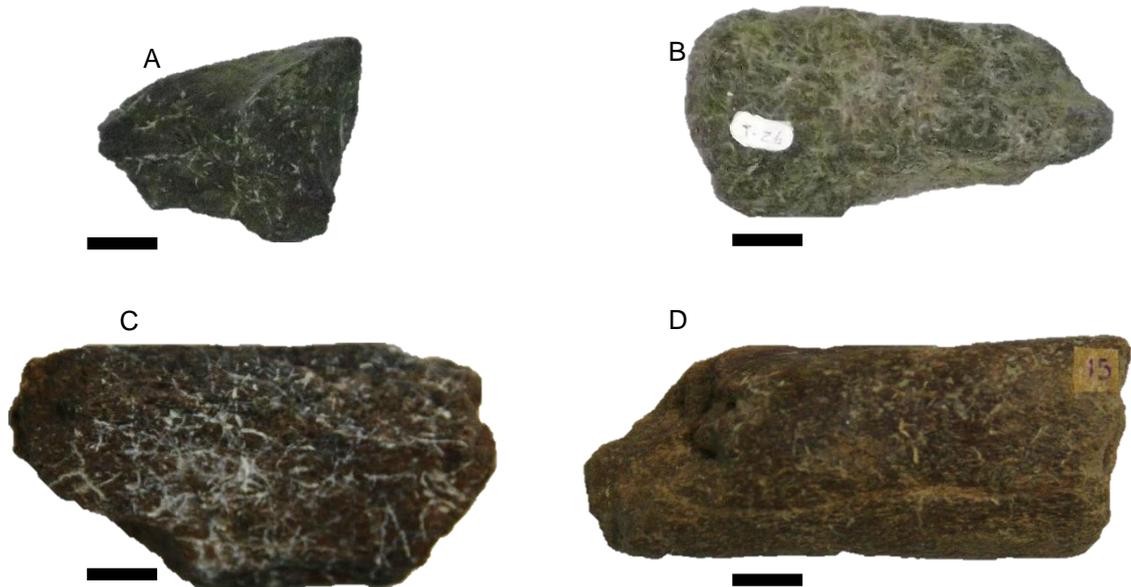


Figura 25: Exemplo de espécimes que possuem bioerosões por raízes e algas. A: espécime 273-V-UERN; B: espécime 295-V-UERN; C: espécime 314-V-UERN; e D: espécime 315-V-UERN. Escala = 2 cm.

#### 4.4.2 Branqueamento por exposição solar

A evidência de branqueamento por raios solares foi observada em fósseis que apresentam dois tons de colorações sem alterações significativas na composição química em cada coloração, de acordo com os resultados da FRX (Fig. 26).

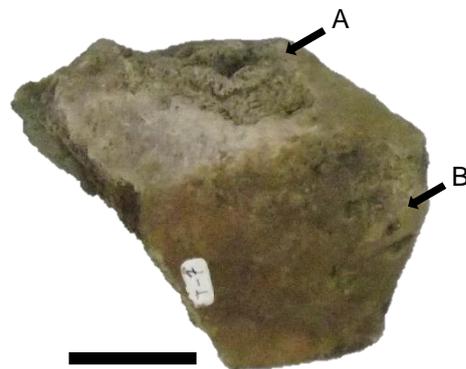


Figura 26: Exemplo de fóssil submetido ao branqueamento pela exposição aos raios solares (276-V-UERN). A: porção que sofreu incidência de raios solares; e B: porção que permaneceu soterrada. (Escala = 2cm).

## 5 DISCUSSÃO

### 5.1 PROCESSOS FOSSILDIAGENÉTICOS

É comum encontrar variações de cores e tonalidades em fósseis de um mesmo depósito de tanque (SILVA, 2001; ALVES et al., 2007; ARAÚJO-JÚNIOR et al., 2013b; ARAÚJO-JÚNIOR; PORPINO; BERGQVIST, 2015), com exceção do tanque fossilífero de Lage Grande (PE), cujos fósseis apresentam apenas a coloração preta, o que pode indicar um único evento de impregnação de minerais (ARAÚJO-JÚNIOR; PORPINO; BERGQVIST, 2013). Silva (2001) ao estudar fósseis de um tanque localizado na Fazenda do Ovo (Maravilha, AL), os classificou em quatro colorações (branca, preta, creme e amarela,) e através de lâminas petrográficas e Difração de raios-X inferiu cinco diferentes fases fossilidiagnéticas, porém, nos fósseis do TFPL, não há grandes diferenças de padrões entre a observação macroscópica das cores e as substâncias que permineralizaram ou substituíram os fósseis para os quais as lâminas delgadas foram feitas (Tabela 3).

Foi observado na amostra total dos fósseis do TFPL diferentes padrões de coloração, inclusive um mesmo fóssil apresentando variações de cores, bem como em percentual de elementos. Isso implica que a precipitação de substâncias não ocorreu de forma homogênea no mesmo espécime. Observa-se também, através do PCA, que há tonalidades avermelhadas e pretas dentro do grupo A, sendo o que possui um maior percentual de Cálcio (Ca; entre 34,6% e 63%) e Fósforo (P; entre 22,2% e 36,3%), ao mesmo tempo que possuem baixos índices de Ferro (Fe; entre 0,5% e 2,9%) e Manganês (Mn; entre 0,27% e 2,95%; ver Fig. 21 A). Isto pode indicar que uma pequena variação desses elementos seja capaz de fornecer diferenças significativas nas tonalidades. Desta forma, classificar os fósseis de acordo com a coloração, sem análises químicas (e.g. FRX), pode não ser suficiente para inferir mistura temporal ou intensidade de processos.

Grandes diferenças de concentrações de elementos foram observadas a partir da FRX (Tab. 4) e melhor visualizadas com o uso do PCA (Fig. 21). O ferro e o manganês atuam como responsáveis pelas colorações e impregnações escuras dos fósseis (Fig. 21 B e C; veja também TOMASSINI et al., 2010; 2015; ARAÚJO-JÚNIOR et al., 2013b). Porém, também foi observado fósseis que mesmo com distintas tonalidades (mais claras e escuras), não diferem na quantidade de ferro e manganês, como visto no espécime 276-V-UERN (Fig. 26; Tab. 4). Neste caso, é possível que a ocorrência do retrabalhamento provocou a exposição solar e

consequentemente o clareamento de certas partes dos fósseis, um fenômeno em que não há alteração química (SINIBALDI, 2010).

Assim, os fósseis do TFPL seguem o modelo comum encontrado nos demais depósitos de tanques fossilíferos, no que se refere à presença de diferentes padrões de coloração. Considerando que os fósseis adquirem as características do ambiente de soterramento, os vários elementos e suas diferenças de concentrações conferiram aos fósseis uma grande variação de cores e tonalidades, sugerindo momentos distintos de soterramento, de impregnação por substâncias e diferentes minerais dissolvidos (TOMASSINI et al., 2014); portanto, podem ser evidências de retrabalhamento dentro ou nas proximidades do depósito fossilífero e mistura temporal (RIBEIRO, 2010; ARAÚJO-JÚNIOR; PORPINO; BERGQVIST, 2013).

Através das lâminas delgadas foi possível notar que a preservação dos ossos do tanque natural em Taperoá se deu em diferentes estágios. O principal processo de fossilização foi a permineralização, embora haja a presença simultânea de substituição em alguns casos (espécimes 301, 309, 318, 319-V-UERN; Tabela 3). Ocorrências conjuntas de permineralização e substituição foram igualmente reportadas para tanques naturais nos estados da Ceará (ARAÚJO-JÚNIOR et al., 2013b), Pernambuco (ALVES, 2007) e Rio Grande do Norte (SANTOS et al., 2002); casos com a presença unicamente de permineralização também foram encontrados em tanques na Bahia (DANTAS; TASSO, 2007; RIBEIRO, 2010, 2014). Além disso, com observações macroscópicas e análise de FRX foi constatada a presença de incrustações ferruginosas e siliciclásticas em alguns espécimes (Tab. 3 e Fig. 21 C). Desta forma, pode-se inferir que os depósitos de tanque possuem um padrão comum de fossilização, que inclui, principalmente, a ocorrência de permineralização.

Considerando que o ferro é um dos elementos mais encontrados na crosta terrestre (TOLEDO; PEREIRA, 2001), a provável fonte do óxido de ferro dos fósseis estudados pode ser a rocha encaixante do tanque (ARAÚJO-JÚNIOR et al., 2013a, 2013b). Também é possível que o ferro seja proveniente da ação microbiana sobre o sangue dos organismos carregados para o interior do tanque. Em alguns casos, fósseis com tons variando entre preto, amarronzado, avermelhado e amarelado possuem em comum a substituição e permineralização por óxido de ferro ( $\text{FeO}_2$ ); sendo que o preenchimento por óxido de manganês ( $\text{MnO}_2$ ) foi observado apenas em fóssil com tons de preto e marrom, mas em conjunto com o  $\text{FeO}_2$  (ver o item 4.1.4).

A permineralização por siliciclásticos foi observada em fósseis com tons de preto e marrom, assim como a presença de substituição por calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), que também foi observada em um tanque de Pernambuco, indicada apenas com o uso da DRX (SILVA et al., 2010). A

presença de calcita nas lâminas 301, 309, 310, 314 e 315-V-UERN, pode ser explicada através da dissolução e precipitação do cálcio ósseo em estágios tardios da diagênese (ARAÚJO-JÚNIOR et al., 2013b), devido à instabilidade da hidroxiapatita (TRUEMAN, 2007; CASAL et al., 2017). Uma fonte alternativa seria o solo, através do intemperismo das rochas do embasamento (ARAÚJO-JÚNIOR et al., 2013a; PREVITERA, 2017).

De maneira geral, as lâminas delgadas demonstraram uma boa preservação das microestruturas ósseas, exceto pelas áreas substituídas e por pequenas fraturas em algumas lâminas (ver abaixo). Caso semelhante é observado no tanque de Jirau, no município de Itapipoca (CE), onde os fósseis não apresentaram alterações significantes no volume e morfologia, exceto os fósseis que apresentaram substituição (ARAÚJO-JÚNIOR et al., 2013b). A microestrutura óssea também está bem preservada nos fósseis do tanque de Maravilha (AL), onde também foram encontrados exemplares com preenchimento de grãos de quartzo nos espaços intertrabeculares do tecido esponjoso (SILVA, 2001).

Microfraturas foram observadas apenas nas lâminas delgadas do espécime 314-V-UERN (Fig. 14), com o posterior preenchimento de minerais opacos, pois as microfraturas podem ter favorecido a deposição de minerais adicionais no interior dos ossos (TOMASSINI et al., 2010; PFRETZSCHNER; TÜTKEN, 2011). Não há evidências de microfraturas provocadas pelo crescimento de cristais (CASAL, 2017; PREVITERA, 2017).

As microfraturas originam-se a partir de diferentes processos fossildiagnéticos. De acordo com Previtera (2017), podem ser causadas por processos de intemperismo e exposição após a fossilização (em contexto de retrabalhamento), assim como por pressão litostática após a perda das fibras de colágeno. Também podem ser causadas por condições de estresse ambiental, como explicam Pfretzschner e Tütken (2011), que com base em comparações entre rachaduras em ossos de cabras recentes e ossos de dinossauros identificaram três padrões de microfraturas gerados em ambientes seco e subaquático. No material analisado foram observadas fraturas radiais nas margens externas dos ósteons secundários (Fig. 14 A-A3), padrão que corresponde à etapa final da fossildiagnese inicial em eventos de inundação (TOMASSINI et al., 2015). Esse tipo de fratura foi descrito por diversos pesquisadores (PFRETZSCHNER; TÜTKEN, 2011; PFRETZSCHNER, 2004; TOMASSINI et al., 2015), os quais concordam que sua ocorrência está relacionada ao inchaço do colágeno ósseo provocado pela absorção da água, que promove uma tensão nas paredes mineralizadas dos ósteons secundários e, conseqüentemente, rupturas nos limites externos do ósteon, penetrando-o radialmente. Porém, também foram observadas fraturas que atravessam o córtex ósseo (Fig. 14

B-C), as quais indicam compressão litostática (PREVITERA, 2017). Desta maneira, é possível que o referido espécime tenha sido submetido a um prolongado período em ambiente subaquático em sua fase de diagênese inicial e, posteriormente, na fase de diagênese tardia, ter sido sujeito a pressão das camadas superiores de sedimentos, gerando os distintos tipos de microfraturas durante a história preservacional do fóssil observado. As demais lâminas delgadas não apresentam sinais de fraturas, sugerindo que os espécimes correspondentes não foram expostos por tempo suficiente a condições capazes de gerar tais feições. Tais diferenças entre a presença e ausência de fraturas corroboram hipóteses bioestratinômicas de trabalhos prévios realizados no tanque de Taperoá (BERGQVIST et al., 1997; ARAÚJO-JÚNIOR; PORPINO; BERGQVIST, 2017), que propõem que ossos foram depositados em seu interior por fluxos hidráulicos em distintos momentos, provocando níveis diferentes de abrasão. Nesse contexto, durante a estação chuvosa, através do fluxo de água e inundações, foram carregados mais elementos para dentro do tanque misturando-os com os que já estavam depositados, ocasionando retrabalhamento e abrasão dentro do tanque, com conseqüente mistura temporal e espacial (BERGQVIST et al., 1997; ARAÚJO-JÚNIOR; PORPINO; BERGQVIST, 2017).

No decorrer do Pleistoceno nordestino, o clima, embora apresentando fases ligeiramente úmidas, tendeu para semiárido (SILVA, 2001). Isto explica a presença de óxidos de ferro e manganês nos fósseis estudados, que sugere períodos de seca e aridez, associados a condições oxidantes e alcalinas no ambiente de preservação (TOMASSINI et al., 2010, 2014; PREVITERA et al., 2016). Durante os períodos de inundação Mg e Fe permanecem em suas formas móveis e solúveis, enquanto que durante períodos de seca e aridez esses elementos se precipitariam como óxidos (ELORZA et al., 1999; TOMASSINI et al., 2010, 2014; PREVITERA et al., 2016).

Situação similar provavelmente ocorreu na deposição de calcita (subsistindo ou permineralizando os ossos), precipitada em períodos de aridez (PREVITERA; D'ANGELO; MANCUSO, 2013). Em contrapartida, a presença do Bário (Ba), embora não encontrado entre os elementos majoritários nos espécimes estudados devido a sua raridade na crosta terrestre por apresentar baixa solubilidade, pode indicar a existência de sulfato de bário ( $BaSO_4$ ) no ambiente deposicional em condições de extrema redução, onde aumenta a solubilidade do  $BaSO_4$  devido à atividade de respiração de bactérias anaeróbicas que se utilizam de minerais contendo bário em rochas do embasamento, liberando assim, o bário de modo solubilizado (RIBEIRO, 2010). Logo, sulfetos teriam sido precipitados na superfície dos ossos em momento de ambiente redutor, como também encontrado por Silva (2001) no tanque de Maravilha (AL). A

composição química das rochas de embasamento que compõem o TFPL (rochas cálcio-alcalinas de alto-K Itaporanga; ver Fig. 3) confirma a presença do elemento traço Bário (Ba), além de também ser rico em ETR Leves (MARIANO; SOBREIRA, 1999).

Em relação ao alumínio (Al) e o silício (Si) indicados na FRX, estes podem ser produtos do intemperismo do feldspato da rocha matriz, como observado também no tanque de Lagoa do Rumo (BA; RIBEIRO, 2010, 2014), uma vez que são elementos comuns na composição mineralógica das rochas de embasamento (CASAL et al., 2017), como o granito e granodiorito constituintes do tanque de Taperoá. Adicionalmente, a presença de areias quartzosas, ricas em feldspato, no sedimento que preenche o tanque de Taperoá (BERGQVIST, 1993), também observado no tanque de Jirau (CE; ARAÚJO-JÚNIOR et al., 2013b), é a provável origem da presença de incrustações siliciclásticas e do preenchimento por minerais siliciclásticos observados nas lâminas delgadas.

Os elementos cálcio (Ca) e fósforo (P) são originários da biapatita óssea, presentes em maior quantidade nos espécimes submetidas à FRX, assim como demonstrados através da DRX a qual indicou grande presença de hidroxiapatita. Após a morte, este biomineral, um dos mais reativos e instáveis, pode ter sua estabilidade aumentada através da dissolução preferencialmente das fases mais instáveis, recristalização de fases instáveis e/ou crescimento de novas fases, buscando o equilíbrio com o meio (TRUEMAN, 2013).

Quanto à origem dos ETR observados nos fósseis da Fazenda Pau Leite, sendo a primeira vez discutidos em fósseis provenientes de tanques Pleistocênicos, deve-se considerar que são elementos que se ligam fortemente na apatita óssea (TOLEDO, 2001; COOK; TRUEMAN, 2009), indicam o período de diagênese inicial e são regidos pela água no ambiente de soterramento (TRUEMAN; TUROSS 2002; COOK; TRUEMAN, 2009; TRUEMAN et al., 2006), visto que são os primeiros elementos adquiridos pelos ossos através da água de percolação que obtém o elemento da rocha matriz (ver item 3.1), herdando também a composição química dos sedimentos envolventes (TRUEMAN, 2013). Desta forma, as implicações sobre as microfraturas em período úmido concordam com as inferências sobre a presença dos ETR, uma vez que são elementos que refletem a associação de fósseis com a água (SUAREZ et al., 2010). Pode-se também inferir que os fósseis sem a presença dos elementos Terras Raras podem apresentar ETR Pesados, os quais são muito mais difíceis de serem detectados por serem os íons mais enfraquecidos, sendo estes espécimes mais antigos do que aqueles que apresentam ETR Leves e Médios (TRUEMAN et al., 2011). Desta forma, pode-se afirmar que a presença dos ETR contribui para indicar a ocorrência de mistura temporal.

Estudos bioestratigráficos prévios realizados no tanque estudado corroboram com tal hipótese (ARAÚJO-JÚNIOR et al., 2011; ARAÚJO-JÚNIOR; PORPINO; BERGQVIST, 2017).

Adicionalmente, a presença de marcas de raízes (feições fossildiagnéticas) e algas que indicam eventos de inundações (feições bioestratigráficas), observadas nos fragmentos estudados no presente trabalho (Fig. 25), pode indicar exposição antes do soterramento e condições onde houve o crescimento de plantas (ARAÚJO-JÚNIOR et al., 2013b).

## 5.2 HISTÓRIA FOSSILDIAGENÉTICA DO DEPÓSITO DO TANQUE DE TAPEROÁ

Em resumo, a história preservacional do depósito do tanque de Taperoá (Fig. 27 e 28) se dá em períodos de sazonalidade, ou seja, momentos chuvosos e momentos secos. No primeiro (Fig. 27), ossos em diagênese tardia foram retrabalhados com ossos em diagênese inicial através de um fluxo de alta energia, o que provoca mistura temporal. Uma vez submetidos a um ambiente subaquático, o sulfato de bário ( $\text{BaSO}_4$ ) foi precipitado nos fósseis através de atividades bacterianas que utilizam o bário proveniente das rochas de embasamento, as quais também liberam outros íons, como ferro, manganês, alumínio e sílica, através do processo de intemperismo da rocha. Nos ossos com diagênese inicial, também ocorreu a precipitação dos ETR e alguns sofreram fraturas nas margens externas dos ósteons devido a absorção de água.

### 1) Evento de inundação (fase chuvosa)

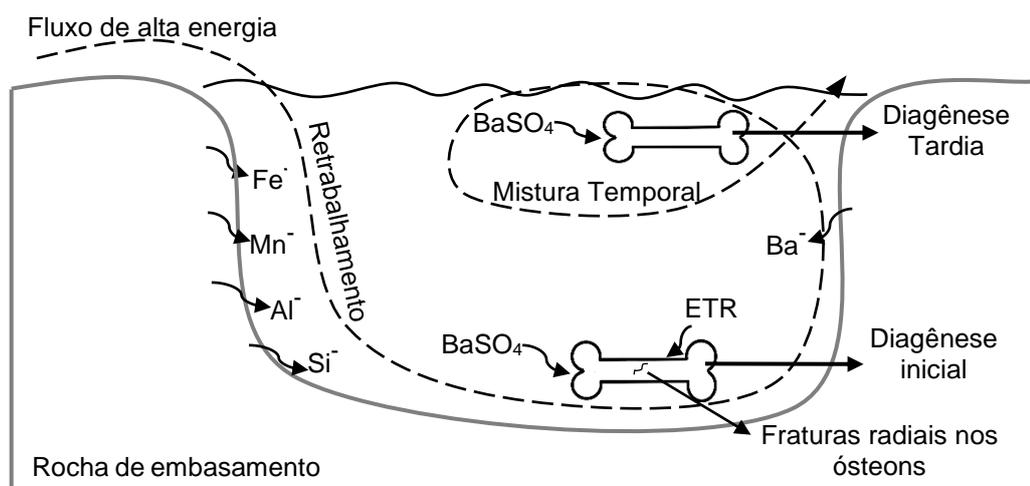


Figura 27: Diagrama esquemático resumindo os processos da história fossildiagnética observados nos fósseis coletados no TFPL na fase chuvosa.

Já em períodos secos (Fig. 28), óxidos de ferro e manganês precipitaram, substituindo a composição original do osso e preenchendo cavidades e fraturas (permineralização). Além de minerais siliciclasticos e calcita que foi provavelmente precipitada a partir do próprio osso. Adicionalmente, alguns ossos, que ficaram submetidos a exposição solar, sofreram branqueamento.

É possível que alguns ossos com diagênese tardia tenham sofrido microfaturas por compressão litostática, que pode ocorrer em diferentes eventos de inundação ou estiagem.

## 2) Ambiente seco (fase de estiagem)

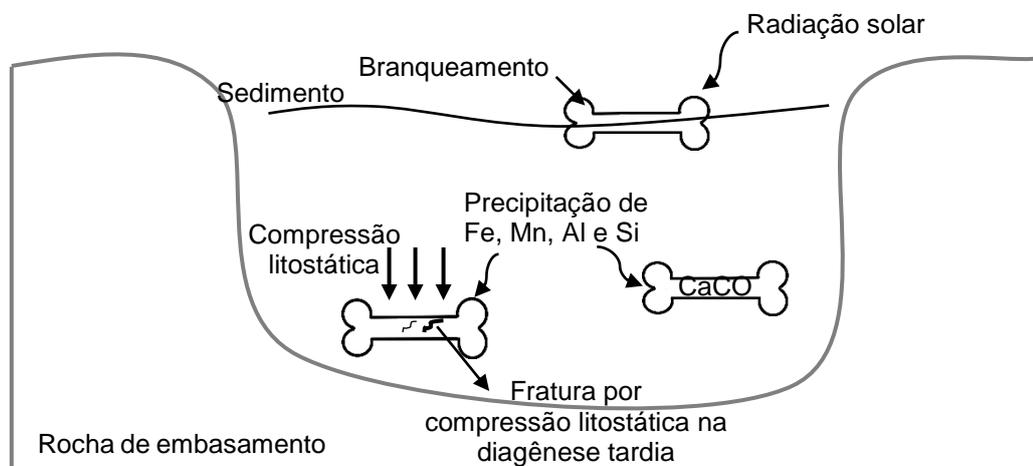


Figura 28: Diagrama esquemático resumindo os processos da história fossilidiagênética observados nos fósseis coletados no TFPL na fase de estiagem.

## 5.2 PERSPECTIVAS FUTURAS

É possível observar que, na faixa de sedimentos onde foi coletado os fósseis para este trabalho, há muito material com alto grau de fragmentação, em contrapartida, os relatos do trabalho feito pela equipe de Paula Couto aborda a presença de ossos completos e bem preservados (ver item 1.2.1; BERGQVIST, 1993). Com tal disparidade de informações, é importante novos estudos sobre a origem da acumulação fossilífera TFPL com estudos bioestratigráficos do material *in situ*.

A observação da presença dos ETR nos fósseis do TFPL provou-se importante para a interpretação paleoambiental, desta maneira, futuramente será realizada uma análise mais detalhada utilizando métodos capazes de detectar a variação das proporções desses elementos nos fósseis e um maior esclarecimento das características paleoambientais e sedimentares no ambiente de soterramento.

## 6 CONCLUSÕES

Os fósseis incorporaram informações de diferentes condições ambientais pelas quais passou o depósito fossilífero. De circunstâncias oxidantes a redutoras, úmidas a secas, causando diferenças diagenéticas; tudo isso se tornam evidências da mistura temporal e retrabalhamento, pois os ossos sofreram mineralização e impregnação de substâncias em diferentes momentos, condições comuns em depósito de tanque.

As informações paleoambientais discutidas mostram que o clima variou durante a história preservacional do depósito fossilífero da Fazenda Pau Leite (anteriormente mencionada como Campo Alegre) conferindo aos fósseis diferenças diagenéticas, onde muitas vezes um mesmo exemplar mostra associações de substâncias que precipitam em condições ambientais distintas, o que se sugere cautela em identificar o nível de alteração fossilodiagenética dos fósseis apenas de acordo com a coloração; além disso, a radiação solar tem o potencial de clarear os fósseis sem alterar a composição química. Porém, observou-se que fósseis ricos em manganês apresentam a coloração com tons fortes de preto, enquanto que fósseis ricos em ferro, tonalidades de marrom e vermelho. Adicionalmente, a análise dos ETR mostrou-se importante estudo complementar para o entendimento paleoambiental e o ambiente inicial de soterramento.

Desta maneira o sítio paleontológico da Fazenda Pau Leite é um caso típico de associação de bioclastos em diferentes momentos de preservação, ou seja, mistura temporal (*time averaging*) e de retrabalhamento dentro e/ou fora do tanque, embora os fósseis ainda preservem a microestrutura e biomineral originais mesmo com casos de substituição.

## REFERÊNCIAS

ALVES, R. S.; BARRETO, A. M. F.; BORGES, L. E. P.; FARIAS, C. C. Aspectos tafonômicos no depósito de mamíferos pleistocênicos de Brejo da Madre de Deus, Pernambuco. **Estudos Geológicos**, v. 17, n. 2, 2007.

ARAÚJO-JÚNIOR, H. I.; BISSARO-JÚNIOR, M. C. Tafonomia de vertebrados em ambientes continentais. In: HORODYSKI, R. S.; ERTHAL, F. (Orgs.). **Tafonomia: métodos, processos e aplicação**. Curitiba: CRV, 2017, p. 175-236.

ARAÚJO JÚNIOR, H. I.; DOMINATO, V. H.; BERTONI-MACHADO, C.; AVILLA, L. S. Taphonomic aspects of the Pleistocene vertebrate assemblage of Itaboraí, State of Rio de Janeiro, Southeastern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, n. 46, p. 26-34, 2013a.

ARAÚJO-JÚNIOR, H. I. Classifying vertebrate assemblages preserved in Quaternary tank deposits: Implications for vertebrate taphonomy and paleoecology. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 445, p. 147-152, 2016.

\_\_\_\_\_. **Modelo tafonômico para vertebrados de depósitos de tanque do Nordeste do Brasil**. Tese. (Doutorado em Geologia)-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **Tafonomia da acumulação fossilífera de vertebrados pleistocênicos do Tanque do Jirau, Itapipoca, Estado do Ceará, Brasil**. Dissertação (Mestrado em Geologia)-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

ARAÚJO-JÚNIOR, H. I.; MOURA, G. J. B. Anuros (Amphibia, Anura) do Pleistoceno final-Holoceno inicial de Itapipoca, Estado do Ceará, Brasil: taxonomia, paleoecologia e tafonomia. **Revista Brasileira de Paleontologia**, v. 17, p. 373-388, 2014.

ARAÚJO-JÚNIOR, H. I.; PORPINO, K. O.; BERGQVIST, L. P. Origin of bonebeds in Quaternary tank deposits. **Journal of South American Earth Sciences**, n. 76, p. 257-263, 2017.

\_\_\_\_\_. Taphonomic analysis of a late Pleistocene vertebrate accumulation from Lage Grande Paleontological Site, Pernambuco State, northeastern Brazil: New remarks on preservational aspects of tank deposits., **Quaternary International**, p. 1-14, 2013.

\_\_\_\_\_. Vertebrate taphonomy and paleoecology in an Upper Pleistocene tank deposit of Paraíba, Brazil: Taphonomic modes, evidence of temporal and spatial resolutions and paleoecological patterns of the Brazilian Intertropical Region. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 437, p. 1-17, 2015.

ARAÚJO-JÚNIOR, H. I.; PORPINO, K. O.; BERGQVIST, L. P.; AVILLA, L. S. Nova ocorrência de mamíferos do Quaternário nos Tanques de Taperoá (Paraíba) e Alagoinha (Pernambuco), Nordeste do Brasil: Implicações paleoambientais. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, vol. 40, n. 1, p. 37-46, 2017.

ARAÚJO-JÚNIOR, H. I.; PORPINO, K. O.; XIMENES C. L.; BERGQVIST, L. P. Unveiling the taphonomy of elusive natural tank deposits: A study case in the Pleistocene of northeastern Brazil. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**. n. 378, p. 52–74, 2013b.

\_\_\_\_\_. Análise multivariada como ferramenta tafonômica no estudo das associações quaternárias de mamíferos do Nordeste do Brasil. **Gaea - Journal of Geoscience**, v. 7, n. 2, p. 104-111, 2011.

BEHRENSMEYER, A. K. Taphonomic and ecologic information from bone weathering. **Paleobiology**, v. 4, n. 2, p.150-162, 1978.

BEHRENSMEYER, A. K.; KIDWELL, S.M. Taphonomy's contributions to Paleobiology. **Paleobiology**, v. 11, p. 105-119, 1985.

BERGQVIST, L. P. Jazimentos pleistocênicos do Estado da Paraíba e seus fósseis. **Revista Nordestina de Biologia**, v. 8, n. 2, p. 143-158, 1993.

\_\_\_\_\_. **Mamíferos pleistocênicos do Estado da Paraíba, Brasil, depositados no Museu Nacional, Rio de Janeiro**. 1989. Dissertação. (Mestrado em Zoologia)-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1989.

BERGQVIST, L. P.; GOMIDE, M.; CARTELLE, C.; CAPILLA, R. Faunas-locais de mamíferos pleistocênicos de Itapipoca/Ceará, Taperoá/Paraíba e Campina Grande/Paraíba. Estudo comparativo, bioestratinômico e paleoambiental. **Geociências**, v. 2, n. 6, p. 23-32. 1997.

BRANCO, P. M. **Guia de redação para a área de geociências**. Oficina de Textos: São Paulo. p. 68, 2014.

CASAL, G. A., NILLNI, A. M., VALE, M. N., SVOBODA, E. G., TIEDEMANN, C. Permineralización em restos de dinosaurios preservados em depósitos de desbordamento de la Formación Bajo Boreal (Cretácico Superior), Patagonia central, Argentina. **Revista mexicana de Ciências Geológicas**, vol. 34 n.1, 2017.

CASSAB, R. C. T. Histórico das pesquisas paleontológicas no Brasil. In: CARVALHO, I. de S. (Org). **Paleontologia: conceitos e métodos**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. p. 13-18.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Geologia e Recursos Minerais do Estado da Paraíba**. SANTOS, E. J. FERREIRA, C. A.; SILVA-JÚNIOR, J. M. F. (Org). Recife, 2002.

\_\_\_\_\_. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea: diagnóstico do município de Taperoá, Paraíba**. MASCARENHAS, J. C.; BELTRÃO, B. A.; SOUZA-JÚNIOR, L. C.; MORAIS, F.; MENDES, V. A.; MIRANDA, J. L. F. (Org). CPRM/PRODEEM, Recife, 2005.

COOK, E.; TRUEMAN, C. Taphonomy and geochemistry of a vertebrate microremains assemblage from the Early Triassic karst deposits at Czatkowice 1, southern Poland. **Palaeontologia Polonica** n. 65, p. 17–30, 2009.

DANTAS, M. A. T. Paleomastozoologia Sergipana: as descobertas em Sítios Novos, Canhoba. **Revista de Geologia**, vol. 21, nº 2, p. 159-168, 2008.

DANTAS, M. A. T.; PORPINO, K. O.; BAUERMANN, S. G.; PRATA, A. P. N.; COZZUOL, M. A.; KINOSHITA, A.; BARBOSA, J. H. O.; BAFFA, O. Megafauna do pleistoceno superior de Sergipe, Brasil: registros taxonômicos e cronológicos. **Revista Brasileira de Paleontologia**, v. 14, n. 3, p. 311-320, 2011.

DANTAS, M. A. T.; TASSO, M. A. L. Megafauna do Pleistoceno final de Vitória da Conquista, Bahia: taxonomia e aspectos tafonômicos. **Scientia Plena**, v.3, n.3, p.30-36, 2007.

DANTAS, M. A. T.; ZUCON, M. H.; RIBEIRO, A. M. Megafauna pleistocênica da Fazenda Elefante, Gararu, Sergipe, Brasil. **Geociências**, São Paulo, v. 24, n.3, p. 277-287, 2005.

DAUPHIN, Y.; NESPOULET, R.; STOETZEL, E.; HAJRAOUI, M. A. EL.; DENYS, C. Can colour be used as a proxy for paleoenvironmental reconstructions based on archaeological bones? El Harhoura 2 (Morocco) case study. **Journal of Taphonomy**, v. 10, n. 2, 2012.

ELORZA, J.; ASTIBIA, H.; MURELAGA, X.; PEREDA-SUBERBIOLA, X. Francolite as a diagenetic mineral in dinosaur and other Upper Cretaceous reptile bones (Laño, Iberian Peninsula): microstructural, petrological and geochemical features. **Cretaceous Research**, v. 20, n.2, p. 169-187, 1999.

FERNANDES, A. C. S.; XIMENES, C. L.; ANTUNES, M. T. Na Ribeira do Acaraú: João Batista de Azevedo Coutinho de Montaury e a descoberta documentada de megafauna no Ceará em 1784. **Filosofia e História da Biologia**, v. 8, n. 1, p. 21-37, 2013.

HAMMER, Ø; HARPER, D. A.T. Introduction to multivariate data analysis. In: \_\_\_\_\_. **Paleontological Data Analysis**. 1. ed. Wiley-Blackwell, 2006. Cap. 3.

HAMMER, Ø; HARPER, D. A.T.; RYAN, P. D. PAST: Paleontological Statistics software package for education and data analysis. **Palaeontologia Electronica**, v. 4, n. 1, p. 1-9, 2001

HOLZ, M; SIMÕES, M. G. **Elementos fundamentais de tafonomia**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2002.

JOLLIFFE, I. T.; CADIMA, J. Principal component analysis: a review and recente developments. **Royal Society**, v. 374, p. 1-15, 2016.

KOHN, M. J. Models of diffusion-limited uptake of trace elements in fossils and rates of fossilization. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, n. 72, p. 3758–3770, 2008.

MAGALHÃES, R. M.; MELO, M. G. S.; BERGQVIST, L. P. Cérvidas pleistocênicos da Região Nordeste brasileira. **Academia Brasileira de Ciências**, v. 64, n. 2, p. 149-154, 1991.

MALDONADO, V; MONTEIRO, L. G. P.; ROTTI, A.; PEREIRA, C.; ARAÚJO-JÚNIOR, H. I.; AVILLA, L. S. Taphonomic aspects of deer (mammalia, cetartiodactyla, cervidae) remains from a Quaternary cave deposit in Northern Brazil. **Journal of Sedimentary Environments**, Rio de Janeiro, v.1, n.2, p. 234-248, 2016.

MARIANO, G; SOBREIRA, M. N. M. O Batolito Calcio-Alcalino de Alto- K da Serra da Lagoinha, estados do Ceará e Paraíba: coexistência e mistura de magmas dioríticos com magmas quartzo monzoníticos a graníticos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 29, n. 3, p. 319-326, 1999.

MAYOR-RODRIGUEZ, J. A. **Génesis de Cavidades Graníticas en Ambientes Endógenos y Exógenos**. Tese (Doutorado em Geologia)-Universidad de Coruña, Corunã, 2011.

MEDEIROS, M.A. Fossildiagênese. *In*: CARVALHO, I.S. (ed.) **Paleontologia: Conceitos e Métodos**. Ed. Interciência, Rio de Janeiro, 2010. p. 65-78.

MONTALVO, C.I. Root traces in fossil bones from the Huayquerian (Late Miocene) faunal assemblage of Telén, La Pampa, Argentina. **Acta Geologica Hispanica**, v. 37, n. 1, p. 37-42, 2002.

MUNSELL COLOR. **Geological rock-color chart**. Geological Society of America (GSA), 2009.

PAULA-COUTO, C. Explorações paleontológicas no Pleistoceno do Nordeste. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 34, p.19–20, 1962.

\_\_\_\_\_. Fossil Pleistocene to sub-recent mammals from northeastern Brazil. I-Edentata Megalonychidae. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 52, n. 1, p. 143-151, 1980.

\_\_\_\_\_. **Paleontologia Brasileira: Mamíferos**. Rio de Janeiro: Instituto Nacional do Livro, 1953.

PFRETZSCHNER, H. U. Fossilization of Haversian bone in aquatic environments: **Comptes Rendus Palevol**, v. 3, n. 6-7, p. 605-616, 2004.

PFRETZSCHNER, H. U.; TÛTKEN, T. Rolling bones: Taphonomy of Jurassic dinosaur bones inferred from diagenetic microcracks and mineral infillings. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 310, n.1-2, p. 117-123, 2011.

PORPINO, K. O.; BERGQVIST, L. P. Novos achados de *Panochthus* (Mammalia, Cingulata, Glyptodontoida) no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Paleontologia**, v.4, p. 51-62, 2002.

PORPINO, K. O.; SANTOS, M. F. C. F.; Estudo de mamíferos pleistocênicos do Nordeste do Brasil e a necessidade de abordagens complementares: um exemplo potiguar. **Revista de Geologia**, v. 15, p. 17-21, 2002.

PORPINO, K. O.; SANTOS-JUNIOR, V.; SANTOS, M. F. C. F. Lajedo de Soledade, Apodi, RN: Ocorrência peculiar de megafauna fóssil quaternária no nordeste do Brasil. In: BERGQVIST, L. P.; MANSUR, K. L.; RODRIGUES, M. A.; RODRIGUES-FRANCISCO, B. H.; PEREZ, R. A.; BELTRAO, M. C. M. C. (Org.). **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**, Brasília: SIGEP/CPRM, 2009. v. 2, p. 403-412.

PORPINO, K. O.; FERNICOLA, J. C.; CRUZ, L. E.; BERGQVIST, L. P. The Intertropical Brazilian species of *Panochthus* (Xenarthra, Cingulata, Glyptodontoidea): a reappraisal of their taxonomy and phylogenetic affinities. **Journal of Vertebrate Paleontology**, v. 34, n. 5, p.1165–1179, 2014.

PREVITERA, E. Bone microstructure and diagenesis of saurischian dinosaurs from the Upper Cretaceous (Neuquén Group), Argentina. **Andean Geology**, v. 44, n. 1, p. 39-58, 2017.

PREVITERA, E.; D'ANGELO, J. A.; MANCUSO, A. C. Preliminary chemometric study of bone diagenesis in Early Triassic cynodonts from Mendoza, Argentina. **Ameghiniana**, v. 50, p. 460-468, 2013.

PREVITERA, E.; MANCUSO, A. C.; FUENTE, M. S.; SÁNCHEZ, E. S. Diagenetic analysis of tetrapod from the Upper Triassic, Puesto Viejo Group, Argentina. **Andean Geology**, v. 43, v. 2, p. 197-214, 2016.

RIBEIRO, R. C. **Aspectos tafonômicos dos fósseis da Megafauna do Quaternário Tardio da Lagoa do Rumo, Baixa Grande, Bahia**. Dissertação. (Mestrado em Geologia)-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **Assembleia fossilífera do Quaternário Tardio de Lagoa do Rumo, Baixa Grande, Bahia: Tafonomia e Geocronologia**. Tese. (Doutorado em Geologia)-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

SANTOS-JÚNIOR, V.; PORPINO, K. O.; SILVA, A. S. N. F.; A Megafauna Extinta e os Artefatos Culturais de um Tanque Natural na Região Central do Rio Grande do Norte. **Contexto**, v.3, n.3, p. 176-193, 2008.

SANTOS, M. F. C. F.; BERGQVIST, L. P.; LIMA-FILHO, F. P.; PEREIRA, M. M. V. Feições tafonômicas observadas em fósseis pleistocênicos do Rio Grande do Norte. **Revista de Geologia**, v. 15, n. 3, 2002.

SCHERER, C. S.; PALES, L. F. M.; ROSA, M.; SILVA, S. A. Chronological, taphonomical, and paleoenvironmental aspects of a Late Pleistocene mammalian fauna from Guanambi, Bahia, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 79, p. 95-110, 2017.

SHIMADZU CORPORATION. **Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer EDX-7000/EDX-8000 2013**. Japão, p.1-24, 2013. Disponível em: <[http://www.shimadzu.com/an/elemental/edxrf/edx7000\\_8000](http://www.shimadzu.com/an/elemental/edxrf/edx7000_8000)>. Data de acesso: 18 de maio de 2017.

SILVA, F. M.; FILGUEIRA, C. F. C.; BARRETO, A. M. F.; OLIVEIRA, E. V. Mamíferos do Pleistoceno Superior de Afrânio, Pernambuco, nordeste do Brasil. **Quaternary and Environmental Geosciences**, v. 2, n. 2, p. 01-11, 2010.

SILVA, J. L. L. **Tafonomia em mamíferos pleistocênicos: caso da planície colúvio – aluvionar de Maravilha – AL**. Dissertação (Mestrado em Geociências)-Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2001.

SIMPSON, G.G.; PAULA COUTO, C. The Mastodonts of Brazil. **Bulletin of American Museum of Natural History**, v. 112, n. 2, p. 1-65, 1957.

SINIBALDI, R. W. Natural Alterations to Fossils. In: \_\_\_\_\_. (Org). **What you fossils can tell you: Vertebrate, Morphology, Pathology, and cultural Modification**. Florida: University Press of Florida, 2010. Cap. 4.

SOUSA-FILHO, F. E. **Aplicação de técnicas físicas na paleontologia: um estudo de fósseis da Formação Ipubi – Bacia Sedimentar do Araripe**. Tese (Doutorado)-Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2011.

SUAREZ, C.A.; MACPHERSON, G.L.; GONZÁLEZ, L. A.; GRANDSTAF, D. E. Heterogeneous rare earth element (REE) patterns and concentrations in a fossil bone: Implications for the use of REE in vertebrate taphonomy and fossilization history. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 74, n. 10, p. 2970–2988, 2010.

TOLEDO, M. C. M.; PEREIRA, V. P. A variabilidade de composição da apatita associada a carbonatitos. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 22, n. 1/2, p. 27-64, 2001.

TOMASSINI, R. L.; MIÑO-BOILINI, Á. R.; ZURITA, A. E.; MONTALVO, C. L.; CESARETTI, N. Modificaciones fosildiagnéticas en *Toxodon platensis* Owen, 1837

(Notoungulata, Toxodontidae) del Pleistoceno Tardío de la provincia de Corrientes, Argentina. **Revista Mexicana de Ciências Geológicas**, v. 32, n. 2, p. 283-292, 2015.

TOMASSINI, R. L.; MONTALVO, C.; MANERA, T.; VISCONTI, G. Mineralogy, Geochemistry and paleohistology of Pliocene mammals from the Monte Hermoso Formation (Argentina). *Paedotherium bonaerense* (notoungulata, hegetotheriidae) as a case study. **Ameghiniana**, Buenos Aires, v. 51, n.5, p. 385-395, 2014.

TOMASSINI, R. L.; MONTALVO, C.; MANERA; OLIVA, C. Estudio tafonómico de los mamíferos pleistocenos del yacimiento de Playa del Barco (Pehuen Co), provincia de Buenos Aires, Argentina. **Ameghiniana**, Buenos Aires, v. 47, n. 2, p. 137-152., 2010.

TRUEMAN, C. N. Chemical taphonomy of biomineralized tissues. **Palaeontology**, v. 56, n.3, p, 1-12, 2013.

\_\_\_\_\_. Geochemistry. In. ROGERS, R. R; Eberth, D. A; Fiorillo, T. R. (Eds). **Bonebeds: genesis, analisis and paleobiological significance**. 2007.

\_\_\_\_\_. Rare Earth Element Geochemistry and Taphonomy of Terrestrial Vertebrate Assemblages. **Palaios**, v. 14, p. 555–568, 1999.

TRUEMAN, C. N.; BEHRENSMEYER, A. K.; POTTS, R.; TUROSS, N. High-resolution records of location and stratigraphic provenance from the rare earth element composition of fossil bones. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 70, n. 17, p. 4343–4355, 2006.

TRUEMAN, C. N.; KOCSIS, L.; PALMER, M.; DEWDNEY, C. Fractionation of rare earth elements within bone mineral: A natural cation exchange system. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 310, n.1-2, p. 124–132, 2011.

TRUEMAN, C. N.; TUROSS, N. Trace Elements in Recent and Fossil Bone Apatite. In. KOHN, M. L., RAKOVAN, J., HUGHES, J. M. (Ed). **Phosphates: Geochemical, Geobiological and Materials Importance**. Washington, D.C.: Mineralogical Society of America, 2002. p. 489-591.

WALDHERR, F. R.; ARAÚJO-JÚNIOR, H. I.; RODRIGUES, S. W. O. Origem e morfologia dos tanques naturais do Nordeste do Brasil. **Pesquisas em Geociências**, v. 44, n. 3, p. 467-488, 2017.

XIMENES, C.L. Tanques Fossilíferos de Itapipoca, CE: Bebedouros e cemitérios de megafauna pré-histórica. In: WINGE, M., SCHOBENHAUS, C., SOUZA, C.R.G., FERNANDES, A.C.S., BERBERT-BORN, M., QUEIROZ, E.T., CAMPOS, D.A. (Org.). **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil: SIGEP – Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos**, Brasília, p. 465–478, 2009.

ZAZZO, A.; LECUYER, C.; SHEPPARD, S. M. F.; GRANDJEAN, P.; MARIOTTI, A. Diagenesis and the reconstruction of paleoenvironments: A method to restore original  $\delta^{18}\text{O}$  values of carbonate and phosphate from fossil tooth enamel. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 68, n. 10, p. 2245–2258, 2004.