

CAPÍTULO 2

**Paleobiologia da conservação:
lições do passado para
conservação da biodiversidade**

Alessandro Marques de Oliveira

O que é a paleobiologia da conservação?

A paleobiologia da conservação é uma disciplina nova, que surgiu a partir de discussões no início dos anos 2000, passou por um processo de maturação e agora se encontra idealmente preparada para definições e determinações de metas acordadas por meio do debate acadêmico (FLESSA, 2002; DIETL; FLESSA, 2011; DIETL et al., 2015; BARNOSK, 2017; TYLER, 2018). Em 2001, o termo “paleobiologia da conservação” foi introduzido pela comunidade paleontológica durante uma sessão específica de um evento da Convenção Paleontológica da América do Norte. A sessão foi chamada de “Novos usos para os mortos: contribuições paleobiológicas para paleobiologia da conservação”, e o termo foi empregado pela primeira vez em uma publicação científica por Simões e demais autores (2009).

A paleobiologia da conservação é, portanto, uma disciplina sintética que procura aplicar teorias e ferramentas analíticas da paleontologia para a solução de problemas relacionados à conservação da biodiversidade. Sua grande vantagem está atrelada ao fato de ser a única que possibilita a identificação de fenômenos que estão além da limitada escala de tempo das experiências humanas. Dados paleontológicos ou paleobiológicos são importantes, pois fornecem uma perspectiva a longo prazo sobre os sistemas modernos. Dessa forma, essa disciplina contribui para o desenvolvimento de políticas de conservação mais efetivas diante de um futuro incerto.

Existem duas abordagens complementares na paleobiologia da conservação. A primeira é denominada “abordagem near-time”, ou seja, numa escala de tempo mais recente. Nesse caso, as abordagens estão concentradas em dados de um

passado mais recente – há poucos milhares de anos – para fazer extrapolações para a atualidade. A segunda abordagem é denominada "deep-time", numa escala de tempo mais profunda. Nesse caso, leva-se em conta a totalidade da história da vida como um laboratório ecológico e evolutivo natural.

Dados geo-históricos e sua importância

Na primeira metade da década dos anos 2000, alguns autores começaram a perceber que estudos sobre conservação da biodiversidade ainda estavam muito concentrados em escalas de tempo curtas, as quais variavam de poucos anos a décadas. Algumas das possíveis explicações para o uso limitado de dados geo-históricos por biólogos da conservação incluem a falta de conhecimento sobre a disponibilidade desses dados ou mesmo uma relutância em usá-los. Essa resistência está possivelmente associada à falta de confiança em extrapolar os dados geo-históricos para ações e políticas de conservação. Segundo críticos, pelo fato de esses dados não serem oriundos de experimentos replicados e bem controlados em laboratório, as interpretações se tornariam muito incertas, colocando em dúvida a adequabilidade de tais informações. Apesar de essas críticas serem válidas, estudos tafonômicos podem minimizar distorções sobre as interpretações do registro fóssil. Experimentos em ambiente natural e em condições controladas de laboratório sobre a formação do registro fóssil são alguns exemplos que serão explicados adiante.

Os dados geo-históricos podem ser compreendidos em três grandes grupos: geoquímicos, litológicos e paleobiológicos

(Figura 1). Os dados geoquímicos incluem isótopos estáveis (como carbono, nitrogênio e oxigênio). Já os dados litológicos abrangem parâmetros ligados aos sedimentos, como tamanho dos grãos, estruturas sedimentares e traços fósseis. Por fim, os parâmetros paleobiológicos incluem tamanho e massa corporal, distribuição geográfica, estrutura trófica, abundância relativa e traços de DNA ou RNA preservados em fósseis.

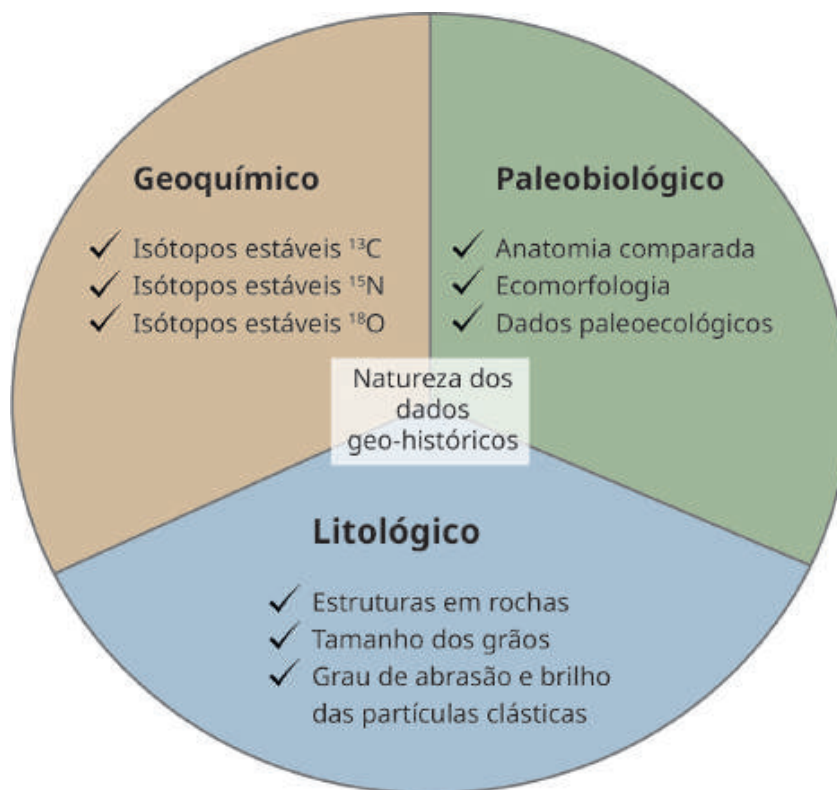


Figura 1: Diagrama que resume a natureza dos dados geo-históricos

Fonte: elaborado pelo autor.

Em suma, os dados geo-históricos, em conjunto com modelos matemáticos e dados ecológicos de natureza observacional e experimental, compõem um corpo de informações integradas e mais completas, que ajudarão os biólogos da

conservação a pensar nas melhores estratégias e ações de conservação em próximas décadas e séculos (Figura 2).

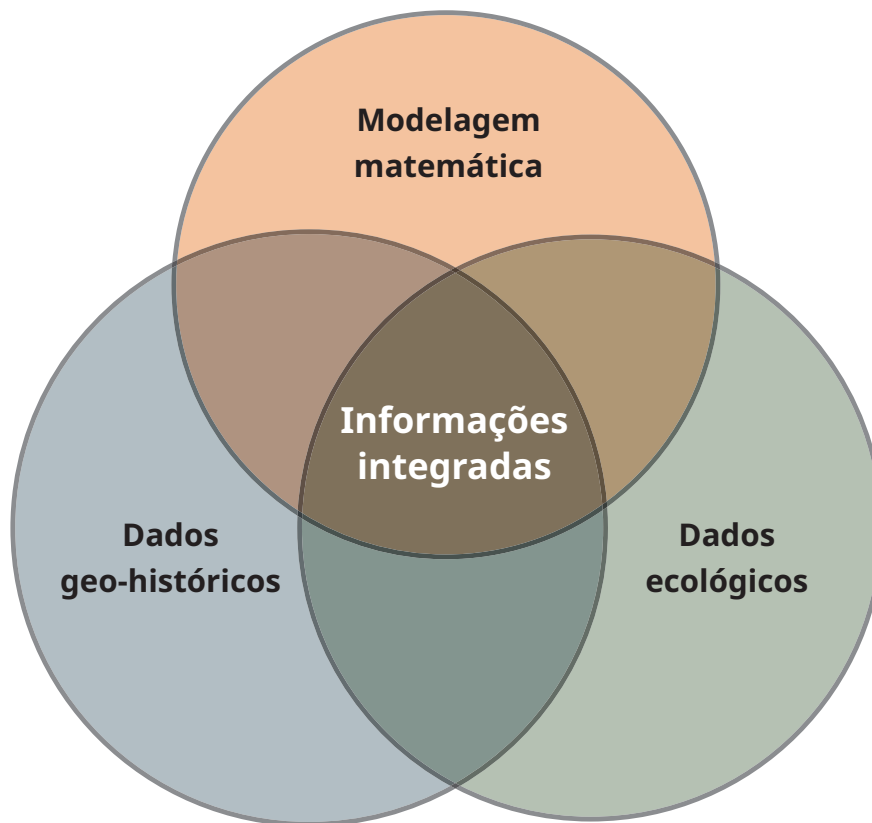


Figura 2: Diagrama indicando a sobreposição e integração dos dados geo-históricos, ecológicos e modelagens em paleobiologia da conservação

Fonte: elaborado pelo autor.

Tafonomia

A origem etimológica do termo "tafonomia" provém do grego *tafos*, que significa "sepultamento", e *nomos*, que significa "lei". Assim, tafonomia é uma disciplina da paleontologia e da arqueologia que objetiva o estudo e a compreensão dos processos de preservação e do modo como eles afetam a informação no registro fóssil (BEHRENSMEYER; KIDWELL, 1985).

Uma definição clássica dada por Efremov (1940) propõe que a tafonomia é o estudo da transição de restos animais da biosfera para a litosfera. No entanto, esse conceito se expandiu para incluir todos os tipos de restos orgânicos e seus vestígios. A tafonomia, enquanto ciência, pode servir como uma abordagem pragmática para entender a preservação do registro fossilífero e arqueológico, assim como um conceito-chave para uma busca mais ampla por conhecimento sobre processos de mudanças que estão sempre presentes no mundo natural (BEHENSMEYER et al., 2018).

Os estudos tafonômicos se ramificam em duas abordagens: bioestratinomia e diagênese dos fósseis (HOLZ; SIMÕES, 2002). A bioestratinomia se refere à história sedimentar dos restos de organismos até o momento de soterramento. Durante a fase bioestratinômica, estão envolvidas as etapas de morte, decomposição, desarticulação, transporte e soterramento dos restos. A diagênese dos fósseis, por sua vez, abrange os processos físicos, químicos e biológicos que alteram os restos dos organismos após o soterramento. Assim, a importância de estudos tafonômicos repousa na possibilidade de interpretar adequadamente uma assembleia fossilífera, no que diz respeito à sua gênese. Como consequência, informações paleobiológicas, paleoecológicas e paleoambientais podem ser acessadas.

Observações atualísticas nos permitem realizar extrapolações para o passado e identificar viesamentos tafonômicos numa assembleia fossilífera. Esse é um ramo denominado tafonomia atualística ou tafonomia experimental. Simulações

e experimentos controlados, seja em laboratório ou ambiente natural, são atividades desse ramo da tafonomia.

Os tipos de danos tafonômicos que nos permitem identificar enviesamentos são classificados de acordo com sua natureza. Esses danos podem ser de origem física (abrasão e fragmentação), química (dissolução, precipitação e alteração de cor) e biológica (bioerosão, bioturbação e incrustação). Abrasão é o processo de desgaste dos restos, tais como ossos, dentes e conchas, resultando do atrito dos restos com o substrato em que se encontra, ou mesmo com a água circundante. Um exemplo é o desgaste físico observado em ossos e conchas transportados em ambientes fluviais. O contato com o sedimento, como areias, seixos e cascalhos, num ambiente de alta energia, provoca um desgaste nas bordas dos elementos esqueléticos, dando um aspecto de polimento e arredondamento ao material. Em ambientes marinhos, conchas de moluscos tendem a perder sua ornamentação à medida que os processos abrasivos são mais intensos.

A fragmentação dos restos é um outro processo que pode estar relacionado a ambientes de alta energia. Isso vai depender da natureza do esqueleto, do tipo de organismo e do ambiente. Em geral, os ossos podem sofrer fraturas ao serem transportados em ambientes de alta energia, como pelos rios, mas também podem ser fragmentados por pisoteamento de outros animais, ação de predadores, carniceiros ou mesmo pela ação humana. Os padrões de fraturas também dão indícios sobre a história da partícula bioclástica. Ossos recentes ou frescos são bastante resistentes a quebras ou fraturas. Caso um osso longo fresco (fêmur, tíbia, úmero, rádio, ulna)

seja fragmentado na região da diáfise (centro do osso), ele apresentará um padrão de fratura irregular e pontiagudo. Esse padrão se dá pela presença de fibras colágenas, que dão resistência ao osso. No entanto, com a perda de colágeno e a precipitação de minerais em sua estrutura interna, os ossos podem ser fraturados mais facilmente. Nesse caso, as bordas da região fraturada exibirão padrões mais regulares.

Outros sinais de origem física sobre a superfície dos ossos, como marcas de estrias ou rachaduras, indicam estágios de intemperismo (Figura 3). Essas rachaduras resultam da exposição aérea de ossos à radiação solar, variações de temperatura (mais altas durante o dia e mais baixas durante a noite) e umidade. Em geral, todos esses fatores contribuem para a perda de fibras colágenas dos ossos, o que torna o osso mais friável e suscetível à desintegração. Assim, quanto maior a quantidade de rachaduras e estrias na superfície óssea, mais avançado deve ser seu estágio de intemperismo.

Quanto aos processos de origem química, a dissolução resulta de um desequilíbrio químico entre a água circundante e o resto esquelético. Em geral, ambientes com solução mais ácida dissolvem os restos esqueléticos, mas também facilitam a precipitação de alguns minerais. O aumento dos níveis de CO_2 na água, devido ao processo de decomposição de matéria orgânica, eleva os níveis de acidez. A precipitação ocorre nos pontos em que há uma supersaturação, geralmente de carbonato de cálcio, material que atua como cimento, agregando restos de bioclastos. Esse processo é comum em ambientes marinhos e no interior de cavernas calcárias. A alteração de cor é um processo que também ocorre em elementos

esqueléticos depositados em ambientes subaquáticos. Essa alteração de coloração pode ser correlacionada à precipitação de minerais (POKINES; HIGGS, 2015). Por exemplo, ossos depositados em fundos de rios ou lagos apresentam uma coloração que varia de preto, marrom ou avermelhado. Tais padrões podem estar associados à precipitação de grupos de minerais contendo ferro.

Por fim, a bioerosão é um dos principais processos de origem biológica. Trata-se de um conjunto de interações biogeoquímicas que alteram os bioclastos. Os principais agentes causadores de bioerosão incluem as algas, fungos, bivalves, gastrópodes e os artrópodes.

A ação de vertebrados também pode ser considerada um tipo de bioerosão. Por exemplo, pequenos mamíferos frequentemente são presas de corujas. Durante a digestão, as corujas não conseguem dissolver os ossos e pelos, restos regurgitados pelas corujas. O fato importante aqui é que os restos ósseos apresentarão sinais de corrosão química ocasionados pela ação do ácido gástrico. A incrustação é um outro processo de origem biológica, que pode ser definido como o estabelecimento de um organismo sobre outro. A incrustação biológica é um processo comum em ambiente marinho, em que as conchas de moluscos são incrustadas por foraminíferos, cracas ou outros moluscos.

Todos os exemplos supracitados mostram as informações fornecidas por observações de simples feições macroscópicas a respeito de antigos ambientes de deposição. Aqui, foram mencionados apenas alguns exemplos de invertebrados e

vertebrados, mas há feições específicas para cada grupo de organismos que podem ser associadas a contextos de deposição distintos. Tudo isso exemplifica, apenas parcialmente, a importância da tafonomia como ferramenta para compreender paleoambientes. Nas próximas sessões, alguns estudos de caso mostrarão de forma mais clara a relação de dados geo-históricos com a conservação da biodiversidade.

Fragmento de osso de mamífero não identificado



Fragmento de costela



Figura 3: Fragmentos de fósseis de mamíferos. À esquerda, osso longo não identificado com maior grau de abrasão física e arredondamento das bordas. À direita, fragmento de costela de mamífero. As setas indicam marcas de estrias e rachaduras

Fonte: elaborado pelo autor.

Dados geoquímicos

Conforme o mencionado previamente, a natureza dos dados geoquímicos está baseada principalmente na razão

isotópica de elementos químicos. Isótopos são elementos que possuem o mesmo número atômico, ou seja, mesmo número de prótons, mas diferentes números de nêutrons. Para exemplificar, pensemos nos isótopos de carbono. As versões do elemento carbono são bastante variadas, mas os isótopos ^{12}C e ^{13}C são os de maior interesse para nossa discussão. Os isótopos de carbono podem ser usados para inferir a paleodieta em fósseis. Primeiramente, é preciso compreender algumas das diferenças fisiológicas entre as plantas. As plantas podem ser classificadas fisiologicamente em três grupos, de acordo com as rotas bioquímicas tomadas durante a fotossíntese. Plantas do tipo C_3 são geralmente adaptadas a ambientes mais úmidos, nos quais há abundância de água, e por essa razão essas plantas esbanjam água durante seus processos metabólicos. As plantas C_4 , por outro lado, são mais bem adaptadas para viver em ambientes secos, pois tendem a ser econômicas no uso de água. Por fim, as plantas CAM também são adaptadas a ambientes secos. Algumas das consequências desses padrões bioquímicos são as diferentes razões isotópicas incorporadas na biomassa dessas plantas. As plantas C_3 apresentam valores da razão $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (ou apenas $\delta^{13}\text{C}$), dada em partes por mil, muito baixos (entre -20‰ e -35‰). Já as plantas C_4 apresentam valores mais altos (entre -9‰ e -15‰), enquanto os valores das plantas CAM podem ser intermediários (DEINES, 1980).

Quando os animais herbívoros se alimentam das plantas, eles incorporam a mesma razão de isótopos das plantas que consumiram. Por isso, é possível realizar inferências sobre seus hábitos alimentares. Diversos trabalhos sobre ecologia isotópica têm sido publicados nos últimos anos.

Muitos desses trabalhos versam sobre a paleodieta de preguiças e tatus gigantes, ungulados e grandes carnívoros, incluindo diversos fósseis do Brasil (DANTAS et al., 2017; DANTAS et al., 2019).

Recentemente, um dos presentes autores realizou a datação radiométrica e a análise de isótopos de carbono num fóssil de preguiça gigante da região do Vale do Ribeira, localizado no estado de São Paulo (OLIVEIRA, 2018). Os resultados indicaram valores baixos da razão isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ (-21.8 ‰), o que é compatível com uma dieta composta majoritariamente por plantas C_3 . Os valores são compatíveis também com ambientes onde há um certo estresse hídrico, como florestas estacionais. Além disso, a idade obtida para o fóssil foi de aproximadamente 13 mil anos. Atualmente, a região do Vale do Ribeira apresenta uma densa floresta tropical úmida. O que pode ser concluído a partir da análise desse fóssil é que, há 13 mil anos, as condições eram diferentes das atuais, com clima possivelmente um pouco mais seco. Essas interpretações estão de acordo com pesquisas de outros autores, que apontavam para um período de transição de climas mais úmidos para mais secos naquela região, em torno de 13 mil anos Antes do Presente (AP).

A razão dos isótopos de $\delta^{15}\text{N}$ num organismo fóssil pode nos fornecer informações sobre vários aspectos. Alguns autores (BOCHERENS; DRUCKER, 2003; ROBBINS et al., 2005; LEICHLITER et al., 2021) afirmam que o isótopo estável ^{15}N dos ossos de mamíferos pode ser útil para indicar o nível trófico. Para Robinson (2001), há um enriquecimento entre + 1 ‰ e + 6 ‰ em cada nível trófico. Em geral, os mamíferos que se

alimentam de proteína animal (carnívoros ou insetívoros) mostrarão valores de $\delta^{15}\text{N}$ mais altos que os herbívoros. No entanto, outros quatro fatores que afetam essa razão isotópica são: estresse hídrico, estresse proteico, idade biológica e fisiologia.

Um outro tipo de abordagem isotópica comumente aplicada é a razão $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ($\delta^{18}\text{O}$), que pode variar de acordo com condições ambientais. O isótopo ^{16}O é mais leve que o ^{18}O , sendo, portanto, mais facilmente transportado da água do mar para a atmosfera durante a evaporação. Por essa razão, os vapores de água na atmosfera possuem maior teor de ^{16}O . Apesar desse fracionamento durante a evaporação, o balanço entre os dois isótopos se mantém em períodos não glaciais, pois esse vapor retorna relativamente rápido para os oceanos por meio das precipitações, mesmo que elas ocorram no continente.

Durante períodos de glaciação, a água evaporada nas regiões intertropicais se move para regiões de alta latitude, em que são armazenadas em forma de gelo (calotas polares) com altos teores de ^{16}O . Como resultado, há um enriquecimento de ^{18}O nas águas marinhas. Em períodos mais quentes (interglaciais), ocorre o degelo dessa água enriquecida com ^{16}O , que se mistura novamente com o oceano. Esse degelo leva, portanto, ao aumento de ^{16}O nas águas marinhas. Os valores da razão $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ presente em testas de foraminíferos, conchas de moluscos ou outros organismos carregam informações a respeito do paleoclima e outras condições paleoambientais em que esses organismos viveram.

Segundo alguns autores, o período Cretáceo foi um momento de temperaturas quentes, sem calotas permanentes de gelo (STARLEY; THOMPSON; BARRON, 1981). Algumas estimativas chegaram a propor que as temperaturas dos fundos dos oceanos estavam entre 10 e 15°C, muito mais quente que atualmente. Por isso, os valores de $\delta^{18}\text{O}$ obtidos a partir de carapaças de ostracodes do Cretáceo mostram variações de temperaturas entre águas mais quentes e mais amenas. Outros fatores ambientais, como salinidade, também possuem correlação com a razão isotópica de $\delta^{18}\text{O}$. Conforme mencionado, altas temperaturas favorecem uma maior evaporação e, portanto, o enriquecimento de ^{16}O no vapor d'água e enriquecimento de ^{18}O na água do mar. Com uma maior taxa de evaporação da água do mar, ocorre o aumento da salinidade. Por essa razão, é possível fazer estimativas de paleotemperaturas, correlacionando altas temperaturas com um alto grau de salinidade em águas oceânicas.

Dados litológicos

Os dados litológicos podem fornecer informações muito valiosas sobre os ambientes de deposição. Os sedimentos clásticos, tais como partículas de areia, silte e argila, são depositados em ambientes bastante variados. Em geral, em ambientes com alta energia, como nos rios, há um maior número de seixos, cascalhos e areias grossas, pois esse tipo de material pode ser transportado pela força da correnteza. À medida que a correnteza perde força e velocidade, as partículas mais pesadas são depositadas no leito fluvial e as mais leves continuam sendo transportadas pela água. Nesse processo de transporte, as partículas tornam-se mais

polidas e arredondadas, devido ao desgaste físico ocasionado pelo atrito entre as próprias partículas (Figura 4). Quando ambientes de deposição fluvial são preservados no registro geológico, podemos observar todas essas características no sedimento. Em adição, antigos canais fluviais podem ser identificados ao observarmos um padrão de estratificação das camadas do tipo cruzada acanalada.



Figura 4: Diferentes graus de abrasão em partículas

Fonte: elaborado pelo autor.

Em ambientes de baixa energia, como fundo de lagos ou regiões muito profundas dos oceanos, os sedimentos muito finos, como silte e argila, depositam-se formando camadas paralelas. As rochas formadas a partir da deposição desses sedimentos apresentam feições muito características, como estratificação plano-paralela, às vezes com alternância de camadas de silte e argila. Um exemplo desse tipo de rocha pode ser visto no Parque do Varvito, localizado em Itu, no estado de São Paulo. Lá, há rochas formadas no leito de um antigo

lago glacial, datado entre 360 e 270 milhões de anos. Alguns seixos grandes podem ser observados em meio às camadas de argila, silte e areia, o que é interpretado como evidência de glaciação, pois partículas muito grandes podem ser carregadas para lagos glaciais por meio do deslizamento dos blocos de gelo que flutuaram sobre esses lagos. Com o degelo, as partículas maiores foram liberadas no fundo do lago.

Nos ambientes desérticos, é comum que o processo abrasivo gere um aspecto fosco nas partículas de areia. Uma aparência mais brilhante geralmente está presente nas partículas de ambientes aquáticos. O ventifacto é outro tipo de partícula comum de desertos. Esses clastos são seixos que apresentam duas ou mais faces planas. Tais estruturas são ocasionadas pela ação abrasiva dos grãos de areia carregados pelos ventos. Quando dunas de areias são preservadas no registro geológico, é possível identificá-las por padrões de estratificações do tipo cruzada.

Os exemplos citados são apenas algumas das várias formas de obter informações sobre os paleoambientes por meio das rochas e sedimentos. Várias outras estruturas e feições podem ser identificadas no registro geológico e informam sobre processos físico-químicos e condições ambientais pretéritas (PRESS et al., 2006). Dessa forma, o que foi reportado neste item compõe uma fração muito pequena sobre a natureza dos dados litológicos.

Dados paleobiológicos e paleoecológicos

Os dados geoquímicos – que já foram mencionados neste capítulo – revelam que é possível obter informações

paleoecológicas a partir dos fósseis. Contudo, há outras maneiras de obter essas informações por meio de estudos morfológicos, pela anatomia comparada e pela ecomorfologia, por exemplo. Assim, é possível conhecer hábitos, comportamentos e habitats explorados com base na forma dos organismos.

Para fornecer exemplos práticos, é possível analisar a anatomia e a morfologia de alguns vertebrados. Os Xenarthra são um grupo de mamíferos atualmente representados pelos tamanduás, tatus e preguiças arborícolas. Existiram outros Xenarthras que viveram durante a época do Pleistoceno (entre 2,5 milhões e 11,7 mil anos AP), que apresentavam diferentes formas, hábitos de vida e preferências alimentares. Muitos desses fósseis já foram encontrados em todo o continente americano, inclusive no Brasil. No estado de Minas Gerais, por exemplo, muitos fósseis de preguiças gigantes, tatus e gliptodontes têm sido encontrados no interior de cavernas calcárias. Dito isso, como podemos saber qual era a base alimentar ou o comportamento desses animais? Em geral, podemos observar algumas características, como o formato dos dentes ou das mandíbulas e maxilas superiores, e, a partir disso, inferir se tinham alguma preferência por comer folhas e frutos ou gramíneas.

No que diz respeito aos modos de exploração de substrato, os membros locomotores são bastante informativos. Por exemplo, o osso do úmero em tatus atuais apresenta uma série de características indicativas de sua alta habilidade de escavar tocas. Quando observamos o úmero de preguiças arborícolas, podemos perceber um padrão morfológico bem

distinto. Enquanto os tatus possuem cristas bem desenvolvidas, em que se inserem músculos mais desenvolvidos, as preguiças arborícolas apresentam um úmero bastante delgado, sem cristas desenvolvidas, com a cabeça do úmero bastante conspícua (Figura 5). Essas características são adaptações ao hábito arborícola do tipo suspensívoro. Para esse estilo de vida, exige-se maior liberdade para movimentar os membros superiores. Não apenas o úmero, mas outros ossos, como rádio e fêmur, são informativos a esse respeito.

Exemplo de morfologia comparada

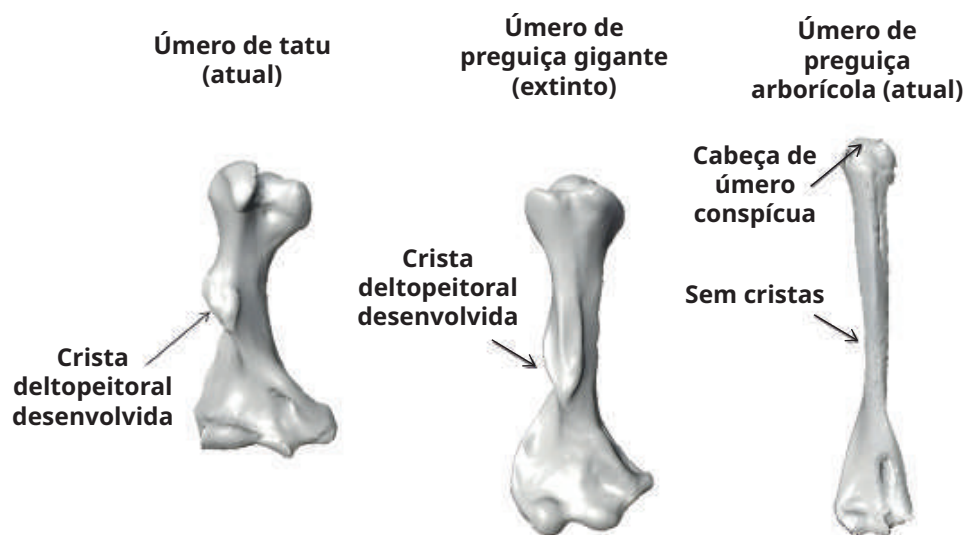


Figura 5: Úmeros de diferentes Xenarthras (atuais e extintos), com indicativo de características morfológicas específicas

Fonte: elaborado pelo autor.

Outras características dos membros locomotores podem indicar se aqueles animais eram bons corredores (cursoriais), escaladores, nadadores etc. Quando comparamos a morfologia óssea dos membros locomotores das preguiças gigantes com seus parentes atuais (tatus, tamanduás e preguiças arborícolas) podemos ter alguma noção de como esses animais se

comportavam. As preguiças, por serem animais de grande porte e apresentarem características morfológicas similares às de tatus e tamanduás, possivelmente eram animais que também tinham alguma habilidade para construir tocas, escavar o substrato em busca de alimentos e até mesmo escalar ou nadar. As espécies menores de preguiças-gigantes, como o *Nothrotherium* (tamanho similar ao de uma anta atual), provavelmente eram semiarborícolas, um hábito que hoje podemos verificar no tamanduá-mirim.

O tamanho e a massa corporal dos indivíduos, distribuição geográfica, estrutura trófica, riqueza e abundância relativa de paleopopulações, além de traços de DNA ou RNA preservados em fósseis, são outros parâmetros paleobiológicos e paleoecológicos que podem fornecer muitas informações.

Aplicação da paleobiologia da conservação: estudos de caso

Quando falamos em conservação da biodiversidade, assumimos que há ameaças à sua existência intimamente ligadas às ações antrópicas, como a fragmentação de habitats e as mudanças climáticas. No entanto, para que possamos ter uma visão holística e de longo prazo sobre o comportamento das espécies, diante de vários tipos de perturbações ambientais, é importante olharmos para as experiências passadas. Quando mudanças ambientais ocorrem, os organismos respondem a elas das mais variadas formas. Eles podem sofrer adaptações fenotípicas, migrarem para regiões mais favoráveis ou simplesmente desaparecerem.

Dietl e Flessa (2011) fizeram uma compilação de trabalhos paleobiológicos que ajudaram a compreender melhor a resposta de alguns organismos frente a mudanças climáticas e, outras, ambientais. Em alguns casos, esses estudos foram importantes na tomada de decisões sobre ações de conservação, como veremos a seguir.

Bruzgul e demais autores (2005), ao estudarem restos ósseos de salamandras da espécie *Ambystoma tigrinum*, encontrados na caverna Lamar – Yellowstone National Park, nos Estados Unidos – e datados de 3 mil anos AP, perceberam que essa espécie é capaz de explorar histórias de vida alternativas em resposta às mudanças ambientais. Em momentos de maior umidade, as formas pedomórficas eram mais abundantes nas populações, enquanto as formas metamorfoseadas eram mais abundantes nos períodos mais secos. Formas pedomórficas são aquelas que mantêm as características larvais e atingem a maturidade sexual, podendo, portanto, reproduzir-se. Nesse caso, como a forma larval é mantida, esses animais ficam restritos ao ambiente aquático. As formas que passam pela metamorfose completa vivem parte da sua vida adulta em ambiente terrestre. Por essa razão, em momentos mais secos e quentes – período em que predominavam as formas terrestres – havia maior taxa de fluxo gênico entre populações. Em adição, foi verificado um aumento no tamanho corporal dos indivíduos.

Currano e demais autores (2008) compararam a intensidade de herbivoria de insetos sobre as folhas de angiospermas da Bacia de Bighorn, no estado de Wyoming, nos Estados Unidos, datados antes, durante e depois do evento Máximo

Termal do Paleoceno/Eoceno (em torno de 55,8 milhões de anos AP). Os resultados mostraram que a intensidade de herbivoria aumentou significativamente durante os períodos de maior aquecimento do planeta.

Os casos supracitados são interessantes, visto que nos dão informações sobre as alterações das relações ecológicas diante do aquecimento global, fato defendido pela maioria dos especialistas. Esses exemplos nos mostram o quanto algumas espécies são resilientes às mudanças ambientais, sofrendo mudanças fenotípicas ou comportamentais.

Outra forma de as espécies se manterem no “jogo ecológico”, em face de mudanças ambientais, é por meio das migrações. Esse foi o caso observado por Greenstein e Pandolf (2008) ao estudarem fósseis de corais do Pleistoceno da Costa Oeste da Austrália. Corais, especialmente da família dos Acroporidae, migraram de regiões mais ao norte para os trópicos em resposta à redução das temperaturas (cerca de 2°C) de águas marinhas superficiais, desde o período interglacial há cerca de 120 mil anos AP.

Por outro lado, muitas espécies são menos resilientes e mais propensas a entrarem em extinção diante de perturbações ambientais. A extinção da megafauna do Quaternário (preguiças gigantes, tatus, gliptodontes, ursos, tigres-dente-de-sabre, entre outros) é um evento bastante debatido na comunidade científica no que diz respeito às suas causas. A hipótese “*overkill*” sugere que, após a chegada dos primeiros humanos no continente americano pelo estreito de Bering, em torno de 15 mil anos AP, a megafauna teria sido caçada por

esses grupos (MARTIN, 1973). Isso teria levado, a longo prazo, à extinção dos grandes mamíferos. Vários pontos favoráveis e contrários podem ser levantados em relação a essa hipótese.

Uma hipótese igualmente interessante é a de mudanças climáticas. Nesse caso, advoga-se que a megafauna teria sido extinta em função de mudanças climáticas. Durante o período Quaternário, houve eventos de glaciações que fizeram com que as temperaturas médias do planeta caíssem abaixo das médias atuais (16°C). São conhecidos entre quatro e seis eventos de glaciação durante o Quaternário, intercalados por períodos de aquecimento, também chamados de períodos interglaciais. O último período glacial finalizou entre 11 e 10 mil anos AP. Muitos autores entendem que foi durante o final do último período glacial que a megafauna se extinguiu. A relação causal entre esses eventos está associada ao fato de o resfriamento global também ter como consequência a redução de florestas tropicais úmidas e a expansão de florestas secas, savanas e áreas abertas em geral. Quando ocorre o aquecimento, o clima se torna mais úmido e as florestas voltam a dominar as paisagens nas regiões intertropicais. Esse processo de expansão e retração de florestas teria levado à extinção dos grandes mamíferos, que não conseguiram se adaptar às mudanças climáticas num curto intervalo de tempo.

Atualmente, vários autores entendem que não apenas uma ou outra causa teria levado à extinção da megafauna, mas uma confluência dessas e outros possíveis motivos (doenças, introdução de espécies exóticas ou catástrofes locais) (STURAT, 2014; VILLAVICENCIO et al., 2016; BROUGHTON; WEITZEL, 2018). A

discussão se concentra no quanto cada uma dessas causas interferiu na extinção da megafauna. Na América do Norte e na Austrália, é bastante aceita a ideia da caça como agente principal da extinção. Já na América do Sul, Europa e Ásia, as causas climáticas parecem ser mais convincentes. Contudo, independentemente das motivações, algo que parece claro quando olhamos as extinções do Quaternário Tardio é que grandes animais sofrem maior perda de diversidade. Boyer (2008), ao estudar os padrões de extinções da avifauna das ilhas do Havaí, percebeu que as aves de grande porte, não voadoras e que nidificam no chão, são mais propensas à extinção. Em alguns casos, mesmo espécies de porte menor, como a raposa do ártico (*Alopex lagopus*), não são capazes de traçar rotas migratórias e nem de mudar seu fenótipo. Isso pode culminar em sua extinção, que ocorreu com populações de raposa do ártico que viviam na Europa no final do Pleistoceno (cerca de 11,7 mil anos AP).

Finalmente, os dados geo-históricos podem ser decisivos para evitar que atitudes equivocadas sejam tomadas. Van Leeuwen e demais autores (2008) aplicaram dados geo-históricos para identificarem espécies não nativas e invasoras nas Ilhas Galápagos. Ao analisarem o registro fóssil de plantas e grãos de pólen, perceberam que pelo menos seis espécies não nativas estavam de fato presentes nessas ilhas antes da chegada do ser humano no local. Essas informações foram muito importantes, visto que a prioridade de conservação nas Ilhas Galápagos era a remoção de prováveis espécies invasoras.

Desafios

Diante do exposto, fica clara a importância dos dados geo-históricos. No entanto, eles raramente são considerados em políticas de conservação. Para que esse quadro seja diferente, é necessário que os dados geo-históricos sejam traduzidos para uma forma aplicável à conservação da biodiversidade. Um dos grandes desafios, portanto, dos paleobiólogos da conservação, é aprender a trabalhar em conjunto com agências, Organizações Não Governamentais (ONGs) e empresas para que esses dados tenham impactos nas políticas de conservação. Assim, é fundamental, primeiramente, aprendermos quais dados são mais importantes para esse propósito e, depois, traduzi-los para que sejam aplicados aos problemas reais de conservação da biodiversidade.

REFERÊNCIAS

- BARNOSKY, Anthony D. *et al.* Merging paleobiology with conservation biology to guide the future of terrestrial ecosystems. **Science**, v. 355, n. 6325, p. 1-11, 2017. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aah4787>. Acesso em: 12 jan. 2023.
- BEHRENSMEYER, Anna K.; DENYS, Christiane; BRUGAL, Jean-Philip. What is taphonomy and what is not? **Historical Biology**, v. 30, n. 6, p. 718-719, 2018. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/08912963.2018.1432919>. Acesso em: 12 jan. 2023.
- BEHRENSMEYER, Anna K.; KIDWELL, Susan M. Taphonomy's Contributions to Paleobiology. **Paleobiology**, v. 11, n. 1, p. 105-119, 1985. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2400427>. Acesso em: 12 jan. 2023.
- BOCHERENS, Hervé; DRUCKER, D. Trophic level isotopic enrichment of carbon and nitrogen in bone collagen: case studies from recent and ancient terrestrial ecosystems. **International Journal of Osteoarchaeology**, v. 13, n. 1-2, p. 46-53, 2003. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/oa.662>. Acesso em: 12 jan. 2023.
- BOYER, Alison G. Extinction patterns in the avifauna of the Hawaiian islands. **Diversity and Distributions**, v. 14, n. 3, p. 509-517, 2008. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1472-4642.2007.00459.x>. Acesso em: 12 jan. 2023.
- BROUGHTON, Jack M.; WEITZEL, Elic M. Population reconstructions for humans and megafauna suggest mixed causes for North American Pleistocene extinctions. **Nature Communications**, v. 9, n. 1, p. 5441, 2018. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-018-07897-1>. Acesso em: 12 jan. 2023.
- BRUZGUL, Judsen E.; LONG, Webb; HADLY, Elizabeth A. Temporal response of the tiger salamander (*Ambystoma tigrinum*) to 3,000 years of climatic variation. **BMC Ecology**, v. 5, n. 1, p. 7, 2005. Disponível em: <https://bmcecol.biomedcentral.com/articles/10.1186/1472-6785-5-7>. Acesso em: 12 jan. 2023.

- CURRANO, Ellen D. *et al.* Sharply increased insect herbivory during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 105, n. 6, p. 1960-1964, 2008. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.0708646105>. Acesso em: 12 jan. 2023.
- DANTAS, Mário André Trindade *et al.* Isotopic paleoecology of the Pleistocene megamammals from the Brazilian Intertropical Region: Feeding ecology ($\delta^{13}\text{C}$), niche breadth and overlap. **Quaternary Science Reviews**, v. 170, p. 152-163, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0277379117300616>. Acesso em: 12 jan. 2023.
- DANTAS, Mário André Trindade *et al.* Isotopic paleoecology ($\delta^{13}\text{C}$) of mesoherbivores from Late Pleistocene of Gruta da Marota, Andaraí, Bahia, Brazil. **Historical Biology**, v. 33, n. 5, p. 643-651, 2019. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/08912963.2019.1650742>. Acesso em: 12 jan. 2023.
- DEINES, P. The isotopic composition of reduced organic carbon. In: FRITZ, P.; FONTES, J. C. (org.). **Handbook of Environmental Isotope Geochemistry**. Admsterdam: Elsevier, 1980, p. 329-406.
- DIETL, Gregory P.; FLESSA, Karl W. Conservation paleobiology: putting the dead to work. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 26, n. 1, p. 30-37, 2011. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21035892/>. Acesso em: 12 jan. 2023.
- DIETL, Gregory P. *et al.* Conservation Paleobiology: Leveraging Knowledge of the Past to Inform Conservation and Restoration. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 43, n. 1, p. 79-103, 2015. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-earth-040610-133349>. Acesso em: 12 jan. 2023.
- FLESSA, Karl W. Conservation paleobiology. **American Paleontology**, v. 10, n. 1, p. 2-5, 2002.

- GREENSTEIN, Benjamin J.; PANDOLFI, John M. Escaping the heat: range shifts of reef coral taxa in coastal Western Australia. **Global Change Biology**, v. 14, n. 3, p. 513-528, 2008. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2486.2007.01506.x>. Acesso em: 12 jan. 2023.
- LEICHLITER, Jennifer N. *et al.* Nitrogen isotopes in tooth enamel record diet and trophic level enrichment: Results from a controlled feeding experiment. **Chemical Geology**, v. 563, p. 120047, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0009254120305866>. Acesso em: 12 jan. 2023.
- MARTIN, P. S. The Discovery of America: The first Americans may have swept the Western Hemisphere and decimated its fauna within 1000 years. **Science**, v. 179, n. 4077, p. 969-974, 1973. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17842155/>. Acesso em: 12 jan. 2023.
- OLIVEIRA, Alessandro M. de. **Megafauna Cenozóica do continente americano**: considerações sobre ecomorfologia, paleoecologia, evolução e paleobiogeografia. Universidade Federal do ABC, Santo André, 2018. Disponível em: <https://docplayer.com.br/169913449-Cenozoic-megafauna-from-the-american-continent-insights-on-ecomorphology-paleoecology-evolution-and-paleobiogeography.html>. Acesso em: 12 jan. 2023.
- POKINES, James T.; HIGGS, Nicholas. Macroscopic Taphonomic Alterations to Human Bone Recovered from Marine Environments. **Journal of Forensic Identification**, v. 65, n. 6, p. 953-984, 2015.
- PRESS, Frank *et al.* **Para entender a Terra**. Tradução de Rualdo Menegat. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006, p. 656.
- ROBBINS, Charles T.; FELICETTI, Laura A.; SPONHEIMER, Matt. The effect of dietary protein quality on nitrogen isotope discrimination in mammals and birds. **Oecologia**, v. 144, n. 4, p. 534-540, 2005. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15800751/>. Acesso em: 12 jan. 2023.

- SIMÕES, Marcello G.; RODRIGUES, Sabrina C.; KOWALEWSKI, Michal. *Bouchardia rosea*, a vanishing brachiopod species of the Brazilian platform: taphonomy, historical ecology and conservation paleobiology. **Historical Biology**, v. 21, n. 3-4, p. 123-137, 2009. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/08912960903315559>. Acesso em: 12 jan. 2023.
- STUART, Anthony John. Late Quaternary megafaunal extinctions on the continents: a short review. **Geological Journal**, v. 50, n. 3, p. 338-363, 2015. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/gj.2633>. Acesso em: 12 jan. 2023.
- THOMPSON, Starley L.; BARRON, Eric J. Comparison of Cretaceous and Present Earth Albedos: Implications for the Causes of Paleoclimates. **The Journal of Geology**, 2015. Disponível em: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/628577>. Acesso em: 11 set. 2022.
- TYLER, Carrie L.; SCHNEIDER, Chris L. An Overview of Conservation Paleobiology. *In*: TYLER, Carrie L.; SCHNEIDER, Chris L. (org.). **Marine Conservation Paleobiology**. Cham: Springer International Publishing, 2018, p. 1-10. (Topics in Geobiology). Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-73795-9_1. Acesso em: 28 jul. 2022.
- VAN LEEUWEN, Jacqueline F. N. *et al.* Fossil pollen as a guide to conservation in the Galapagos. **Science**, v. 322, n. 5905, p. 1206, 2008. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19023075/>. Acesso em: 12 jan. 2023.
- VILLAVICENCIO, Natalia A. *et al.* Combination of humans, climate, and vegetation change triggered Late Quaternary megafauna extinction in the Última Esperanza region, southern Patagonia, Chile. **Ecography**, v. 39, n. 2, p. 125-140, 2016. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ecog.01606>. Acesso em: 12 jan. 2023.