

Diseño bioinspirado en la palma de coco de Panamá para estructuras de absorción de energía

Panama coconut palm bio-inspired design for energy absorption structures

Nacari Marín ^{2*} , Estephany Reyes ¹ , Kui Wang ¹ , Noé Serrano ³ 

¹ Central South University, School of Traffic and Transportation Engineering, China

² Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Mecánica, Panamá

³ Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Civil, Panamá

nacari.marin@utp.ac.pa; estephany.reyes@utp.ac.pa, kui.wang@csu.edu.cn, noe.serrano@utp.ac.pa

Fecha de recepción: 28 de febrero de 2021; Fecha de aprobación: 10 de marzo de 2022.

*Autor de correspondencia: Nacari Marín (nacari.marin@utp.ac.pa)

RESUMEN. El diseño bioinspirado se desarrolla conscientemente a través de la investigación, el estudio y el análisis de como los organismos vivos han desarrollado soluciones, superado los retos del mundo natural. De este modo, el campo de los materiales bioinspirados contribuye al diseño de estructuras y a la fabricación de materiales, con el objetivo de combinar estructuras naturales conocidas con un material específico. El objetivo principal de esta investigación es inspirarse en la vegetación de Panamá y América, para identificar, interpretar, extraer, diseñar, verificar y optimizar una estructura para aplicaciones de absorción de energía. En el presente documento se resumen conceptos sobre la bioinspiración, las características comunes en los materiales biológicos según diversos autores en conjunto con diseños de estructuras de pared delgada. Las estructuras, propiedades y anatomía de la palma de coco (Cocos nucifera) son estudiadas como parte de la inspiración, siendo estas plantas parte de la vegetación de Panamá. También se expone el método de bioinspiración y la ruta técnica, que corresponden a la búsqueda de estrategias biológicas en las plantas para gestionar las fuerzas estructurales, análisis de propiedades mecánicas y de las características estructurales de la palma. De esta manera surgen diseños tendientes a la optimización de elementos estructurales, tal y como es el caso de los tubos cilíndricos, mediante métodos de análisis experimental y numérico, los que se pueden llevar a cabo para conocer las ventajas, desventajas y la eficiencia de nuevos diseños.

Palabras clave. *Absorción de energía, diseño bioinspirado, estructura de palma de coco, haces vasculares, optimización estructural.*

ABSTRACT. Bio-inspired design is consciously developed through research, study and analysis of how living organisms have developed solutions to overcome the challenges of the natural world. In this way, the field of bio-inspired materials contributes to the design of structures and the manufacture of materials, with the aim of combining known natural structures with a specific material. The main objective of this research is to be inspired by the vegetation of Panama and America, to identify, interpret, extract, design, verify and optimize a structure for energy absorption applications. This paper summarizes concepts about bioinspiration, common characteristics in biological materials according to several authors in conjunction with designs of thin-walled structures. The structures, properties and anatomy of the coconut palm (Cocos nucifera) are studied as part of the inspiration, being these plants part of the vegetation of Panama. The bioinspiration method and the technical route are also presented, which correspond to the search for biological strategies in plants to manage structural forces, analysis of mechanical properties and structural characteristics of the palm. In this way, designs tending to the optimization of structural elements, such as the case of cylindrical tubes, emerge through experimental and numerical analysis methods, which can be carried out to know the advantages, disadvantages and efficiency of new designs.

Keywords. *Energy absorption, bioinspired design, coconut palm structure, vascular bundles, structural optimization.*

1. Introducción

La naturaleza es una fuente inagotable de inspiración para encontrar soluciones funcionales, sostenibles e

innovadoras a problemas concretos planteados por el ser humano. Nuestro planeta alberga vida desde hace miles de millones de años y son muchos los organismos y seres vivos que han evolucionado para vivir según sus necesidades y las condiciones de su entorno. Es a partir del diseño bioinspirado, que se desarrollan conscientemente soluciones a través de la investigación científica, por ejemplo, como los organismos vivos a través de la multiplicidad de formas, materiales y mecanismos compuestos por células, sustancias, tejidos, órganos y sistemas integrados, han desarrollado soluciones y superado los retos del mundo natural [1–3].

El gran número de estudios o diseños bioinspirados en animales, plantas, semillas, organismos naturales, entre otras estructuras, se evidencian en investigaciones alrededor del mundo [4–9]. Hashemi Farzaneh [2], Pereira *et al.* [10] y Tripathi [11] concluyen en sus estudios que todavía hay una variedad de materiales, plantas y componentes del entorno natural que pueden servir de inspiración para la creación de productos necesarios y así innovar en el campo de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales.

El estudio de las propiedades de los materiales se realiza en el ámbito de la investigación y la industria, como herramienta para obtener las ventajas del material y para buscar las aplicaciones potenciales [12]. De este modo, el campo de los materiales bioinspirados contribuye al diseño de estructuras y a la fabricación de materiales, con el objetivo de combinar estructuras naturales conocidas con un material específico. No cabe duda de que la demanda de estructuras y materiales con mejores propiedades mecánicas se encuentra en aumento, así como la combinación de materiales que proporcionan un rendimiento adaptado para mejorar la resistencia a los golpes y la amortiguación interna. Ejemplo de ello son los polímeros reforzados y aleaciones entre aluminio, titanio y magnesio, de los que se obtienen materiales resistentes y ligeros al mismo tiempo [13].

Las áreas de aplicación de los materiales bioinspirados son múltiples como se mencionan en [6], [14], [15]. Específicamente, las estructuras con capacidad de absorción de energía se utilizan en la industria automotriz, naval, aeroespacial, construcción, defensa y protección personal y deportiva. Materiales bioinspirados aplicados al sistema de transporte pueden

resultar interesantes en el diseño de estructuras para mejorar el rendimiento y la seguridad de los trenes de alta velocidad, al igual que de los automóviles.

El objetivo principal de esta investigación es inspirarse en la vegetación de Panamá y del continente americano para identificar, interpretar, extraer, diseñar, verificar y optimizar una estructura para aplicaciones de absorción de energía. Esto es posible gracias a las condiciones climáticas y topográficas propias de la región, que dan vida a una diversidad de plantas y semillas [16], [17].

La sección 2 proporciona conceptos sobre la bioinspiración y las características comunes en los materiales biológicos según estudios realizados por diferentes autores. La sección 3 presenta un resumen de investigaciones que utilizan la bioinspiración en el diseño de estructuras de pared delgada. Esta investigación se centra en el diseño bioinspirado del tallo de la palma de coco (*Cocos nucifera*), siendo esta una planta característica de la vegetación en Panamá y la zona tropical de América. La sección 4, explica como fue desarrollado el diseño bioinspirado a partir de las características estructurales de la palma de coco. Finalmente, se hacen recomendaciones del camino a seguir para el análisis de las propiedades mecánicas de estructuras bioinspiradas.

2. Conceptos básicos y terminología

Existen varios términos relacionados con el enfoque de diseño que se realiza mediante el uso de conceptos observados en la naturaleza, como son las características de la estructura jerárquica y compuesta. Muchos otros términos utilizan el prefijo “bio-”, pero “bio-inspirado” es generalmente aceptado como un término para los enfoques de diseño que indican las raíces biológicas de una idea [1].

Hashemi Farzaneh [2] define el diseño bioinspirado como aquel que “*tiene como objetivo la abstracción, la transferencia y la aplicación de los conocimientos adquiridos a partir de modelos biológicos*”. Según Bennett [18], las metodologías bioinspiradas pueden presentar diferentes formas, dependiendo de la persona que intenta desarrollar soluciones impactantes a problemas específicos, a partir de enfoques innovadores, útiles, sostenibles y disruptivos.

Es importante tener en cuenta que al momento de realizar un diseño bioinspirado han surgido con la práctica dos enfoques de diseño y cada uno tiene

características y metodologías diferentes [19]. El primero, es el diseño bioinspirado basado en el problema, en el que se busca la solución en la naturaleza a un problema previamente identificado. El segundo enfoque es una solución basada en el diseño bioinspirado, en el que sólo se estudia el material biológico. En esta investigación se aplica un diseño bioinspirado basado en problemas, que tiene los siguientes pasos: definición del problema, replanteamiento del problema, búsqueda de la solución biológica, definición de la solución biológica, extracción del principio y aplicación del principio [20]. Es en el campo de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales donde tiene un mayor impacto [10], [19].

En Naleway *et al.* [21] se identificaron ocho elementos estructurales comunes en los materiales biológicos, estudiados en la bioinspiración. Estos materiales son fibroso, helicoidal, gradiente, estratificado, tubular, celular, sutura y superposición. El presente estudio se basa en la estructura del tipo tubular.

2.1. Resumen de características y diseños para absorción de energía

En el estudio que se llevó a cabo por Lazarus *et al.* [14], se presenta un resumen de las características generales de los materiales biológicos como jerárquicas, compuestas, porosas y de interfaz. Por otra parte, también se presentan las arquitecturas específicas que se encuentran en los materiales biológicos resistentes a los impactos: son estratificación, gradiente, tubular, sándwich y sutura. Dicha investigación explica que muchos de los materiales de tipo tubular encontrados en la naturaleza mejoran la resistencia al impacto debido a los mecanismos típicos de deformación plástica y desviación de grietas.

En Ha & Lu [6], se categorizaron las estructuras para la absorción de energía como estructuras bioinspiradas de pared delgada, placas, estructuras celulares, estructuras civiles y otras estructuras. Dentro de esta categorización, el interés de esta investigación se centra en las estructuras bioinspiradas de pared delgada, subdivididas como bioinspiradas: tubos rectos y tubos cónicos.

Siendo el campo de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales importante para el sector industrial, hay un mayor desarrollo de investigaciones que incluyen los biomateriales inspirados en estructuras o sistemas biológicos aplicados a la absorción de energía [6]. Desde la primera aplicación del enfoque bioinspirado en el año

2000, es notable el aumento del número de publicaciones científicas en los últimos años.

La capacidad de absorción de energía de los materiales ligeros es una propiedad mecánica demandada por la industria. Entre las estructuras que han servido de bioinspiración se encuentran: la madera, el nácar, los huesos de las alas de las aves, el bambú, las plantas conocidas como cola de caballo y cola de gato, la palma, el ala del escarabajo, el hueso y el tendón, las algas diatomeas, el cuerno de buey, el balanus, la raíz de loto, el caparazón de tortuga, el camarón mantis, la cabeza y el pico del pájaro carpintero, la madera de palmito, entre muchas otras estructuras [6], [10], [30–33], [22–29].

3. Estado de la investigación y tendencias

3.1. Tubos cilíndricos

Las investigaciones científicas consultadas coinciden en que los tubos cilíndricos en comparación con otros elementos estructurales de diversas formas de sección transversal demuestran una mejor absorción de energía, debido a su rigidez, resistencia, versatilidad, bajo coste de fabricación y facilidad de manufactura. Por lo tanto, analizando el mecanismo de resistencia, rigidez y absorción de energía en las estructuras biológicas, se puede mejorar la eficacia y capacidad de este tipo de estructuras para la absorción de energía.

Ha & Lu [6], presentan un completo resumen de diversas investigaciones que utilizan la bioinspiración en el diseño de estructuras de pared delgada, clasificándolas en tubos circulares, tubos multicelulares (mejor conocido en inglés como “*multi-cell tubes*”), tubos de esquinas múltiples y tubos corrugados. En la clasificación de los tubos circulares, presentan dos diseños bioinspirados en la estructura del nácar y la madera que modifican las paredes de los tubos a través de estructuras de corte de capas helicoidales y que imitan el nácar, así como fibras helicoidales, bordeadas por capas interiores y exteriores [34], [35]. En esta investigación también se menciona un estudio que demuestra lo efectivos que son los diseños que modifican la estructura interna del tubo con puntales y crestas, poniendo como ejemplo la bioinspiración en los huesos de las alas de las aves.

Investigaciones recientes han introducido el concepto de secciones multicelulares en tubos cilíndricos, configuración que describe una sección transversal con divisiones. Algunas bioinspiraciones basadas en este

concepto son el bambú, las plantas conocidas como cola de caballo y cola de gato, la palma, el ala del escarabajo, el hueso y el tendón.

El bambú es un material biológico ligero y resistente, muy popular por sus propiedades físicas y mecánicas, que ha sido utilizado por el hombre como elemento estructural o de diseño desde la antigüedad. Sus características estructurales han dado lugar a numerosos diseños con alta capacidad de absorción de energía, entre los diseños probados numéricamente se encuentra el de Zou *et al.* [36], en donde se modificó la sección transversal de un tubo con elementos biónicos inspirados en la estructura vascular del bambú y su distribución de gradiente. En Feng *et al.* [37], se realizaron simulaciones con un diseño de tres tipos de elementos biónicos, pero como la forma era un poco compleja, se propuso el uso de un elemento biónico triangular. Esto llevó a otra investigación para optimizar el diseño y obtener una mejor absorción de energía con elementos biónicos en forma de “X”. Otra característica aplicada por [38], incluyó la mimetización con la distribución no uniforme de los haces vasculares del bambú y a través de los resultados numéricos, se obtuvo un aumento de la capacidad de carga.

Las investigaciones experimentales en tubos inspirados en el bambú son menores, porque el proceso de fabricación puede ser un poco difícil dependiendo del diseño. En Chen *et al.* [39] se muestra un diseño biónico de una sección transversal de tubo que se simplifica a una pared delgada, inspirada en tres tipos de características extraídas del bambú: nervadura de refuerzo biónica, espesor variable biónico y sección transversal biónica. En Hu *et al.* [40] se fabricó una estructura anidada tubular biónica en forma de panal de abeja utilizando diferentes diseños de la estructura del haz vascular del bambú. Todos los diseños mencionados demostraron que el método biomimético mejora del rendimiento de absorción de energía.

En investigaciones realizadas por Yin *et al.* [41], la planta llamada cola de caballo, que tiene una estructura multicelular similar al bambú, fue evaluada resultando en seis diseños de tubos bioinspirados. En este estudio se modificó la sección transversal, se modelaron y simularon numéricamente en condiciones de carga lateral. Después de observar los buenos resultados en la

resistencia al choque de estos diseños, se introdujo espuma como parte de la optimización. Lo que demostró buenos resultados bajo carga lateral, sin embargo, a pesar de los resultados obtenidos, no se entendió completamente el comportamiento de este tipo de tubos bioinspirados bajo carga axial [42]. Xiao *et al.* [43] continuó con el estudio de Yin *et al.* [41], optimizando los mismos seis diseños bajo cargas dinámicas axiales, demostrando que entre más celdas están presentes en los tubos bioinspirados, mayor es la absorción específica de energía.

Las propiedades mecánicas de las hojas de cola de gato se estudiaron en [44]. En base al estudio anterior, Xu *et al.* [45] propuso un parachoques biónico con una viga transversal inspirada en la estructura de las nervaduras internas de la hoja de cola de gato y una caja de choque que imita la estructura del bambú. Ese diseño biónico mostró un efecto significativo en la resistencia al choque de la estructura y mejoró la absorción de energía específica.

En otro estudio, los tallos de la palmera sirvieron de inspiración para investigar la absorción de energía de los tubos cuadrados bajo aplastamiento axial cuasi-estático, analizando experimentalmente los diseños con forma de estructura multicelular y distribución de los haces vasculares de la palmera. Las características de resistencia al choque de los tubos se vieron significativamente afectadas por el número de celdas, en comparación con los tubos de una sola celda [46].

Existen diferentes investigaciones bioinspiradas centradas en el estudio de la estructura de las alas delanteras de los escarabajos, cuyos resultados demostraron que la estructura bioinspirada presenta una absorción de energía específica mejorada en comparación con la estructura convencional. Xiang & Du [47] presentaron dos tubos multicelulares bioinspirados consistentes en las celdas del panal de abejas y tubos circulares colocados en el centro de las celdas o en las paredes de las mismas. A continuación, Hao & Du [48] estudiaron las paredes de las celdas como estructura convencional en comparación con tres diseños con diferentes posiciones de los tubos circulares en las paredes de las celdas. Otro estudio, inspirado en los absorbentes de energía bitubulares y en la estructura interna del ala del escarabajo dama dio paso a diseños de

tubos circulares en estructuras cilíndricas huecas con varias secciones transversales poligonales. Estos diseños mostraron que la absorción de energía de la estructura se encuentra directamente relacionada con el grosor de la pared interna y las configuraciones de la sección transversal [47]. Este estudio fue sintetizado por [49], al analizar diseños bioinspirados multicelulares con secciones cuadrilaterales, hexagonales y octogonales para conocer el efecto de la posición del tubo circular y la forma de la sección transversal. Otro estudio fue realizado por [50], para conocer el efecto de la corrugación en el comportamiento de aplastamiento de los tubos multicelulares bioinspirados. Por último, en [51] se estudiaron diseños con sub círculos autosimilares en las uniones de las nervaduras primarias mostrando una mejor resistencia al aplastamiento en comparación con los tubos circulares jerarquizados.

Finalmente, la última bioinspiración que incluye secciones multicelulares se basa en huesos y tendones de animales o humanos. Una caja de choque que imita la estructura ósea esponjosa de la tibia humana mostró una absorción de energía superior a la caja de choque original según la simulación en el estudio de [52]. Otro diseño de tubos que empaquetan tubos más pequeños en un tubo de un nivel jerárquico superior fue propuesto por [53], inspirado en la micro a nano arquitectura del tendón y el músculo, ese estudio mejoró la capacidad de absorción de energía de impacto con la jerarquía.

Dentro de los tubos bioinspirados de esquinas múltiples, se desarrolló un diseño en [54], para mejorar la absorción de energía de las columnas de paredes delgadas de esquinas múltiples no convexas, que tienen una mayor absorción de energía en comparación con las columnas cuadradas tradicionales. Este diseño imitaba los nodos de bambú y los diafragmas nodales añadiendo mamparas en la columna para mejorar la propiedad de absorción de energía. Comprobaron que, para lograr la mayor absorción de energía específica, había que añadir el menor número de mamparas en un pilar para mantener el modo de deformación progresiva.

La última subdivisión mencionada por [6], se trata de tubos corrugados bioinspirados que pueden tener patrones superficiales sinusoidales y corrugados. Un diseño inspirado en el perfil de la palma de coco fue desarrollado en [55], denominado “tubo corrugado

cónico”. Otro diseño fue desarrollado en [56], inspirado en la estructura de una diatomea que presentaba tres ondulaciones con diferentes alturas. Ambos diseños demostraron buenos resultados en comparación con su contraparte técnica.

En la figura 1 se resume el rendimiento, la eficiencia y los diseños de las estructuras bioinspiradas mencionadas anteriormente.

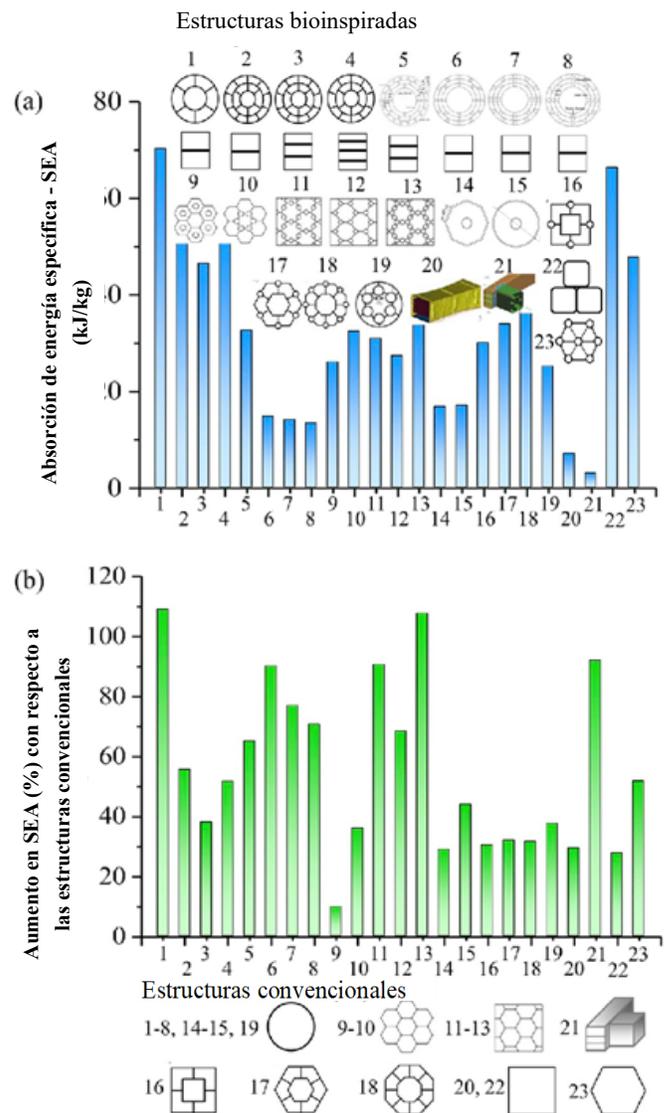


Figura 1. Rendimiento, eficiencia y diseños de las estructuras bioinspiradas [6].

3.2. Palma de coco (*Cocos nucifera*)

La inspiración de esta investigación es el tallo de la palma de coco (*Cocos nucifera*). Fathi [57] realizó un estudio para investigar la relación de la estructura y las propiedades mecánicas/físicas de la madera de la palma de coco, palmeras aceiteras y palmeras datileras. La palma de coco es muy común en todo el territorio panameño, de allí que se ha seleccionado esta planta para un diseño bioinspirado. La figura 2 muestra dos palmas de coco características de Panamá.



Figura 2. Palmas de coco [58].

3.3. La palma de coco en Panamá y América

La palma de coco forma parte de la vegetación costera característica de los trópicos y se encuentra en las costas del continente americano. En el cultivo de la palma de coco es una práctica universal nombrar las formas más comunes de una región por la localidad donde se ha recolectado. Es por ello por lo que en la literatura podemos encontrar que “*Panamá Tall*” es una de las variedades locales.

En [59], se presentó un registro histórico, genético, arqueológico e información lingüística relacionada con el origen de la palma de coco a lo largo de la costa del Pacífico de Panamá. Las hipótesis son múltiples, desde las que afirman que la palma de coco se originó en

América hasta las que mencionan que los cocos flotaron a través del océano pacífico o fueron transportados en canoas desde Filipinas o islas del Pacífico. El estudio concluye mencionando que existe una relación entre las variedades modernas de coco de la costa del Pacífico de Panamá y las variedades filipinas modernas conocidas de acuerdo con la evidencia genética. Otros estudios sugieren que los cocos de Panamá fueron introducidos después de la conquista española en las costas del Pacífico de América, probablemente provenientes de la costa del Pacífico de México, poco después de que se establecieron las primeras plantaciones mexicanas con variedades filipinas de coco.

Nayar [60], en su libro sobre la palma de coco, menciona detalles que no son claros sobre la presencia de esta palma en América. Sin embargo, observaciones de diferentes autores coinciden que la presencia de las palmas de coco en América es anterior a la llegada de Colón en 1497. Pero el momento de la llegada de los primeros cocos desde Filipinas no está claro.

3.4. Anatomía y propiedades de la palma de coco

La palma de coco forma parte de la familia de las palmeras, que cuenta con numerosas especies de plantas monocotiledóneas. Debido a esta característica, el tallo crece verticalmente sin ramificaciones. La sección transversal del tallo tiene una forma circular en la que se observan haces vasculares dispersos por toda la superficie con un gradiente de distribución (ver figura 3a). La figura 3 hace referencia al tallo de la palma de coco y el gradiente de distribución de los haces vasculares.

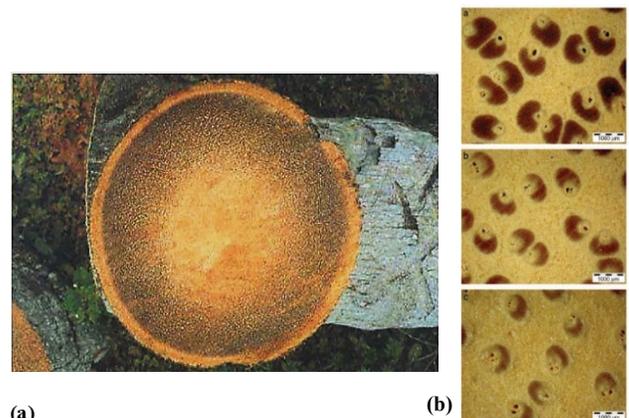


Figura 3. (a) Tallo de la palma de coco [57]. (b) Secciones macroscópicas del tallo [61].

Esta palmera se encuentra en las regiones tropicales del Mar Caribe, el Océano Índico y el Océano Pacífico. También es un icono de la cultura del trópico en Panamá por su importancia para la subsistencia de los nativos americanos [60]. Esta palma se ha utilizado durante miles de años y tiene muchos usos en todo el mundo, entre los que se encuentran la industria del combustible, los cosméticos, los alimentos y la construcción. La palma de coco tarda muchos años en crecer hasta alcanzar los 30 metros de altura y se divide en corona, tallo y raíces. El tallo está formado principalmente por haces vasculares rodeados de tejido parenquimatoso [57]. Las células parenquimatosas tienen múltiples funciones: almacenamiento de carbohidratos, reserva de agua, almacenamiento de nitrógeno, comunicación entre el xilema y el floema, etc. Sin embargo, su estabilidad mecánica es muy baja debido a las delgadas paredes celulares [57].

La estabilidad del tallo de la palma y los buenos resultados en las pruebas de las propiedades mecánicas del material del tallo de la palma de coco se deben principalmente a una combinación de los haces vasculares y las células parenquimatosas que en conjunto actúan como material reforzado. Según [57], el número, el diámetro y la densidad de los haces vasculares describen el refuerzo. La estructura de los haces vasculares se compone de tejido vascular reforzado por una cubierta de células de esclerenquima de pared gruesa. El tejido vascular está formado por tejidos conductores llamados vasos de xilema y floema, los vasos de xilema conducen algunos compuestos inorgánicos y orgánicos desde las raíces hasta las hojas, además de grandes cantidades de agua [62]. El conductor de alimentos se llama floema, es el encargado de transportar las sustancias orgánicas desde los lugares de fotosíntesis hasta el resto de la palma. La cubierta del haz tiene una densidad que disminuye hacia la parte central y a lo largo del tallo, está asociada al floema con una función de soporte y protección [63].

Dicho de forma más sencilla, las numerosas fibras que forman cada haz vascular proporcionan un soporte estructural porque las fibras se engrosan en forma de cubierta en un extremo. Estas fibras de alta densidad aumentan las propiedades mecánicas y la estabilidad de la madera de la palma de coco. Los haces vasculares tienen un gradiente de distribución (ver figura 3b), lo que hace que la densidad y las propiedades mecánicas de la madera de esta palmera varíen a lo largo de las

direcciones radial y longitudinal del tallo. Como se muestra en la figura 4, la densidad de la madera aumenta desde la zona interior hacia la zona periférica y disminuye desde la parte inferior hacia la parte superior del tallo. El número y la distribución de los haces vasculares, el grosor de las paredes de las células parenquimáticas, así como el grosor y el diámetro de las paredes de los haces, son algunas de las razones por las que la densidad de la madera de la palma de coco puede variar. Una baja densidad se asocia con una mayor presencia de células parenquimáticas y menos haces vasculares [57].

La figura 5 muestra el floema en medio de los vasos del xilema y la cubierta del haz en el otro extremo, los cuales juntos forman el haz vascular.

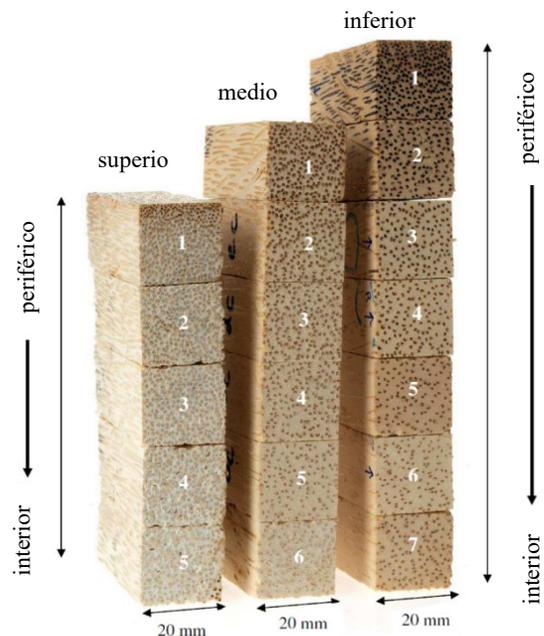


Figura 4. Distribución de la densidad de la madera [57].

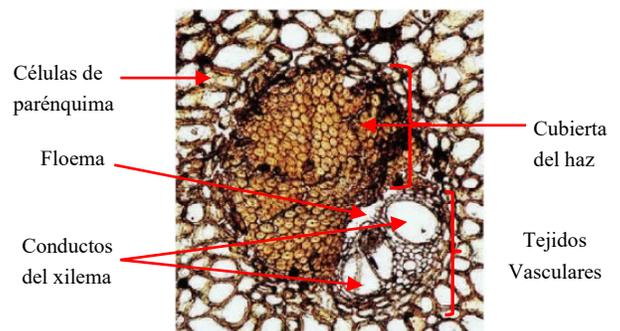


Figura 5. Anatomía de un haz vascular [61].

4. Métodos de investigación y rutas técnicas

4.1. Bioinspiración en la palma de coco

Existe una herramienta online gratuita denominada asknature.org, desarrollada para conectar a la comunidad con otras personas, ideas, métodos y conceptos para iniciarse en el campo de la biomimesis, es decir, para incorporar con éxito principios de la naturaleza en diseños que resuelvan problemas de forma sostenible [64]. Al buscar en la base de datos estrategias biológicas en las plantas para gestionar las fuerzas estructurales, se encuentra que los árboles y aquellos utilizados para obtener madera son cilindros sólidos debido a los fuertes haces vasculares distribuidos en el tallo. Como ejemplo, mencionan el bambú, cuya sección transversal es hueca pero las paredes tienen haces vasculares con un gradiente de distribución rodeados de fibras de celulosa en forma de matriz. Estos haces vasculares tienen mayor resistencia y densidad en el borde exterior [65].

A continuación, se presentan algunas estrategias del equipo Asknature que sirvieron de inspiración:

- Los haces vasculares de las plantas proporcionan resistencia mecánica al colocarse en una matriz de células como refuerzos en forma de varilla [66].
- Las fibras vegetales de las plantas que han desarrollado una estructura rígida como la madera proporcionan resistencia mecánica debido a que las fibras actúan como refuerzos [67].
- Las paredes celulares de plantas vasculares proporcionan resistencia mecánica durante las etapas de crecimiento. Las células tienen paredes delgadas que se vuelven más gruesas una vez desarrolladas en su forma madura, lo que les da fuerza mecánica propia [68].

Con la aplicación de la estrategia anterior, se busca conocer y entender las principales características estructurales de la palma de coco que se encuentra en la naturaleza panameña, para inspirarse en su estructura y hacer modelizaciones con la ayuda de un software de modelado 3D, que permita analizar o evaluar las propiedades mecánicas de la estructura bioinspirada.

Como parte de este estudio, se llevó a cabo una relación entre la vegetación de Panamá y la estrategia estructural del bambú. A su vez se observó el grosor del tallo y su altura. La palma de coco es una planta vascular con un tallo fuerte y flexible, que resiste las fuerzas de la naturaleza como el viento. Las fibras de este tipo de

planta forman un anillo estructural alrededor del tallo, que mantiene la estructura vertical de la planta, proporcionando rigidez, pero también permite el movimiento y la flexión.

La investigación experimental realizada por [57], muestra los cortes transversales macroscópicos del tallo de la palma de coco en las tres zonas principales del tallo, zona periférica, central e interior. En la investigación realizada por este autor, se tomaron muestras de cada zona y realizaron diferentes pruebas para determinar las propiedades mecánicas. Cada zona del tallo representa una clase de densidad, por lo que las propiedades de resistencia varían dentro del tallo, y por tanto la distribución de fibras en los haces vasculares es mayor en la zona periférica, así como el engrosamiento de la pared celular (por la edad de la palma). Debido a que el engrosamiento de las paredes celulares indica la existencia de capas secundarias adicionales (ver figura 7e), los haces vasculares cercanos a la corteza del tallo tienen un mayor número de capas que proporcionan una resistencia adicional en forma de cilindro a todo el tallo de la palma.

En las figuras 6, 7 y 8 se presentan diseños bioinspirados basados en las características estructurales de la palma de coco. En la figura 7a se representa la sección transversal de la parte inferior del tallo de la palma de coco que tiene haces vasculares con diferentes densidades, como se ve en la figura 7b la distribución de la densidad varía de mayor a menor desde la corteza del tallo hacia la zona interior, con tres rangos de densidades que llevan a la figura 7c que muestra la distribución microscópica de los haces vasculares en las tres zonas de la sección transversal del tallo. La distribución de la proporción de haces vasculares es 32:20:12 [61]. Con un vistazo más cercano, se observa en la figura 7d la sección transversal de un haz vascular individual rodeado de tejido parenquimatoso. Por último, si se observa de cerca en la figura 7d hay fibras de varias capas cuya sección transversal se muestra en la figura 7e. Lo que lleva al diseño bioinspirado (figura 7f) y a extraer diferentes tipos de características de la palma de coco, que permiten crear diferentes diseños de tubos cilíndricos bioinspirados.

A partir de la figura 7 se utilizó el software de modelado 3D SolidWorks v.28 (SolidWorks 2020 SP5.0) para crear diseños bioinspirados como los que se muestran en la figura 6 y 8. Los diseños desarrollados muestran elementos cilíndricos, con diferentes

configuraciones internas inspiradas en la palma de coco de Panamá y la literatura consultada.

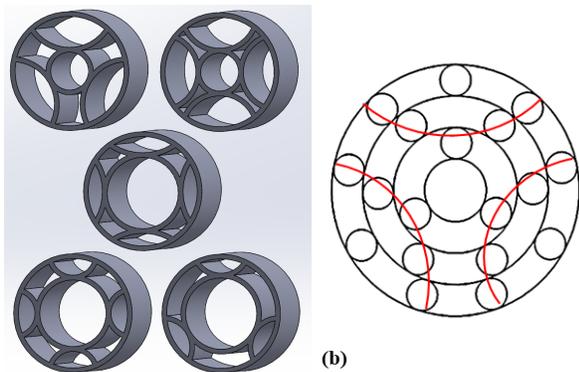


Figura 6. (a) Grupo 1, inspirado en los haces vasculares. (b) Geometría de referencia de la palma de coco.

convencionales (mecanizado en torno, proceso de embutición profunda, moldeado, corte/grabado por láser, proceso de fundición de precisión y la técnica de mecanizado por descarga eléctrica de hilo), fabricación aditiva (uso de la tecnología de impresión en 3D), laminación, entre otras técnicas de fabricación nuevas mencionadas en [69].

En cuanto a la realización de ensayos o pruebas mecánicas se pueden mencionar los métodos de comprobación de la fluidez y la tensión, ensayo cuasi-estático, ensayo dinámico de baja y de alta deformación y pruebas de choque [14]. La aplicación de estos ensayos en el ámbito de diseños bioinspirados, ha sido fundamental en la verificación de propiedades mecánicas tanto en el material natural como en el fabricado a partir

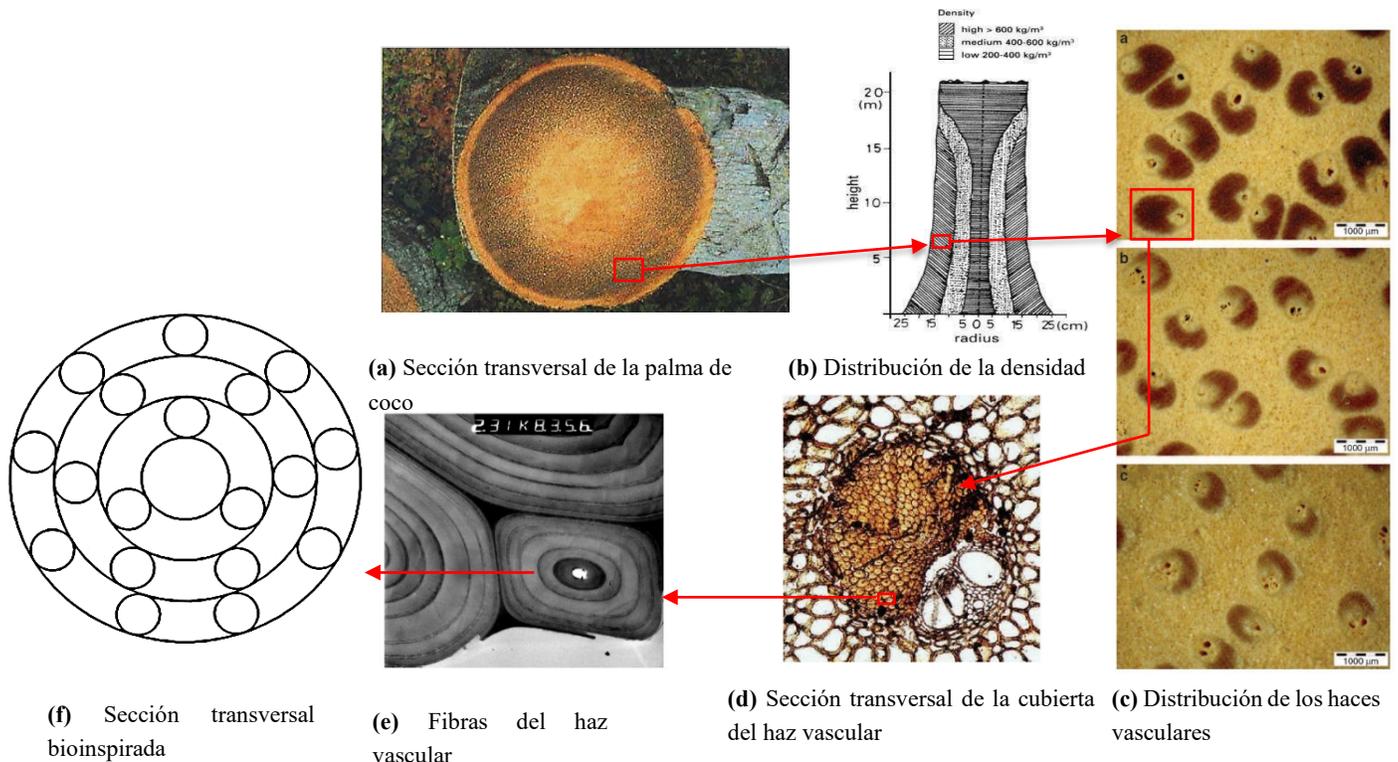


Figura 7. Diseño bioinspirado [57] (Figuras a - e).

4.2. Métodos experimentales y de simulación

Con la definición de los diseños bioinspirados, el paso a seguir es la fabricación, ensayos experimentales y análisis numérico de los cilindros.

Entre los métodos experimentales empleados en estudios de la literatura científica consultada se incluyen distintos métodos de fabricación [6], como métodos

de un diseño bioinspirado.

Los métodos de análisis numérico, reportados en la literatura científica incluyen la utilización de herramientas de análisis por elementos finitos (FEA, siglas en inglés de *Finite Element Analysis*) entre las que se encuentran Abaqus, ANSYS, CosmosWorks y LS-

DYNA. En una fase posterior del presente estudio, se espera presentar los resultados correspondientes.

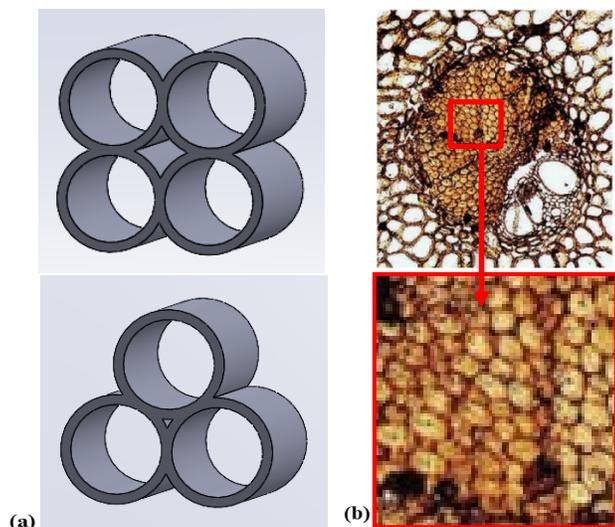


Figura 8. (a) Grupo 3, inspirado por la estructura multicelular de la cubierta de un haz vascular. (b) Geometría de referencia de la palma de coco [57].

5. Conclusiones

Esta investigación es una muestra de que todavía existen muchas fuentes de inspiración en la naturaleza y es una guía para el desarrollo de diseños de estructuras bioinspiradas. A partir de la relación de la estructura y las propiedades mecánicas/físicas de tallo de la palma de coco se crearon diseños bioinspirados.

Como se expuso, la bioinspiración es una alternativa a los métodos convencionales de diseño y permite encontrar soluciones estructurales al identificar una función deseada o identificar un problema, que se traduce a estrategias biológicas que buscamos en la naturaleza. Estas estrategias son separadas y estudiadas para la creación de un diseño, el cual va a ser evaluado de acuerdo al enfoque de la investigación [70].

Aunque los tubos cilíndricos tienen una eficacia probada como estructura para la disipación de energía, populares por su ligereza y su sencillo proceso de fabricación, esta investigación puede contribuir a mejorar el uso de este tipo estructura cilíndrica, con características bioinspiradas para la disipación de energía en estructuras más robustas, en lugar de utilizar estructuras que tienen un proceso de fabricación más elaborado; por ejemplo, una columna de hormigón y acero. Cuando los tubos cilíndricos no son suficientes, se

busca una opción con mayor resistencia. En este caso, diseños como los presentados pueden ser una opción interesante.

Los métodos experimentales incluyen distintos métodos de fabricación como el uso de la tecnología de impresión en 3D, luego la realización de ensayos o pruebas mecánicas. Los métodos de análisis numérico utilizan herramientas de análisis por elementos finitos (FEA, siglas en inglés de *Finite Element Analysis*).

REFERENCIAS

- [1] Biomimicry Institute, “Introduction - Biomimicry Toolbox”. <https://toolbox.biomimicry.org/introduction/>.
- [2] H. Hashemi Farzaneh, “Bio-inspired design: Ideation in collaboration between mechanical engineers and biologists”, 2016.
- [3] D. Urdinola Serna, A. H. Valencia Escobar, E. Patiño Mazo, D. A. Torreblanca Díaz, y A. Zuleta Gil, *Biomimética y diseño*. Bolivia, 2018.
- [4] A. Alavi Nia y M. Parsapour, “An investigation on the energy absorption characteristics of multi-cell square tubes”, *Thin-Walled Struct.*, vol. 68, pp. 26–34, 2013, doi: 10.1016/j.tws.2013.01.010.
- [5] F. Bairo y M. Ferraris, “Learning from Nature: Using bioinspired approaches and natural materials to make porous bioceramics”, *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, vol. 14, núm. 4, pp. 507–520, 2017, doi: 10.1111/ijac.12677.
- [6] N. S. Ha y G. Lu, *A review of recent research on bio-inspired structures and materials for energy absorption applications*, vol. 181. Elsevier Ltd, 2020.
- [7] F. Libonati y M. J. Buehler, “Advanced Structural Materials by Bioinspiration”, *Adv. Eng. Mater.*, vol. 19, núm. 5, pp. 1–19, 2017, doi: 10.1002/adem.201600787.
- [8] U. G. K. Wegst, H. Bai, E. Saiz, A. P. Tomsia, y R. O. Ritchie, “Bioinspired structural materials”, *Nat. Mater.*, vol. 14, núm. 1, pp. 23–36, 2015, doi: 10.1038/nmat4089.
- [9] P. Zhang, “Bioinspired Hierarchical Materials and Cellular Structures: Design, Modeling, and 3D Printing”, ene. 2016.
- [10] P. M. M. Pereira, G. A. Monteiro, y D. M. F. Prazeres, “General aspects of biomimetic materials”, en *Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering*, Springer International Publishing, 2015, pp. 57–79.
- [11] A. Tripathi, “Bioinspired Light-Weight Materials Using Biopolymers: From Synthesis to Application”, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, 2018.
- [12] B. L. Zhou, “Bio-inspired study of structural materials”, *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 11, núm. 1, pp. 13–18, 2000, doi: 10.1016/S0928-4931(00)00136-3.
- [13] M. F. Ashby y D. R. H. Jones, *Engineering Materials 2*, Third Edition., vol. 2. 2005.
- [14] B. S. Lazarus, A. Velasco-Hogan, T. Gómez-del Río, M. A.

- Meyers, y I. Jasiuk, “A review of impact resistant biological and bioinspired materials and structures”, *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, núm. 6, pp. 15705–15738, 2020, doi: 10.1016/j.jmrt.2020.10.062.
- [15] G. Palomba, T. Hone, D. Taylor, y V. Crupi, “Bio-inspired protective structures for marine applications”, *Bioinspiration and Biomimetics*, vol. 15, núm. 5, p. 056016, sep. 2020, doi: 10.1088/1748-3190/aba1d1.
- [16] J. S. Beard, “Climax Vegetation in Tropical America”, *Ecology*, vol. 25, núm. 2, pp. 127–158, abr. 1944, doi: 10.2307/1930688.
- [17] G. Vargas Ulate, “La vegetación de América Central: características, transformaciones y protección”, *Anu. Estud. Centroam.*, vol. 23, núm. 1–2, pp. 7–34, 1997, doi: 10.2307/25661291.
- [18] A. Burnett, “Biomimicry, Bioutilization, Biomorphism - Terrapin Bright Green”, ene. 17, 2015. <https://www.terrapinbrightgreen.com/blog/2015/01/biomimicry-bioutilization-biomorphism/>.
- [19] T. A. Owoseni, “Bioinspired Design”, 2013.
- [20] M. Helms, S. S. Vattam, y A. K. Goel, “Biologically inspired design: process and products”, *Des. Stud.*, vol. 30, núm. 5, pp. 606–622, 2009, doi: 10.1016/j.destud.2009.04.003.
- [21] S. E. Naleway, M. M. Porter, J. McKittrick, y M. A. Meyers, “Structural Design Elements in Biological Materials: Application to Bioinspiration”, *Adv. Mater.*, vol. 27, núm. 37, pp. 5455–5476, 2015, doi: 10.1002/adma.201502403.
- [22] H. P. S. Abdul Khalil, I. U. H. Bhat, M. Jawaid, A. Zaidon, D. Hermawan, y Y. S. Hadi, “Bamboo fibre reinforced biocomposites: A review”, *Mater. Des.*, vol. 42, núm. June 2018, pp. 353–368, 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2012.06.015.
- [23] M. Imani, M. Donn, y Z. Balador, “Bio-Inspired Materials: Contribution of Biology to Energy Efficiency of Buildings”, en *Handbook of Ecomaterials*, Springer International Publishing, 2018, pp. 1–24.
- [24] M. A. Meyers, J. McKittrick, y P. Y. Chen, “Structural biological materials: Critical mechanics-materials connections”, *Science (80-.)*, vol. 339, núm. 6121, pp. 773–779, 2013, doi: 10.1126/science.1220854.
- [25] J. Y. Ooi, T. Schork, H. Rasouli, y S. Malek, “The Role of Defects in 3D Printing of Bio-inspired Cellular Composites”, pp. 3–4, 2007.
- [26] C. Paulina Valenzuel, A. Cecilia Bustos, J. P. Lasserre, y E. William Gacitúa, “Fracturas en madera de eucalyptus nitens: Efecto de las propiedades mecánicas a nivel ultraestructural y de la anatomía celular”, *Maderas Cienc. y Tecnol.*, vol. 14, núm. 2, pp. 225–238, 2012, doi: 10.4067/S0718-221X2012000200009.
- [27] M. Presas, J. Y. Pastor, J. Llorca, A. R. De Arellano-López, J. Martínez-Fernández, y R. Sepúlveda, “Microestructura y propiedades mecánicas del SiC biomórfico obtenido a partir de eucalipto”, *Bol. la Soc. Esp. Ceram. y Vidr.*, vol. 44, núm. 6, pp. 363–367, 2005, doi: 10.3989/cyv.2005.v44.i6.337.
- [28] L. Rossi y F. J. R. Galino, “Estructura de Neumáticos Bio-Inspirada en la Madera de Cactus”, pp. 552–558, 2017, doi: 10.5151/sigradi2017-085.
- [29] H. H. Tsang, K. M. Tse, K. Y. Chan, G. Lu, y A. K. T. Lau, “Energy absorption of muscle-inspired hierarchical structure: Experimental investigation”, *Compos. Struct.*, vol. 226, núm. May, p. 111250, 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111250.
- [30] V. Valtchev y S. Mintova, “Bioinspired Porous Materials”, *Ordered Porous Solids*, pp. 477–499, 2009, doi: 10.1016/B978-0-444-53189-6.00018-4.
- [31] B. Wang, W. Yang, J. McKittrick, y M. A. Meyers, “Keratin: Structure, mechanical properties, occurrence in biological organisms, and efforts at bioinspiration”, *Prog. Mater. Sci.*, vol. 76, pp. 229–318, 2016, doi: 10.1016/j.pmatsci.2015.06.001.
- [32] A. Bührig-Polaczek *et al.*, “Biomimetic cellular metals - Using hierarchical structuring for energy absorption”, *Bioinspiration and Biomimetics*, vol. 11, núm. 4, pp. 1–20, 2016, doi: 10.1088/1748-3190/11/4/045002.
- [33] J. Tsenn, J. S. Linsey, y D. A. McAdams, “Development of a Search Tool to Identify Structural Design Principles for Bioinspired Materials Design”, ago. 2014, doi: 10.1115/detc2014-34291.
- [34] Z. Xin, X. Zhang, Y. Duan, y W. Xu, “Nacre-inspired design of CFRP composite for improved energy absorption properties”, *Compos. Struct.*, vol. 184, pp. 102–109, ene. 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.09.075.
- [35] L. Zorretto y D. Ruffoni, “Wood-Inspired 3D-Printed Helical Composites with Tunable and Enhanced Mechanical Performance”, *Adv. Funct. Mater.*, vol. 29, núm. 1, p. 1805888, ene. 2019, doi: 10.1002/adfm.201805888.
- [36] M. Zou, S. Xu, C. Wei, H. Wang, y Z. Liu, “A bionic method for the crashworthiness design of thin-walled structures inspired by bamboo”, *Thin-Walled Struct.*, vol. 101, pp. 222–230, abr. 2016, doi: 10.1016/j.tws.2015.12.023.
- [37] Z. Feng, Z. Luo, y J. Xiang, “Structural bionic design for thin-walled energy absorber tube and parametric analysis”, *58th AIAA/ASCE/AHS/ASC Struct. Struct. Dyn. Mater. Conf. 2017*, núm. January, pp. 1–8, 2017, doi: 10.2514/6.2017-1358.
- [38] J. feng Ma, W. yi Chen, L. Zhao, y D. hai Zhao, “Elastic Buckling of Bionic Cylindrical Shells Based on Bamboo”, *J. Bionic Eng.*, vol. 5, núm. 3, pp. 231–238, sep. 2008, doi: 10.1016/S1672-6529(08)60029-3.
- [39] B. C. Chen, M. Zou, G. M. Liu, J. F. Song, y H. X. Wang, “Experimental study on energy absorption of bionic tubes inspired by bamboo structures under axial crushing”, *Int. J. Impact Eng.*, vol. 115, núm. April 2017, pp. 48–57, 2018,

- doi: 10.1016/j.ijimpeng.2018.01.005.
- [40] D. Hu, Y. Wang, B. Song, L. Dang, y Z. Zhang, “Energy-absorption characteristics of a bionic honeycomb tubular nested structure inspired by bamboo under axial crushing”, *Compos. Part B Eng.*, vol. 162, pp. 21–32, abr. 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.10.095.
- [41] H. Yin, Y. Xiao, G. Wen, Q. Qing, y X. Wu, “Crushing analysis and multi-objective optimization design for bionic thin-walled structure”, *Mater. Des.*, vol. 87, pp. 825–834, dic. 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.08.095.
- [42] H. Yin, Y. Xiao, G. Wen, N. Gan, C. Chen, y J. Dai, “Multi-objective robust optimization of foam-filled bionic thin-walled structures”, *Thin-Walled Struct.*, vol. 109, pp. 332–343, dic. 2016, doi: 10.1016/j.tws.2016.10.011.
- [43] H. Oba *et al.*, “State of the World’s Plants”, 2016. [En línea]. Disponible en: http://arbtalk.co.uk/forum/attachments/tree-health-care/19204d1250773892-decay-picus-02nic.pdf%0Ahttps://www.forestry.gov.uk/safetreemanagement%0Ahttp://www.springerlink.com/index/V7031376R783771.pdf%0Ahttps://stateoftheworldsplants.com/report/sotwp_2016.
- [44] Z. Zhao *et al.*, “Synergistic Effects of Chiral Morphology and Reconfiguration in Cattail Leaves”, *J. Bionic Eng.*, vol. 12, núm. 4, pp. 634–642, oct. 2015, doi: 10.1016/S1672-6529(14)60153-0.
- [45] T. Xu, N. Liu, Z. Yu, T. Xu, y M. Zou, “Crashworthiness Design for Bionic Bumper Structures Inspired by Cattail and Bamboo”, *Appl. Bionics Biomech.*, vol. 2017, 2017, doi: 10.1155/2017/5894938.
- [46] Q. Liu, J. Ma, Z. He, Z. Hu, y D. Hui, “Energy absorption of bio-inspired multi-cell CFRP and aluminum square tubes”, *Compos. Part B Eng.*, vol. 121, pp. 134–144, jul. 2017, doi: 10.1016/j.compositesb.2017.03.034.
- [47] J. Xiang, J. Du, D. Li, y F. Scarpa, “Numerical analysis of the impact resistance in aluminum alloy bi-tubular thin-walled structures designs inspired by beetle elytra”, *J. Mater. Sci.*, vol. 52, núm. 22, pp. 13247–13260, nov. 2017, doi: 10.1007/s10853-017-1420-z.
- [48] P. Hao y J. Du, “Energy absorption characteristics of bio-inspired honeycomb column thin-walled structure under impact loading”, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 79, pp. 301–308, mar. 2018, doi: 10.1016/j.jmbm.2018.01.001.
- [49] L. Zhang, Z. Bai, y F. Bai, “Crashworthiness design for bio-inspired multi-cell tubes with quadrilateral, hexagonal and octagonal sections”, *Thin-Walled Struct.*, vol. 122, pp. 42–51, ene. 2018, doi: 10.1016/j.tws.2017.10.010.
- [50] X. Yu, L. Pan, J. Chen, X. Zhang, y P. Wei, “Experimental and numerical study on the energy absorption abilities of trabecular–honeycomb biomimetic structures inspired by beetle elytra”, *J. Mater. Sci.*, vol. 54, núm. 3, pp. 2193–2204, feb. 2019, doi: 10.1007/s10853-018-2958-0.
- [51] Y. Zhang, X. Xu, J. Wang, T. Chen, y C. H. Wang, “Crushing analysis for novel bio-inspired hierarchical circular structures subjected to axial load”, *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 140, pp. 407–431, may 2018, doi: 10.1016/j.ijmeecsci.2018.03.015.
- [52] C. Y. Wang, Y. Li, W. Z. Zhao, S. C. Zou, G. Zhou, y Y. L. Wang, “Structure design and multi-objective optimization of a novel crash box based on biomimetic structure”, *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 138–139, pp. 489–501, abr. 2018, doi: 10.1016/j.ijmeecsci.2018.01.032.
- [53] H. H. Tsang y S. Raza, “Impact energy absorption of bio-inspired tubular sections with structural hierarchy”, *Compos. Struct.*, vol. 195, núm. March, pp. 199–210, 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.04.057.
- [54] S. Liu, Z. Tong, Z. Tang, Y. Liu, y Z. Zhang, “Bionic design modification of non-convex multi-corner thin-walled columns for improving energy absorption through adding bulkheads”, *Thin-Walled Struct.*, vol. 88, pp. 70–81, mar. 2015, doi: 10.1016/j.tws.2014.11.006.
- [55] N. S. Ha, G. Lu, y X. Xiang, “High energy absorption efficiency of thin-walled conical corrugation tubes mimicking coconut tree configuration”, *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 148, pp. 409–421, nov. 2018, doi: 10.1016/j.ijmeecsci.2018.08.041.
- [56] C. Hundertmark, R. Tinter, M. Ortelt, y M. J. B. Hauser, “Diatom-inspired Plastic Deformation Elements for Energy Absorption in Automobiles”, *J. Bionic Eng.*, vol. 12, núm. 4, pp. 613–623, oct. 2015, doi: 10.1016/S1672-6529(14)60151-7.
- [57] L. Fathi, “Structural and mechanical properties of the wood from coconut palms, oil palms and date palms”, p. 248, 2014.
- [58] K. Wicomb, “Cocos nucifera in cool lighting”, sep. 25, 2010. <https://www.flickr.com/photos/36838058@N03/5208216708/in/album-72157625476346675/>.
- [59] C. R. Clement, D. Zizumbo-Villarreal, C. H. Brown, R. G. Ward, A. Alves-Pereira, y H. C. Harries, “Coconuts in the Americas”, *Bot. Rev.*, vol. 79, núm. 3, pp. 342–370, sep. 2013, doi: 10.1007/s12229-013-9121-z.
- [60] N. M. Nayar, *The Coconut*, 1st Edition. 2017.
- [61] L. Fathi y A. Frühwald, “The role of vascular bundles on the mechanical properties of coconut palm wood”, *Wood Mater. Sci. Eng.*, vol. 9, núm. 4, pp. 214–223, oct. 2014, doi: 10.1080/17480272.2014.887774.
- [62] M. Megías, P. Molist, y M. Pombal, “Atlas de Histología Vegetal y Animal. Tejidos vegetales. Conductores”, 2019. https://mmegias.webs.uvigo.es/1-vegetal/guiada_v_conductores.php.
- [63] M. Viney, “Anatomy: Monocot Stems”, 2008. <http://petrifiedwoodmuseum.org/AnatomyMonocotStems.htm>.
- [64] I. López Forniés, “Modelo metodológico de diseño

- conceptual con enfoque biomimético”, Universidad de Zaragoza, 2012.
- [65] E. Banwell, “Fiber arrangement is highly efficient: Puntingpole Bamboo - AskNature”, jul. 02, 2020. <https://asknature.org/strategy/fiber-arrangement-is-highly-efficient/>.
- [66] AskNature Team, “Rod-like reinforcements provide strength: Plants”, ago. 18, 2016. <https://asknature.org/strategy/rod-like-reinforcements-provide-strength/>.
- [67] AskNature Team, “Reinforced fibers provide strength: Plants”, sep. 14, 2016. <https://asknature.org/strategy/reinforced-fibers-provide-strength/>.
- [68] AskNature Team, “Structural composition provides strength in changing conditions : Phyllanthaceae ”, sep. 14, 2016. <https://asknature.org/strategy/structural-composition-provides-strength-in-changing-conditions/>.
- [69] C. Zhang, D. A. Mcadams, y J. C. Grunlan, “Nano/Micro-Manufacturing of Bioinspired Materials: a Review of Methods to Mimic Natural Structures”, *Adv. Mater.*, vol. 28, núm. 30, pp. 6292–6321, ago. 2016, doi: 10.1002/adma.201505555.
- [70] D. DeLuca, “The power of the Biomimicry Design Spiral”, *Biomimicry Institute*, jun. 14, 2016. <https://biomimicry.org/biomimicry-design-spiral/>.