

# La Bioinspiración como Camino hacia la Innovación Tecnológica

**Peters, Carlos**

Research Group in Design, Manufacturing and Materials (DM + M), School of Mechanical Engineering,  
Universidad Tecnológica de Panamá  
Panamá, Panamá  
carlos.peters@utp.ac.pa

**Ortega, Maria De Los Ángeles**

Research Group in Design, Manufacturing and Materials (DM + M), School of Mechanical Engineering,  
Universidad Tecnológica de Panamá  
Panamá, Panamá  
maria.ortega@utp.ac.pa

## Abstract

Bioinspiration has become a relevant approach for technological development by translating principles observed in living organisms into actionable engineering design criteria. This work presents a structured qualitative mini-review that compiles representative biological models and organizes them into transferable functions and application domains in robotics, mechanics, and adaptive technologies. The methodology consists of classifying each biological model according to the functional principle it exemplifies, including locomotion, adhesion, sensing, material properties, structural optimization, and energy-related mechanisms, and mapping these functions to technological domains where their contribution can be assessed. The synthesis highlights four integrative outcomes. First, multiscale hierarchy emerges as a unifying principle, as gecko-inspired adhesion, nacre-like architectures, and Bouligand-type structures converge in hierarchical designs that redistribute stresses and control damage pathways. Second, passive actuation oriented toward efficiency is supported by plant hygromorphy and related biobased strategies, enabling low-complexity adaptability with scaling potential in built environments. Third, mechanical energy is consolidated as a functional resource, as recent soft materials demonstrate low-dissipative energy storage and release that align with resilience principles and the needs of robotics and impact mitigation. Finally, the review underscores the importance of documenting bioinspired design as a traceable translation chain from biology to engineering with comparable performance criteria, particularly when sustainability claims are advanced.

**Keywords:** bioinspiration, biomimicry, bibliometric analysis, engineering design, biological models.

## Resumen

La bioinspiración se ha consolidado como un enfoque para traducir principios observados en organismos vivos en criterios de diseño aplicables a ingeniería. Este trabajo presenta una revisión cualitativa estructurada que recopila y organiza modelos biológicos y los vincula con funciones transferibles y dominios de aplicación en robótica, materiales y tecnologías adaptativas. La metodología consistió en clasificar los modelos según el principio funcional que inspiran, incluyendo locomoción, adhesión, detección, propiedades materiales, optimización estructural y mecanismos asociados a la energía, y mapear estas funciones hacia aplicaciones donde su contribución pueda evaluarse. La síntesis evidencia recurrencia de cuatro patrones integradores: jerarquía multiescala como principio unificador en adhesión y materiales estructurales, actuación pasiva orientada a eficiencia en sistemas vegetales higromórficos, uso de energía mecánica como recurso funcional en almacenamiento y liberación de baja disipación, y la necesidad de documentar la traducción biología–ingeniería como una cadena verificable con criterios comparables, especialmente cuando se argumentan beneficios de sostenibilidad.

**Palabras clave:** bioinspiración, biomimética, análisis bibliométrico, diseño ingenieril, modelos biológicos.

## 1. INTRODUCCIÓN

La bioinspiración se ha posicionado como una estrategia central en la ingeniería moderna, al permitir que principios funcionales observados en organismos vivos sirvan de base conceptual para el desarrollo de tecnologías innovadoras [1]. A diferencia de los enfoques tradicionales de diseño, este campo se nutre de soluciones naturales optimizadas, fruto de millones de años de evolución. Los enfoques desarrollados en este campo actualmente permiten abordar desafíos como la locomoción, la adhesión, la resistencia estructural y la sensorización mediante estrategias probadas en la naturaleza [2]. Marcos recientes abordan explícitamente la relación entre el biodiseño y la sostenibilidad, señalando que la promesa de “diseños más sostenibles” no es automática y depende de cómo se definan los criterios, las métricas y los límites del sistema de evaluación. En ese contexto, se proponen guías metodológicas para traducir la biología al diseño con mayor rigor y reproducibilidad, que incluyen herramientas para la enseñanza y la práctica profesional [3], [4]. La revisión realizada reúne una amplia diversidad de organismos (insectos, reptiles, peces, plantas, moluscos, medusas y estructuras internas) utilizados como referencia para resolver problemas ingenieriles desde perspectivas adaptativas y eficientes. Estas fuentes biológicas

han impulsado avances en campos como la robótica suave, la manipulación bioinspirada y la locomoción adaptable [2],[5].

## 2. METODOLOGÍA

La metodología consistió en una revisión cualitativa estructurada de modelos biológicos aplicados a tecnologías emergentes. Los organismos y estructuras se clasificaron según su principio funcional y se agruparon en categorías como locomoción, adhesión, detección, propiedades materiales, optimización estructural y mecanismos asociados a la energía [6],[7]. A partir de esta organización se identificaron patrones recurrentes, incluyendo geometrías naturales, estrategias de movimiento y materiales bioinspirados, y se sintetizó su transferencia a aplicaciones como robots suaves, sistemas de agarre y dispositivos de inspección [8].

La búsqueda se guió por la pregunta: ¿De qué manera los sistemas biológicos ofrecen principios funcionales aplicables al diseño y la ingeniería? La evidencia se estructuró con una lógica “reto-función-mecanismo-métrica” para mapear funciones a dominios de aplicación con criterios de evaluación verificables, en línea con enfoques metodológicos recientes [3], [4].

## 3. RESULTADOS

### 3.1 Sistemas biológicos aprovechados y su valor como repositorio de estrategias

La inspiración biológica se organizó en seis familias recurrentes: insectos, reptiles, peces, vegetales, gusanos y humanos. Esta clasificación separa la fuente biológica del objetivo tecnológico y permite seleccionar modelos según la función y las condiciones de operación, en línea con marcos de biodiseño orientados al desempeño medible y la sostenibilidad.

### 3.2 Adhesión y fricción como función transferible

La adhesión destaca en la literatura por las estrategias optimizadas presentes en los sistemas biológicos. El gecko es un caso paradigmático, ya que su arquitectura jerárquica de micro y nanoestructuras permite una adhesión reversible y controlable en diversas superficies, habilitando aplicaciones como agarre robótico, fijación temporal y superficies funcionales, con avances orientados a control del estado adhesivo, mayor durabilidad cíclica y multifuncionalidad [9], [10]. En ambientes húmedos o sumergidos, el reto es mantener la cohesión interfacial pese a la presencia de capas de agua, sales, flujo y degradación; estudios recientes resaltan mecanismos moleculares y estrategias basadas en química funcional, coacervación y coordinación metálica, además de revisiones que sistematizan múltiples sistemas adhesivos bioinspirados y amplían el panorama de mecanismos y diseños. En

conjunto, estos hallazgos indican que el biodiseño aporta tanto geometrías como rutas químicas e interfaciales para desarrollar adhesivos robustos [11], [12].

### 3.3 Geometría como base funcional y arquitectura jerárquica de materiales

El biodiseño estructural muestra que gran parte del desempeño proviene de la arquitectura interna y la jerarquía multiescala, más que del material base. Revisiones recientes sobre estructuras tipo “ladrillo y mortero”, inspiradas en el nácar, describen mecanismos como la deflexión de grietas y el deslizamiento interfacial para mejorar el equilibrio entre rigidez, resistencia y tenacidad en composites [13], [14]. Asimismo, las estructuras Bouligand, con arquitecturas helicoidales, se destacan por su relación estructura–propiedad y por las oportunidades de manufactura que las hacen relevantes para el diseño de estructuras y sistemas de amortiguación [15], [16]. En este contexto, la manufactura aditiva se consolida como habilitadora para implementar geometrías jerárquicas y lattices con desempeño programable; revisiones recientes subrayan el impacto de los defectos de fabricación, la necesidad de modelos computacionales robustos y el potencial de integrar monitoreo en tiempo real [17], [18].

### 3.4 Actuación higroscópica y adaptabilidad inspirada en vegetales

La inspiración vegetal se asocia con “actuación pasiva”, en la que la geometría y la anisotropía del material producen movimiento o cambio de forma en respuesta a estímulos ambientales, lo que reduce la dependencia de actuadores electromecánicos. En los últimos años, se ha reforzado el vínculo entre la higromorfía bioinspirada y sus aplicaciones en la arquitectura. Cheng et al. presentaron un caso que demuestra un sombreado adaptativo basado en biláminas higromórficas biobasadas, con orientación a la escalabilidad arquitectónica [19]. Otros trabajos discuten cómo la higroscopicidad y los materiales con cambio de forma pueden reemplazar actuadores mecánicos en fachadas adaptativas, con un consumo energético nulo durante su actuación [20]. La literatura muestra indicios de que el biodiseño vegetal es especialmente útil cuando se requiere adaptación con mínima complejidad, pero exige reportar ventanas de operación, histéresis, tiempos de respuesta y de envejecimiento del material.

### 3.5 Almacenamiento y liberación de energía inspirada en insectos

El almacenamiento y la liberación rápida de energía son funciones centrales en insectos, asociadas a locomoción eficiente y absorción de impactos. En ingeniería, este principio se ha aplicado a materiales y sistemas blandos que buscan almacenar energía mecánica con baja disipación. Savolainen et al. demuestran hidrogeles con almacenamiento y liberación

mecánicos altamente reversibles, inspirados en principios biológicos de resiliencia [21]. Estas estrategias sugieren criterios de diseño orientados a maximizar la energía almacenada, controlar la liberación y asegurar la estabilidad a lo largo de los ciclos, con aplicaciones directas en robótica blanda, amortiguación y, potencialmente, verificación cuando el sistema integra estados detectables o autorreportados.

### 3.6 Locomoción y coordinación inspirada en peces e insectos

Se han desarrollado sistemas robóticos de tipo anfibio, inspirados en peces, capaces de transitar entre medios y coordinar sus mecanismos propulsivos para mejorar el desempeño. Lin et al. presentan un robot inspirado en el mudskipper que integra la locomoción acuática y terrestre mediante la coordinación de las aletas [22]. Otro ejemplo es en sistemas colectivos, como por ejemplo, Duan et al, quienes discuten cómo reglas locales simples producen comportamientos globales robustos y adaptativos, y señalan retos críticos para despliegue real, como comunicación intermitente, ruido y métricas estandarizadas de desempeño [23].

### S3.7 ensorización y verificación como extensión natural del biodiseño

La sensorización bioinspirada enfatiza el transductor y la forma de acoplarse al entorno mediante estructuras y propiedades de deformabilidad que filtran, amplifican o direccionan estímulos mecánicos antes de la etapa de adquisición electrónica. En la literatura reciente se observa una convergencia hacia sensores que emulan receptores biológicos y hacia sistemas que integran el sensado con la adaptación. Ejemplos recientes incluyen dispositivos y revisiones sobre sensores bioinspirados en robótica inteligente, así como desarrollos inspirados en vibrisas y antenas que amplían robustez mecánica y direccionalidad. Además, existe un impulso contemporáneo hacia sensores con adaptación sensorial inspirada biológicamente, lo que fortalece el dominio de la verificación como parte del diseño, no solo como etapa final de ensayo [24], [25], [26].

### 3.8 Síntesis de la literatura y oportunidades

De la evidencia reciente y del marco funcional propuesto se desprenden cuatro resultados integradores. En primer lugar, la jerarquía multiescala emerge como principio unificador, ya que la adhesión tipo gecko, las arquitecturas inspiradas en el nácar y las estructuras Bouligand convergen en configuraciones jerárquicas que redistribuyen esfuerzos y controlan rutas de daño. En segundo lugar, la actuación pasiva orientada a la eficiencia se consolida mediante la higromorfía vegetal y sus equivalentes biobasados, que habilitan adaptabilidad de baja complejidad y con potencial de escalamiento en entornos construidos. En tercer

lugar, la energía mecánica como recurso funcional se evidencia en materiales recientes que logran almacenamiento y liberación con baja disipación, alineándose con principios biológicos de resiliencia y con requerimientos de robótica y amortiguación. Finalmente, se observa un desplazamiento de la inspiración hacia una metodología verificable, donde marcos contemporáneos enfatizan documentar la traducción biología–ingeniería como una cadena trazable, con métricas y validación comparables, especialmente cuando se argumentan beneficios de sostenibilidad.

## 4. CONCLUSIONES

El biodiseño ofrece una base sólida para desarrollar soluciones tecnológicas adaptativas cuando se estructura mediante un marco funcional que conecta el sistema biológico, la función transferible y el dominio de aplicación. La evidencia reciente respalda la idea de que las contribuciones más robustas se concentran en adhesión y fricción, arquitectura jerárquica de estructuras, actuación higroscópica, almacenamiento y liberación de energía, coordinación colectiva y sensorización bioinspirada.

## Referencias

- [1] M. D. L. A. Ortega Del Rosario, C. Castaño, and M. Chen Austin, “Biodesign as a Tool to Achieve Sustainable Construction Through Additive Manufacturing,” in *Biomimetics, Biodesign and Bionics: Technological Advances Toward Sustainable Development*, A. J. V. Arruda and F. L. Palombini, Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 251–282. doi: 10.1007/978-3-031-51311-4\_10.
- [2] D. Li *et al.*, “Bioinspired Ultrathin Piecewise Controllable Soft Robots,” *Adv Materials Technologies*, vol. 6, no. 5, p. 2001095, May 2021, doi: 10.1002/admt.202001095.
- [3] L. Ilieva *et al.*, “Biomimicry as a Sustainable Design Methodology—Introducing the ‘Biomimicry for Sustainability’ Framework,” *Biomimetics*, vol. 7, no. 2, Mar. 2022, doi: 10.3390/biomimetics7020037.
- [4] B. Linder, J. Huang, B. Linder, and J. Huang, “A Design Process Framework and Tools for Teaching and Practicing Biomimicry,” *Biomimetics*, vol. 10, no. 6, June 2025, doi: 10.3390/biomimetics10060376.
- [5] R. An *et al.*, “Fabrication of bifocal curved compound eyes for large-DOF and wide-FOV imaging via femtosecond laser 3D printing,” *Optics Communications*, vol. 585, p. 131864, July 2025, doi: 10.1016/j.optcom.2025.131864.
- [6] H. Lu *et al.*, “Liquid Metal Chameleon Tongues: Modulating Surface Tension and Phase Transition to Enable Bioinspired Soft Actuators,” *Advanced Intelligent Systems*, vol. 6, no. 10, p. 2400231, Oct. 2024, doi: 10.1002/aisy.202400231.
- [7] Y. Zhou, J. Zhao, P. Lu, Z. Wang, and B. He, “TacSuit: A Wearable Large-Area, Bioinspired Multimodal Tactile Skin for Collaborative Robots,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 71, no. 2, pp. 1708–1717, Feb. 2024, doi: 10.1109/TIE.2023.3253921.
- [8] X. Huang *et al.*, “4D Printing Hybrid Soft Robots Enabled by Shape-Transformable Liquid Metal Nanoparticles,” *Advanced Materials*, vol. 36, no. 46, p. 2409789, Nov. 2024, doi: 10.1002/adma.202409789.

- [9] W. Wang, Y. Liu, and Z. Xie, "Gecko-Like Dry Adhesive Surfaces and Their Applications: A Review," *Journal of Bionic Engineering*, vol. 18, pp. 1–34, Oct. 2021, doi: 10.1007/s42235-021-00088-7.
- [10] Y. Liu *et al.*, "Gecko-Inspired Controllable Adhesive: Structure, Fabrication, and Application," *Biomimetics*, vol. 9, no. 3, Feb. 2024, doi: 10.3390/biomimetics9030149.
- [11] J. Chen and H. Zeng, "Designing Bio-Inspired Wet Adhesives through Tunable Molecular Interactions," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 645, pp. 591–606, Sept. 2023, doi: 10.1016/j.jcis.2023.04.150.
- [12] J. Liu *et al.*, "An Overview on the Adhesion Mechanisms of Typical Aquatic Organisms and the Applications of Biomimetic Adhesives in Aquatic Environments," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 25, no. 14, July 2024, doi: 10.3390/ijms25147994.
- [13] D. Madhav, B. Buffel, P. Moldenaers, F. Desplentere, and V. Vandeginste, "A review of nacre-inspired materials: Chemistry, strengthening-deformation mechanism, synthesis, and applications," *Progress in Materials Science*, vol. 139, p. 101168, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.pmatsci.2023.101168.
- [14] K. Ko, S. Lee, Y. K. Hwang, S. Jin, and J.-W. Hong, "Investigation on the impact resistance of 3D printed nacre-like composites," *Thin-Walled Structures*, vol. 177, p. 109392, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.tws.2022.109392.
- [15] J. Liu, S. Li, K. Fox, and P. Tran, "3D concrete printing of bioinspired Bouligand structure: A study on impact resistance," *Additive Manufacturing*, vol. 50, p. 102544, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.addma.2021.102544.
- [16] S.-M. Chen, S.-M. Wen, S.-C. Zhang, C.-X. Wang, and S.-H. Yu, "Biological and bioinspired Bouligand structural materials: Recent advances and perspectives," *Matter*, vol. 7, no. 2, pp. 378–407, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.matt.2023.11.013.
- [17] W. Haipeng *et al.*, "A review of recent research on bionic structural characteristics and performance mechanisms of biomimetic materials," *Composites Part B: Engineering*, vol. 304, p. 112681, Sept. 2025, doi: 10.1016/j.compositesb.2025.112681.
- [18] V. Tuninetti *et al.*, "Biomimetic Lattice Structures Design and Manufacturing for High Stress, Deformation, and Energy Absorption Performance," *Biomimetics*, vol. 10, no. 7, July 2025, doi: 10.3390/biomimetics10070458.
- [19] T. Cheng *et al.*, "Weather-responsive adaptive shading through biobased and bioinspired hygromorphic 4D-printing," *Nat Commun*, vol. 15, no. 1, p. 10366, Nov. 2024, doi: 10.1038/s41467-024-54808-8.
- [20] R. El-Dabaa and S. Abdelmohsen, "Hygroscopy and adaptive architectural façades: an overview," *Wood Sci Technol*, vol. 57, no. 3, pp. 557–582, May 2023, doi: 10.1007/s00226-023-01464-8.
- [21] H. Savolainen, N. Hosseiniyan, M. Piedrahita-Bello, and O. Ikkala, "Bioinspired nondissipative mechanical energy storage and release in hydrogels via hierarchical sequentially swollen stretched chains," *Nat Commun*, vol. 16, no. 1, p. 4544, May 2025, doi: 10.1038/s41467-025-59743-w.
- [22] Z. Lin *et al.*, "Mudskipper-inspired amphibious robotic fish enhances locomotion performance by pectoral-caudal fins coordination," *Cell Reports Physical Science*, vol. 4, no. 10, p. 101589, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.xcrp.2023.101589.
- [23] H. Duan, M. Huo, and Y. Fan, "From animal collective behaviors to swarm robotic cooperation," *Natl Sci Rev*, vol. 10, no. 5, p. nwad040, May 2023, doi: 10.1093/nsr/nwad040.
- [24] Y. Zhou *et al.*, "Bioinspired sensors and applications in intelligent robots: a review," *Robotic Intelligence and Automation*, vol. 44, no. 2, pp. 215–228, Apr. 2024, doi: 10.1108/RIA-07-2023-0088.
- [25] H. Ren *et al.*, "A robust and omnidirectional-sensitive electronic antenna for tactile-induced

perception," *Nat Commun*, vol. 16, p. 3135, Apr. 2025, doi: 10.1038/s41467-025-58403-3.

- [26] G. Gong *et al.*, "Bioinspired Adaptive Sensors: A Review on Current Developments in Theory and Application," *Advanced Materials*, vol. n/a, no. n/a, p. 2505420, 2025, doi: 10.1002/adma.202505420.

## Autorización y Licencia CC

Los autores autorizan a APANAC XVIII a publicar el artículo en las actas de la conferencia en Acceso Abierto (Open Access) en diversos formatos digitales (PDF, HTML, EPUB) e integrarlos en diversas plataformas online como repositorios y bases de datos bajo la licencia CC: Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.