

Evolución del corazón en vertebrados V. Mamíferos

Lorena González Vadillo¹, Brenda Romero Flores² y Roberto Lazzarini Lechuga^{1*}

1. Departamento de Biología de la Reproducción, Universidad Autónoma Metropolitana unidad Iztapalapa, C.P. 09310, Ciudad de México, México.
2. Posgrado en Biología Experimental, Universidad Autónoma Metropolitana unidad Iztapalapa, C.P. 09310, Ciudad de México, México.

*** Autor de correspondencia:**

Roberto Lazzarini Lechuga
lazzarini@xanum.uam.mx

RESUMEN

Los mamíferos surgieron hace 250 millones de años (MDA) a partir de reptiles sinápsidos, se distinguen por: poseer pelo, glándulas mamarias, dentición diferenciada y un corazón cuatricameral esencial para un metabolismo endotérmico eficiente. En los mamíferos, el corazón se ubica en la cavidad torácica, separa completamente la circulación pulmonar y sistémica, y mantiene un flujo sanguíneo unidireccional. La diversidad del grupo Mammalia se refleja en adaptaciones específicas del corazón. En la ballena azul (*Balaenoptera musculus*), el corazón, de gran tamaño, permite inmersiones prolongadas mediante bradicardia extrema. En el murciélago vampiro (*Desmodus rotundus*), el órgano está adaptado al vuelo sostenido, con una alta frecuencia cardíaca y una densa red capilar. En los humanos (*Homo sapiens*), el corazón presenta modificaciones para mantener la perfusión cerebral en el bipedismo. Estas variaciones demuestran la relación entre evolución, anatomía y ecología en los mamíferos.

Palabras clave. *Balaenoptera musculus*, *Desmodus rotundus*, Evolución cardíaca, *Homo sapiens*, Vertebrados.

ABSTRACT

Mammals emerged approximately 250 million years ago (MYA) from synapsid reptiles. They are characterized by the presence of hair, mammary glands, differentiated dentition, and a four-chambered heart essential for an efficient endothermic metabolism. In mammals, the heart is in the thoracic cavity, completely separates pulmonary and systemic circulation, and ensures unidirectional blood flow. The diversity within the mammalian group is reflected in specific adaptations of the heart. In the blue whale (*Balaenoptera musculus*), the large heart supports prolonged dives through extreme bradycardia. In the vampire bat (*Desmodus rotundus*), the heart is adapted for sustained flight, featuring a high heart rate and a dense capillary network. In humans (*Homo sapiens*), the heart exhibits modifications to maintain cerebral perfusion during bipedalism. These variations highlight the relationship between evolution, anatomy, and ecology in mammals.

Keywords. Cardiac evolution, *Balaenoptera musculus*, *Desmodus rotundus*, *Homo sapiens*, Vertebrates.

INTRODUCCIÓN

Los mamíferos aparecieron como pequeños animales insectívoros durante el periodo Triásico, hace aproximadamente 250 MDA (Grossnickle et al., 2019). Evolucionaron a partir de reptiles sinápsidos, un grupo caracterizado por poseer un solo arco temporal en el cráneo (Luo, 2007; Vivien et al., 2016). Los mamíferos, se distinguen por el desarrollo del oído medio y dientes especializados (Luo, 2007), adaptaciones que les otorgaron ventajas para cazar, consumir insectos y sobrevivir en ecosistemas dominados por los reptiles (Grossnickle et al., 2019).

Los mamíferos se caracterizan por la presencia de pelo en alguna etapa de su vida, glándulas mamarias (Luo, 2007), una placenta en los Eutheria (Poelmann et al., 2014), un oído medio con tres huesos, y una dentición diferenciada o heterodoncia (Luo, 2007). Además, poseen un corazón cuatricameral que separa por completo la circulación pulmonar y sistémica, y permite un metabolismo endotérmico eficiente (Bishopric, 2005).

El corazón de los mamíferos es una de las estructuras anatómicas más estudiadas debido a su complejidad funcional y sus adaptaciones para soportar un metabolismo elevado (Bishopric, 2005). Actualmente, la clase Mammalia incluye 27 órdenes, divididos entre monotremas, marsupiales y Eutheria (placentarios) (Stephenson et al., 2017). En este artículo se abordarán las adaptaciones anatómicas y fisiológicas del corazón de la ballena azul (*Balaenoptera musculus*), el murciélago vampiro (*Desmodus rotundus*) y el humano (*Homo sapiens*).

CLASE MAMMALIA

El corazón de los mamíferos está ubicado en la cavidad torácica, dentro del saco pericárdico entre los pulmones, su base está orientada hacia la parte dorsal del cuerpo, mientras que el ápice apunta hacia el lado izquierdo del cuerpo. Esta ubicación central permite una distribución equitativa de la sangre a los circuitos pulmonar y sistémico (Gair, et al., 2022).

El corazón, consta de dos atrios y dos ventrículos, separados por válvulas que aseguran un flujo sanguíneo unidireccional (Rowlatt, 1968). El ventrículo izquierdo es más robusto que el derecho y bombea sangre a la circulación sistémica, mientras que el ventrículo derecho dirige la sangre hacia los pulmones para su oxigenación (Meijler & Meijler, 2011) (Figura 1A).

Los mamíferos son un grupo diverso, adaptado a una amplia gama de ambientes y hábitos (Bettex et al., 2014). En monotremas, como el ornitorrinco (*Ornithorhynchus anatinus*), el corazón muestra similitudes con los reptiles, como un ritmo cardíaco más lento y un mayor uso de shunts vasculares para redistribuir el flujo sanguíneo durante la inmersión acuática (Grimes et al., 2010). Los marsupiales, como el canguro rojo (*Macropus rufus*), tienen un rango de frecuencia cardíaca que puede ajustarse a demandas metabólicas variables, desde un estado de reposo con una baja frecuencia cardíaca de 40-50 latidos por minuto hasta más de 200 durante la actividad intensa (Frappell & Baudinette, 1995). Además, en ambientes áridos, los canguros pueden reducir su tasa metabólica basal y la frecuencia cardíaca para conservar agua y energía (Dawson, 2012). Por otro lado, la frecuencia cardíaca depende del tamaño corporal, por ejemplo, pequeños mamíferos como los ratones tienen una frecuencia cardíaca superior a 500 latidos por minuto, mientras que, en grandes mamíferos como los elefantes, la frecuencia es inferior a 30 latidos por minuto (Hillman & Hedrick, 2015).

La circulación sanguínea en los mamíferos es doble y completa. La sangre desoxigenada ingresa al atrio derecho a través de las venas cavas (superior e inferior) (Poelmann *et. al.*, 2014). Desde allí, pasa al ventrículo derecho, que la impulsa hacia los pulmones a través de la arteria pulmonar para ser oxigenada (Jensen *et al.*, 2012). La sangre oxigenada regresa al atrio izquierdo mediante las venas pulmonares y es conducida al ventrículo izquierdo, que la bombea hacia la circulación sistémica a través de la aorta (Bishopric, 2005).

El sistema de conducción cardíaco coordina la contracción del corazón mediante la generación y propagación de impulsos eléctricos, el nodo sinoauricular, ubicado en la pared del atrio derecho, actúa como el marcapasos natural, e inicia la señal eléctrica (Jensen *et al.*, 2013). La señal eléctrica viaja al nodo atrioventricular, situado en la parte inferior del tabique interartrial, retrasa brevemente el impulso para permitir el llenado completo de los ventrículos (Stephenson *et al.*, 2017). A continuación, el impulso eléctrico se transmite a través del haz de His, que recorre el tabique interventricular, y finalmente se distribuye mediante las fibras de Purkinje, que están dispersas por el miocardio ventricular, y asegura las contracciones sincronizadas (Jensen *et al.*, 2013) (Figura 1B).

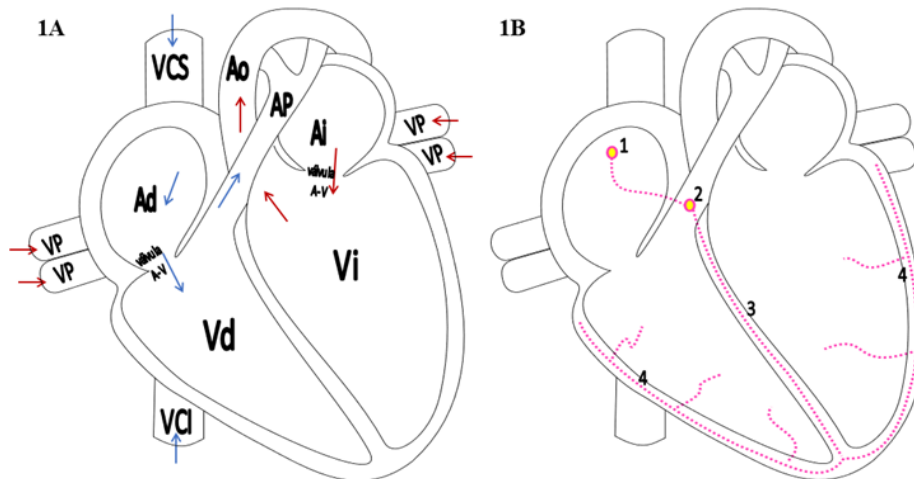


Figura 1. A) Esquema de la anatomía del corazón de la clase mammalia, Vena Cava Superior (VCS) Vena Cava Inferior (VCI) Atrio derecho (Ad) Válvula atrioventricular (A-V) Ventrículo derecho (Vd) Arteria Pulmonar (AP) Vena Pulmonar (VP) Atrio izquierdo (Ai) Ventrículo izquierdo (Vi) Aorta (Ao) B) Esquema del sistema de conducción cardíaco, Nodo sinoatrial (1), nodo atrioventricular (2), haz de His (3), fibras de Purkinje ventriculares (4).

A nivel celular, la contracción cardíaca en mamíferos depende de la actividad coordinada del sistema de conducción y del retículo sarcoplásmico: una red intracelular de membranas en las células musculares encargada de regular el almacenamiento y la liberación de calcio, un ion esencial para la contracción muscular (Shiels & Galli, 2014). Aunque el retículo sarcoplásmico está presente en todos los vertebrados, en los mamíferos desempeña un papel central en la dinámica rápida del ciclo contracción-relajación del miocardio, lo que permite mantener un ritmo cardíaco elevado y eficiente. La interacción entre el sistema de conducción y la fisiología intracelular asegura las contracciones sincronizadas necesarias para sostener un flujo sanguíneo continuo y adaptarse a las demandas metabólicas del organismo (Jensen *et al.*, 2013; Shiels & Galli, 2014).

***Balaenoptera musculus* (Ballena azul)**

Las ballenas, incluidas en el orden Cetacea, evolucionaron hace aproximadamente 50 MDA a partir de mamíferos terrestres que regresaron al medio acuático (Bettex *et al.*, 2014). Este grupo comparte un ancestro común con los artiodáctilos, como los hipopótamos (Gatesy, 1997).

El corazón de la ballena azul (Figura 2), el animal más grande del planeta puede pesar más de 180 kilogramos y bombear hasta 220 litros de sangre por latido (Race *et al.*, 1959). Su fisiología incluye adaptaciones como bradicardia extrema durante el buceo, donde la frecuencia cardíaca puede reducirse a menos de 10 latidos por minuto para conservar oxígeno (Goldbogen *et al.*, 2019). Además, poseen un sistema de vasos sanguíneos elásticos que permite el almacenamiento temporal de sangre durante inmersiones prolongadas, y garantizan un suministro constante a órganos vitales (Lillie *et al.*, 2013).

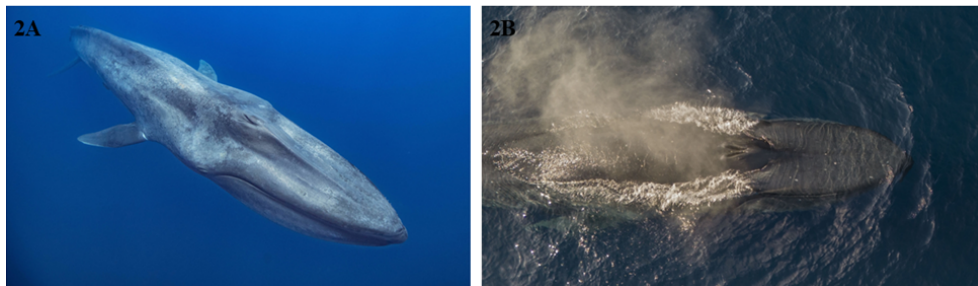


Figura 2. Ballena Azul pigmea *Balaenoptera musculus ssp. Brevicauda*

A) Licencia: <https://mexico.inaturalist.org/observations/252451630>,

B) Licencia: <https://mexico.inaturalist.org/observations/115155480>

***Desmodus rotundus* (Murciélago vampiro)**

Los murciélagos, pertenecen al orden Chiroptera, son los únicos mamíferos con capacidad de vuelo sostenido (Chang *et al.*, 2022). Evolucionaron hace unos 52 MDA y comparten un ancestro común con los primates (Stephenson *et al.*, 2017).

El corazón del murciélago vampiro (Figura 3) está altamente adaptado para soportar las demandas metabólicas del vuelo. Su frecuencia cardíaca puede alcanzar los 1,000 latidos por minuto durante el vuelo activo, una de las frecuencias de latido más altas registradas entre los mamíferos (Hillman & Hedrick, 2015; Chang *et al.*, 2022). Además, presentan una alta densidad de capilares y mitocondrias en el miocardio, lo que maximiza el intercambio de gases y la producción de energía (Mathieu-Costello & Brill, 1996).

***Homo sapiens* (Humano)**

Los *Homo sapiens* emergieron hace aproximadamente 300,000 años en el continente africano (Stringer, 2016). Los humanos pertenecemos al género *Homo*, que se caracteriza por encéfalos grandes, una organización social compleja (Dunbar, 2009), fabricación de herramientas (Henshilwood *et al.*, 2002), pensamiento abstracto (Mellars *et al.*, 2007) y el uso de lenguaje simbólico (Tattersall, 2009). La diversificación de los humanos ocurrió a través de múltiples migraciones fuera de África hace aproximadamente 70,000 años (Stringer, 2016).

El bipedismo de los humanos, influyo en cambios en el corazón para enfrentar las demandas de mantener un adecuado retorno venoso y perfusión cerebral contra la gravedad (Bagshaw, 1996; Schulte et al., 2015).

El sistema de conducción en humanos presenta un nodo sinoauricular robusto (Stephenson et al., 2017), la redistribución de la carga hemodinámica con un ventrículo izquierdo que soporta una presión sistólica de aproximadamente 120 mmHg en reposo (Jensen et al., 2013), válvulas en las venas de las extremidades inferiores que previenen el reflujo sanguíneo y reflejos barorreceptores que coordinan ajustes rápidos en la presión arterial durante los cambios de postura (Yates et al., 2014).

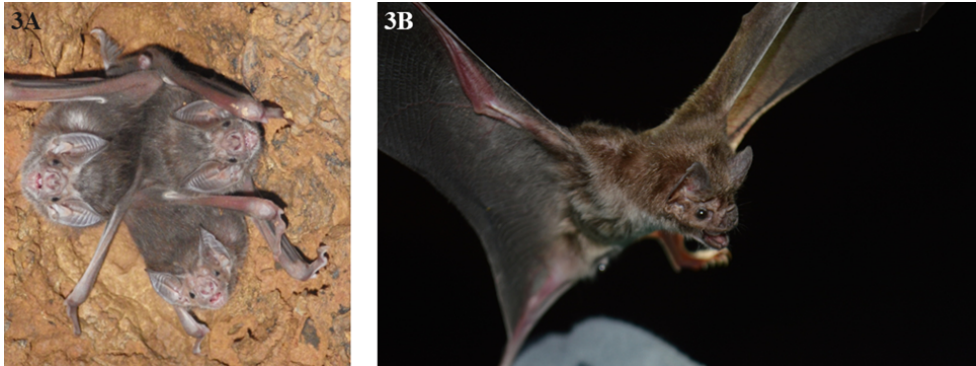


Figura 3. Murciélago vampiro *Desmodus rotundus*.

A) Licencia: <https://mexico.inaturalist.org/observations/218422928>

B) Licencia: <https://mexico.inaturalist.org/observations/155255554>

El corazón humano refleja su historia evolutiva durante la embriogénesis (Figura 4). Inicialmente, se desarrolla como un tubo cardíaco similar al de los agnatos (González et al., 2024). Posteriormente, aparecen estructuras como el seno venoso y el bulbo arterioso (*bulbus cordis*) características observadas en los peces (González et al., 2024). En los mamíferos, el seno venoso se conserva en la entrada del atrio derecho y el bulbo arterioso forma parte del tronco arterial, los tractos de salida ventriculares subvalvares (Anderson et.al., 2016) y del ventrículo derecho (Kelly, 2007; Lazzarini et al., 2018). Por otro lado, el ventrículo primitivo, que en peces y anfibios (González et al., 2024) constituye el principal compartimento de bombeo, en mamíferos se conserva en la evolución y formar al ventrículo izquierdo (Poelmann et al., 2014). Es probable, que el atrio único observado en los peces se elongó y dividió en el atrio derecho e izquierdo.

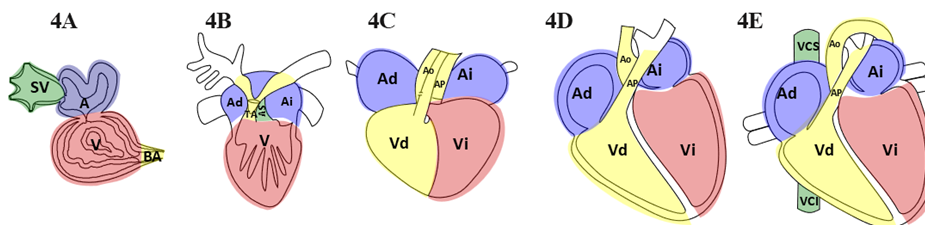


Figura 4. Esquema filogenético de la anatomía cardíaca de los vertebrados, la embriogénesis del corazón refleja su historia evolutiva. A) Pez pulmonado, Seno Venoso (SV) Atrio (A)

Ventrículo (V) Bulbo arterioso (BA) B Anfibio Anuro, Atrio derecho (Ad) Atrio izquierdo (Ai) Tronco arterioso (TA) Ventrículo (V) Seno Venoso (SV) C Reptil Crocodylia D Ave E Mamífero Atrio derecho (Ad) Atrio izquierdo (Ai) Ventrículo derecho (Vd) Ventrículo izquierdo (Vi) Aorta (Ao) Arteria Pulmonar (AP) Vena Cava Superior (VCS) Vena Cava Inferior (VCI).

Durante el desarrollo embrionario, también se observan estructuras como el foramen oval y el *ductus arteriosus*, que permiten el flujo directo entre los atrios y arterias principales, evitando la circulación pulmonar en el feto humano (Remien & Majmundar, 2023; Kiserud, 2005). Este mecanismo es comparable al foramen de Panizza en cocodrilos, que conecta los atrios derecho e izquierdo y permite la mezcla y redirección del flujo sanguíneo, especialmente durante inmersiones prolongadas (González et al., 2024).

CONSIDERACIONES FINALES

El estudio de la evolución del corazón en los mamíferos proporciona una comprensión profunda de la cardiogénesis y su relación con las presiones ambientales selectivas. Comparativamente, tanto los mamíferos como las aves desarrollaron un corazón de cuatro cámaras para satisfacer las demandas de un metabolismo elevado. Sin embargo, esta convergencia evolutiva ocurrió de manera independiente (Bettex et al., 2014).

La diversidad anatómica y fisiológica del corazón en las diferentes clases de vertebrados hace evidente la estrecha relación entre evolución y medio ambiente. Este conocimiento no solo es crucial para comprender nuestra propia biología, sino también para desarrollar nuevas estrategias en medicina regenerativa y cardiovascular.

REFERENCIAS

- Anderson, R. H., Mori, S., Spicer, D. E., Brown, N. A., & Mohun, T. J. (2016). Development and Morphology of the Ventricular Outflow Tracts. *World Journal for Pediatric and Congenital Heart Surgery*, 7(5), 561–577. <https://doi.org/10.1177/2150135116651114>
- Bagshaw, R. J. (1996). Human cardiovascular evolution and intracranial saccular aneurysms: An hypothesis. *Neurological Research*, 18(3), 191–198. <https://doi.org/10.1080/01616412.1996.11740374>
- Bettex, D. A., Prêtre, R., & Chassot, P. G. (2014). Is our heart a well-designed pump? The heart along animal evolution. *European Heart Journal*, 35(34), 2322–2332. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehu222>
- Bishopric, N. H. (2005). Evolution of the heart from bacteria to man. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1047, 13–29. <https://doi.org/10.1196/annals.1341.002>
- Chang, Y. H., Sheftel, B. I., & Jensen, B. (2022). Anatomy of the heart with the highest heart rate. *Journal of Anatomy*, 241(1), 173–190. <https://doi.org/10.1111/joa.13640>
- Dawson, T. J. (2012). *Kangaroos: Biology of the largest marsupials*. CSIRO Publishing.
- Dunbar, R. I. M. (2009). The Social Brain Hypothesis and its Implications for Social Evolution. *Annals of Human Biology*, 36(5), 562–572. <https://doi.org/10.1080/03014460902960289>
- Frappell, P. B., & Baudinette, R. V. (1995). Energetics of hopping in the red kangaroo (*Macropus rufus*): The influence of age, body size, and speed. *The Journal of Experimental Biology*, 198(4), 1691–1697.
- Gair, J., Molnar, C., & NSCC Academic Biology. (2022). 21.3. Mammalian Heart and Blood Vessels. NSCC Pressbooks. Recuperado de <https://pressbooks.nsc.ca/biology1050/chapter/21-3-mammalian-heart-and-blood-vessels/>

- Gatesy, J. (1997). More DNA support for a Cetacea/Hippopotamidae clade: the blood-clotting protein gene gamma-fibrinogen. *Molecular Biology and Evolution*, 14(5), 537–543. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.molbev.a025785>
- Goldbogen, J. A., Cade, D. E., Calambokidis, J., *et. al.* (2019). Extreme bradycardia and tachycardia in the world's largest animal. *PNAS*, 116(50), 25329–25332. <https://doi.org/10.1073/pnas.1914273116>
- González, L., Romero Flores, B., & Lazzarini Lechuga, R. (2024). Evolución del corazón en vertebrados I. Peces. *Revista Panamericana de Morfología*, 1(4), 58.
- González, L., Romero Flores, B., & Lazzarini Lechuga, R. (2024). Evolución del corazón en vertebrados II. Anfibios. *Revista Panamericana de Morfología*, 2(5), 43.
- González, L., Romero Flores, B., & Lazzarini Lechuga, R. (2024). Evolución del corazón en vertebrados III. Reptiles. *Revista Panamericana de Morfología*, 2(6), 22.
- Grossnickle, D. M., Smith, S. M., & Wilson, G. P. (2019). Untangling the multiple ecological radiations of early mammals. *Trends in Ecology & Evolution*, 34(10), 936–949. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2019.05.008>
- Grimes, A. C., Durán, A. C., Sans-Coma, V., Hami, D., Santoro, M. M., & Torres, M. (2010). Phylogeny informs ontogeny: A proposed common theme in the arterial pole of the vertebrate heart. *Evolution & Development*, 12(6), 552–567. <https://doi.org/10.1111/j.1525-142X.2010.00441.x>
- Henshilwood, C. S., *et. al.* (2002). Emergence of modern human behavior: Middle Stone Age engravings from South Africa. *Science*, 295(5558), 1278–1280. <https://doi.org/10.1126/science.1067575>
- Hillman, S. S., & Hedrick, M. S. (2015). A meta-analysis of in vivo vertebrate cardiac performance: Implications for cardiovascular support in the evolution of endothermy. *Journal of Experimental Biology*, 218(Pt 8), 1143–1150. <https://doi.org/10.1242/jeb.118372>
- Jensen, B., Boukens, B. J. D., Postma, A. V., *et. al.* (2013). Identifying the evolutionary building blocks of the cardiac conduction system. *PLOS ONE*, 7(9), e44231. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0044231>
- Jensen, B., Wang, T., Christoffels, V. M., & Moorman, A. F. M. (2012). Evolution and development of the building plan of the vertebrate heart. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1833(4), 783–794. <https://doi.org/10.1016/j.bbamcr.2012.10.004>
- Kelly, R. G. (2007). Building the right ventricle. *Circulation Research*, 100(7), 943–945. <https://doi.org/10.1161/01.RES.0000265523.36667.18>
- Kiserud, T. (2005). Physiology of the fetal circulation. *Seminars in Fetal and Neonatal Medicine*, 10(6), 493–503. <https://doi.org/10.1016/j.siny.2005.07.004>
- Lazzarini, R., Gómez-Quiroz, L. E., González-Márquez, H., Villavicencio-Guzmán, L., Salazar-García, M., & Sánchez-Gómez, C. (2018). The proximal segment of the embryonic outflow (conus) does not participate in aortic vestibule development. *PLOS ONE*, 13(12), e0209930. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209930>
- Lillie, M. A., Piscitelli, M. A., & Vogl, A. W. (2013). Cardiovascular design in fin whales: High-stiffness arteries protect against adverse pressure gradients at depth. *Journal of Experimental Biology*, 216(14), 2548–2560. <https://doi.org/10.1242/jeb.082636>
- Luo, Z. X. (2007). Transformation and diversification in early mammal evolution. *Nature*, 450(7172), 1011–1019. <https://doi.org/10.1038/nature06277>
- Mathieu-Costello, O., & Brill, R. W. (1996). Structural basis for oxygen delivery: Muscle capillaries and manifolds in tuna red muscle. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 113(1), 25–35. [https://doi.org/10.1016/0300-9629\(95\)02059-4](https://doi.org/10.1016/0300-9629(95)02059-4)
- Meijler, F. L., & Meijler, T. D. (2011). Archetype, adaptation and the mammalian heart. *Netherlands Heart Journal*, 19(3), 142–148. <https://doi.org/10.1007/s12471-011-0086-4>
- Mellars, P., *et. al.* (2007). Rethinking the human revolution. *Proceedings of the British Academy*, 158, 1–11. <https://doi.org/10.5871/bacad/9780197264140.001.0001>
- Poelmann, R. E., *et. al.* (2014). Evolution and development of ventricular septation in the amniote heart. *PLOS ONE*, 9(9), e106569. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0106569>
- Race, G. J., Edwards, W. L., Halden, E. R., Wilson, H. E., & Luibel, F. J. (1959). A large whale heart. *Circulation*, 19(6), 928–932. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.19.6.928>
- Remien, K., & Majmundar, S. H. (2023). Physiology, fetal circulation. *StatPearls*. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK539710/>

- Rowlatt, U. (1968). Functional Morphology of the Heart in Mammals. *American Zoologist*, 8(2), 221–229. <https://doi.org/10.1093/icb/8.2.221>
- Schulte, K., Kunter, U., & Moeller, M. J. (2015). The evolution of blood pressure and the rise of mankind. *Nephrology Dialysis Transplantation*, 30(5), 713–723. <https://doi.org/10.1093/ndt/gfu275>
- Shiels, H. A., & Galli, G. L. (2014). The sarcoplasmic reticulum and the evolution of the vertebrate heart. *Physiology (Bethesda)*, 29(6), 456–469. <https://doi.org/10.1152/physiol.00015.2014>
- Stephenson, A., Adams, J. W., & Vaccarezza, M. (2017). The vertebrate heart: An evolutionary perspective. *Journal of Anatomy*, 231(6), 787–797. <https://doi.org/10.1111/joa.12687>
- Stringer, C. (2016). The origin and evolution of *Homo sapiens*. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 371(1698), 20150237. <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0237>
- Tattersall, I. (2009). *The Fossil Trail: How We Know What We Think We Know About Human Evolution*. Oxford University Press.
- Vivien, C. J., Hudson, J. E., & Porrello, E. R. (2016). Evolution, comparative biology, and ontogeny of vertebrate heart regeneration. *NPJ Regenerative Medicine*, 1, 16012. <https://doi.org/10.1038/npjregenmed.2016.12>
- Yates, B. J., Bolton, P. S., & Macefield, V. G. (2014). Vestibulo-sympathetic responses. *Comprehensive Physiology*, 4(2), 851–887. <https://doi.org/10.1002/cphy.c130043>