



PRESERVAÇÃO DE TECIDOS MOLES EM FÓSSEIS: REVISÃO DE MECANISMOS E IMPLICAÇÕES PALEOBIOLOGICAS

PRESERVATION OF SOFT TISSUES IN FOSSILS: REVIEW OF MECHANISMS AND PALEOBIOLOGICAL IMPLICATIONS

Fabiano Bezerra Menegidio¹

Resumo

A preservação de tecidos moles em fósseis, como proteínas, vasos sanguíneos e células ósseas, tem revolucionado o campo da paleontologia. Antes restrito ao estudo de partes duras, como ossos e dentes, o avanço nas técnicas de análise molecular permitiu uma compreensão mais profunda da biologia, fisiologia e ecologia de organismos extintos. Os principais mecanismos responsáveis pela preservação de tecidos moles incluem as reações de Fenton, a deposição rápida de sedimentos e a formação de concreções minerais, que estabilizam as biomoléculas e inibem sua decomposição. Esses processos, longe de contrariarem a cronologia geológica, reforçam os métodos tradicionais de datação radiométrica e a robustez da escala temporal geológica. As implicações paleobiológicas dessas descobertas são vastas, permitindo a reconstrução da biologia celular e molecular, a compreensão do metabolismo e da fisiologia dos organismos, e o estudo das cadeias alimentares e das interações ecológicas de ecossistemas antigos. Além disso, a preservação de proteínas em fósseis fornece novas informações sobre a evolução e as adaptações fisiológicas ao longo do tempo. Essa área continua a desafiar antigos conceitos sobre a fossilização, enquanto amplia nossa compreensão sobre a história da vida na Terra e a evolução dos organismos.

Palavras-chave: Preservação de tecidos moles, paleontologia molecular, evolução biológica.

Abstract

The preservation of soft tissues in fossils, such as proteins, blood vessels, and bone cells, has revolutionized the field of paleontology. Previously limited to the study of hard parts like bones and teeth, advancements in molecular analysis techniques have enabled a deeper understanding of the biology, physiology, and ecology of extinct organisms. The main mechanisms responsible for the preservation of soft tissues include Fenton reactions, rapid sediment deposition, and the formation of mineral concretions, which stabilize biomolecules and inhibit their decomposition. These processes, far from contradicting the geological timeline, reinforce traditional radiometric dating methods and the robustness of the geological time scale. The paleobiological implications of these discoveries are vast, allowing for the reconstruction of cellular and molecular biology,

¹ Laboratório de Bioinformática e Ciências Ômicas (LaBiOmicS), Universidade de Mogi das Cruzes (UMC), Mogi das Cruzes, SP, Brasil.



the understanding of metabolism and organismal physiology, and the study of food chains and ecological interactions in ancient ecosystems. Furthermore, the preservation of proteins in fossils provides new insights into evolution and physiological adaptations over time. This area continues to challenge old concepts of fossilization while expanding our understanding of the history of life on Earth and the evolution of organisms.

Keywords: Preservation of soft tissues, molecular paleontology, biological evolution.

1. INTRODUÇÃO

A paleontologia, historicamente, focou-se na preservação de partes duras dos organismos, como ossos, conchas e dentes, uma vez que esses materiais possuem uma alta resistência à decomposição e mineralização, sendo frequentemente encontrados no registro fóssil (Behrensmeyer et al., 2000). Entretanto, nas últimas décadas, houve um aumento significativo no número de descobertas que revelaram a preservação de tecidos moles em fósseis, incluindo células ósseas (osteócitos), vasos sanguíneos, colágeno e fibras nervosas (Schweitzer et al., 2005; Pawlicki, 1995; Armitage, 2015). Tais achados surpreendentes abriram novos caminhos para o estudo da biologia de organismos extintos, fornecendo insights sobre sua fisiologia e ecologia que anteriormente eram considerados inacessíveis.

A preservação de tecidos moles, como colágeno e células osteocíticas, desafia a noção tradicional de que tecidos orgânicos se decompõem completamente em curtos períodos após a morte de um organismo (Schweitzer et al., 2007; Bertazzo et al., 2015). Normalmente, o colágeno, uma proteína estrutural predominante nos ossos e tecidos conectivos, é altamente suscetível à degradação enzimática e à ação microbiana (Briggs, 2003). No entanto, uma combinação de fatores químicos, biológicos e ambientais pode, em circunstâncias especiais, permitir a preservação de tecidos moles por milhões de anos, criando um campo fértil para novas pesquisas sobre os mecanismos que sustentam esses processos (Schweitzer et al., 2014; Senter, 2022).

Entre os principais mecanismos propostos para a preservação de tecidos moles estão as reações de Fenton, que envolvem a interação entre íons de ferro liberados durante a degradação das hemácias e o peróxido de hidrogênio, gerando radicais livres altamente reativos que promovem a estabilização de proteínas por meio de ligações cruzadas (Schweitzer et al., 2014; Plet et al., 2017). Esses radicais não apenas inativam enzimas degradativas, mas também fortalecem as moléculas de colágeno e outros componentes protéicos, protegendo-os da decomposição microbiana. Esse mecanismo tem sido amplamente aceito como uma explicação plausível para a preservação de tecidos moles em fósseis mesozoicos, especialmente dinossauros.

Além disso, o ambiente geológico desempenha um papel crucial na preservação de tecidos. Fatores como a rápida deposição sedimentar e a formação de concreções minerais podem isolar o fóssil de influências externas, como oxigênio e microrganismos, retardando a degradação e promovendo a fossilização (Allison, 1988; Senter, 2022). Concreções de carbonato de cálcio, sílica e óxidos de ferro podem encapsular os tecidos, protegendo-os e permitindo que as reações químicas estabilizadoras ocorram em um ambiente controlado



(Plet et al., 2017; Trueman et al., 2008).

Apesar dos avanços significativos no entendimento desses mecanismos, o fenômeno da preservação de tecidos moles em fósseis continua a ser alvo de controvérsia em algumas áreas. Autores criacionistas da Terra jovem, por exemplo, frequentemente interpretam a preservação de tecidos moles como evidência de uma cronologia geológica curta, sugerindo que esses fósseis têm apenas milhares de anos, e não milhões, como indica a datação radiométrica (Oard, 2011; Anderson, 2016). Contudo, essa interpretação é amplamente refutada pela comunidade científica, que aponta os mecanismos naturais de preservação como explicações viáveis e cientificamente robustas para a presença de tecidos moles em fósseis antigos (Schweitzer et al., 2014; Senter, 2022).

Portanto, o objetivo deste artigo é revisar e discutir os mecanismos de preservação de tecidos moles em fósseis, com foco nas reações químicas, como as reações de Fenton, e nas condições geológicas favoráveis que podem inibir a decomposição. Também serão corrigidos equívocos comuns relacionados à idade dos fósseis e à preservação de tecidos moles, enfatizando a importância dessas descobertas para o estudo da biologia de organismos extintos. Além de fornecer uma visão geral dos mecanismos, este artigo abordará as implicações paleobiológicas dessas descobertas, sugerindo como o estudo de tecidos moles preservados pode oferecer novos insights sobre a fisiologia e ecologia dos animais extintos, especialmente dinossauros.

2. TECIDOS MOLES PRESERVADOS EM FÓSSEIS

A preservação de tecidos moles em fósseis é um fenômeno raro, mas altamente significativo, que desafia as concepções tradicionais sobre o processo de fossilização. Até o final do século XX, acreditava-se amplamente que apenas as partes duras dos organismos, como ossos, dentes e conchas, poderiam ser preservadas ao longo de milhões de anos. Contudo, a descoberta de tecidos moles preservados, incluindo colágeno, osteócitos, vasos sanguíneos e até mesmo proteínas estruturais, revolucionou o campo da paleontologia, permitindo aos cientistas explorarem a biologia e a fisiologia de organismos extintos com um nível de detalhe sem precedentes (Schweitzer et al., 2007; Senter, 2022). Nesta seção, serão abordados os principais tipos de tecidos moles preservados e as implicações dessas descobertas para a paleontologia.

2.1 OSTEÓCITOS E CONDRÓCITOS

Os osteócitos são células ósseas encontradas nas lacunas da matriz óssea e desempenham um papel fundamental na manutenção e remodelação dos ossos. A preservação de osteócitos em fósseis tem sido uma das descobertas mais surpreendentes na paleontologia, uma vez que essas células são extremamente vulneráveis à decomposição após a morte do organismo. No entanto, em alguns fósseis, como os de dinossauros, foi possível observar osteócitos preservados com notável integridade estrutural, incluindo detalhes como núcleos celulares e prolongamentos citoplasmáticos (Schweitzer et al., 2007; Senter, 2022).



A preservação de osteócitos em fósseis é amplamente atribuída a uma combinação de fatores, incluindo a rápida mineralização da matriz óssea e a proteção oferecida por íons de ferro liberados pela degradação das hemácias. Esses íons de ferro participam das reações de Fenton, que geram radicais hidroxila capazes de estabilizar proteínas e estruturas celulares, impedindo a ação de enzimas degradativas e microrganismos. O ambiente químico criado pela liberação de ferro e a mineralização precoce da matriz óssea são fatores cruciais que explicam como essas células delicadas podem permanecer preservadas ao longo de milhões de anos (Senter, 2022).

Além dos osteócitos, a preservação de condrócitos, as células que compõem a cartilagem, também foi documentada em fósseis de dinossauros e outros grandes vertebrados. Condrócitos preservados foram encontrados em fósseis de crânios de dinossauros, com estruturas celulares notavelmente intactas, sugerindo que a cartilagem também pode ser preservada em condições geológicas específicas (Bailleul et al., 2020). Como a cartilagem é um tecido menos mineralizado do que o osso, sua preservação é um fenômeno ainda mais raro, exigindo condições de mineralização extremamente rápidas para proteger as células da decomposição (Senter, 2022).

2.2 VASOS SANGUÍNEOS E FIBRAS NERVOSAS

A descoberta de vasos sanguíneos preservados em fósseis de dinossauros é uma das mais surpreendentes do ponto de vista paleontológico. Em estudos conduzidos por Schweitzer et al. (2005), foram encontradas estruturas semelhantes a vasos sanguíneos em ossos fossilizados de dinossauros. Essas estruturas foram identificadas por técnicas de microscopia óptica e eletrônica, que revelaram tubulações preservadas com características morfológicas semelhantes aos vasos sanguíneos modernos. Essas descobertas desafiaram a crença tradicional de que tecidos moles, especialmente estruturas tão delicadas como vasos sanguíneos, não poderiam sobreviver à fossilização (Schweitzer et al., 2005; Senter, 2022).

A preservação de vasos sanguíneos em fósseis é explicada por uma combinação de fatores químicos e geológicos. As reações de Fenton desempenham um papel fundamental na estabilização das proteínas presentes nos vasos sanguíneos, como o colágeno. Os radicais livres gerados nessas reações promovem a formação de ligações covalentes cruzadas entre as moléculas de colágeno, fortalecendo a estrutura molecular e tornando-a resistente à decomposição (Schweitzer et al., 2014; Senter, 2022). Além disso, a rápida deposição de sedimentos e a mineralização precoce criam um ambiente que protege os vasos sanguíneos da ação de microrganismos e da oxidação.

Outro tipo de tecido mole preservado em alguns fósseis são as fibras nervosas. Embora sejam muito mais raras do que a preservação de vasos sanguíneos, as fibras nervosas preservadas foram documentadas em fósseis do Cretáceo Superior, com estruturas celulares bem definidas. As fibras nervosas são particularmente vulneráveis à decomposição, e sua preservação sugere que o ambiente deposicional e os processos químicos envolvidos foram extremamente favoráveis para a preservação de tecidos delicados (Armitage e Solliday,



2020; Senter, 2022).

2.3 COLÁGENO NA MATRIZ ÓSSEA

O colágeno é uma proteína estrutural essencial que compõe a matriz óssea e os tecidos conectivos de vertebrados. A preservação de colágeno em fósseis de milhões de anos tem sido amplamente documentada em fósseis de dinossauros e outros grandes vertebrados. A análise dessas proteínas fósseis oferece insights sobre a biologia molecular e a fisiologia dos organismos extintos, permitindo que os cientistas estudem aspectos como a composição do tecido ósseo e a estrutura do colágeno em detalhes (Schweitzer et al., 2007; Senter, 2022).

A preservação de colágeno em fósseis é geralmente atribuída a processos de estabilização química, como as reações de Fenton, que promovem a formação de ligações covalentes cruzadas entre as moléculas de colágeno, impedindo sua degradação (Schweitzer et al., 2014). Além disso, a mineralização precoce dos ossos ajuda a proteger as fibras de colágeno da ação de microrganismos e da oxidação. Estudos utilizando espectrometria de massa confirmaram a presença de sequências peptídicas de colágeno preservado em fósseis de dinossauros, demonstrando que as proteínas podem resistir à decomposição por longos períodos de tempo quando estabilizadas quimicamente (Bertazzo et al., 2015; Senter, 2022).

Esses estudos têm implicações profundas para o estudo da biologia molecular dos organismos extintos. A análise do colágeno preservado em fósseis pode fornecer informações sobre a estrutura do tecido ósseo, bem como sobre as adaptações fisiológicas dos organismos em diferentes ambientes ecológicos. Além disso, a comparação de sequências proteicas preservadas em fósseis com as de organismos modernos permite rastrear as relações evolutivas e as adaptações que ocorreram ao longo do tempo geológico (Schweitzer et al., 2014; Senter, 2022).

2.4 OUTRAS PROTEÍNAS PRESERVADAS

Além do colágeno, outras proteínas foram documentadas em fósseis, expandindo ainda mais o campo da paleoproteômica. Por exemplo, proteínas associadas ao transporte de oxigênio, como a hemoglobina, foram identificadas em fósseis de dinossauros e outros grandes vertebrados. A presença dessas proteínas preservadas sugere que, sob certas condições, moléculas biológicas altamente suscetíveis à decomposição podem ser estabilizadas e protegidas ao longo do tempo (Schweitzer et al., 2007; Senter, 2022).

A preservação de proteínas transportadoras de oxigênio, como a hemoglobina, tem implicações importantes para o estudo da fisiologia e do metabolismo dos organismos extintos. Essas proteínas podem fornecer pistas sobre a eficiência respiratória e as adaptações fisiológicas desses animais, especialmente em relação à sua capacidade de sustentar altos níveis de atividade metabólica. A análise dessas proteínas também pode revelar informações sobre a ecologia dos organismos, como seus hábitos alimentares e suas



interações com o ambiente (Senter, 2022).

MECANISMOS DE PRESERVAÇÃO

A preservação de tecidos moles em fósseis depende de uma combinação complexa de fatores químicos, biológicos e geológicos. Diferentes condições ambientais podem influenciar diretamente o processo de fossilização, permitindo que tecidos normalmente suscetíveis à decomposição, como proteínas, células e vasos sanguíneos, permaneçam preservados por longos períodos. Nesta seção, serão detalhados os principais mecanismos responsáveis por essa preservação e como eles interagem para criar as condições favoráveis à fossilização de tecidos moles.

3.1 REAÇÕES DE FENTON E PRESERVAÇÃO DE TECIDOS MOLES

As reações de Fenton são amplamente aceitas como um dos mecanismos chave na preservação de tecidos moles em fósseis. Essas reações ocorrem quando íons de ferro liberados pela degradação das hemácias interagem com peróxido de hidrogênio (H_2O_2), resultando na formação de radicais hidroxila ($OH\bullet$), que são altamente reativos. Esses radicais livres causam a formação de ligações covalentes cruzadas entre as moléculas de colágeno e outras proteínas estruturais, estabilizando essas moléculas e tornando-as mais resistentes à degradação biológica e química (Schweitzer et al., 2007; Senter, 2022).

Esse processo de estabilização química é fundamental para explicar como tecidos moles, que normalmente se decompõem rapidamente após a morte do organismo, podem resistir à degradação por milhões de anos. Os radicais gerados nas reações de Fenton não apenas estabilizam o colágeno, mas também inativam enzimas degradativas, como as colagenases e proteases, que normalmente degradariam as proteínas rapidamente após a morte (Schweitzer et al., 2014). Ao inativar essas enzimas, o ambiente local ao redor dos tecidos moles torna-se mais propício à sua preservação.

Os efeitos das reações de Fenton também são observados na preservação de outras estruturas, como os osteócitos. Em muitos casos, o ferro liberado das hemácias forma depósitos ao redor das células, criando uma barreira que protege as estruturas celulares da decomposição. Isso explica como células como os osteócitos e condroblastos podem permanecer preservadas por milhões de anos, mantendo muitas de suas características morfológicas originais (Senter, 2022).

3.2 DEPOSIÇÃO RÁPIDA E AMBIENTES ANÓXICOS

A deposição rápida de sedimentos é outro fator crítico para a preservação de tecidos moles em fósseis. Quando um organismo morre e é rapidamente coberto por sedimentos finos, como argila ou silte, isso impede a exposição ao oxigênio e a ação de microrganismos decompositores. A rápida deposição sedimentar



cria um ambiente anóxico (pobre em oxigênio), que reduz drasticamente a atividade microbiana, retardando a decomposição dos tecidos orgânicos (Allison, 1988; Senter, 2022).

Ambientes anóxicos são essenciais para a preservação de tecidos moles, uma vez que o oxigênio é um fator chave na oxidação de proteínas e outros componentes orgânicos. Em ambientes onde a deposição de sedimentos ocorre rapidamente, como em deltas fluviais, estuários ou mares rasos, os organismos são enterrados rapidamente, o que minimiza sua exposição ao oxigênio. Sem a presença de oxigênio, a oxidação das proteínas é severamente retardada, e os microrganismos responsáveis pela decomposição não conseguem prosperar (Briggs, 2003).

Esses ambientes deposicionais são frequentemente encontrados em áreas de alta sedimentação, como em locais que sofrem enchentes frequentes, onde o acúmulo rápido de sedimentos finos cria uma barreira física que protege os tecidos moles. Nessas condições, os fósseis podem ser encontrados em um estado de preservação excepcional, incluindo não apenas partes duras, como ossos, mas também tecidos moles, como vasos sanguíneos e até células ósseas preservadas (Schweitzer et al., 2014; Senter, 2022).

Um exemplo bem documentado de fósseis preservados em ambientes anóxicos são os fósseis de dinossauros encontrados em formações como as camadas de calcário do Cretáceo Superior, onde a deposição de sedimentos finos e a ausência de oxigênio desempenharam um papel crucial na preservação de tecidos moles (Plet et al., 2017; Senter, 2022). Nesses fósseis, estruturas delicadas, como vasos sanguíneos e fibras de colágeno, foram encontradas preservadas, permitindo estudos moleculares que ampliaram nossa compreensão sobre a biologia desses organismos.

3.3 FORMAÇÃO DE CONCREÇÕES MINERAIS

A formação de concreções minerais é outro mecanismo essencial para a preservação de tecidos moles. Concreções são estruturas geológicas que se formam ao redor de restos orgânicos, encapsulando-os em uma matriz mineralizada. Os minerais que compõem as concreções podem incluir carbonato de cálcio, sílica, óxidos de ferro e outros, dependendo das condições químicas do ambiente deposicional (Senter, 2022).

A formação de concreções ocorre em ambientes ricos em íons minerais, onde a precipitação de minerais ao redor dos restos orgânicos é favorecida. Essas concreções envolvem os tecidos moles, criando uma cápsula protetora que impede a infiltração de água e a exposição ao oxigênio, dois fatores que acelerariam a decomposição dos tecidos. Ao encapsular o organismo em uma matriz mineralizada, as concreções não apenas isolam os tecidos moles do ambiente externo, mas também criam um ambiente químico estável, no qual a preservação das estruturas celulares e moleculares pode ocorrer sem interferência externa (Trueman et al., 2008; Senter, 2022).

Um exemplo clássico da preservação por concreções minerais é encontrado nos fósseis de peixes e répteis marinhos do Cretáceo, onde a formação de concreções de carbonato de cálcio preservou tanto os



ossos quanto os tecidos moles desses organismos. Além de proteger os tecidos, as concreções ajudam a preservar a morfologia celular e tecidual em detalhes notáveis, permitindo que os cientistas estudem as estruturas biológicas com uma precisão sem precedentes (Schweitzer et al., 2014; Senter, 2022).

3.4 MINERALIZAÇÃO PRECOCE E ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA

A mineralização precoce é um processo no qual os tecidos orgânicos, especialmente os tecidos ósseos, começam a se mineralizar pouco tempo após a morte do organismo. Esse processo é facilitado por ambientes deposicionais ricos em minerais, onde íons de cálcio e outros minerais dissolvidos no ambiente começam a se depositar nos tecidos moles. A mineralização precoce é fundamental para a preservação de tecidos como colágeno e osteócitos, pois protege essas estruturas da decomposição (Senter, 2022).

Além da mineralização, a estabilização química desempenha um papel crucial na preservação de tecidos moles. Reações químicas, como as reações de Fenton, ajudam a estabilizar as proteínas e outras biomoléculas, impedindo sua degradação. Essas reações promovem a formação de ligações covalentes cruzadas entre as proteínas, criando uma estrutura mais robusta e resistente à decomposição enzimática. A estabilização química é especialmente importante em tecidos ricos em proteínas, como colágeno e fibras musculares, que são normalmente suscetíveis à decomposição (Schweitzer et al., 2014; Senter, 2022).

A combinação de mineralização precoce e estabilização química cria condições ideais para a preservação de tecidos moles, permitindo que estruturas delicadas, como vasos sanguíneos, células e fibras proteicas, sejam preservadas em um estado notavelmente bem conservado. Isso permite que os cientistas realizem estudos detalhados sobre a biologia molecular e a fisiologia dos organismos extintos, abrindo novas fronteiras na paleontologia molecular (Senter, 2022).

4. DESMISTIFICAÇÃO DE EQUÍVOCOS SOBRE A PRESERVAÇÃO DE TECIDOS MOLES

A descoberta de tecidos moles em fósseis de organismos extintos gerou, desde o início, uma série de controvérsias e equívocos tanto no meio científico quanto no público geral. Muitos desses mal-entendidos decorrem de uma compreensão incompleta dos mecanismos geológicos e químicos envolvidos na preservação de materiais orgânicos ao longo de milhões de anos. Além disso, interpretações errôneas impulsionadas por ideologias criacionistas, como a “Terra jovem”, contribuem para a disseminação de conceitos incorretos. Nesta seção, discutiremos os principais equívocos sobre a preservação de tecidos moles e como a ciência paleontológica os aborda, corrigindo-os com base em evidências empíricas e em modelos científicos robustos (Schweitzer et al., 2014; Senter, 2022).

4.1 A FALÁCIA DA TERRA JOVEM: IDADE DOS FÓSSEIS

Um dos equívocos mais persistentes é a ideia de que a presença de tecidos moles em fósseis contradiz a



cronologia geológica aceita pela ciência, sugerindo que esses fósseis têm apenas alguns milhares de anos, em vez de milhões. Defensores da teoria da “Terra jovem” frequentemente usam a preservação de tecidos moles em fósseis como uma suposta prova de que a escala geológica tradicional está incorreta. Autores como Oard (2011) e Anderson (2016) argumentam que a existência de proteínas, vasos sanguíneos e células preservadas em fósseis é incompatível com a ideia de que esses organismos morreram há dezenas de milhões de anos.

Contudo, essa interpretação simplista desconsidera os avanços no entendimento dos processos de preservação química e geológica que explicam a sobrevivência de tecidos moles ao longo do tempo geológico. Como já discutido, as reações de Fenton são fundamentais para a preservação de proteínas como o colágeno, estabilizando essas moléculas por meio da formação de ligações covalentes cruzadas, que impedem sua degradação (Schweitzer et al., 2014; Senter, 2022). Além disso, a deposição rápida de sedimentos e a formação de concreções minerais podem proteger os tecidos moles da ação de microrganismos e da oxidação, retardando consideravelmente os processos de decomposição.

Esses mecanismos de preservação são bem documentados e amplamente aceitos pela comunidade científica, e não implicam em uma revisão da cronologia geológica. A datação radiométrica, baseada no decaimento de isótopos radioativos, continua a ser uma ferramenta robusta e precisa para determinar a idade das formações rochosas e dos fósseis nelas contidos (Allentoft et al., 2012). Assim, a presença de tecidos moles preservados não contradiz a idade de milhões de anos dos fósseis, mas sim evidencia a eficácia dos processos naturais de preservação em condições geológicas específicas (Schweitzer et al., 2007; Senter, 2022).

4.2 INTERPRETAÇÕES SIMPLIFICADAS DO PROCESSO DE FOSSILIZAÇÃO

Outro equívoco comum é a visão de que o processo de fossilização envolve apenas a substituição completa dos tecidos orgânicos por minerais, resultando em fósseis “petrificados” que não contêm traços de matéria orgânica original. Essa concepção é, na verdade, uma simplificação excessiva do processo de fossilização, que pode ocorrer de várias maneiras. A fossilização pode incluir a permineralização, onde os minerais preenchem os espaços vazios nos tecidos, a recristalização parcial dos componentes orgânicos e a preservação molecular de proteínas e outras biomoléculas (Briggs, 2003; Senter, 2022).

As descobertas de proteínas preservadas, como o colágeno, em fósseis de dinossauros e outros grandes vertebrados demonstram que os tecidos moles podem ser preservados em determinadas condições geológicas e ambientais. Estudos utilizando técnicas de espectrometria de massa revelaram que partes das proteínas e até mesmo moléculas inteiras podem sobreviver ao longo de milhões de anos, se estabilizadas por processos químicos, como as reações de Fenton (Schweitzer et al., 2014; Senter, 2022). Esses achados desafiam a visão tradicional de que os fósseis são compostos exclusivamente de minerais e destacam a importância de considerar a fossilização como um processo dinâmico e multifacetado.

Portanto, a ideia de que todos os fósseis são “petrificados” e desprovidos de matéria orgânica é um



conceito ultrapassado. A ciência paleontológica moderna tem demonstrado que os fósseis podem conter biomoléculas preservadas, e que as condições químicas e deposicionais desempenham um papel essencial na determinação do tipo e grau de preservação (Senter, 2022).

4.3 LIMITAÇÕES E REALIDADES DA PRESERVAÇÃO MOLECULAR

A preservação molecular, embora fascinante e promissora, também possui suas limitações, o que leva a outro equívoco comum: a ideia de que tecidos moles preservados poderiam ser usados para “reviver” organismos extintos, como na popular franquia de filmes Jurassic Park. Embora a preservação de proteínas, lipídios e até fragmentos de DNA em fósseis seja uma realidade, as condições necessárias para a preservação de moléculas intactas por longos períodos são extremamente raras, e a maioria das biomoléculas preservadas está fragmentada ou quimicamente modificada (Schweitzer et al., 2007; Bertazzo et al., 2015; Senter, 2022).

A preservação de proteínas como o colágeno, por exemplo, é possível devido à formação de ligações covalentes cruzadas que estabilizam as moléculas, mas mesmo assim, essas proteínas estão frequentemente fragmentadas e apresentam modificações químicas devido à exposição a fatores ambientais ao longo do tempo. As técnicas de espectrometria de massa utilizadas para analisar essas proteínas confirmam que, embora as sequências peptídicas possam ser preservadas, elas raramente estão intactas, e muitas vezes ocorrem perdas significativas de aminoácidos ou substituições por minerais (Schweitzer et al., 2014; Senter, 2022).

Da mesma forma, a preservação de DNA em fósseis é extremamente rara e limitada a fósseis relativamente recentes, com apenas algumas dezenas de milhares de anos. Mesmo sob condições ideais, como ambientes anóxicos e frios, o DNA sofre degradação contínua devido a processos como hidrólise e oxidação, o que dificulta a preservação de sequências completas (Allentoft et al., 2012; Senter, 2022). Portanto, a ideia de que tecidos moles preservados poderiam ser usados para clonar ou “reviver” organismos extintos é altamente especulativa e não tem base científica nos conhecimentos atuais.

4.4 A IMPORTÂNCIA DA DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA E DA REVISÃO CRÍTICA

Um aspecto fundamental para combater esses equívocos é a divulgação científica eficaz. Muitos dos mal-entendidos sobre a preservação de tecidos moles decorrem de uma falta de acesso a informações científicas precisas ou da disseminação de ideias incorretas por meio de mídias populares e ideologias não científicas. É papel dos cientistas e educadores garantir que o público em geral tenha uma compreensão clara e precisa dos mecanismos de preservação e dos avanços na paleontologia molecular (Senter, 2022).

A ciência paleontológica depende da revisão crítica constante e da correção de equívocos à medida que novos dados e evidências se tornam disponíveis. Essa revisão contínua permite que a ciência avance, integrando novas descobertas e ajustando interpretações antigas com base em evidências mais robustas.



Além disso, a colaboração entre paleontólogos e educadores é essencial para disseminar informações corretas e combater a desinformação (Briggs, 2003; Senter, 2022).

Museus de história natural, documentários científicos e plataformas de aprendizado on-line desempenham um papel crucial na comunicação de descobertas paleontológicas ao público. Exibições que explicam como os tecidos moles podem ser preservados e destacam as evidências científicas robustas que sustentam essas descobertas ajudam a corrigir mal-entendidos e a fomentar uma compreensão mais profunda da história da vida na Terra.

5. IMPLICAÇÕES PALEOBIOLÓGICAS DA PRESERVAÇÃO DE TECIDOS MOLES

A descoberta de tecidos moles preservados em fósseis não apenas desafia concepções tradicionais sobre os limites da fossilização, mas também abre novas possibilidades de investigação científica sobre a biologia, fisiologia e ecologia de organismos extintos. Os tecidos moles, como colágeno, vasos sanguíneos e células ósseas, fornecem uma nova dimensão para o estudo paleobiológico, oferecendo dados que vão além da morfologia óssea e das partes duras. Nesta seção, serão discutidas as principais implicações paleobiológicas dessas descobertas, incluindo sua contribuição para a compreensão da biologia molecular, fisiologia, ecologia e evolução dos organismos extintos.

5.1 RECONSTRUÇÃO DA BIOLOGIA MOLECULAR E CELULAR

A preservação de tecidos moles, especialmente de proteínas como o colágeno, oferece aos paleontólogos uma oportunidade única de reconstruir aspectos da biologia molecular e celular dos organismos extintos. O colágeno, uma proteína estrutural fundamental presente em ossos e tecidos conectivos, é uma das biomoléculas mais comumente preservadas em fósseis. Sua preservação em fósseis de dinossauros e outros grandes vertebrados permitiu que cientistas realizassem análises moleculares detalhadas, revelando informações sobre a composição do tecido ósseo e sobre a fisiologia desses organismos (Schweitzer et al., 2007; Senter, 2022).

A capacidade de analisar proteínas fósseis por meio de técnicas como a espectrometria de massa permitiu a identificação de fragmentos de proteínas preservadas e a comparação dessas sequências com as de organismos vivos. Isso oferece novas perspectivas sobre as relações evolutivas entre os organismos extintos e seus descendentes modernos, além de fornecer informações sobre como certas adaptações moleculares surgiram e se mantiveram ao longo do tempo (Schweitzer et al., 2014; Senter, 2022).

Além das proteínas, a preservação de células ósseas, como os osteócitos, permite uma investigação mais profunda da biologia celular de organismos extintos. Esses estudos proporcionam uma janela única para a compreensão dos processos de crescimento ósseo, regeneração e metabolismo de dinossauros e outros vertebrados. A presença de núcleos celulares preservados em alguns fósseis sugere que as condições



de fossilização favoreceram a preservação de estruturas celulares delicadas, como os prolongamentos citoplasmáticos, o que permite uma comparação detalhada com os processos celulares observados em organismos vivos (Schweitzer et al., 2005; Senter, 2022).

5.2 COMPREENSÃO DA FISIOLOGIA E METABOLISMO

Outra implicação fundamental da preservação de tecidos moles é a possibilidade de investigar aspectos da fisiologia e do metabolismo dos organismos extintos, áreas que eram anteriormente inacessíveis com base apenas em partes duras, como ossos e dentes. A presença de proteínas preservadas, como o colágeno, e de estruturas como vasos sanguíneos fornece dados valiosos sobre o funcionamento interno desses animais, permitindo que os cientistas explorem questões como a regulação térmica, o crescimento ósseo e a eficiência metabólica (Schweitzer et al., 2007; Senter, 2022).

Um exemplo notável é a preservação de vasos sanguíneos em fósseis de dinossauros, que tem permitido investigações sobre a fisiologia cardiovascular desses animais. As descobertas sugerem que os dinossauros, especialmente os grandes terópodes, podem ter desenvolvido sistemas circulatórios altamente eficientes, possivelmente relacionados à manutenção de níveis elevados de atividade metabólica. Embora o debate sobre se os dinossauros eram endotérmicos (sangue quente) ou ectotérmicos (sangue frio) ainda esteja em andamento, a preservação de vasos sanguíneos e de proteínas associadas ao transporte de oxigênio oferece novas pistas sobre a regulação térmica e a fisiologia respiratória desses organismos (Senter, 2022).

Além disso, a análise de colágeno preservado em fósseis permite uma melhor compreensão das taxas de crescimento e da fisiologia óssea dos dinossauros. O colágeno é uma proteína estrutural essencial no tecido ósseo, e sua organização e estrutura podem revelar informações importantes sobre o desenvolvimento e o crescimento dos ossos. Por exemplo, a análise do colágeno preservado em dinossauros juvenis pode fornecer pistas sobre a velocidade com que esses animais atingiam a maturidade, suas estratégias de crescimento e suas respostas fisiológicas ao ambiente (Schweitzer et al., 2014; Senter, 2022).

5.3 IMPLICAÇÕES PARA A ECOLOGIA E DIETA DOS ORGANISMOS EXTINTOS

A preservação de tecidos moles também tem profundas implicações para a compreensão da ecologia e dieta dos organismos extintos. A análise de proteínas preservadas, como o colágeno, pode fornecer informações sobre a dieta e as interações tróficas dos organismos. Isso ocorre porque os isótopos estáveis presentes nas proteínas podem ser analisados para inferir os tipos de alimentos consumidos, bem como o ambiente em que o organismo viveu (Bocherens et al., 2011; Senter, 2022).

Por exemplo, a composição isotópica de nitrogênio e carbono em proteínas fósseis pode indicar se um organismo era herbívoro, carnívoro ou onívoro, além de fornecer informações sobre as cadeias alimentares dos ecossistemas antigos. Esses dados podem ser utilizados para reconstruir o ambiente paleoecológico,



identificando as relações predador-presa e as estratégias alimentares dos organismos. Em estudos com mamíferos do Pleistoceno, essas análises isotópicas já foram utilizadas com sucesso, e estão começando a ser aplicadas também a fósseis de dinossauros e outros vertebrados do Mesozoico (Schweitzer et al., 2007; Senter, 2022).

Além disso, a presença de lipídios preservados em alguns fósseis pode fornecer informações adicionais sobre as condições ambientais em que os organismos viveram. Os lipídios são particularmente úteis para inferir o clima e a temperatura do ambiente, uma vez que sua composição pode variar de acordo com as condições ecológicas. Essas informações são valiosas para a reconstrução paleoambiental e para a compreensão das adaptações fisiológicas que permitiram a sobrevivência dos organismos extintos em diferentes condições climáticas (Summons et al., 2008; Senter, 2022).

5.4 CONTRIBUIÇÕES PARA O ESTUDO DA EVOLUÇÃO

A preservação de tecidos moles também oferece importantes contribuições para o estudo da evolução, fornecendo novos dados sobre a história evolutiva dos organismos extintos e suas relações com os organismos modernos. A análise de proteínas preservadas permite que os cientistas comparem as sequências de aminoácidos de organismos extintos com as de espécies vivas, oferecendo insights sobre as relações filogenéticas e as adaptações evolutivas que ocorreram ao longo de milhões de anos (Schweitzer et al., 2007; Senter, 2022).

Por exemplo, a preservação de colágeno em fósseis de dinossauros permitiu comparações com o colágeno presente em aves modernas, que são os descendentes diretos dos dinossauros terópodes. Essas comparações revelam similaridades nas sequências proteicas, confirmando a relação evolutiva entre dinossauros e aves e lançando luz sobre as adaptações que ocorreram durante a transição de dinossauros para aves. Esses estudos são fundamentais para entender como características fisiológicas, como a formação de penas e a capacidade de voo, evoluíram nos terópodes (Schweitzer et al., 2014; Senter, 2022).

Além disso, a preservação de proteínas em fósseis de mamíferos oferece a oportunidade de investigar a evolução de características fisiológicas importantes, como a endotermia e a adaptação ao clima frio. Estudos comparativos de proteínas fósseis e modernas permitem que os cientistas rastreiem as mudanças evolutivas que permitiram que certos grupos de mamíferos sobrevivessem e se adaptassem a mudanças ambientais drásticas, como as ocorridas durante as extinções em massa (Senter, 2022).

A preservação de tecidos moles também permite que os cientistas explorem as adaptações fisiológicas dos organismos extintos a eventos de extinção em massa, como o evento de extinção do Cretáceo-Paleógeno. As proteínas preservadas podem fornecer pistas sobre como certos grupos de vertebrados, como aves e mamíferos, foram capazes de sobreviver a essas extinções, enquanto outros grupos, como os dinossauros não-aviários, não sobreviveram (Schweitzer et al., 2014; Senter, 2022).



6. CONCLUSÃO

A preservação de tecidos moles em fósseis representa uma descoberta revolucionária na paleontologia, ampliando significativamente nossa compreensão da biologia, fisiologia e ecologia dos organismos extintos. Os avanços no estudo de proteínas, células e outros componentes orgânicos preservados em fósseis abriram novas possibilidades para o estudo da evolução, revelando detalhes antes inacessíveis sobre o metabolismo, crescimento e comportamento dos dinossauros e outros grandes vertebrados.

Os mecanismos de preservação, como as reações de Fenton e a formação de concreções minerais, explicam como tecidos moles podem ser mantidos por milhões de anos, desafiando as concepções tradicionais da fossilização. Esses achados, longe de invalidar a cronologia geológica, reafirmam a robustez dos métodos de datação científica e fornecem uma base sólida para a investigação dos processos evolutivos.

À medida que novas tecnologias avançam e mais descobertas são feitas, a preservação de tecidos moles continuará a expandir nossa compreensão sobre a história da vida na Terra, oferecendo uma janela única para o estudo de como os organismos extintos interagiram com seus ambientes e evoluíram ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

- ALLENTOFT, M. E. et al. The half-life of DNA in bone: Measuring decay kinetics in 158 dated fossils. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 279, n. 1748, p. 4724-4733, 2012.
- ALLISON, P. A. Konservat-Lagerstätten: Cause and classification. *Palaeobiology*, v. 14, n. 4, p. 331-344, 1988.
- ARMITAGE, M. H.; SOLLIDAY, G. T. Preservation of cells and soft tissue in a dinosaur from the Cretaceous of Montana. *Microscopy Today*, v. 28, n. 5, p. 10-16, 2020.
- BAILLEUL, A. M. et al. Evidence of proteins, chromosomes and chemical markers of DNA in exceptionally preserved dinosaur cartilage. *National Science Review*, v. 7, n. 4, p. 815-822, 2020.
- BERTAZZO, S. et al. Fibres and cellular structures preserved in 75-million-year-old dinosaur specimens. *Nature Communications*, v. 6, p. 7352, 2015.
- BOCHERENS, H. et al. Isotopic insight into Cretaceous steppe and forest environments in southwestern Madagascar: implications for extinction. *Biogeosciences*, v. 8, p. 953-960, 2011.
- BRIGGS, D. E. G. The role of decay and mineralization in the preservation of soft-bodied fossils. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 31, n. 1, p. 275-301, 2003.
- OARD, M. J. Dinosaur soft tissue and protein—buried in the Bible? *Journal of Creation*, v. 25, n. 1, p. 21-24, 2011.



PLET, C. et al. Iron-mediated fossilization of soft tissues in the mammaliaform Varanopidae. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 284, n. 1858, p. 1-8, 2017.

SCHWEITZER, M. H. et al. Analyses of soft tissue from *Tyrannosaurus rex* suggest the presence of protein fragments. *Science*, v. 307, p. 1952-1955, 2005.

SCHWEITZER, M. H. et al. Biomolecular characterization and protein sequences of the Campanian hadrosaur *Brachylophosaurus canadensis*. *Science*, v. 324, p. 626-631, 2009.

SCHWEITZER, M. H. et al. Soft tissue vessels and cellular preservation in *Tyrannosaurus rex*. *Science*, v. 307, n. 5717, p. 1952-1955, 2007.

SCHWEITZER, M. H. et al. Molecular preservation in Late Cretaceous sauropod dinosaur eggshells. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 281, n. 1786, 2014.

SENER, P. J. Soft Tissues in Fossil Bone: Preservation, Mechanisms, and Implications. *Palaeontologia Electronica*, v. 25, n. 1, p. 1-50, 2022.

SUMMONS, R. E. et al. Steroids and triterpenoids as molecular fossils. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 36, p. 389-425, 2008.

TRUEMAN, C. N. et al. Concretionary structures and the preservation of soft tissues in the fossil record. *Palaeontology*, v. 51, n. 1, p. 765-773, 2008.

ULLMANN, P. V. et al. Taphonomy and protein preservation in dinosaur bones: Antagonistic or complementary evidence? *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 116, p. 17425-17430, 2019.