

METABOLISMO ENERGÉTICO DE MAMÍFEROS AQUÁTICOS - UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

Palavras-Chave: MAMÍFEROS AQUÁTICOS, ADAPTAÇÕES METABÓLICAS, CIENTOMETRIA

Autores(as):

BEATRIZ AP. F. LEITE, IB – UNICAMP

MSc BEATRIZ HELENA MACARI DAROS (co orientadora), IB – UNICAMP

Prof^(a). Dr^(a). MARIANA FREITAS NERY (orientadora), IB – UNICAMP

INTRODUÇÃO:

Os mamíferos aquáticos evoluíram de forma independente a partir de três linhagens distintas, cada uma desenvolvendo adaptações próprias para a vida no ambiente aquático (Figura 1). Uma dessas linhagens, os cetáceos (Cetacea), se divide em odontocetos (baleias com dentes) e misticetos (baleias filtradoras) (Fordyce, 2018). Outra linhagem corresponde aos sirênios, que incluem atualmente os Trichechidae (peixes-boi) e Dugongidae (dugongos) (Domning, 2018). A terceira linhagem é formada pelos pinípedes (morsas, focas e leões-marinhos), pertencentes à ordem Carnívora (Berta, 2018) (Figura 1).

Embora tenham origens evolutivas distintas, as três linhagens de mamíferos aquáticos apresentam modificações morfofisiológicas convergentes associadas à transição para o ambiente aquático. Uma das mais evidentes é o formato fusiforme do corpo, que melhora a hidrodinâmica e reduz o arrasto durante a locomoção (Berta; Sumich; Kovacs, 2015). No que diz respeito às adaptações fisiológicas, os mamíferos aquáticos compartilham um tecido especializado fundamental: o *blubber*. Esse tecido caracteriza-se em um tecido adiposo espesso e vascularizado, fundamental para isolamento térmico, flutuabilidade e armazenamento energético, podendo compor até 50% da massa corporal (Iverson; Koopman, 2018). Assim, o conjunto de adaptações morfológicas e fisiológicas convergentes revelam um plano

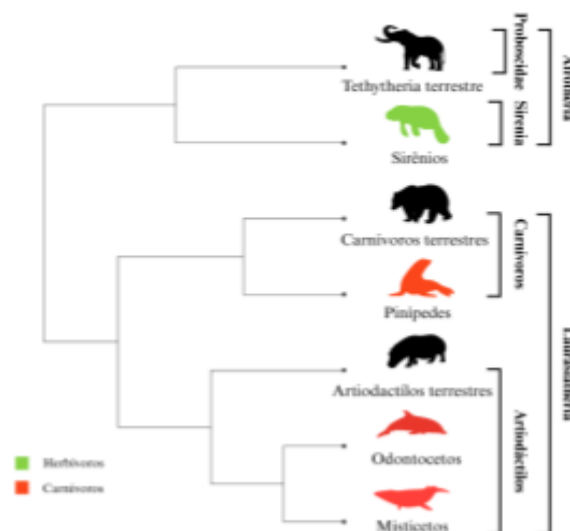


Figura 1 - Esquema de filogenia explicando as relações evolutivas entre os mamíferos aquáticos. Carnívoros e artiodáctilos são mais próximos filogeneticamente, compondo o grupo Laurasiatheria. Os sirênios estão mais próximos filogeneticamente aos proboscídeos, sendo representantes de Afrotheria. Em vermelho estão representados os animais com dietas carnívoras, sendo pinípedes e odontocetos caçadores ativos e misticetos filtradores (krill e pequenos crustáceos). E em verde estão os animais estritamente herbívoros, representados exclusivamente pelos sirênios.

corporal característico, e indicam a importância da eficiência locomotora para a sobrevivência desses animais em ambientes aquáticos.

Para além das adaptações corporais convergentes, os mamíferos aquáticos possuem particularidades metabólicas notáveis decorrentes de seus diferentes hábitos de vida. Hipotetiza-se que muitas das adaptações metabólicas estejam relacionadas à elevada demanda energética imposta pelo ambiente aquático, variando conforme as estratégias alimentares, dietas e formas de regulação metabólica de cada grupo (Costa; Maresh, 2018). Estudos recentes identificaram particularidades metabólicas notáveis, como hiperglicemia e hiperinsulinemia pós-prandial em odontocetos, resistência insulínica adaptativa durante longos jejuns em pinípedes e a possível perda funcional da cetogênese em cetáceos (Houser; Champagne; Crocker, 2013; Venn-Watson, 2013; Wolfgang; Choi; Scafidi, 2021). No entanto, ainda não existe uma síntese abrangente que organize e integre esses achados.

Embora existam diversos estudos isolados sobre as adaptações metabólicas de mamíferos aquáticos, falta uma sistematização abrangente dessas descobertas. Essa lacuna dificulta uma compreensão mais ampla dos mecanismos moleculares e fisiológicos por trás dessas adaptações (Wolfgang; Choi; Scafidi, 2021). Neste contexto, este estudo tem como objetivo a realização de uma revisão sistemática, complementada por análises ciêtométricas, sobre o metabolismo energético em mamíferos aquáticos. Além de sintetizar os achados, a realização de uma revisão sistemática possibilitará a identificação das principais lacunas, melhorando a compreensão de diversos conceitos e possibilitando que novos trabalhos explorem a temática. Espera-se que esse trabalho sirva de base para a produção de novos estudos envolvendo mamíferos aquáticos, tanto no campo metabólico, quanto no ecológico-evolutivo.

METODOLOGIA:

Revisão Sistemática

A revisão sistemática foi conduzida conforme as etapas propostas por Donato e Donato (2019), tendo como base a metodologia PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). Inicialmente, foi elaborado uma *string* de busca utilizando palavras-chave relevantes ao tema de interesse e operadores lógicos - *AND* e *OR*. A busca foi realizada através da ferramenta de busca avançada em três bases de dados: Scopus (<https://www.sciencedirect.com/search/entry>), PubMed (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/advanced/>) e Web of Science (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/advanced-search>). Os artigos encontrados foram submetidos a um processo de remoção de duplicatas. Em seguida, houve a definição de critérios de inclusão e exclusão para a seleção dos estudos relevantes para a pesquisa. A triagem inicial foi realizada com base na leitura dos resumos, de modo a identificar os artigos que atendem aos critérios estabelecidos. Os estudos selecionados nessa etapa foram submetidos à leitura integral do corpo textual para verificação final de sua elegibilidade. Os artigos incluídos serão analisados e sintetizados para compor a escrita de um artigo de revisão (Figura 2).

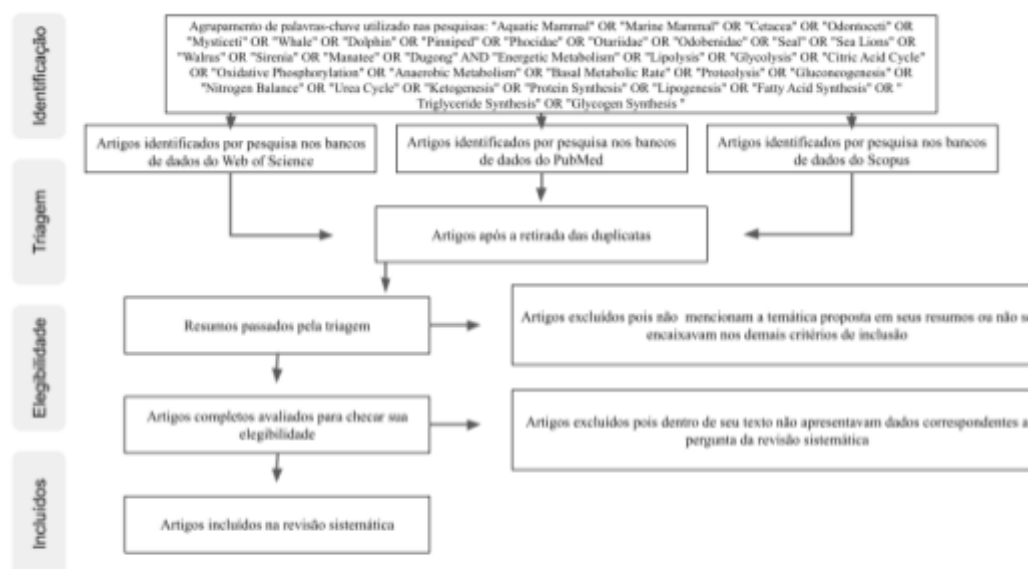


Figura 2 - Fluxograma de trabalho roteirizado no método PRISMA. Apresenta o *string* de pesquisa utilizado e as etapas seguintes do levantamento bibliográfico inicial do projeto.

Análise Cientométrica

A análise cientométrica foi realizada com o auxílio do software VOSviewer v1.6.20 (VAN ECK; WALTMAN, 2010), amplamente empregado para mapeamento e visualização de redes bibliométricas. Inicialmente, a amostra foi composta por artigos das três bases de dados, selecionados conforme critérios de elegibilidade. No entanto, devido à incompatibilidade entre os formatos de exportação, não foi possível integrar os arquivos das três fontes em uma única análise no VOSviewer. Assim, optou-se por realizar as análises com os dados provenientes exclusivamente da base Web of Science, por concentrar o maior número de artigos da amostra. Os metadados foram previamente padronizados no Google Sheets, com correções em campos essenciais (e.g., título, autores, palavras-chave) para assegurar a qualidade da análise. Adicionalmente, o software R (R CORE TEAM, 2024) foi utilizado para a produção de gráficos complementares. Foi implementada uma divisão temática entre os artigos, com o objetivo de delimitar a área de abordagem dentro do tema metabolismo energético: desenvolvimento, metabolismo de macronutrientes, resposta ao estresse, respiração celular e gasto energético. Foram geradas redes de coautoria, citação direta e coocorrência de termos com base nos metadados. Todas as redes aplicaram filtro de distribuição temporal (ano de publicação), sendo que, na rede de citação, utilizou-se a força do link como métrica principal de tamanho de nó. Para rede de coocorrência de termos, foi utilizado um número mínimo de 4 ocorrências.

RESULTADOS PRELIMINARES:

A busca nas três bases de dados resultou em um total de 1.498 artigos. Após a remoção das duplicatas, restaram 1.268 publicações, as quais foram submetidas aos critérios de inclusão e exclusão por meio da leitura dos resumos. Destes, 203 artigos atenderam aos critérios e foram avaliados integralmente. Após a leitura do corpo-textual completo, 103 artigos foram incluídos na revisão sistemática. Dentre eles, 83 apresentaram metadados compatíveis com o software utilizado e, portanto, foram utilizados nas análises cientométricas.

A primeira análise consistiu na contagem do número de artigos por linhagem de mamíferos aquáticos. Observou-se que focídeos são animais amplamente estudados, com 63 artigos, enquanto os sirênios são sub-representados com apenas 2 trabalhos. Também foi analisada a abordagem temática abordada nos estudos, em que notavelmente metabolismo de macronutrientes e estudos sobre gasto energético destacam-se (Figura 3).

A distribuição geográfica das publicações indica uma concentração significativa de estudos nos Estados Unidos, que totalizam 63 artigos. De modo geral, as publicações estão majoritariamente vinculadas a instituições localizadas no norte global (Figura 4). A análise de coocorrência de termos revelou tendências temáticas atuais nas pesquisas sobre metabolismo energético em mamíferos aquáticos, com destaque para estudos em cetáceos e no metabolismo de lipídeos.

As análises de coautoria e citação identificam grupos de pesquisa consolidados e autores com forte influência na área. O pesquisador Ph.D. Daniel E. Crocker se destaca como principal autor, com múltiplas publicações sobre o metabolismo energético de elefantes-marinhos-do-norte, o que contribui para a expressiva presença de focídeos na literatura. Observa-se, ainda, uma tendência recente de aumento nas publicações envolvendo cetáceos, acompanhada do surgimento de novos grupos de autores, o que está de acordo com os dados da rede de coocorrência (Figura 6).

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos até o momento evidenciam padrões importantes sobre as abordagens do metabolismo energético em

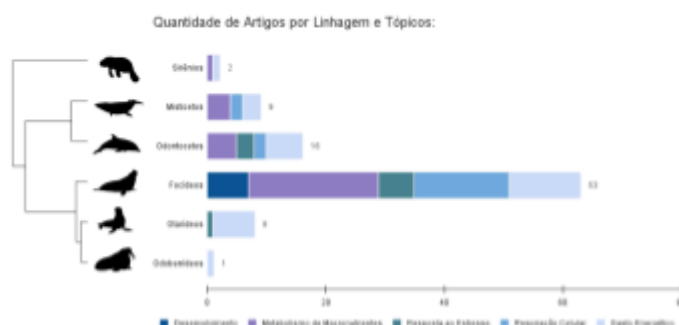


Figura 3 - Gráfico de barras representando o número total de artigos obtidos por linhagens de mamíferos aquáticos. As barras menores indicam a quantidade de artigos por tópicos abordados. Uma filogenia está acoplado ao gráfico, ilustrando a divisão entre as linhagens.



Figura 4 - Heatmap apresentando a quantidade de publicações por país na amostra analisada. A variação dos tons de azul indica a quantidade - quanto mais escuro, maior o número de publicações.



Figura 5 - Rede de coautoria. Os nós maiores indicam os autores com maior número de publicações, e as linhas representam colaborações entre eles.



Figura 6 - Rede de cocitação. Os nós maiores representam os artigos mais citados internamente. As linhas ilustram as citações entre as publicações. Os artigos são identificados pelo nome do primeiro autor e ano de publicação.

mamíferos aquáticos, destacando desigualdades taxonômicas e geográficas nas publicações. As próximas etapas envolvem a escrita do artigo de revisão e a continuidade das análises cientométricas, com foco na identificação dos principais periódicos e das lacunas na literatura.

BIBLIOGRAFIA

BERTA, Annalisa. Pinniped Evolution. In: WÜRSIG, Bernd; THEWISSEN, J. G. M.; KOVACS, Kit M. (orgs.). **Encyclopedia of Marine Mammals (Third Edition)**. [S. l.]: Academic Press, 2018. p. 712–722. DOI 10.1016/B978-0-12-804327-1.00196-5. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128043271001965>. Acesso em: 4 abr. 2025.

BERTA, Annalisa; SUMICH, James L.; KOVACS, Kit M. Chapter 3 - Pinniped Evolution and Systematics. In: BERTA, Annalisa; SUMICH, James L.; KOVACS, Kit M. (orgs.). **Marine Mammals (Third Edition)**. San Diego: Academic Press, 2015. p. 35–61. DOI 10.1016/B978-0-12-397002-2.00003-X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012397002200003X>. Acesso em: 4 abr. 2025.

COSTA, Daniel P.; MARESH, Jennifer L. Energetics. In: WÜRSIG, Bernd; THEWISSEN, J. G. M.; KOVACS, Kit M. (orgs.). **Encyclopedia of Marine Mammals (Third Edition)**. [S. l.]: Academic Press, 2018. p. 329–335. DOI 10.1016/B978-0-12-804327-1.00119-9. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128043271001199>. Acesso em: 9 abr. 2025.

DOMNING, Daryl P. Sirenian Evolution. In: WÜRSIG, Bernd; THEWISSEN, J. G. M.; KOVACS, Kit M. (orgs.). **Encyclopedia of Marine Mammals (Third Edition)**. [S. l.]: Academic Press, 2018. p. 856–859. DOI 10.1016/B978-0-12-804327-1.00229-6. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128043271002296>. Acesso em: 3 abr. 2025.

DONATO, H.; DONATO, M. Etapas na condução de uma revisão sistemática. **Acta Médica Portuguesa**, v. 32, n. 3, p. 227–235, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/332084935_Etapas_na_Conducao_de_uma_Revisao_Sistematica. Acesso em: 7 abr. 2025.

FORDYCE, R. Ewan. Cetacean Evolution. In: WÜRSIG, Bernd; THEWISSEN, J. G. M.; KOVACS, Kit M. (orgs.). **Encyclopedia of Marine Mammals (Third Edition)**. [S. l.]: Academic Press, 2018. p. 180–185. DOI 10.1016/B978-0-12-804327-1.00088-1. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128043271000881>. Acesso em: 4 abr. 2025.

HOUSER, Dorian S.; CHAMPAGNE, Cory D.; CROCKER, Daniel E. A Non-Traditional Model of the Metabolic Syndrome: The Adaptive Significance of Insulin Resistance in Fasting-Adapted Seals. **Frontiers in Endocrinology**, [s. l.], v. 4, p. 164, 1 nov. 2013. <https://doi.org/10.3389/fendo.2013.00164>.

IVERSON, Sara J.; KOOPMAN, Heather N. Blubber. In: WÜRSIG, Bernd; THEWISSEN, J. G. M.; KOVACS, Kit M. (orgs.). **Encyclopedia of Marine Mammals (Third Edition)**. [S. l.]: Academic Press, 2018. p. 107–110. DOI 10.1016/B978-0-12-804327-1.00069-8. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128043271000698>. Acesso em: 7 abr. 2025.

VENN-WATSON, S. Blood-based indicators of insulin resistance and metabolic syndrome in bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*). **Front Endocrinol (Lausanne)**, [s. l.], v. 4, 2013. DOI 10.3389/fendo.2013.00136. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fendo.2013.00136>

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. *Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping*. **Scientometrics**, v. 84, n. 2, p. 523–538, 2010. DOI: 10.1007/s11192-009-0146-3..

WOLFGANG, Michael J.; CHOI, Joseph; SCAFIDI, Susanna. Functional loss of ketogenesis in odontocete cetaceans. **Journal of Experimental Biology**, [s. l.], v. 224, n. 20, p. jeb243062, 28 out. 2021. <https://doi.org/10.1242/jeb.243062>.