

## Biodigital Product Design Through Additive Fabrication Technologies: Stool Project

David A. Torreblanca-Díaz<sup>1</sup>, Juan Pablo Velásquez Peña<sup>2</sup>

Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia  
david.torreblanca@upb.edu.co; juanp.velasquezp@upb.edu.co

**Abstract.** Designers and architects have widely used references from nature for their projects; bioinformed design has had a significant evolution in recent decades, largely thanks to digital technologies advantages, especially digital fabrication and parametric software. This text presents the process of design, experimentation and materialization of a stool based on three-dimensional patterns extracted from nature. The project followed this methodological sequence (1) Selection of biological referents (2) Morphologic synthesis (3) Compression test (4) Analysis of thicknesses and stress (5) Fabrication of 1:1 scale prototype through Fused Deposition Modelling technology - FDM- (6) User testing (7) Conclusions and improvement proposal. The 1:1 scale prototype fabrication process presented various challenges in terms of dimensions, printing times and costs. Finally, the prototype demonstrated that it is possible to materialize functional and resistant objects through FDM; the proposed goals were achieved in the context of a valuable experience, as a result of a transdisciplinary collaboration.

**Keywords:** Biomimicry, Biodigital design, Parametric design, Additive fabrication technologies, Fused deposition modelling technology.

### 1 Introducción

Profesionales de las disciplinas proyectuales han usado ampliamente referentes de la naturaleza para sus propuestas de diseño. La denominación biónica fue introducida por el doctor coronel Jack E. Steele en 1960 en una investigación comparativa entre los sistemas naturales y sintéticos en la *United Air Force* de los Estados Unidos (Villamil & Otálvaro, 2019). Benyus (2012) define biomimética como una ciencia que estudia los modelos de la naturaleza para resolver problemas humanos con una aproximación sistémica. El diseño y arquitectura biodigital emergen de una fusión entre las tecnologías digitales y las posibilidades de lo biológico, uniendo una variedad de conceptos como la naturaleza, algoritmos, cibernética, genética, matemáticas (Estévez AT, 2020).

Como una idea integradora Iouguina et al. (2014) proponen el concepto de disciplinas bioinformadas, agrupando a todos los enfoques de diseño basado en la naturaleza para resolver problemas del ser humano con resultados sostenibles o no. A un nivel más específico Gebeshuber y Drack (2008) diferencian dos enfoques para la biomimética: por analogía y por inducción. El método por analogía arranca desde el problema del ser humano para buscar referentes en la naturaleza y finalmente transfiere sus características a través de productos o sistemas, el método por inducción empieza desde el estudio de un fenómeno o sistema natural para después buscar aplicaciones en el mundo artificial. Pedersen Zari (2007) propone tres niveles de complejidad para estudiar referentes de la naturaleza: organismo, comportamiento y ecosistema. El diseño bioinformado ha tenido una evolución significativa en las últimas décadas, en gran medida gracias a las tecnologías digitales, en especial la fabricación digital aditiva y los software paramétrico-asociativos. La fabricación digital aditiva permite materializar geometrías complejas, un alto nivel de precisión, materialización de ensambles armados, multimaterialidad; esta tecnología además ha inspirado un movimiento de proyectistas y fabricantes con el objetivo de democratizar el diseño y la fabricación (Gao et al., 2015). Ford & Despeisse (2015) afirman que permite realizar diseños personalizados; la fabricación aditiva facilita la traducción del modelo digital a formas concretas, incluidos prototipos y productos finales (Scheeren & Sperling, 2020). Con estos antecedentes se propuso un proyecto orientado a diseñar una serie de objetos bajo las premisas de lo biodigital, destacando las posibilidades de las tecnologías de fabricación digital aditiva y diseño paramétrico para materializar morfologías de la naturaleza. En este texto se presenta el proceso de diseño, experimentación y materialización de un taburete basado en patrones tridimensionales extraídos de la naturaleza.

## **1 Metodología**

Se propuso un proyecto con una aproximación transdisciplinaria, un método empírico-experimental, combinación de herramientas analógicas y digitales, y el uso de análisis cuantitativos. Desde el diseño basado en la naturaleza, se utilizó el enfoque por inducción (Gebeshuber y Drack, 2008) y el uso de referentes a nivel de organismos (Pedersen Zari, 2007). Como se puede ver en la figura 1 se realizó la siguiente secuencia metodológica (1) Búsqueda y selección de referentes en la naturaleza, (2) Síntesis morfológica y parametrización (3) Materialización de probetas y ensayos de compresión (4) Análisis digital de espesores y stress (5) Materialización del prototipo escala 1:1 (6) Validaciones (7) conclusiones y propuesta de mejora.

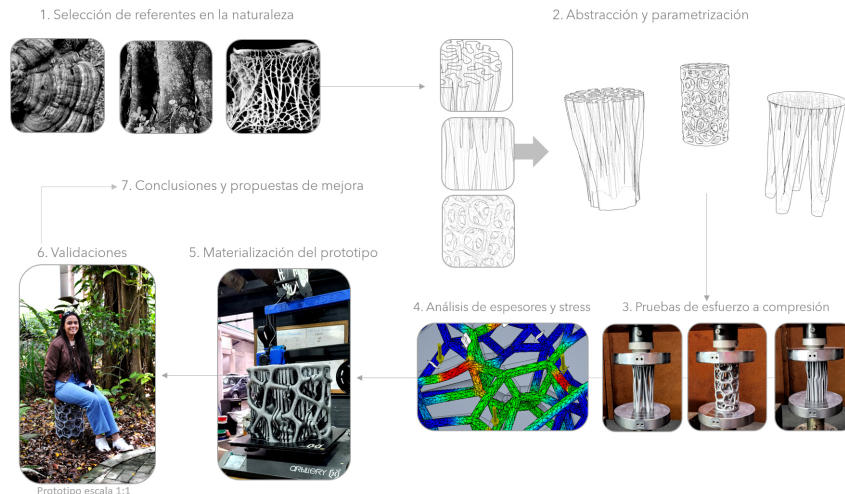


Figura 1. Secuencia metodológica. Fuente: los autores, 2022.

Se buscaron referentes biológicos con presencia en diferentes entornos, que cumplieran los requerimientos de ser patrones morfológicos y a la vez de crecimiento tridimensional, con características geométricas diferentes entre sí y factibilidad para ser aplicados al objeto de destino (asiento). Como se puede ver en la figura 2 los patrones elegidos fueron: crecimiento diferencial, ramificaciones y el diagrama de Voronoi.

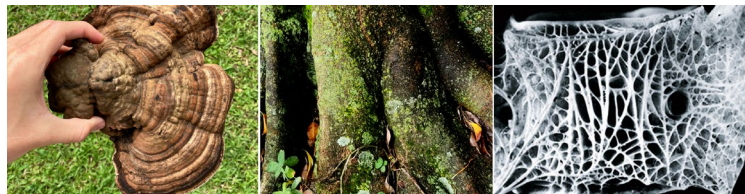


Figura 2. Referentes de la naturaleza, de izquierda a derecha: crecimiento diferencial, ramificaciones y diagrama de Voronoi. Fuente: las dos primeras imágenes de los autores y la última a la derecha extraída de Evolo, 2022.

El diagrama de Voronoi, es un patrón morfológico que se puede encontrar en diferentes organismos, a escala micro y macro; el patrón Voronoi elegido es de tipo tridimensional y se encuentra a nivel microscópico en huesos, una estructura ligera y eficiente estructuralmente porque posee más volumen en las zonas que requiere un mayor esfuerzo mecánico, en las zonas de menor esfuerzo tiene un volumen reducido o está vacío. Las ramificaciones en plantas y árboles dan soporte estructural al organismo, permiten obtener una máxima exposición al sol y distribuir nutrientes; arrancan desde un tronco, a partir de este se bifurcan diferentes ramas en ángulos que en general varía

entre 75 ° y 90°. El crecimiento diferencial se presenta en el reino vegetal y corales (animales denominados pólipos o zooides), su crecimiento no homogéneo se debe a la estructura no uniforme de la composición de los materiales o el transporte intercelular, las limitaciones físicas en las paredes celulares obligan a las células adyacentes a deformarse de manera coordinada generando morfologías complejas e irregulares. Posteriormente se hizo el proceso de abstracción y parametrización en Grasshopper®, se integraron estas morfologías a un volumen cilíndrico base de 420 mm de altura y 300 mm de diámetro, que corresponden a las dimensiones del objeto final. De la figura 3 a la 6 se pueden ver los algoritmos y los 3 modelos resultantes.

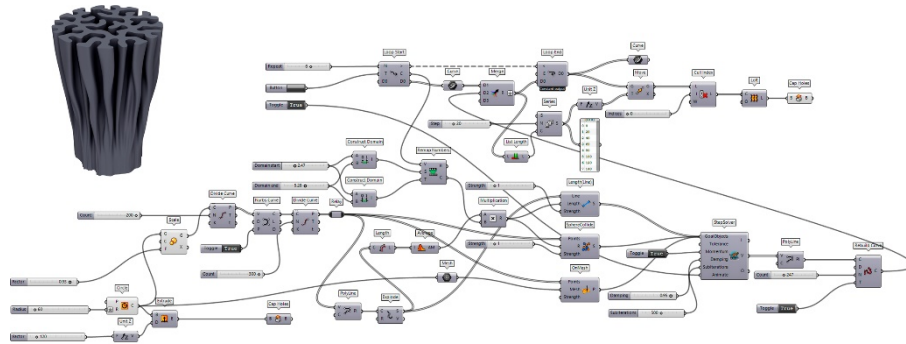


Figura 3. Algoritmo del patrón de crecimiento diferencial. Fuente: los autores, 2022.

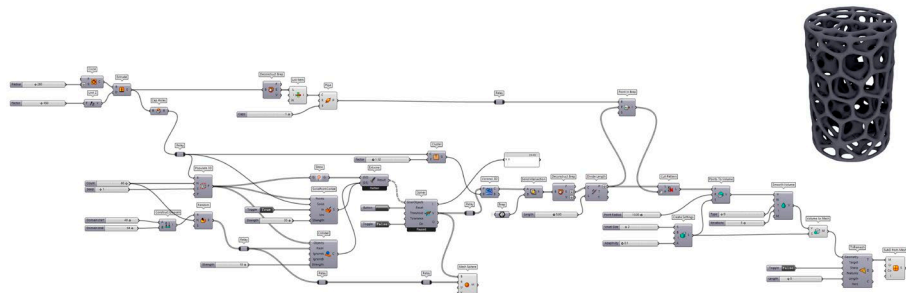


Figura 4. Algoritmo del diagrama de Voronoi. Fuente: los autores, 2022.

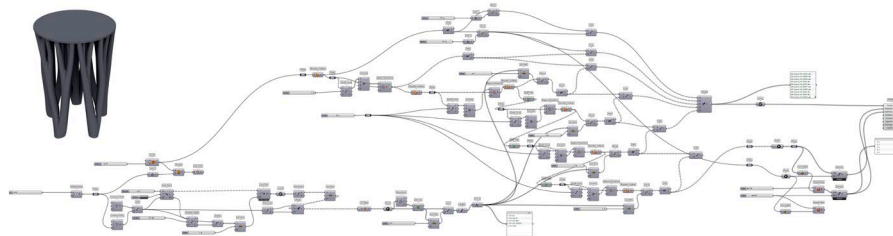


Figura 5. Algoritmo del patrón de ramificación. Fuente: los autores, 2022.



Figura 6. Aplicación de patrones morfológicos de la naturaleza en la geometría base. Fuente: los autores, 2022.

Para las pruebas de esfuerzo se consideraron varios parámetros y conceptos como la fórmula esfuerzo y deformación, esfuerzo máximo específico, dimensiones de la probeta, parámetros de impresión. Se decidió hacer la prueba de compresión, ya que este sería el principal esfuerzo al cual será sometido el objeto final. Más abajo se puede ver la fórmula de esfuerzo y deformación (1) y de esfuerzo máximo específico (2).

$$E = \frac{F}{A} \quad (1)$$

$$\frac{\text{Maximum Stress}}{\text{Masa (peso)}} = \text{Esfuerzo máximo específico} \quad (2)$$

Ahora, debido a que las morfologías de las secciones horizontales de cada probeta son diferentes, fue necesario definir una sección transversal horizontal promedio para hacer los cálculos de esfuerzo. Esta sección promedio se calculó con cinco secciones transversales por cada probeta a través de un algoritmo hecho en Grasshopper©. En las figuras 7 y 8 se puede ver el algoritmo y la aplicación en una de las probetas.

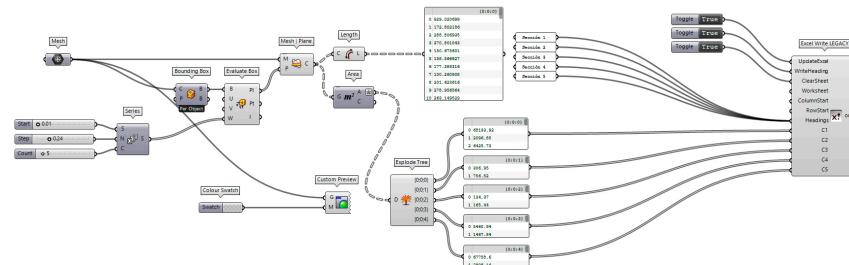


Figura 7. Algoritmo para el cálculo de las secciones transversales promedio. Fuente: los autores, 2022.

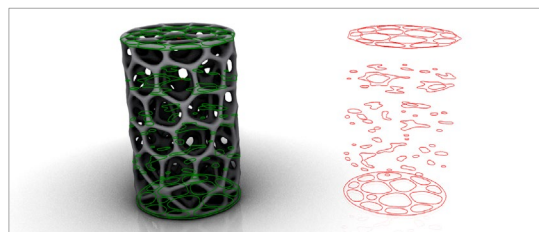


Figura 8. Secciones transversales de la probeta correspondiente al patrón de Voronoi en Grasshopper ©. Fuente: los autores, 2022.

Se diseñaron cuatro probetas de 120mm de altura y 60 mm de diámetro, una probeta cilíndrica y las tres probetas con las morfologías extraídas de la naturaleza. Las probetas se materializaron a través de la tecnología Fused Deposition Modelling -FDM- con la impresora Creality 3D Ender-3, el material usado fue Polylactic acid -PLA- construidos en la empresa Polymasters (figura 9). La pieza cilíndrica permitió hacer una caracterización ese tipo de probetas con el material y proceso elegido; en la tabla 1 se pueden ver los parámetros de impresión de las probetas.



Figura 9. Probetas de PLA, tecnología FDM. Fuente: los autores, 2022.

Tabla 1. Parámetros de impresión para probetas

Parámetros de impresión	
Impresora	Creality 3D Ender-3
Tecnología	FDM
Diámetro de boquilla	0.4 mm
Altura de capa	0.28 mm
Espesor de pared	0.8
Recuento de línea de pared	2 líneas
Densidad de relleno	40%
Velocidad	50 mm/seg

Fuente: Polymasters, 2022

Las pruebas de compresión se hicieron en la Universidad Pontificia Bolivariana en Medellín, Colombia. Se usó una máquina de ensayos universal Instron modelo 5582, acoplada con una celda de carga de 100 kN. El ensayo se ejecutó a una velocidad de 2 mm/min. Ver figuras desde la 10 a la 13.

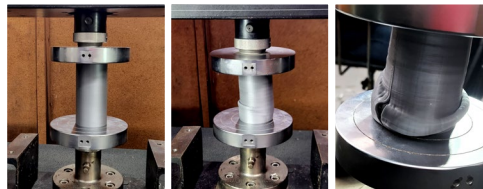


Figura 10. Prueba de esfuerzo a compresión, probeta cilíndrica. Fuente: los autores, 2022.

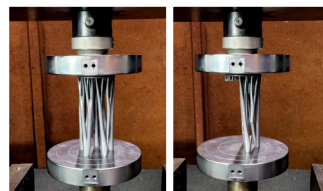


Figura 11. Prueba de esfuerzo a compresión, probeta con patrón de ramificación. Fuente: los autores, 2022.

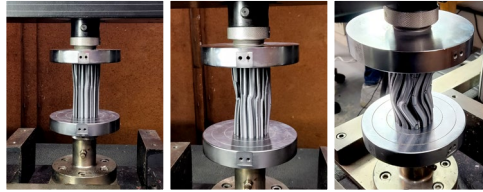


Figura 12. Prueba de esfuerzo a compresión, probeta con patrón de crecimiento diferencial. Fuente: los autores, 2022.

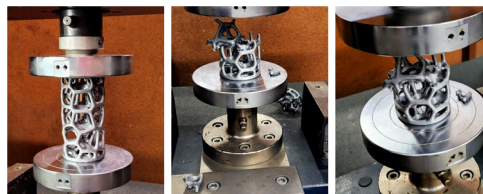


Figura 13. Prueba de esfuerzo a compresión, probeta con diagrama de Voronoi. Fuente: los autores, 2022.

Para el prototipo escala 1:1 se planeó imprimir las tres propuestas, pero no fue posible por tiempos y costos. Se elige el modelo con el diagrama de Voronoi, aunque ese patrón ya es muy conocido, es el que ofrece mayores desafíos debido a su morfología compleja. Se hicieron análisis de elementos finitos en el software Inventor® (Figura 14) y se imprimieron partes del prototipo con diferentes diámetros de la estructura, según estos análisis de decidió usar un espesor de 10 milímetros para la fabricación del prototipo.

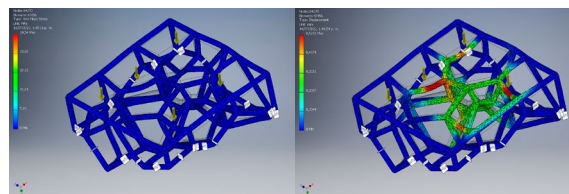


Figura 14. Análisis Von Misses Stress y desplazamiento. Fuente: los autores, 2022.

La materialización del prototipo escala 1:1 presentó diversos desafíos en cuanto a dimensiones, tiempos de impresión y costos. Para lograr los objetivos planteados se hizo una alianza con la empresa Polymasters de Medellín, Colombia. Se trabajó con la impresora Artillery Sidewinder X2; fue necesario dividir el modelo en 4 partes y se trabajó con el software Ultimaker Cura para definir los parámetros de impresión. En la tabla 2 se pueden ver los parámetros de impresión y en la figura 15 el proceso constructivo.



Tabla 2. Parámetros de impresión para prototipo escala 1:1

Parámetros de impresión		
Impresora	Artillery	Sidewinder X2
Tecnología	FDM	
Diámetro de boquilla	0,8 mm	
Altura de capa	0,4	
Espesor de pared	2,4 mm	
Recuento de línea de pared	3	
Densidad de relleno	15%	
Velocidad	45 mm/seg	

Fuente: Polymasters, 2022

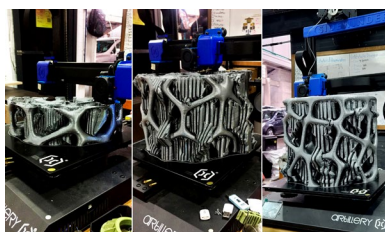


Figura 15. Proceso constructivo prototipo escala 1:1. Fuente: Polymasters, 2022.

### 3 Resultados

#### 3.1 Pruebas de esfuerzo a compresión

En las tablas (3 y 4) y la figura 16 se aprecia que la probeta con patrón de ramificación fue la que tuvo la mayor resistencia específica (2.60 MPa/g), seguida de la probeta con el patrón Voronoi (0.24 Mpa/g), luego la probeta con patrón de crecimiento diferencial (0.21 Mpa/g) y por último el cilindro fue el que tuvo menor resistencia específica (0.13 MPa/g). La probeta con patrón de

ramificación tuvo la mayor resistencia específica y además presentó un comportamiento más rígido y menor peso (56 gm); por el contrario, la probeta cilíndrica (la que tuvo menor resistencia específica), fue la que tuvo mayor tendencia a la deformación y mayor peso (171gm).

Tabla 3. Información general de las probetas

	Etiqueta de la probeta	Diámetro equivalente (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Longitud (mm)	Masa (g)
1	Cilindro	60.00	2827.43	120.00	171.00
2	Voronoi	18.14	258.56	125.54	79.00
3	Ramificación	6.24	30.58	120.82	56.00
4	Crecimiento diferencial	41.95	1381.85	120.23	128.00
<b>Media</b>		31.58	1124.61	121.65	108.50
<b>Desviación estándar</b>		24.07	1279.68	2.62	51.36

Fuente: los autores, 2022

Tabla 4. Cargas y esfuerzos de las probetas

	Maximun Load (kgf)	Maximum Stress (MPa)	Módulo (Automática) (MPa)	Esfuerzo máximo específico (MPa/g)
1	< -6424.67	> 22.28	908.88	0.13
2	< -493.21	> 18.71	811.30	0.24
3	< -454.25	> 145.67	15218.70	2.60
4	< -3811.56	> 27.05	1289.01	0.21
<b>Media</b>	-2795.90	53.43	4556.97	0.79
<b>Desviación estándar</b>	2885.90	61.59	7110.81	1.21

Fuente: los autores, 2022

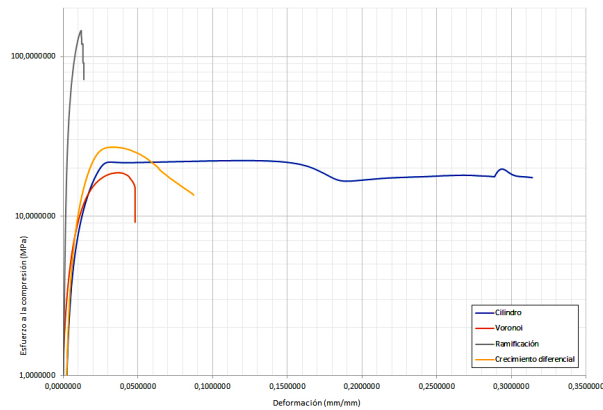


Figura 16. Gráfico comparativo de esfuerzo y deformación, resultado de la prueba de compresión de las probetas. Fuente: los autores, 2022.

### 3.2 Prototipo y validaciones

En la figura 17 se puede ver el prototipo escala 1:1 y algunas validaciones, el prototipo mide 420 mm de altura y 300 mm de diámetro, pesa 3.3 kg, el material es PLA y tardó 10.7 días en el proceso de impresión, construido en la empresa Polymasters. Se hicieron validaciones con 10 personas y a través de entrevistas semiestructuradas se pudo conocer su apreciación. Dijeron que tiene una apariencia atractiva, aunque luce frágil se siente sólido al sentarse, es resistente y las dimensiones son adecuadas, aunque la rigidez del material no lo hace cómodo para un uso prolongado.



Figura 17. Prototipo escala 1:1 y algunas validaciones. Fuente: los autores, 2022.

## 4 Discusión

El uso de referentes de la naturaleza fue un aporte y con resultados impredecibles, en el caso de las probetas el patrón más ligero fue el que tuvo la resistencia específica más alta (ramificaciones), esta información puede ser útil para futuros proyectos. Se comprobó que es posible materializar a través de FDM objetos funcionales con morfologías complejas, resistentes y con una definición adecuada; respecto al prototipo, no es viable comercialmente por los extensos tiempos de impresión y su alto costo, pero se abre la oportunidad de integrar el uso de técnicas convencionales de manufactura. Fue muy importante la prueba y error, un proceso de aprendizaje constante. A futuro se espera materializar los tres modelos, integrar el uso de herramientas digitales de optimización topológica y otras que mejoren el desempeño estructural.

**Agradecimientos.** Agradecemos a nuestras familias, a la Universidad Pontificia Bolivariana y a la empresa Polymasters de Medellín, Colombia.

## Referencias

- Benyus Janine M.; García Leal Ambrosio. (2012). *Biomímesis: innovaciones inspiradas por la naturaleza*. Tusquets.
- Ford, S., Despeisse, M., & Viljakainen, A. (2015). Extending product life through additive manufacturing: The sustainability implications. *Global Cleaner Production and Consumption Conference, December*, 1–4.
- Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., Wang, C. C. L., Shin, Y. C., Zhang, S., & Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *CAD Computer Aided Design*, 69, 65–89. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>
- Gebeshuber, I. C., & Drack, M. (2008). An attempt to reveal synergies between biology and mechanical engineering. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 222(7), 1281–1287. <https://doi.org/10.1243/09544062JMES890>
- Iouguina, A., Dawson, J. W., Hallgrímsson, B., & Smart, G. (2014). Biologically informed disciplines: A comparative analysis of bionics, biomimetics, biomimicry, and bio-inspiration among others. *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*, 9(3), 197–205. <https://doi.org/10.2495/DNE-V9-N3-197-205>
- Pedersen Zari, M. (2007 June 1-3). Biomimetic approaches to architecture. Poster presented at the Toronto Sustainable Building Conference 07, Toronto, Canada.
- Scheeren, R., & Sperling, D. M. (2020). *Flexible multi-scalar system: 3D printing of modular components for adaptable tensioned structures*. 371–376. <https://doi.org/10.5151/sigradi2020-51>
- Villamil, B., & Otálvaro, V. (2019). *Biónica y biomímesis en el diseño de productos: Modelos de aplicación* (Primera ed). Universidad del Valle.