

**(03-029) - Strategic application of biomimicry in engineering projects:
Collaboration, innovation, and sustainability**

Aguilar-Planet, María Teresa ¹; Picardo, Alberto ¹; Fernández Rodríguez, Juan
Francisco ¹; Martín-Mariscal, Amanda ¹; Peralta, Estela ¹

¹ Universidad de Sevilla

In the field of project management, a growing interest is evident in strategically applying biomimicry and its principles. This approach aims to optimize resources, encourage effective collaboration, drive innovation, promote sustainability, and strengthen resilience by emulating the efficient and adaptable processes found in natural ecosystems. Adopting nature-inspired procedures not only facilitates the achievement of Sustainable Development Goals but also maximizes efficiency while minimizing the inherent environmental impact of each solution. This study conducts a comprehensive analysis of existing biomimetic knowledge, emphasizing the most prevalent tools and approaches across various industrial sectors. The primary objective is to identify areas where biomimicry has been significantly integrated and those where its implementation is still in an early stage. Through a detailed analysis of specific situations, the study explores the benefits and challenges associated with applying biomimetic approaches in project management. The results provide a comprehensive perspective on the utilization of biomimicry in the industrial context, along with its integration into project management procedures with a focus on sustainability.

Keywords: Biomimicry; green engineering; sustainable design; innovation design; bionics; biological models.

**Aplicación estratégica de la biomimética en proyectos de ingeniería:
Colaboración, innovación y sostenibilidad**

En el ámbito de la gestión de proyectos, se observa un creciente interés en la aplicación estratégica de la biomimética y sus principios. Este enfoque busca optimizar recursos, fomentar la colaboración efectiva, la innovación, promover la sostenibilidad y fortalecer la resiliencia, aplicando principios y estrategias que imitan los procesos eficientes y adaptables de los ecosistemas naturales. La adopción de procedimientos inspirados en la naturaleza no solo facilita el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, sino que también maximiza la eficiencia y reduce el impacto ambiental inherente a cada solución. Este trabajo realiza un análisis exhaustivo del conocimiento biomimético existente, resaltando las metodologías, herramientas y enfoques más utilizados en diversos sectores industriales. El objetivo principal es ubicar las áreas donde el biomimetismo ha sido más significativamente integrado y aquellas en las que su implementación se encuentra en una fase incipiente. A través de un análisis detallado de situaciones particulares, se exploran los beneficios y desafíos asociados con la aplicación del enfoque biomimético en el panorama industrial. Los resultados de este trabajo ofrecen una perspectiva integral de la utilización del biomimetismo, así como su integración en los procedimientos de gestión de proyectos enfocados hacia la sostenibilidad.

Palabras clave: Biomimetismo; ingeniería verde; gestión de proyectos; diseño innovador; biónica; modelos biológicos

Correspondencia: María Teresa Aguilar-Planet



©2024 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

El desarrollo de tecnologías sostenibles ha experimentado un auge significativo en respuesta a la creciente preocupación por los impactos ambientales y sociales asociados con su ciclo de vida. En este contexto, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) se han establecido como una guía fundamental para las estrategias destinadas a mitigar los efectos negativos de la globalización y promover el bienestar social. El alcance de estos objetivos converge con la aplicación avanzada de la biomimética, como tendencia innovadora que busca la inspiración en la naturaleza para obtener soluciones más sostenibles.

Si bien la biomimética no es un concepto nuevo, con ejemplos históricos como la imitación del vuelo de las aves por Dédalo e Ícaro en la antigua Grecia (Ovid, 2004), la máquina voladora renacentista de Leonardo Da Vinci (Taylor, 2009) o la invención del velcro por George de Mestral en el siglo XX (Benyus, 1997), ha experimentado un notable auge en la última década. Esta tendencia se debe principalmente a dos factores: (1) ofrece un enfoque y procedimiento innovador para abordar problemas complejos; y (2) permite la imitación de elementos y comportamientos naturales, los cuales han sido desarrollados por la naturaleza como soluciones altamente eficientes y sostenibles.

La biomimética, como disciplina que busca emular los componentes y comportamientos naturales para el desarrollo de soluciones tecnológicas, se ha convertido en un campo de investigación de gran interés en la actualidad. Su integración en las distintas fases de un proyecto (de desarrollo de productos, servicios, espacios construidos, instalaciones, entre otros) incluye un conjunto de beneficios, entre los que destacan la capacidad de desarrollo de soluciones más innovadoras y sostenibles en consonancia con el entorno, así como, el fomento del pensamiento creativo en las fases previas del proyecto. Esta estrategia es aplicable en cualquier área de conocimiento o sector. No obstante, la implementación efectiva de la biomimética exige una correcta selección de las metodologías y herramientas más adecuadas según el objetivo del proyecto, lo cual puede representar una barrera inicial significativa. Hasta la fecha, se han logrado avances sustanciales en áreas como la biomedicina, la automoción o la robótica, aunque su aplicación aún enfrenta diversos desafíos y limitaciones. Hay que destacar que la naturaleza presenta una complejidad intrínseca (y que en muchas ocasiones el ser humano todavía no comprende), dificultando la réplica directa de sus soluciones en el ámbito industrial; la traducción de los principios biológicos a soluciones tecnológicas no siempre es un proceso directo; y exige un enfoque interdisciplinario que integre conocimientos de biología, ingeniería, diseño y otras áreas. En segundo lugar, la falta de estándares y metodologías ampliamente aceptadas dificultan la aplicación coherente.

Este trabajo tiene el objetivo principal de identificar las áreas donde el biomimetismo ha sido más significativamente integrado y aquellas en las que su implementación se encuentra en una fase incipiente. A través de un análisis detallado de situaciones particulares, se exploran los beneficios y desafíos asociados con la aplicación del enfoque biomimético en el sector industrial. Los resultados de este trabajo ofrecen una perspectiva integral de la utilización del biomimetismo, así como sus posibilidades de integración en los procedimientos de gestión de proyectos enfocados hacia la sostenibilidad.

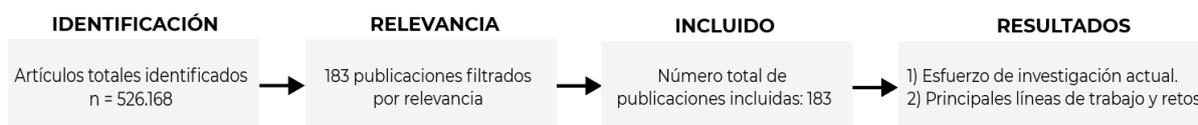
2. Metodología

La presente investigación se basa en una revisión bibliográfica exhaustiva de la literatura científica sobre biomimética. Se realizó un análisis crítico de las publicaciones y fuentes relevantes para asegurar una identificación óptima y actualizada de las metodologías, herramientas y aplicaciones patentadas en este campo. La búsqueda se llevó a cabo utilizando palabras clave en los motores de búsqueda Google Académico (*Google Scholar*,

2023), Scopus (Scopus, 2023) y la base de datos AskNature (Innovations — AskNature, 2023). Se seleccionaron artículos académicos, revistas, libros y casos de estudio como fuentes de información. La figura 1 muestra gráficamente la metodología seguida. La información recopilada se sometió a un proceso de filtrado basado en los siguientes criterios:

- Relevancia temática relacionada con la gestión de proyectos industriales.
- Adaptabilidad y factibilidad práctica, buscando que las metodologías, herramientas y aplicaciones fuesen adaptables e implementables en el ámbito industrial.
- Calidad de la fuente, seleccionando las confiables y de alta calidad según el contenido y otros indicadores de calidad, como tipo de indexación, área de indexación y número de citas.

Figura 1: Metodología de investigación



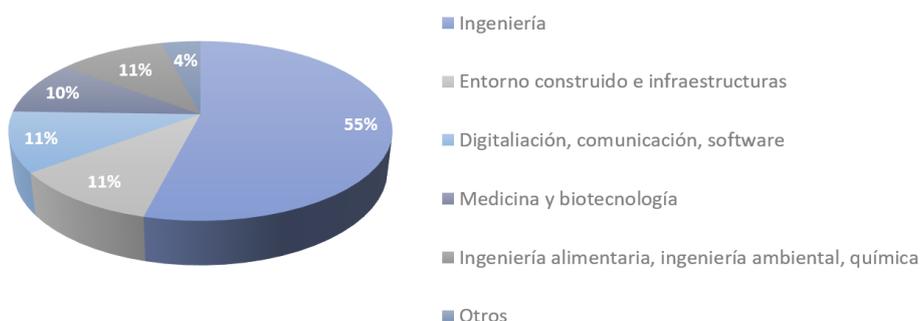
Los resultados de esta revisión se analizaron en detalle, identificando las principales metodologías, herramientas y aplicaciones de la biomimética en la gestión de proyectos industriales, destacando su potencial para mejorar la eficiencia, la sostenibilidad y la adaptabilidad a diferentes tipos y alcances de proyectos.

3. Resultados

3.1 Análisis bibliométrico

Se realizó un análisis detallado de los avances innovadores de carácter biomimético utilizando la plataforma online especializada AskNature (Innovations — AskNature, 2023). Se prestó especial atención a la distribución sectorial de las publicaciones, como se muestra en la Figura 2. Los resultados muestran que la mayor parte de las publicaciones (55%) se centran en la ingeniería, seguidas del entorno construido, la digitalización y computación o la industria alimentaria con un 11 %. Analizando el área “ingeniería” destaca la ingeniería de materiales, con el 26 % de fuentes analizadas; puede atribuirse a la creciente demanda de materiales y recursos más sostenibles, impulsada por las tendencias hacia el desarrollo de tecnologías verdes; en contraste, se observa un menor número de publicaciones en subáreas como las comunicaciones o la ingeniería ambiental, lo que puede ser debido a la dificultad de aplicación y la falta de inversión en investigación y desarrollo.

Figura 2: Categorización de áreas de aplicación de la biomimesis



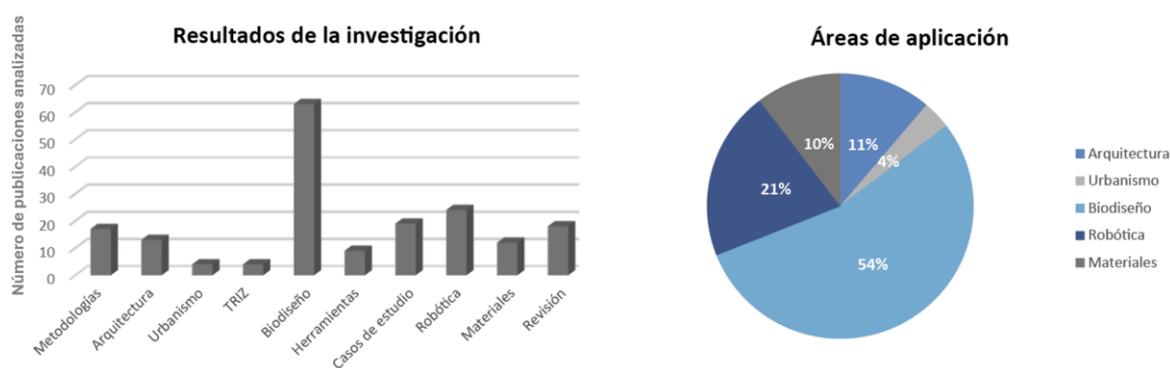
La tabla 3 recoge una selección de aplicaciones representativas en las diferentes áreas analizadas en este trabajo.

Tabla 3: Selección de aplicaciones de biomimesis más representativas

Categoría	Referencias
Arquitectura	(Blanco et al., 2010; Nazareth, 2018; Rezaei et al., 2011; Valadas, 2013)
Urbanismo	(Hermanus et al., 2017; Krzemińska et al., 2019; Taylor, 2017; Trudeau, 2013)
Biodiseño	(Broeckhoven et al., 2022; Collado Ruano, 2017; Islam et al., 2021; Sun et al., 2019)
Robótica	(Pinskier et al., 2021; Ren et al., 2021; Sharifzadeh et al., 2021; White et al., 2021)
Ingeniería de materiales	(Clegg et al., 2019; Khrunyk et al., 2020; Shi et al., 2022; Yan et al., 2020)

Los resultados del análisis bibliométrico se presentan gráficamente en la figura 3, mostrado en la parte izquierda la distribución del número de publicaciones analizadas en este estudio según alcance y en la parte derecha la importancia de sectores de aplicación según número de casos estudiados. Los datos evidencian un mayor interés en el ámbito del biodiseño, seguido con la robótica, la arquitectura, la ingeniería de materiales y el urbanismo. En cuanto al tipo de conocimiento publicado, se observa una mayor cantidad de contribuciones relacionadas con propuestas metodológicas (70%) que con herramientas (como recursos software, bases de datos, simuladores, o técnicas de evaluación y selección de alternativas) (30%).

Figura 3: Resultados del análisis bibliométrico

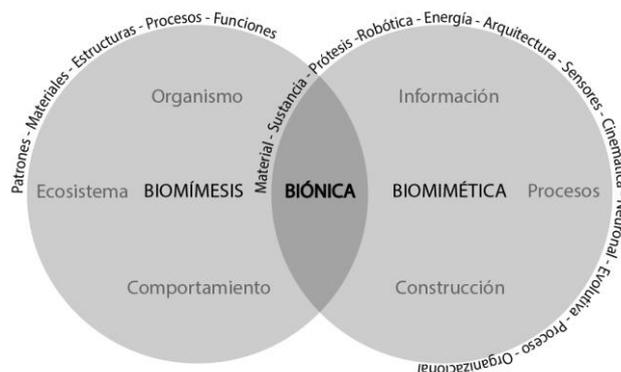


Al analizar la distribución de publicaciones por año (1997-2023), se observa que a principios del siglo XXI predominaba la publicación de conocimiento relacionado con el biodiseño. Sin embargo, no fue hasta mediados de la primera década de 2010 que se produjo un aumento en la publicación de artículos sobre herramientas y metodologías específicas de la biomimética. Entre 2005-2010, se observa un crecimiento en las publicaciones sobre arquitectura, urbanismo y robótica. La presencia significativa de casos de estudio a lo largo del período analizado es un indicador del creciente interés en la investigación sobre la aplicación de la biomimética, el cual se evidencia por el aumento de las publicaciones orientadas a revisiones de la literatura centradas en diferentes categorías temáticas.

3.2 Análisis de los recursos disponibles

El análisis de los recursos disponibles y el alcance del conocimiento de la biomimesis, reveló la frecuente confusión en la utilización de los términos biomimética y biomimetismo. A pesar de su similitud conceptual focalizada en el aprovechamiento de la biología como fuente de inspiración, existen distinciones (figura 4) en cuanto a su enfoque y las metodologías que abordan su aplicación (Tan et al., 2019). La biomimética se centra en emular la biología para generar soluciones innovadoras por analogía con los fenómenos biológicos. Un ejemplo de ello es el diseño formal del Airbus A300-600ST Beluga, que se asemeja al cetáceo del que toma su nombre comercial con el objetivo de maximizar su aerodinámica (Airbus, 2023). El biomimetismo, por su parte, se enfoca en la aplicación de principios biológicos para responder a desafíos específicos, como el diseño de un sistema de purificación de agua fundamentado en las branquias de los peces (Gurave et al., 2023).

Figura 4: Diferencias entre biomimesis y biomimética



La biomimesis toma a la naturaleza como referencia y guía sus métodos mediante tres pilares fundamentales: emular (diseños de soluciones regenerativas a través de la investigación e imitación de la naturaleza), ética (comprensión del funcionamiento de la vida para contribuir a un menor impacto) y (re)conectar (fomentar una conexión armoniosa entre la humanidad y la naturaleza) (*Principios esenciales de la biomimesis*, 2013). Del mismo modo, implica la imitación parcial o total de formas, materiales, estructuras, procesos o funciones naturales, agrupados en tres niveles: organismo (emulación de características físicas y biológicas), comportamiento (traducción de las interacciones de los organismos con el entorno) y ecosistema (estudio de su funcionamiento como entidad autónoma).

Las demandas sociales siempre han sido satisfechas por la naturaleza sin ocasionar daños en los ciclos naturales, contribuyendo así a la cohesión operativa del planeta a lo largo de millones de años. La biomimesis busca comprender estos patrones naturales y traducirlos en soluciones de ingeniería sostenibles. Sin embargo, la comprensión de los patrones naturales y su aplicación efectiva en la gestión de proyectos presenta un desafío significativo. Integrar eficazmente los principios biomiméticos en la planificación, desarrollo y ejecución de proyectos requiere: (1) un profundo conocimiento de la naturaleza y sus procesos biológicos; (2) la capacidad de identificar analogías relevantes entre los sistemas naturales y los problemas de ingeniería; y (3) habilidades para aplicar estos principios de manera pragmática en el diseño e implementación de sistemas y procesos.

Para abordar el desafío de la aplicación efectiva de la biomimesis en la gestión de proyectos, se han desarrollado diversas investigaciones enfocadas en la estandarización de analogías entre los procesos naturales y humanos. En este asunto, destaca Benyus (Benyus, 2009),

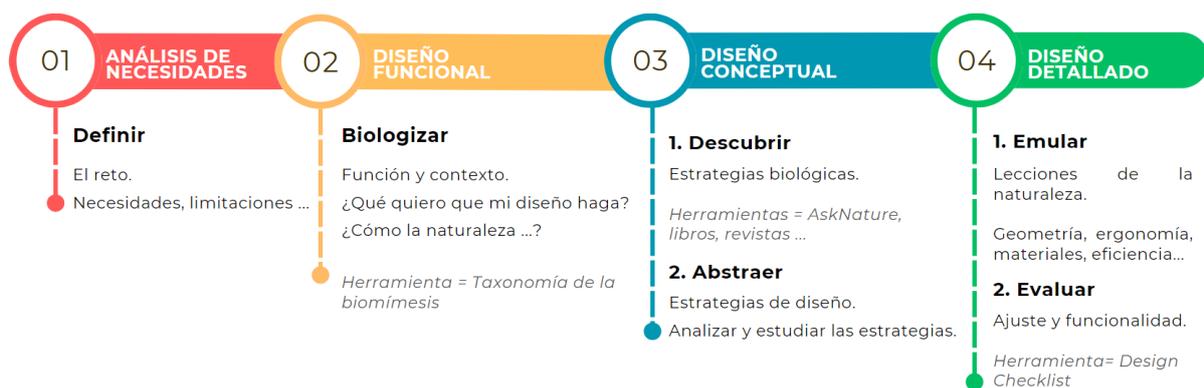
McDonough y Braungart (McDonough et al., 2002) que proponen un marco de trabajo para la creación de soluciones bioinspiradas y una introducción del enfoque Cradle to Cradle (C2C), respectivamente. Por otro lado, destaca la perspectiva ecosistémica de Riechmann (Blount et al., 2003), quien analiza el principio biomimética desde una amplia perspectiva.

En el contexto de la gestión de proyectos, estos marcos de trabajo biomiméticos son esenciales para promover la innovación y la sostenibilidad. Se fundamentan en la estrategia de emplear la naturaleza como un referente, considerándola en tres aspectos principales:

- **Mentora:** la naturaleza como fuente de aprendizaje e inspiración, transmisora de conocimientos fundamentales sobre la eficiencia y eficacia en la concepción de sistemas sostenibles. Este enfoque se relaciona directamente con la fase de planificación de un proyecto, y puede ofrecer perspectivas interesantes para la selección de tecnologías y prácticas adecuadas.
- **Modelo:** identificación de mejores prácticas y minimización del impacto ambiental durante la ejecución del proyecto, según otras referencias naturales que lleven a cabo los mismos procedimientos.
- **Medida:** aplicación de métricas e indicadores específicos que garanticen la sostenibilidad con objeto de analizar el desempeño del proyecto y su impacto ambiental (Benyus, 2009; McDonough et al., 2002).

La biomimesis, como campo de estudio, ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años, impulsado por el gran potencial que ofrece su aplicación en diversos ámbitos. Este auge ha dado lugar al desarrollo de una amplia gama de metodologías y herramientas para la aplicación de la biomimesis en diferentes áreas. Las metodologías biomiméticas generalmente se estructuran en fases similares a las de los proyectos de ingeniería. Por ejemplo, y como muestra la Figura 5, en el contexto de la ingeniería en diseño industrial, el procedimiento biomimético compuesto por las fases definir, biologizar, descubrir y abstraer puede integrarse en la secuencia estándar del proceso de desarrollo de producto (análisis de las necesidades, diseño funcional, diseño conceptual y diseño de detalle) (Biomimicry Institute, 2023b).

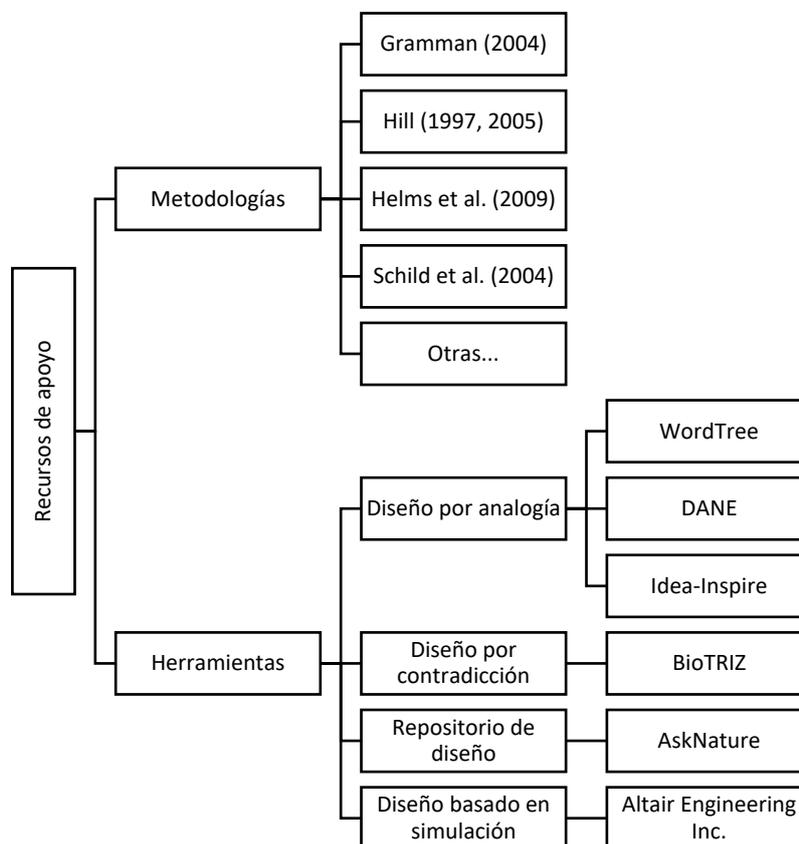
Figura 5. Relación entre las fases del diseño biomimético y el proyecto de producto



La investigación realizada, resalta metodologías y herramientas focalizadas en la aplicación de biomimética en cualquier ámbito como son: BioTRIZ - Biologically Inspired TRIZ (Bogatyrev et al., 2015), MBE - Morphological Biological Engineering (Guifang Cao et al., 2005), UNO-BID - Universal Network of Bio-Inspired Design (Rosa et al., 2014), DANE - Design and Nature for Engineering (LabManager, 2011), SAPPHIRE - Systematic Analysis of Products and Processes for Inspiration by Nature (Bhatt et al., 2021), o Bio-SBF - Biologically Inspired System-Based Framework (Chakrabarti et al., 2005). Requieren conocimiento previo en estrategias biológicas y algunas, como DANE (Biologically-Inspired Design – Design &

Intelligence Lab, 2023) o SAPPhIRE (Bhatt et al., 2021) pueden no encontrarse disponibles o desactualizadas a pesar de ser frecuentemente mencionadas en diversas publicaciones. La figura 6 establece una categorización genérica de las metodologías y herramientas más utilizadas en las fuentes bibliográficas analizadas.

Figura 6. Clasificación de metodologías según alcance



La Tabla 2 presenta un análisis más detallado del conjunto de metodologías y herramientas, incluyendo sus relaciones entre sí. Esta tabla facilita la identificación de las herramientas y metodologías más adecuadas para cada caso particular (Tan et al., 2019).

En el ámbito de la ingeniería, dos metodologías biomiméticas se destacan por su utilidad: BioTRIZ y la Espiral de Diseño Biomimético (figura 7). BioTRIZ, desarrollada por Bogatyrev et al. (2015), combina la TRIZ con la biomimética para generar soluciones innovadoras; presenta similitudes con otras herramientas utilizadas en ingeniería, lo que facilita su integración en los procedimientos tradicionales.

Sin embargo, es la Espiral de Diseño Biomimético es la más frecuentemente utilizada; desarrollada por el Instituto de Biomimética (Biomimicry Institute, 2023b), se caracteriza por su simplicidad y aplicabilidad en diversos contextos. Se complementa con la Taxonomía de la Biomimética (Biomimicry Institute, 2023a) que facilita la identificación de soluciones biomiméticas, y la base de datos AskNature (*Innovations — AskNature*, 2023) con su complemento Biomole (*Biomole*, 2024), que ofrece información sobre ejemplos de aplicaciones. Las etapas por seguir en esta metodología se resumen en la Figura 7.

Tabla 2. Clasificación de recursos según etapas de aplicación en biomimesis

Etapas	Métodos y herramientas
Análisis del problema	<ul style="list-style-type: none"> - Definir la función principal (BioTRIZ, MBE). - Definir el problema (BID, DANE). - Describir el problema usando un triplete de adverbios (SAPPhIRE). - Especificar los términos de la función (bio-SBF).
Definir problemas de forma abstracta	<ul style="list-style-type: none"> - Replantear el problema (BID, DANE). - Modelado funcional (BID, MBE).
Transporte a biología	<ul style="list-style-type: none"> - Buscar prototipos en biología (BioTRIZ). - Búsqueda de una solución biológica (BID). - Traducir la entrada en analogías (SAPPhIRE). - Búsqueda de términos de funciones relevantes (bio-SBF). - Operación de atributo general (MBE).
Clasificar posibles bioprototipos	<ul style="list-style-type: none"> - Base de datos biológica (DANE, SAPPhIRE, MBE). - Matriz PRIZM (BioTRIZ). - Biblioteca de células de conocimiento (bio-SBF).
Comparar y seleccionar bioprototipos	<ul style="list-style-type: none"> - Términos frecuentes (DANE, SAPPhIRE, bio-SBF). - Clúster gris (MBE).
Analizar estrategias biológicas	<ul style="list-style-type: none"> - Conocimiento biológico que representa métodos (DANE...).
Transporte a la tecnología	<ul style="list-style-type: none"> - Analogías biológicas (BID, MBE, bio-SBF). - Principios de invención (BioTRIZ). - Aplicación de principio (BID).
Implementar y verificar	<ul style="list-style-type: none"> - Diseño de funciones, clúster gris y evaluación (MBE).

En la espiral el proceso biomimético se compone de cinco fases principales. Primero se ha de definir de forma completa el reto de diseño teniendo presente su contexto, para posteriormente biologizar el problema buscando en la naturaleza la posible solución. De este modo, se identifican las funciones esenciales y se localizan en la Taxonomía de la Biomimesis (Biomimicry Institute, 2023a) para proceder al descubrimiento de estrategias biológicas mediante la base de datos AskNature (*Innovations — AskNature*, 2023) u otros recursos. Una vez seleccionadas las más relevantes, comienza la fase de abstracción; se estudian y analizan en profundidad las estrategias biológicas más relevantes. Se extraen los principios de funcionamiento y se traducen en soluciones de diseño. Posteriormente, se emulan en un proceso o producto que proporcione una solución al reto de diseño.

Para abordar y justificar la sostenibilidad de las soluciones propuestas se establece un marco de evaluación que asegure la alineación de las soluciones con principios ecológicos y de sostenibilidad. Estos principios son medidos a través de diferentes métricas; por ejemplo, *la adaptación eficiente a los cambios, el uso de materiales seguros, huella ecológica de*

materiales, tasa de ciclicidad o reutilización, reducción de emisiones, eficiencia energética o la creación de condiciones propicias para la vida. Este análisis permite obtener resultados cualitativos o cuantitativos de la viabilidad de las soluciones y su adecuación teniendo en cuenta impactos ambientales, económicos y en su caso, sociales. En esta fase de análisis de la sostenibilidad de las soluciones es necesario recurrir a otros métodos complementarios como técnicas de comprobación especializados en biomimetismo (como la lista de chequeo del Biomimicry Institute (2023b)) o metodologías de evaluación alternativas no especializadas en biomimetismo (como Análisis Jerárquico de Procesos AHP o análisis multicriterio), que analizan la viabilidad desde múltiples perspectivas, incluyendo factores técnicos, económicos y ambientales. Así mismo, un Análisis de Ciclo de Vida (UNE EN ISO 14040) puede ser útil para comparar las soluciones en términos de impactos medios y finales. Este análisis proporciona una cuantificación del impacto en cada fase del ciclo de vida de un sistema o producto.

Figura 7: Espiral de Diseño Biomimético.



4. Conclusiones

La economía circular está adoptando el enfoque biomimético como una estrategia prometedora para asegurar un futuro sostenible en la ingeniería. Ofrece un modelo innovador para abordar los retos ligados al equilibrio entre el desarrollo industrial y los límites ambientales y presenta una aplicabilidad extensa en diversos sectores. Sin embargo, su éxito depende de la mejora de la infraestructura de apoyo y la formación relacionada con este campo.

Este estudio analiza cómo la biomimética, inspirada en los principios y estrategias de la naturaleza, puede aplicarse efectivamente en el desarrollo, gestión y ejecución de proyectos industriales. El análisis de los resultados identifica desafíos significativos que limitan la implementación práctica de la biomimesis. Es el caso del acceso a la información, debido a la gran cantidad de fuentes y recursos disponibles. Además, la efectividad de la biomimética en proyectos reales requiere la comprensión técnica de los procesos biológicos y habilidad para integrar estos conceptos en aplicaciones viables técnica y económicamente. Esto subraya la necesidad de una formación especializada del equipo de proyecto. Para superar estos obstáculos este estudio identifica la necesidad de desarrollar plataformas centralizadas que faciliten el acceso y la gestión de la información; estas deberían ofrecer bases de datos, herramientas y recursos especializados, organizados de manera que reflejen las necesidades específicas de cada sector, mejorando la accesibilidad a la información y apoyando la capacitación del equipo de proyecto para aplicar los principios biomiméticos de manera efectiva.

5. Referencias

- Airbus. (2023). *AIRBUS AIRCRAFT*. BelugaST.
<https://aircraft.airbus.com/en/aircraft/freighters/belugast>
- AskNature. (2024). *Biomole*. <http://biomole.asknature.org/>
- Benyus, J. M. (2002). *Biomimicry: Innovation inspired by nature*. Library Journal Innovations.
<https://aracnetool.eu/sites/default/files/biomimicry-innovation-inspired-by-nature-janine-m-benyus-pdf-download-free-book-2bc616e.pdf>
- Bhatt, A. N., Majumder, A., & Chakrabarti, A. (2021). Analyzing the modes of reasoning in design using the SAPPhIRE model of causality and the Extended Integrated Model of Designing. *AI EDAM*, 35(4), 384-403. <https://doi.org/10.1017/S0890060421000214>
- Biomiméticos. (2013, junio 10). *Biomímesis aplicada*. Principios esenciales de la biomímesis.
<https://biomimesisaplicada.wordpress.com/2013/06/10/principios-esenciales-de-la-biomimesis/>
- Biomimicry Institute. (2017). *Biomimicry Toolbox*. Evaluate: Nature's Unifying Patterns-Design Checklist. <https://toolbox.biomimicry.org/es/>
- Biomimicry Institute. (2023a). *AskNature*. Biomimicry Taxonomy.
<https://asknature.org/resource/biomimicry-taxonomy/>
- Biomimicry Institute. (2023b). *Biomimicry Toolbox*. The Biomimicry Design Process.
<https://toolbox.biomimicry.org/methods/process/>
- Blanco, V. C., & Bermejo Gómez De Segura, R. (2010). Biomímesis como equivalente de sostenibilidad. Las sociedades en emergencia energética como muestra [Tesina fin de máster, Instituto Hegoa UPV-EHU]. En *transicionsostenible.com*.
http://www.transicionsostenible.com/wp-content/uploads/2012/05/Vanesa-Calero_Tesina_La-biomimesis-como-equiv-sost_las-SEE1-Transicion-Sostenible.pdf
- Blount, E., Clarimón, L., Cortés, A., & Riechmann, J. (2003). *Industria como naturaleza: hacia la producción limpia*. Los Libros de la Catarata. https://www.catarata.org/libro/industria-como-naturaleza_45442/
- Bogatyrev, N., & Bogatyreva, O. (2015). TRIZ-based Algorithm for Biomimetic Design. *Procedia Engineering*, 131, 377-387. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2015.12.417>
- Broeckhoven, C., & du Plessis, A. (2022). Escaping the Labyrinth of Bioinspiration: Biodiversity as Key to Successful Product Innovation. *Advanced Functional Materials*, 32(18). <https://doi.org/10.1002/ADFM.202110235>
- Chakrabarti, A., Sarkar, P., Leelavathamma, B., & Nataraju, B. S. (2005). A functional representation for aiding biomimetic and artificial inspiration of new ideas. *AI EDAM*, 19(2), 113-132. <https://doi.org/10.1017/S0890060405050109>
- Clegg, J., Wagner, A., Shin, S., & ... S. H. (2019). Modular fabrication of intelligent material-tissue interfaces for bioinspired and biomimetic devices. *Elsevier*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642519300714>
- Collado Ruano, J. (2017). Biomímesis: un abordaje transdisciplinar a la educación para la ciudadanía mundial. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.1344/RIDAS2017.3.4>
- Elsevier. (2023). *Scopus*. <https://www.scopus.com/home.uri?zone=header&origin=>
- Google. (2023). *Google Scholar*. <https://scholar.google.es/schhp?hl=es>
- Guifang Cao, & Runhua Tan. (2005). Study on conceptual design process model based on effects. *ResearchGate*.

https://www.researchgate.net/publication/296810687_Study_on_conceptual_design_process_model_based_on_effects

- Gurave, P. M., Nandan, B., & Srivastava, R. K. (2023). Fish-gill inspired multifunctional nanofibrous membrane for efficient demulsification and pollutant sorption. *Journal of Membrane Science*, 683, 121850. <https://doi.org/10.1016/J.MEMSCI.2023.121850>
- Hermanus, L., & Campbell, A. (2017). Biomimicry builds urban possibilities in South Africa. *IndraStra Global*, 1-8. <https://www.ssoar.info/ssoar/handle/document/52032>
- Islam, M., Hazell, P., Escobedo, J., & Wang, H. (2021). Biomimetic armour design strategies for additive manufacturing: A review. *Elsevier*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127521002823>
- Khrunyk, Y., Lach, S., Petrenko, I., & drugs, H. E. (2020). Progress in modern marine biomaterials research. *Marine Drugs*, 18(12), 1-589. <https://doi.org/10.3390/MD18120589>
- Krzemińska, A. E., Zaręba, A. D., Dzikowska, A., & Jarosz, K. R. (2019). Cities of the future - bionic systems of new urban environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(9), 8362-8370. <https://doi.org/10.1007/S11356-017-0885-2>
- LabManager. (2011, diciembre 20). *Design Intelligence Lab*. Biologically-Inspired Design. <https://dilab.gatech.edu/biologically-inspired-design/>
- McDonough, W., & Braungart, M. (2002). *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*. Farrar, Straus and Giroux.
- Nazareth, A., Murphy, C., & Rennie, J. (2018). *Bionic architecture* [Tesis de maestría, Instituto Tecnológico Uteq]. <https://www.researchbank.ac.nz/handle/10652/4330>
- Ovid. (2004). *Metamorphoses: a new verse translation* (1 st). Penguin Classics. https://www.amazon.com/Metamorphoses-Translation-Classics-29-Jan-2004-Paperback/dp/B011T7YBJI#detailBullets_feature_div
- Pinskier, J., & Howard, D. (2021). From bioinspiration to computer generation: Developments in autonomous soft robot design. *Wiley Online Library*, 4(1), 2100086. <https://doi.org/10.1002/aisy.202100086>
- Ren, L., Li, B., Wei, G., Wang, K., Song, Z., Wei, Y., & Iscience, L. R. (2021). Biology and bioinspiration of soft robotics: Actuation, sensing, and system integration. *Elsevier*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589004221010439>
- Rezaei, D., & Zare, M. (2011). Plants in arid climate as a pattern for bionic architecture in behavioral viewpoint. *Canadian Journal on Environmental, Construction and Civil Engineering*, 2(6), 141-146. https://www.researchgate.net/publication/316352839_Plants_in_arid_climate_as_a_pattern_for_bionic_architecture_in_behavioral_viewpoint
- Rosa, F., Cascini, G., & Baldussu, A. (2014). UNO-BID: unified ontology for causal-function modeling in biologically inspired design. *International Journal of Design Creativity and Innovation*, 3(3-4), 177-210. <https://doi.org/10.1080/21650349.2014.941941>
- Sharifzadeh, M., Aukes, D., Jiang, Y., Lafmejani, A., Nichols, K., & Aukes, D. (2021). Maneuverable gait selection for a novel fish-inspired robot using a CMA-ES-assisted workflow. *Bioinspiration & Biomimetics*, 16(5). <https://doi.org/10.1088/1748-3190/AC165D>
- Shi, S., Si, Y., Han, Y., Wu, T., Iqbal, M. I., Fei, B., Li, R. K. Y., Hu, J., & Qu, J. (2022). Recent Progress in Protective Membranes Fabricated via Electrospinning: Advanced Materials, Biomimetic Structures, and Functional Applications. *Advanced Materials*, 34(17). <https://doi.org/10.1002/ADMA.202107938>

- Sun, J., & Bhushan, B. (2019). Nanomanufacturing of bioinspired surfaces. *Tribology International*, 129, 67-74. <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2018.08.007>
- Tan, R., Liu, W., Cao, G., & Shi, Y. (2019). Creative design inspired by biological knowledge: Technologies and methods. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 14(1), 1-14. <https://doi.org/10.1007/S11465-018-0511-0/METRICS>
- Taylor, N. (2017). The art of imitating life: The potential contribution of biomimicry in shaping the future of our cities. *journals.sagepub.com*, 44(1), 120-140. <https://doi.org/10.1177/0265813515611417>
- Taylor, R. (2009). Reflecting the impossible. *Nature*, 460. <https://doi.org/10.1038/460462a>
- The Biomimicry Institute. (2023). *AskNature*. <https://asknature.org/innovations/>
- Trudeau, D. (2013). New urbanism as sustainable development? *Wiley Online Library*, 7(6), 435-448. <https://doi.org/10.1111/gec3.12042>
- Valadas, I. (2013). *Arquitectura y biónica. Narrativa de analogía biológica en arquitectura*. [Tesis, Universidad de Oporto]. <https://hdl.handle.net/10216/80308>
- White, C. H., Lauder, G. V., & Bart-Smith, H. (2021). Tunabot Flex: a tuna-inspired robot with body flexibility improves high-performance swimming. *Bioinspiration & Biomimetics*, 16(2). <https://doi.org/10.1088/1748-3190/ABB86D>
- Yan, H., Wu, Q., Yu, C., Zhao, T., & Liu, M. (2020). Recent Progress of Biomimetic Antifouling Surfaces in Marine. *Advanced Materials Interfaces*, 7(20). <https://doi.org/10.1002/ADMI.202000966>

Communication aligned with the Sustainable Development Goals

