



Editorial de la Sociedad
Mexicana de Anatomía A.C.

Re vis ta

Panamericana
de Morfología

Vol 2. Número 6 | 2024

Mesa Directiva 2023-24 · Año académico Dr. Miguel Ángel Herrera Enríquez

Editorial Archivos Mexicanos de Anatomía desde 1960

Evolución del corazón en vertebrados III. Reptiles

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

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

***Autor de Correspondencia:**

Dr. Roberto Lazzarini Lechuga
lazzarini@xanum.uam.mx
Teléfono: 5558044600 Ext: 3382

RESUMEN

Los reptiles surgieron hace 320 millones de años (MDA) en el periodo Carbonífero, a diferencia de los peces y anfibios, no dependen del agua para su desarrollo. Los reptiles no cocodrilianos conservan un corazón con tres cavidades como los anfibios, mientras que los cocodrilianos tienen un corazón de cuatro cámaras, similar al de los mamíferos y las aves. Las adaptaciones cardiovasculares de los órdenes de la clase Reptilia muestran la diversidad evolutiva de los vertebrados y su capacidad para adaptarse a diferentes entornos y demandas metabólicas. Las tortugas acuáticas poseen mecanismos para largas sumersiones, un corazón con tres cavidades que permite desviar el flujo sanguíneo durante el buceo. Las tuataras tienen un corazón con una mínima septación, adecuado para un metabolismo de bajo requerimiento. Las serpientes y lagartos tienen un segmento ventricular parcialmente dividido que soporta periodos de inactividad, así como la actividad intensa. Los cocodrilos, caimanes y gaviales con un corazón de cuatro cámaras y el "Foramen de Panizza," pueden desviar el flujo sanguíneo para optimizar la circulación durante el buceo y la actividad intensa.

Palabras clave: Evolución cardíaca, Anatomía, Vertebrados, Reptiles, Testudines, Chelonia, Squamata, Crocodylia.

ABSTRACT

Reptiles emerged 320 million years ago (MYA) in the Carboniferous period. Unlike fish and amphibians, they do not depend on water for development. Non-crocodylian reptiles retain a three-chambered heart like amphibians, while crocodylians have a four-chambered heart, like mammals and birds. The cardiovascular adaptations of the orders in the class Reptilia show the evolutionary diversity of vertebrates and their ability to adapt to different environments and metabolic demands. Turtles possess mechanisms for long dives and a three-chambered heart that allows blood flow diversion during diving. Tuataras have a heart with minimal septation, suitable for their low metabolism. Snakes and lizards have a partially divided ventricle that supports both inactivity and intense activity. Crocodiles, alligators, and gharials, with a four-chambered heart and the "Foramen of Panizza," can divert blood flow to optimize circulation during diving and intense activity.

Keywords: Cardiac evolution, Anatomy, Vertebrates, Testudines, Chelonia, Squamata, Crocodylia.

INTRODUCCIÓN

Los reptiles, aparecieron en la tierra durante el periodo Carbonífero, hace aproximadamente 320 millones de años (MDA)¹, se consideran los primeros vertebrados completamente terrestres (aunque algunos grupos de reptiles regresaron al medio acuático en su evolución posterior). Los reptiles no presentan una etapa larvaria que dependa de cuerpos de agua, como si ocurre en los peces y anfibios. Los reptiles desarrollaron una membrana (amnios) que rodea y protege al embrión² sus huevos presentan cubiertas que permiten el desarrollo fuera del agua³, eclosionan de huevos, como pequeñas réplicas de sus padres⁴ y tienen una piel escamosa y seca, poco permeable que minimiza la pérdida de humedad⁴. En cuanto al sistema cardiovascular, el corazón de los reptiles no cocodrilianos se mantiene con tres cavidades: dos atrios y un ventrículo parcialmente dividido en tres cámaras^{5,6,7} y en el orden Crocodylia se desarrolla un corazón de cuatro cámaras: dos atrios y dos ventrículos, similar a los mamíferos y las aves, pero con comunicación entre la circulación sistémica y pulmonar^{8,9}.

La historia evolutiva de los reptiles está marcada por el auge de los dinosaurios, gigantes reptiles que dominaron el planeta, y la extinción masiva del periodo Cretácico, que eliminó un gran porcentaje de la diversidad de la vida. Algunos de los reptiles que sobrevivieron a la extinción son los antecesores de los reptiles que conocemos hoy en día, como las tortugas, lagartos, serpientes y cocodrilos¹⁰. En esta revisión abordaremos la anatomía del corazón de los órdenes actuales de la clase Reptilia.

Clase Reptilia

Dentro de los órdenes de la clase Reptilia se observa una transición desde los corazones de tres cámaras, con un ventrículo parcialmente dividido¹, hacia el desarrollo de un corazón de cuatro cámaras en los cocodrilianos⁸.

La clase Reptilia conserva la circulación doble e incompleta de los anfibios⁶ y la división de la aorta, cuya porción izquierda irriga a órganos vitales como el cerebro¹¹.

Fisiológicamente, los reptiles, presentan dos mecanismos adaptativos asociados a las demandas metabólicas caracterizadas por periodos de inactividad prolongados y ráfagas de actividad. Presentan: una cresta muscular en el ventrículo⁵, que les confiere la habilidad de separar y regular el flujo sanguíneo⁸ y la capacidad de direccionar de manera anormal el flujo sanguíneo (*shunts* vasculares) durante períodos de altos requerimientos metabólicos⁸, por ejemplo, en inmersiones y apnea de los reptiles acuáticos¹², y durante la exposición al sol y la termorregulación^{8,13}.

Orden Testudines

El linaje actual más antiguo, también conocido como Chelonia, es representado por las tortugas. Las tortugas poseen un corazón con tres cavidades, dos atrios y un ventrículo parcialmente dividido en tres cámaras⁸: *Cavum venosum*, *Cavum pulmonale* y *Cavum arteriosum*¹⁴. Presentan una prominente musculatura llamada “cresta muscular” divide al *Cavum venosum* y *Cavum pulmonale*, y un septo vertical separa al *Cavum arteriosum* de las otras dos cámaras¹. Aunque la septación de las tortugas no está bien definida como en otros reptiles no cocodrilianos, estas estructuras septales del ventrículo ayudan a que la sangre desoxigenada y oxigenada se mantengan parcialmente separadas durante el bombeo cardíaco¹³.

La circulación sanguínea en las tortugas comienza con el ingreso de la sangre desoxigenada, a través del atrio derecho, se dirige al *Cavum venosum*, donde se mezcla con sangre oxigenada que proviene de los pulmones, desde el *Cavum venosum*, la sangre mixta es bombeada hacia el *Cavum pulmonale*, y es impulsada hacia los pulmones a través de la arteria pulmonar, en los pulmones, la sangre se oxigena y regresa al corazón por el atrio izquierdo, la “cresta muscular” altera la presión entre las cavidades ventriculares¹ y dirige la sangre oxigenada hacia el *Cavum arteriosum*, donde es bombeada hacia la circulación sistémica a través de la aorta (**Figura 1A**).

Las tortugas acuáticas (**Figura 1C y 1D**) poseen un ventrículo grande en comparación con los demás reptiles, en la arteria pulmonar presentan un esfínter muscular que les permite hacer “shunts” (disparos) vasculares durante el buceo¹⁵, es decir, durante la inmersión acuática, cuando las tortugas necesitan conservar oxígeno, para prolongar el tiempo bajo el agua, contraen el esfínter que desvía la sangre

desoxigenada desde el *Cavum venosum* hacia el *Cavum arteriosum*, la sangre desoxigenada se dirige hacia la circulación sistémica y evita la circulación pulmonar¹³. El esfínter se puede contraer o relajar, según las necesidades de oxigenación durante las inmersiones, así las tortugas marinas pueden mantener un flujo pequeño de sangre hacia los pulmones, o incluso evitar totalmente la circulación pulmonar, para reservar el oxígeno, reducir el trabajo cardiaco, y distribuir eficientemente el oxígeno disponible al mezclar la sangre oxigenada y desoxigenada¹⁶ (Figura 1B).

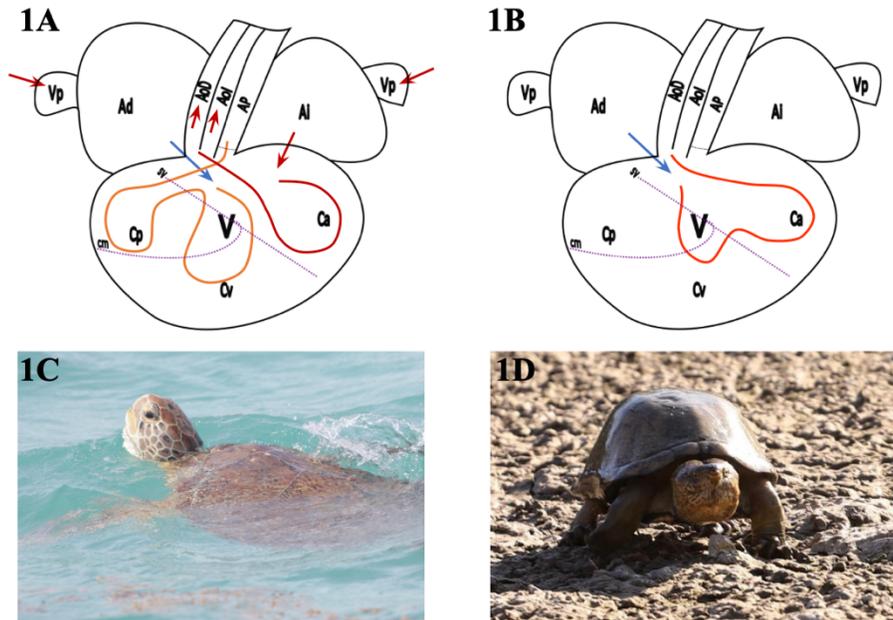


Figura 1: A) Esquema de la anatomía del corazón del orden Chelonia, Atrio derecho (Ad) Atrio izquierdo (Ai) Aorta derecha (AoD) Aorta izquierda (Aoi) Arteria Pulmonar (AP) Ventrículo (V) *Cavum venosum* (Cv) *Cavum pulmonale* (Cp) *Cavum arteriosum* (Ca) Vena pulmonar (Vp) Septo vertical (sv) cresta muscular (cm) B) Circulación durante *shunting* vascular completo, bloqueo de la circulación pulmonar. C) Tortuga marina *Chelonia mydas*. Licencia: <https://mexico.inaturalist.org/observations/222901497> D) Tortuga de pantano *Kinosternon integrum*. Licencia: <https://mexico.inaturalist.org/observations/224297351>

Orden Rhynchocephalia

El orden Rhynchocephalia incluye un solo género viviente de reptiles: las tuataras (Figura 2A). Es el orden menos estudiado, se distribuyen geográficamente solo en las costas frías de Nueva Zelanda¹⁷. El corazón de las tuataras es similar al de las tortugas, dos atrios y un ventrículo parcialmente dividido en tres septos incompletos¹⁸ (Figura 2B), la septación en tautaras se considera minina, a diferencia de otros reptiles¹¹, probablemente por su estilo de vida sedentario y de bajo consumo metabólico.

Las tuataras, presentan “shunt vascular”¹⁹ durante la brumación (disminución del metabolismo), al igual que otros reptiles que se distribuyen en climas fríos, reducen su metabolismo y permanecen en letargo la

mayor parte del día²⁰, al evitar o disminuir la circulación pulmonar, reducen el gasto energético, minimizan el metabolismo y regulan la temperatura corporal.

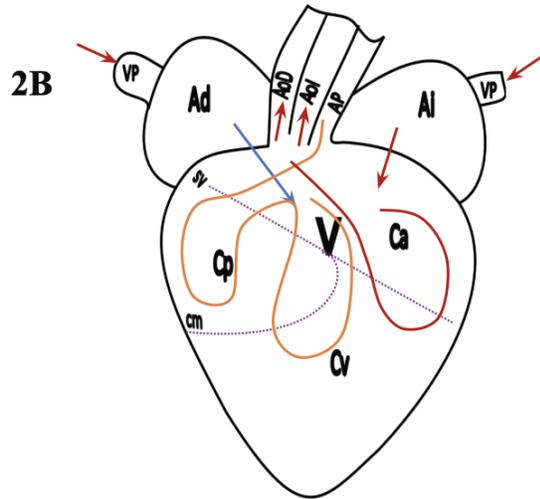


Figura 2: A) Tuatara *Sphenodon punctatus*. Licencia: <https://mexico.inaturalist.org/observations/207227069> B) Esquema de la anatomía del corazón de tuatara, Atrio derecho (Ad) Atrio izquierdo (Ai) Aorta derecha (AoD) Aorta izquierda (AoI) Arteria Pulmonar (AP) Ventrículo (V) Cavum venosum (Cv) Cavum pulmonale (Cp) Cavum arteriosum (Ca) Vena pulmonar (Vp) Septo vertical (sv) cresta muscular (cm).

Orden Squamata

Las serpientes y lagartos son representantes de este orden, tienen un corazón con dos atrios y un ventrículo parcialmente dividido por la “cresta muscular”⁸ (Figura 3A).

En lagartos varanidos (Figura 3B) y pitones, el ventrículo se comporta de manera diferente a otros reptiles^{8,5,21}, presentan “cresta muscular” bien desarrollada que durante la sístole divide al ventrículo en dos secciones funcionalmente distintas, la sección derecha actúa como una bomba de baja presión que impulsa la sangre hacia el circuito pulmonar, mientras que la porción izquierda funciona como una bomba de alta presión que dirige la sangre hacia el circuito sistémico^{8,15}. Este diseño cardíaco permite un estilo de vida más activo y con un metabolismo elevado y actividad sostenida.

Por otro lado, anacondas y dragones barbudos, no presentan una separación tan robusta del flujo ventricular, pero tienen una mayor capacidad para el “shunt vascular”²¹, durante períodos de inactividad o ayuno reducen su flujo sanguíneo pulmonar mientras que, durante la caza o el escape, aumentan el flujo hacia los pulmones para satisfacer la mayor demanda de oxígeno¹³.



Figura 3: A) Esquema de la anatomía del corazón del orden Squamata, Atrio derecho (Ad) Atrio izquierdo (Ai) Aorta derecha (AoD) Aorta izquierda (Aol) Arteria Pulmonar (AP) Ventrículo (V) Vena pulmonar (Vp) Cresta muscular (cm) B) Lagarto varanido *Varanus niloticus*. Licencia: <https://mexico.inaturalist.org/observations/66343634>

Orden Crocodylia

Los cocodrilos, caimanes y gaviales presentan una estructura cardíaca única entre los reptiles, tienen un corazón completamente dividido en cuatro cámaras, dos atrios y dos ventrículos, una aorta izquierda que se origina del ventrículo derecho y una aorta derecha que proviene del ventrículo izquierdo^{9,22,23} (**Figura 4A**).

La evolución del corazón de cuatro cámaras en cocodrilos, aves y mamíferos ocurrió de manera independiente, aunque todos derivan de un corazón de tres cámaras²⁴.

Aunque los cocodrilianos presentan un ventrículo completamente dividido, conservan la “cresta muscular” en el ventrículo derecho para direccionar el flujo y regular la presión sanguínea en el corazón⁹, además poseen una estructura llamada “Foramen de Panizza” a nivel de la raíz aórtica²⁵ que une a las aortas derecha e izquierda⁸ y permite realizar “shunts vasculares” durante la inmersión prolongada en cuerpos de agua, así reducen el flujo pulmonar y distribuyen la sangre mixta a órganos que pueden tolerar condiciones de hipoxia²⁶, también durante la actividad intensa para maximizar la entrega de oxígeno, y para la termorregulación^{1,15}.

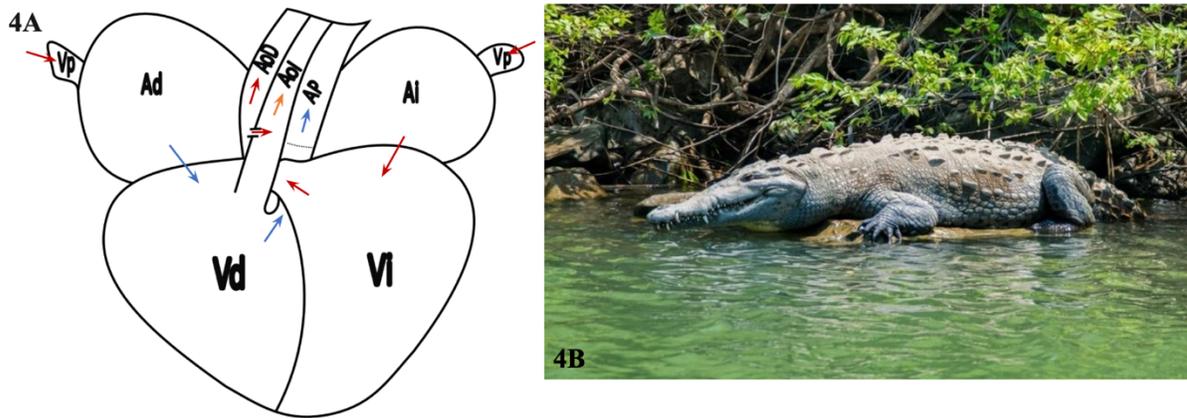


Figura 4: A) Esquema de la anatomía del corazón del orden Crocodylia, Atrio derecho (Ad) Atrio izquierdo (Ai) Ventrículo derecho (Vd) Ventrículo izquierdo (Vi) Aorta derecha (AoD) Aorta izquierda (Aol) Arteria Pulmonar (AP) Vena pulmonar (Vp) B) Cocodrilo americano *Crocodylus acutus* Licencia: <https://mexico.inaturalist.org/observations/223333618>

Consideraciones finales

La evolución y adaptación de la vida, es guiada por los cambios geográficos y físicos del planeta a través del tiempo²⁷. En el caso de los reptiles, los movimientos de las placas tectónicas causaron que el suelo marino se elevara y aumentara el área de tierra firme, evento que propicio la expansión de plantas vasculares, que eventualmente formaron los primeros bosques de helechos y coníferas, hogar de los primeros vertebrados terrestres. Siguiendo la línea evolutiva de los vertebrados, pasaron del agua (peces) a una zona litoral (anfibios) y finalmente a una distribución continental (reptiles). En cada clase de vertebrados, se identifican los cambios anatómicos, fisiológicos y de comportamiento que acompañaron la invasión de hábitat por los organismos.

Los estudios de los diferentes órdenes de la clase Reptilia, revelan una diversidad de adaptaciones cardiovasculares que reflejan sus respectivos estilos de vida y ambientes. Por ejemplo, las tortugas marinas han desarrollado mecanismos que les permiten largas inmersiones, las serpientes y lagartos tienen corazones adaptados para soportar períodos de inactividad y de actividad intensa, los cocodrilos desarrollaron un corazón de cuatro cámaras que soporta tanto la actividad en tierra como inmersiones prolongadas.

El hecho de que los cocodrilianos, aves y mamíferos por convergencia evolutiva desarrollaran un corazón de cuatro cámaras, subraya la importancia de esta adaptación para un estilo de vida activo y metabólicamente demandante.

El estudio de estas adaptaciones evolutivas del corazón permite comprender la historia de la vida en la Tierra y las complejas interacciones entre los vertebrados y su entorno a lo largo del tiempo.

REFERENCIAS

1. Jensen, B., Berg, G., Doel, R., Oostra, R., Wang, T., & Moorman, A. (2013). Development of the Hearts of Lizards and Snakes and Perspectives to Cardiac Evolution. PLoS ONE, 8. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0063651>.
2. Jensen, B. (2019). Commemoration of Comparative Cardiac Anatomy of the Reptilia I-IV. Journal of morphology, 280(4), 623-626.
3. Wirth, W., Schwarzkopf, L., Skerratt, L. F., & Ariel, E. (2018). Ranaviruses and reptiles. PeerJ, 6, e6083.
4. Bower, D. S., Brannelly, L. A., McDonald, C. A., Webb, R. J., Greenspan, S. E., Vickers, M., ... & Greenlees, M. J. (2019). A review of the role of parasites in the ecology of reptiles and amphibians. Austral Ecology, 44(3), 433-448.
5. Wang, T., Altimiras, J., & Axelsson, M. (2002). Intracardiac flow separation in an in situ perfused heart from Burmese python *Python molurus*. The Journal of experimental biology, 205 Pt 17, 2715-23.
6. Jensen, B., Nyengaard, J., Pedersen, M., & Wang, T. (2010). Anatomy of the python heart. Anatomical Science International, 85, 194-203. <https://doi.org/10.1007/s12565-010-0079-1>.
7. Wyneken, J. (2009). Normal reptile heart morphology and function.. The veterinary clinics of North America. Exotic animal practice, 12 1, 51-63, vi. <https://doi.org/10.1016/j.cvex.2008.08.001>.
8. Burggren, W. (1987). Form and Function in Reptilian Circulations. Integrative and Comparative Biology, 27, 5-19. <https://doi.org/10.1093/ICB/27.1.5>.
9. Webb, G. (1979). Comparative cardiac anatomy of the reptilia. III. The heart of crocodylians and an hypothesis on the completion of the interventricular septum of crocodylians and birds. Journal of Morphology, 161. <https://doi.org/10.1002/jmor.1051610209>.
10. Carroll, R. L. (1970). The ancestry of reptiles. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences, 257(814), 267-308.
11. Jensen, B., & Christoffels, V. M. (2020). Reptiles as a model system to study heart development. Cold Spring Harbor perspectives in biology, 12(5), a037226.
12. White, F. N. (1968). Functional anatomy of the heart of reptiles. American Zoologist, 8(2), 211-219.
13. Sapsford, C. (1978). Anatomical Evidence for Intracardiac Blood Shunting in Marine Turtles. African Zoology, 13, 57-62. <https://doi.org/10.1080/00445096.1978.11447605>.

14. Prütz, M., Hungerbühler, S., Fehr, M., & Mathes, K. (2016). [The anatomy of the heart of tortoises (Testudinidae)]. *Berliner und Munchener tierärztliche Wochenschrift*, 129 3-4, 160-6.
15. Jensen, B., Lauridsen, H., Webb, G., & Wang, T. (2022). Anatomy of the heart of the leatherback turtle. *Journal of Anatomy*, 241, 535 - 544. <https://doi.org/10.1111/joa.13670>.
16. Hicks, J. W., & Wang, T. (1996). Functional role of cardiac shunts in reptiles. *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological Genetics and Physiology*, 275(2-3), 204-216.
17. Macfarlan, D., & Campbell, J. (1991). Rhyncholites (cephalopod mandibles) from the Late Triassic (Norian) of New Zealand and New Caledonia. *Journal of The Royal Society of New Zealand*, 21, 161-168. <https://doi.org/10.1080/03036758.1991.10800303>
18. Grigg, G., & Simons, J. (2009). Preferential distribution of left and right auricular blood into the arterial arches of the Tuatara, *Sphenodon punctatus*. *Journal of Zoology*, 167, 481-486. <https://doi.org/10.1111/J.1469-7998.1972.TB01739.X>.
19. Wood, S. C. (1984). Cardiovascular shunts and oxygen transport in lower vertebrates. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 247(1), R3-R14.
20. Hoekstra LA, Schwartz TS, Sparkman AM, Miller DAW, Bronikowski AM. The untapped potential of reptile biodiversity for understanding how and why animals age. *Funct Ecol.* 2020 Jan;34(1):38-54. doi: 10.1111/1365-2435.13450. Epub 2019 Sep 9. PMID: 32921868; PMCID: PMC7480806.
21. Joyce, W., Axelsson, M., Altimiras, J., & Wang, T. (2016). In situ cardiac perfusion reveals interspecific variation of intraventricular flow separation in reptiles. *Journal of Experimental Biology*, 219(14), 2220-2227.
22. Cook, A. C., Tran, V. H., Spicer, D. E., Rob, J. M., Sridharan, S., Taylor, A., ... & Jensen, B. (2017). Sequential segmental analysis of the crocodylian heart. *Journal of Anatomy*, 231(4), 484-499.
23. Poelmann, R. E., Gittenberger-de Groot, A. C., Biermans, M. W., Dolfig, A. I., Jagessar, A., van Hattum, S., ... & Richardson, M. K. (2017). Outflow tract septation and the aortic arch system in reptiles: lessons for understanding the mammalian heart. *Evodevo*, 8, 1-17.
24. Goodrich, E. (1919). Note on the Reptilian Heart.. *Journal of anatomy*, 53 Pt 4, 298-304
25. Poelmann, R. E., Gittenberger-de Groot, A. C., Goerdajal, C., Grewal, N., De Bakker, M. A., & Richardson, M. K. (2021). Ventricular septation and outflow tract development in crocodylians result in two aortas with bicuspid semilunar valves. *Journal of cardiovascular development and disease*, 8(10), 132.

26. Eme, J., Gwalthney, J., Owerkowicz, T., Blank, J. M., & Hicks, J. W. (2010). Turning crocodilian hearts into bird hearts: growth rates are similar for alligators with and without right-to-left cardiac shunt. *Journal of Experimental Biology*, 213(15), 2673-2680.
27. Darwin, C. (1985). *El origen de las especies*. México, Colección Nuestros Clásicos (serie de Ciencia). Universidad Nacional Autónoma de México, 2.