PALEOHISTOLOGIA DOS TETRÁPODES DE IBIRÁ COMO BASE PARA A RECONSTRUÇÃO PALEOAMBIENTAL E DIAGENÉTICA

Palavras-Chave: Paleohistologia, Arcossauros, Tafonomia

Autores(as):

BEATRIZ ABAD GOBBO, IG - UNICAMP

Prof(a).Dr(a). FRESIA RICARDI TORRES BRANCO, IG – UNICAMP

MCS. VINÍCIUS JOSÉ MARÓSTICA PAIO

INTRODUÇÃO:

Esta pesquisa teve como objetivo contribuir para a interpretação paleohistológica e tafonômica de fósseis de Tetrápodes, coletados no município de Ibirá, estado de São Paulo por meio de análises de lâminas petrográficas, objetivando descrever a histologia óssea desses animais, bem como descobrir informações acerca da preservação em seus tecidos.

A importância do tema se apresenta principalmente por se tratar de interpretações histológicas e paleohistológicas, que visam compreender as estruturas microscópicas dos tecidos biológicos e como se preservaram. Essa técnica é utilizada para estimar a idade em tetrápodes com base nas estruturas dos tecidos como os anéis de crescimento e remodelamento ósseo (De Brufrénil et al., 2021). Neste caso, a técnica utilizada é a da paleohistologia, que se serve destes conceitos em pesquisas acerca de vertebrados fósseis, para que seja possível estimar sua fisiologia, ontogenia, esqueletocronologia, e em alguns casos, patologia.

METODOLOGIA:

Os fósseis foram coletados pela equipe do Museu de Paleontologia Pedro Candolo (MPPC), Uchoa, SP, município Ibirá, SP, Formação São José do Rio Preto (Cretáceo), bacia Bauru. Os fósseis estudados compreendem (Figura 1 e Tabela 1) fragmento terminal de costela de saurópode ou terópode (MPPC-01-046), costela de saurópode (MPPC-01-161), osso longo de terópode (MPPC-01-054A) e coprólito (MPPC-01-097)

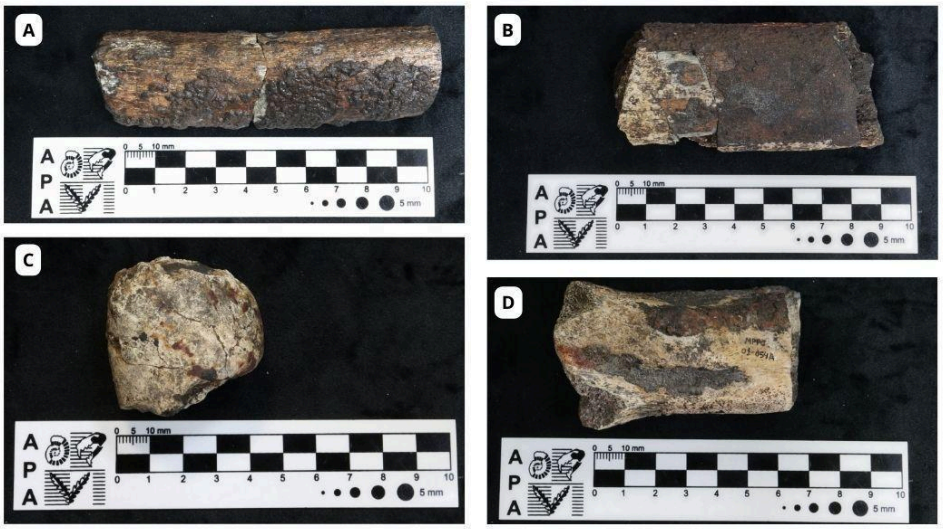

Figura 1. Fósseis estudados, Ibirá, SP, Formação São José do Rio Preto. A. Costela (MPPC-01-161); B. Costela (MPPC-01-046); Coprólito (MPPC-01-097); D. Osso longo (MPPC-01-054). Escalas em cm

Identificação	Comprimento	Espessura	Largura	Diâmetro
Coprólito	\	\	\	4,4cm
Fragmento terminal Costela de Saurópode ou Terópode	9,9cm (dorsoventral) e 10,5cm (lateromedial)	2cm	3,1cm	\
Costela de Saurópode	7,3cm (dorsoventral) e 8,8cm (lateromedial)	3cm	4,2cm	\
Osso Longo de possível Terópode	6,5cm	3,6cm	4,5cm	\

Tabela 1. Dados das dimensões dos fósseis (comprimento, espessura, largura e diâmetro)

Para realizar as análises petrográficas os fósseis foram embebidos em resina paraloide, e enviados ao laboratório para que pudessem ser laminados sem serem comprometidos seguindo a técnica descrita por Lamm (2003). Foram realizadas lâminas polidas sem lamínula com espessura de 60 µm. No entanto, para melhor visualização do conteúdo fossilífero, as duas lâminas do coprólito foram lixadas com o auxílio de carbeto de silício e polidas com óxido de alumínio. Posteriormente, foram feitas as identificações de cada lâmina no Laboratório de Paleohidrogeologia do Instituto de Geociências (IG), sendo elas MPPC-01-046 A e B lâminas da costela terminal de Saurópode ou Terópode, MPPC-01-161 A e B lâminas da costela de saurópode, MPPC-01-054A1 A e B lâminas do osso longo do corte transversal e MPPC-01-054A2 A e B lâminas do osso longo do corte longitudinal e MPPC-01-097 A e B lâminas do coprólito. Após todos esses procedimentos, as descrições petrográficas das lâminas foram feitas utilizando um microscópio petrográfico Carl Zeiss Scope A1 ZEISS sob luz normal e polarizada cruzada usando um compensador de gipso. Imagens digitais das lâminas foram capturadas com ajuda da câmera ZEISS AxioCam acoplada, sendo que o software de microscópio Zenlite da ZEISS foi usado para visualizar e tratar as imagens. Para determinar a composição elementar dos fósseis foi realizada análise em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Dispersão de Energia de raios X (EDS), utilizando-se microscópio eletrônico JEOL, modelo JSM IT500HR, no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura, IG, Unicamp.

Por fim, as análises paleohistológicas das lâminas dos respectivos fósseis foram realizadas seguindo a nomenclatura padrão de microestruturas e classificações de tecidos ósseos conforme propostas por Buffrénil e Quilhac (2021). Considerando que os fragmentos fósseis se tratam de costelas dorsais de saurópode e/ou terópode e um osso longo de terópode, as interpretações dos estágios ontogenéticos dos espécimes foi baseada em modelos e hipóteses atuais sobre o crescimento e desenvolvimento deste tipo de osso em dinossauros saurópodes (Gallina, 2012 ; Waskow e Sander, 2014 ; Brum et al., 2022).

RESULTADOS:

A análise histológica das lâminas permitiu a compreensão das micro estruturas ósseas, padrões de crescimento e os processos pós-morte que atuaram sobre os fósseis. As microestruturas como ósteons primários e secundários bem como as linhas de crescimento EFS (*External Fundamental System*) e trabéculas medulares permitiram inferir aspectos do desenvolvimento ontogenético dos indivíduos, além dos estágios de remodelação óssea.

As três amostras ósseas analisadas (costela MPPC-01-046;, costela MPPC-01-161 e osso longo MPPC-01-054A1) revelaram uma preservação histológica significativa, com córtices com ósteons primários, porém, dominados por ósteons secundários, evidenciando ocorrência de fases de remodelação óssea. As linhas de crescimento (EFS) presentes em todas as lâminas, sugerem que os indivíduos já haviam atingido a maturidade esquelética, com cessação do crescimento rápido. As EFS se apresentaram frequentemente cobertas por grãos minerais e óxidos, o que mostrou que houveram alterações pós-deposicionais.

Nas regiões medulares, as trabéculas estavam completamente/quase completamente preenchidas por grãos minerais e revestidas por óxidos, indicando um ambiente de fossilização químicamente e fisicamente ativo. Distingue-se na amostra do osso longo (MPPC-01-054A) a presença de uma cavidade arredondada localizada na região medular, totalmente preenchida por matriz calcítica e diversos grãos minerais, possivelmente associada a um processo diagenético exógeno.

O coprólito (MPPC-01-97) possivelmente teve como produtor um crocodilomorfo. É possível observar no fóssil espículas alongadas e com feições meia lua na massa da sua porção central. A presença de óxido de ferro também foi notória, além de perfurações escavadas provavelmente por microrganismos e gretas de ressecamento na superfície. Pela análise em MEV/EDS é possível ver uma variação na coloração na massa fecal preservada sugerindo heterogeneidade na composição química do coprólito.

DISCUSSÃO:

As costelas (MPPC-01-161 e MPPC-01-046) apresentam fraturas e rachaduras, por vezes largas, que percorrem até o tecido incluindo os ósteons, sendo que estas feições foram na telodiagênese preenchidas por óxidos, embora a origem dessas feições derive da sua exposição em superfície por um tempo prolongado em condições semiáridas (Behrensmeyer *et al*., 2000; Allison & Bottjer, 2010; Paio *et al*., 2024). Durante a fossilização, essas rachaduras facilitaram a percolação dos elementos químicos, posteriormente cristalizados. Os grãos minerais observados no interior da cavidade medular podem ter sido introduzidos por fluxos de água, já que a medula é rapidamente degradada uma vez que o elemento ósseo fica exposto em superfície (Pfretzschner, 2004).

As costelas durante sua fossilização passaram por várias fases diferentes, sendo elas: (i) ambiente redutor, (ii) ambiente de transição redox e (iii) ambiente oxidante. A primeira fase da fossildiagênese ocorreu na sua deposição num ambiente fluvial entrelaçado redutor. Após o soterramento, o aumento do nível do lençol freático e acúmulo de matéria orgânica promovem que elementos livres como Manganês, Ferro, Bário, Cério, Lítio e Flúor circulem e se infiltrem nos tecidos ósseos (p. ex. ósteons e poros medulares). As evidências de atividade microbiana entre os ósteons, sugere que houve atuação microbiana durante essa fase, favorecendo a degradação de componentes orgânicos e a dissolução parcial da hidroxiapatita ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ (Pfretzschner, 2004, Trueman & Martill, 2002). A seguir aconteceu a substituição parcial ou total do grupo hidroxila por fluoreto, gerando fluorapatita ($Ca_{10}(PO_4)_6F_2$). A segunda fase acontece com a

transição de uma condição redutora para oxidante. Essa fase é marcada pela mineralização de cristais de calcita na região medular devido a disponibilidade de íons Ca^{2+} e CO_3^{2-} (Ca^{2+} de dissolução de minerais carbonáticos). Ademais, ainda nessa fase já é possível que os elementos antes livres (ferro e o manganês) na fase redutora se tenham precipitado na forma de óxido ou hidróxido (Allison & Bottjer, 2010). A terceira e última fase acontece com o retorno das condições oxidantes, fazendo com que os minerais como manganês e ferro se precipitem totalmente como óxidos, sendo o Cério e o Bário nesse caso adsorvidos ou coprecipitados nas superfícies dos óxidos, comum em elementos traço em ambientes oxidantes (Pfretzschner, 2004). Nessa fase final, pode ter ocorrido também um aporte de sedimentos siliciclásticos, por meio da alteração dos minerais presentes na própria rocha encaixante fazendo com que elementos como o Silício, Alumínio, Potássio, Titânio, Cloro e Sódio se depositassem junto com os óxidos nas bordas da costela, dando origem a minerais como Quartzo, minerais feldspáticos, Titanita, Apatita entre outros.

Já para o osso longo (MPPC-01-054A), por médio das análises realizadas através de microscópio petrográfico de MEV/EDS, foi possível identificar que o fóssil passou por várias fases diferentes durante a fóssildiagênse. Isso fica evidente pela presença de matriz calcítica entre os poros, já que os grãos não apresentam o mesmo padrão. A calcita se apresenta recristalizada (Paio *et al*., 2024). De forma geral a sua fóssildiagênese segue as mesmas etapas descritas para as costelas (i, ambiente redutor, ii, ambiente de transição redox e iii, ambiente oxidante).

Por fim, o coprólito (MPPC-01-97), por meio das análises realizadas no MEV/EDS (Figura 2D), foi possível identificar que a massa fecal é composta majoritariamente por Cálcio (Ca) e Fósforo (P), elementos principais que compõe a hidroxiapatita, principal mineral dos ossos, sugerindo uma dieta carnívora para o crocodilomorfo (Trueman & Martill, 2002). Ele também exibe numerosas vesículas produzidas por gases. A presença de vesículas mostra que, muito provavelmente, após sua defecação, passou por uma intensa atividade microbiana ainda úmido ou semi-endurecido ficando exposto num ambiente subaéreo seco, semiárido/árido, desenvolvendo gretas de ressecamento (Allison & Bottjer, 2010; Behrensmeyer *et al*., 2000). O coprólito, diferente das costelas e do osso longo, possui apenas evidências de duas fases distintas da fossildiagênese, sendo elas a primeira em um ambiente redutor, igualmente aos outros fósseis, e a segunda em um ambiente oxidante, igualmente aos outros fósseis, sem indicação de que houve uma fase de ambiente de transição redox.

CONCLUSÃO:

Conclui-se que, os fósseis analisados possuem estruturas ósseas que indicam a maturidade dos indivíduos antes da morte, enquanto que, as assinaturas geoquímicas e tafonômicas revelam ambientes de fossilização que mudaram ao longo do tempo, passando de redutor para oxidante. Os fósseis analisados possuem uma boa preservação histológica e evidências claras de várias fases de fossildiagenéticas. Ademais, o coprólito reforça a ideia de dieta carnívora do crocodilomorfo e a evidência de atividade microbiana pós-deposicional.

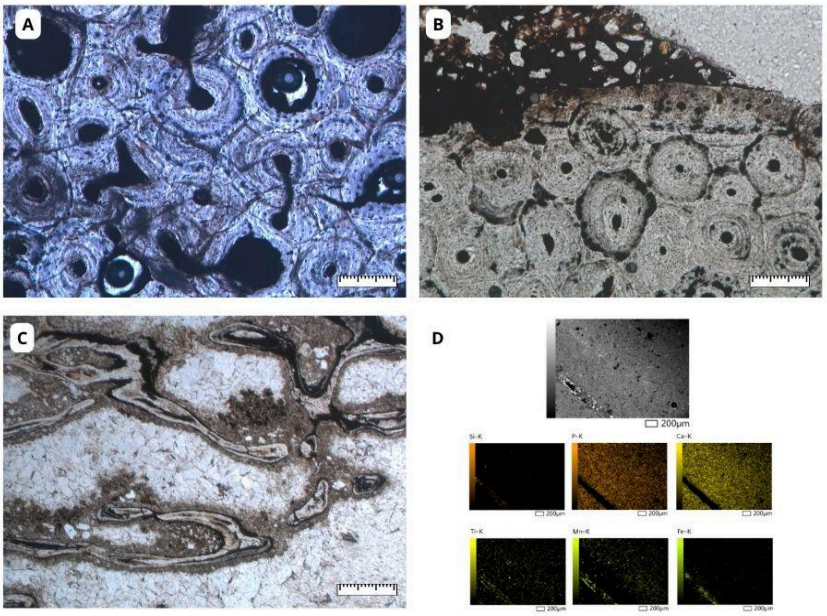

Figura 2. Fotomicrografias de lâminas petrográficas e mapas elementares em MEV/EDS. A. Ósteons da costela 161 preenchidos por óxidos, com feições de atividade microbiana e fraturas presentes. B. Ósteons da costela 046 revestidos por óxidos. Borda envolvida por óxido e grãos minerais. C. Região medular do osso longo 054A preenchida por calcita cristalizada e recristalizada. D. mapeamento elementar em MEV/EDS do coprólito 097 que mostra a composição química da massa fecal sendo majoritariamente de Cálcio e Fósforo.

REFERÊNCIAS:

ALLISON, P. A.; BOTTJER, D. J. ***Taphonomy: Process and Bias Through Time*.** Dordrecht: Springer, 2010.

BATEZELLI, A.; LADEIRA, F.S.B.; NASCIMENTO, D.L.D.; DA SILVA, M.L. (2019). F**acies and palaeosol analysis in a progradational distributive fluvial system from the Campanian–Maastrichtian Bauru Group, Brazil.** *Sedimentology*, *66*: 699-735.

BEHRENSMEYER, A. K.; KIDWELL, S. M.; GASTALDO, R. A**. Taphonomy and paleobiology**. *Paleobiology*, v. 26, suplemento n. 4, p. 103–147, 2000.

CARNEIRO, J.; JUNQUEIRA, L.C. Ua. **Histologia Básica Texto e Atlas** 12ª ed. Rio de Janeiro, Editora Guanabara Koogan LTDA, 2013.

DE BRUFRÉNIL, V.; DE RICQULÉS, A. J.; PADIAN, K.; ZYLBERBERG, L. (2021) **Vertebrate Skeletal Histology and Paleohistology** 1ª ed. Boca Raton, FL, CRC Press.

DELCOURT, R.; BRILHANTE, N.S.; PIRES-DOMINGUES, R.A.; HENDRICKX, C.; GRILLO, O.N.; AUGUSTA, B.G.; MACIEL, B.S.; GHILARDI, A.M; RICARDI-BRANCO, F. (2024) **Biogeography of theropod dinosaurs during the Late Cretaceous: evidence from central South America**. Zoological Journal of the Linnean Society, XX:1-40, 2024.

DELCOURT, R.; IORI, F. V. (2018). **A new Abelisauridae (Dinosauria: Theropoda) from São José do Rio Preto Formation, Upper Cretaceous of Brazil and comments on the Bauru Group fauna.** Historical Biology, 32: 917 - 924.

FERNANDES, L.A.; COIMBRA, A.M. (2000) **Revisão estratigráfica da parte oriental da Bacia Bauru (Neocretáceo)**. Revista Brasileira de Geociências. v. 30. n. 4. p. 717-728..

CARVALHO, I. de S. **(**2000). **Paleontologia** 1ªed. Rio de Janeiro: Editora Interciência.

LANGER, M.C.; DELCOURT, R.; MONTEFELTRO, F.C.; JUNIOR, J.C.S.; SOLER, M.G.; FERREIRA, G. S.; BATEZELLI, A. (2022). **The Bauru Basin in São Paulo and its Tetrapods.** Derbyana, 43: e776.

LAMM, E.-T. (2013). **Preparation and Sectioning of Specimens**. In: Padian, K., Lamm, E.-T. (Eds.), Bone Histology of Fossil Tetrapods. University of California Press, Berkley and Los Angeles, California.

PAIO, V. J. M.; JURIGAN, I.; DELCOURT, R.; FARIA, R. S.; BATEZELLI, A.; RICARDI-BRANCO, F. **Taphonomy and paleohistology of a dinosaur rib from Marília Formation, Bauru Group, in the state of Minas Gerais, Brazil.** *Comptes Rendus Palevol*, [S. l.], 2024.

PFRETZSCHNER, H.-U**. Fossilization of Haversian bone in aquatic environments**. *Comptes Rendus Palevol*, v. 3, n. 8, p. 605–616, 2004.

SANTUCCI, R. M.; ARRUDA-CAMPOS, A. D. (2011). **A new sauropod (Macronaria, Titanosauria) from the Adamantina Formation, Bauru Group, Upper Cretaceous of Brazil and the phylogenetic relationships of Aeolosaurini**. Zootaxa, 3085: 1-33.

TRUEMAN, C. N.; MARTILL, D. M**. The long-term survival of bone: The role of bioerosion.** *Archaeometry*, v. 44, n. 3, p. 371–382, 2002.