

DIGITALIZACIÓN DE FORMAS DE LA NATURALEZA COMO RECURSO MORFOLÓGICO

DIGITIZATION OF NATURE FORMS AS A MORPHOLOGICAL RESOURCE



Santiago Javier Santamaría Bedón
Pontificia Universidad Católica del Ecuador
Ecuador

Ingeniero en Diseño Industrial graduado de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador sede Ambato en 2011. Máster en Diseño Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid en 2017. Diplomado de Design Thinking en 2020. Práctica profesional desde 2006 como diseñador gráfico, identidad corporativa y packaging; y como diseñador de moldes de inyección y productos plásticos. Experiencia docente en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador sede Ambato dentro de diferentes áreas básicas y de especialidad. Docente Coordinador del laboratorio de prototipado y coordinador en proyecto de creación de nueva carrera en la Escuela de Diseño Industrial.

ssantamaria@pucesa.edu.ec
orcid.org/0000-0003-2593-6692

Fecha de recepción: 07 de agosto, 2020. Aceptación: 18 de octubre, 2020.

Resumen

La biomimética imita los procesos naturales para plantear posibles soluciones a problemas humanos y ha sido aplicado por varias profesiones, convirtiéndose en una práctica recurrente para adoptar nuevas morfologías o principios funcionales. Leonardo de Pisa empleó estos fenómenos y desarrolló una serie matemática llamada sucesión de Fibonacci, dando lugar posteriormente a la proporción áurea. Estos descubrimientos matemáticos se manifiestan en forma concurrente en patrones geométricos de los procesos y estructuras de la naturaleza como en la distribución de hojas en las plantas. El objetivo de este artículo es proponer recursos formales procedentes de la aplicación de la biomimética de manera superficial/reductiva, que adopta la morfología de la planta *Sempervivum tectorum* L. para futuras soluciones formales y funcionales del ámbito del diseño. Para ello, se aplica la fotogrametría como técnica para capturar información bidimensional mediante fotografías y convertirlas en información tridimensional, obteniendo un modelo idéntico al original. La digitalización del elemento natural cumple con la siguiente metodología: preparación del entorno, toma de datos, alineación de fotografías, creación de nube de puntos densa, creación de malla y la textura. Posteriormente se realiza la construcción de modelos 3D, siguiendo el recorrido helicoidal digitalizado. Esta trayectoria crea un patrón en forma de hélice que se repite en sentido radial, tomando como referencia el eje vertical, de esta manera se crea un vórtice en la corona del sólido. A partir de esta estructura se realiza variaciones morfológicas, respetando la dirección de la hélice matriz.

Palabras clave

Morfología, fotogrametría, ángulo de oro, sucesión de Fibonacci, diseño.

Abstract

Biomimetics mimics natural processes to propose possible solutions to human problems and has been applied by various professions, making it a recurring practice to adopt new morphologies or functional principles. Leonardo of Pisa used these phenomena and developed a mathematical series called the Fibonacci sequence, later giving rise to the golden ratio. These mathematical discoveries are manifested concurrently in geometric patterns of the processes and structures of nature as in the distribution of leaves in plants. The objective of this article was to propose formal resources from the application of biomimetics in a superficial / reductive way, which adopts the morphology of the *Sempervivum tectorum* L. plant for future formal and functional solutions in the field of design. To this end, photogrammetry was applied as a technique to capture two-dimensional information through photographs and convert them into three-dimensional information, obtaining a model identical to the original. The digitization of the natural element complied with the following methodology: environment preparation, data collection, photo alignment, dense point cloud creation, mesh and texture creation. Subsequently, the construction of 3D models is carried out, following the digitized helical path. This path created a helix-shaped pattern that was repeated radially, taking the vertical axis as a reference, thus creating a vortex in the crown of the solid. Morphological variations were made from this structure, respecting the direction of the parent helix.

Keywords

Morphology, digital photogrammetry, golden angle, Fibonacci sequence, design.

Introducción

El Crystal Palace (Palacio de Cristal) fue una monumental arquitectura del siglo XIX, construida en el Hyde Park por motivo de la primera Gran Exposición de Londres de 1851. Su autor Joseph Paxton, ilustrador y paisajista inglés, se inspiró en la estructura orgánica de la plata acuática denominada *Victoria amazonica* (Poepp.) JC Sowerby para su realización. Este gigante lirio ostenta enormes hojas orbiculares que crecen más de 2,5 metros de diámetro, poseen un sistema de nervaduras radiales y concéntricas en la parte posterior (la que está en contacto con el agua), formando cuadriláteros y triángulos, las mismas que le conceden rigidez y permiten que floten sobre la superficie del agua. Paxton aplica este principio estático a su obra, donde las vigas de hierro actúan como el envés nervudo de la hoja, soportando un techo de cristal y formando las mismas figuras que la planta (Arrondo, 2015).

Ciertamente, la forma en que Paxton aplicó las propiedades de una estructura biológica para buscar una solución ha existido desde la prehistoria, donde los primeros hombres observaban a la naturaleza como fuente de inspiración. De esta manera, las garras y los colmillos de fieras y el mimetismo con el entorno de ciertas especies se convertían en sistemas para las actividades de caza; así mismo, las corazas de armadillos y tortugas se convertían en sistemas de defensa (Muñiz, 2017). Actualmente, esta forma de aplicar la analogía biológica para buscar soluciones a problemas reales se la conoce como biomimética.

La biomimética es la ciencia que emula estrategias, mecanismos y principios que existen en la naturaleza para plantear posibles soluciones a problemas humanos (Badarnah & Kadri, 2015). Esta práctica es aplicada por diseñadores, ingenieros, entre otras áreas del conocimiento, con el fin de desarrollar múltiples proyectos encaminados a imitar procesos naturales para la construcción de productos y servicios (Muñiz, 2017). En el ámbito del diseño y desarrollo de productos se ha aprovechado analogías naturales o biológicas para generar un concepto de solución (Ulrich & Eppinger, 2013). Por lo tanto, varios diseñadores han aplicado este recurso para describir el principio funcional, la usabilidad, la tecnología y la forma de un producto.

Tavsana y Sonmez (2015) aplicaron un método para que las formas de la naturaleza, como animales, plantas, microorganismos o estructuras de esqueletos, inspiraran la creación de mobiliarios más atractivos y estéticos. Su estudio condujo a 44 estudiantes del tercer grado de Arquitectura Interior de la Universidad Técnica de Karadeniz a diseñar diferentes alternativas de mobiliario a partir de microorganismos, teniendo como modelo de partida un taburete de plástico. En síntesis, como resultado de esta aplicación los estudiantes declararon que existe un desarrollo en la capacidad de pensar de manera diferente en el diseño, pudieron crear diseños únicos al abstraer formas naturales y les permitía hacer diseños más estéticos y efectivos con las proporciones, sistemas y formas de la naturaleza. En definitiva, la biomimética actúa como fuente creativa que forma parte del aprendizaje de métodos de diseño y desarrollo de producto (Viñolas & Marlet, 2005).

La biomimética ha sido aplicada por varios diseñadores, arquitectos, artistas, entre otros profesionales, y se ha convertido en una práctica recurrente para adoptar nuevas morfologías o principios funcionales. El objetivo de este trabajo es proponer recursos morfológicos procedentes de formas naturales, mediante la fotogrametría digital. Las áreas del diseño, arquitectura y arte han encontrado en la naturaleza un medio de inspiración para concebir productos, ideas o formas. Por tal motivo, surge la necesidad de entender la compleja estructura que rige estas formas.

Su representación mediante sólidos platónicos y la geometría euclidiana puede resultar una tarea muy complicada. Para ello se hace uso de modernas técnicas que facilitan la obtención de datos y su respectivo análisis. Esta técnica, conocida como fotogrametría, permitirá obtener un modelo de fácil manipulación en un área digital, de proporciones casi exactas que no se conseguirían si se modela en una forma tradicional. Este proyecto tiene un aporte académico que permitirá el conocimiento y la especialización en la técnica y

uso de equipos. La identificación de la sucesión de Fibonacci y sus proporciones geométricas ayudará a comprender de una mejor manera las escalas repetitivas de cada una de las partes del elemento natural y como estos forman parte de un todo funcional. Los resultados obtenidos pretenden ser un recurso bibliográfico para que otros proyectos o investigaciones hagan uso de los mismos y sean plasmados para futuras soluciones estéticas o funcionales.

Aplicación de recursos formales de la naturaleza en diseño de productos

El proceso de diseño y desarrollo de productos es una secuencia de fases que va desde la concepción de la idea hasta la comercialización del producto final. Dentro de estas fases, la generación de conceptos de diseño son las que marcan las especificaciones del producto, las cuales abordarán las necesidades del usuario en las dimensiones formales, funcionales y de usabilidad (Ulrich & Eppinger, 2013). Por lo tanto, en esta fase es donde se crea el lenguaje estético del producto, la misma que es persuasivo, convincente y emotivo. Un diseño atractivo despierta en el usuario un interés en adquirirlo, provoca cierto orgullo y estatus en su propietario. Ulrich y Eppinger mencionan que cuando estas características son importantes, el diseño industrial desempeña una función de importancia decisiva en determinar el éxito final del producto.

Cuando un diseñador industrial tiene el reto de generar el concepto de un producto a nivel estético, puede hacer uso de recursos formales aplicando la biomimética para encontrar la forma ideal. Este recurso es apoyado por Chakrabarti et al. (2017), quienes afirman que: "para desarrollar ideas novedosas, los sistemas naturales se consideran una fuente superior de inspiración" (p. 475).

De esta manera, el diseñador puede identificar a partir de las formas naturales los elementos básicos de la comunicación visual, (punto, línea, plano, volumen, color, textura), sus patrones geométricos y aplicar los fundamentos compositivos como: proporciones, escala, equilibrio, movimiento y ritmo. Este proceso de composición es un paso más importante para definir un lenguaje formal de un producto (Dondis, 2007).

La aplicación de la biomimética puede hacerse a partir de dos vistas, la reductiva o biomimética superficial y la holística o biomimética profunda. La primera consiste en la transferencia tecnológica al dominio de la ingeniería / diseño, mientras que la segunda consiste en ver a la biomimética como una forma de conseguir productos ecológicamente sostenibles (Volstad & Boks, 2012). Por otra parte, Benyus (1997) divide la biomimética en tres niveles: el primer nivel llamada reductora o superficial que implica la imitación de la forma natural; el segundo nivel que implica imitar un proceso natural; y un tercer nivel llamada profunda u holística, que consiste en imitar los ecosistemas naturales sin dañar el medio ambiente (citado en Volstad & Boks, 2012). Por lo tanto, disciplinas como el diseño, el arte y la arquitectura pueden tener la referencia de la naturaleza de manera estética y/o funcional. Desde un punto de vista estético, que le interesa a este trabajo, la biomimética otorga a las creaciones innovación en los atributos formales, tanto geométricos como perceptuales, que provienen de la belleza artística de las proporciones de la naturaleza.

Un ejemplo de diseño que demuestra lo antes mencionado, es la silla bone chair, creada por el diseñador holandés Joris Laarman, que tomó como fuente de inspiración la ramificación de la estructura interna ósea. Mediante la aplicación de un software logró optimizar la cantidad de volumen necesario para la silla y así alcanzar una relación óptima peso-resistencia (Hruska et al., 2008). Otro ejemplo lo demuestran los hermanos Ronan y Erwan Bouroulloec que recurrentemente se han inspirado en las formas del reino marino y vegetal para sus propuestas. Una de ellas es la vegetal chair, cuya estructura del asiento y respaldo imita la forma de las ramificaciones de las plantas y árboles. Otro dise-

ño que se destaca de estos autores son los módulos algues, cuyo sistema modular biomórfico permite al usuario construir particiones que pueden filtrar o aislar el ingreso de luz o estructurar el espacio (Centre Pompidou-Metz, 2012).

La proporción áurea y la sucesión de Fibonacci

La proporción áurea, o la sección dorada, es una relación entre dos secciones de línea, de manera que la razón $a+b$: a es la misma que a : b . Algebraicamente, se la expresa con el valor 1,618 y se le da el símbolo ϕ (phi), número que se presenta constantemente en las matemáticas y en la naturaleza (Page, Thorsteinsson & Gyu Ha, 2010). La forma más simple para su construcción es a partir de la relación entre los lados de un rectángulo, así: "Dibujemos un cuadrado y marquemos el punto medio de uno de sus lados. Lo unimos con uno de sus vértices del lado opuesto y llevamos esa distancia sobre el lado inicial; de esta manera obtenemos el lado mayor del rectángulo" (Arrondo, 2015, p. 17).

En 1202 Leonardo de Pisa, más conocido en el mundo de las matemáticas como Fibonacci, publicó su obra *Liber abacci*, o libro de calcular, donde desarrolla una serie matemática que utiliza la suma de los dos números anteriores para formar el siguiente, así: $0+1=1$, y el siguiente número se calcula sumando $1+1=2$, y el siguiente es $1+2=3$, $2+3=5$; teniendo como resultado la siguiente secuencia: 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, ... etc. (Page et al., 2010). El cociente entre dos términos consecutivos se va acercando cada vez más al valor ϕ (phi), así: $55/34=1,61764$; $89/55= 1,61818$, etc. (Arrondo, 2015).

Tanto la serie Fibonacci como el número áureo poseen una belleza estética que se manifiesta en forma concurrente en patrones geométricos de los procesos y estructuras de la naturaleza como en la forma de distribución de hojas y flores en el tallo de las plantas, en las proporciones de los cuerpos de los seres vivos, en conchas de algunos animales, en la estructura del ADN, entre otros. También se manifiestan en formas artísticas del ingenio humano

como la pintura, escultura, arquitectura y productos (Page et al., 2010). Por lo tanto, los diseñadores de productos encuentran esta relación muy útil como herramienta creativa para diseñar propuestas estéticamente agradables.

Filotaxis

Según Ferrando y Segura (2010): "La filotaxis es la rama de la botánica que estudia la distribución de los elementos de una planta: flores, hojas, semillas, ramas, etc." (p. 46). La botánica y la sucesión Fibonacci se vieron más unidas gracias a las investigaciones del naturalista alemán Karl Schimper (1803-1867) y del biólogo, también alemán, Alexander Braun (1805-1877). Ellos empezaron un estudio sistemático de la filotaxis desde un punto de vista matemático. Schimper publica en 1830 un artículo en el que estudia las distribuciones helicoidales de las hojas y define el ángulo de divergencia, que supuso que eran fracciones racionales de elementos alternos de la sucesión de Fibonacci. Braun se centró en la distribución de las escamas en las piñas y observó que: "en muchos casos, el número de espirales visibles que aparecían en dirección horaria y anti horaria eran dos términos consecutivos de la sucesión de Fibonacci. A partir de los trabajos de estos dos biólogos se definió la serie de Schimper-Braun" (Ferrando & Segura, 2010, p. 48).

En Filotaxis se verifica la llamada ley de divergencia, cuando: "cada hoja está girada respecto a la anterior en un ángulo inferior a 180° " (Ferrando & Segura, 2010, p. 46). Según Okabe (2016) en el siglo XIX la filotaxis expresaba la disposición de las hojas adultas en un tallo por medio de una fracción de Schimper-Braun como:

$1/2$, $1/3$, $2/5$, $3/8$, $5/13$, $8/21$, etc., que significa el ángulo de divergencia entre hojas consecutivas expresado en términos de una fracción de una vuelta completa. Si el ángulo de divergencia se expresa en grados, representan 180° , 120° , 144° , 135° , $138,46^\circ$; $137,14^\circ$, etc., respectivamente (p. 1).

Bravais & Bravais (1837) mencionan que el valor de $137,5^\circ$ se fija como regla general al ángulo de divergencia entre las hojas que surgen sucesivamente (citado en Okabe, 2015). Un ejemplo relacionado a esta afirmación es la que presenta Shipman & Newell (2004), donde las espinas de un cactus se organizan en patrones, cuyo ángulo entre numerados son constantes en la planta, formando el llamado ángulo de divergencia, como se muestra en la Figura 1.

Fotogrametría de objeto cercano

Según la American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (2004) "la fotogrametría es la ciencia y tecnología cuyo fin es obtener información cuantitativa fiable relativa a objetos físicos y su entorno mediante procesos de registro, medidas e interpretación de imágenes fotográficas" (p. 32) (como se cita en Moreno & Castillo, 2018). Dichas

imágenes se analizan y se posicionan según sus características comunes y los píxeles de las características compartidas se asignan en 3D, dando como resultado una nube de puntos, las cuales poseen la información tridimensional (Paixão, Resende & Fortunato, 2018). Dicho de otra manera, la técnica captura información bidimensional mediante fotografías y las convierte en información tridimensional, obteniendo un modelo idéntico al original, tanto en forma, dimensiones, posicionamiento, color y textura. Según el tipo de fotografía, la fotogrametría se clasifica en aérea, la cual tiene aplicaciones cartográficas y topográficas; y la fotogrametría terrestre, que tiene aplicaciones en diversos campos como el estudio de procesos de cambio o la reconstrucción de objetos arquitectónicos, en arqueología, en medicina, metrología industrial y en diseño industrial (Ruiz, 2019).

Figura 1. Los ángulos de divergencia se distribuyen en 3 (rojo, en sentido horario), 8 (marrón, en sentido horario) y 5 (amarillo, en sentido anti horario), que emanan desde el centro de la planta

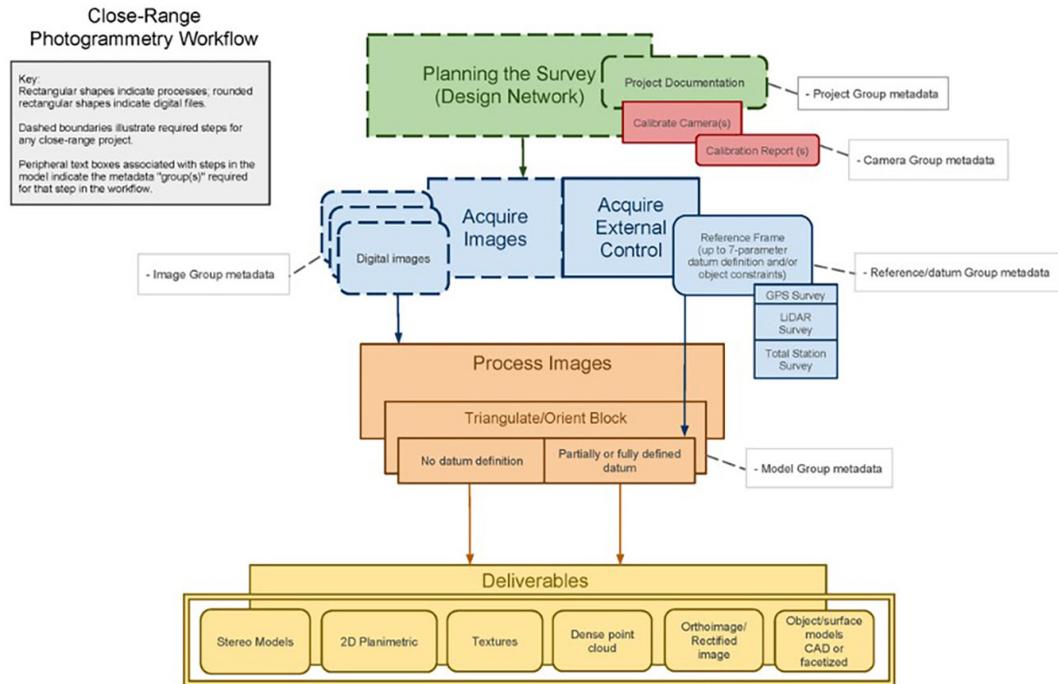


De Shipman & Newell, (2004, p. 2).

La fotogrametría de objeto cercano, conocido en inglés como Close Range Photogrammetry (CRP) o como Terrestrial Photogrammetry, es aplicada a la obtención de medidas geométricas a elementos tomados desde la superficie terrestre a una

distancia a los objetos superior a 10cm e inferior a 300m (Fra Paleo, 2011). En la Figura 2 se expone una descripción gráfica del flujo de trabajo en un proyecto de fotogrametría de objeto cercano, que serán desarrolladas más adelante en la metodología.

Figura 2. Flujo de trabajo en Fotogrametría de Objeto Cercano



De Barnes, (2011).

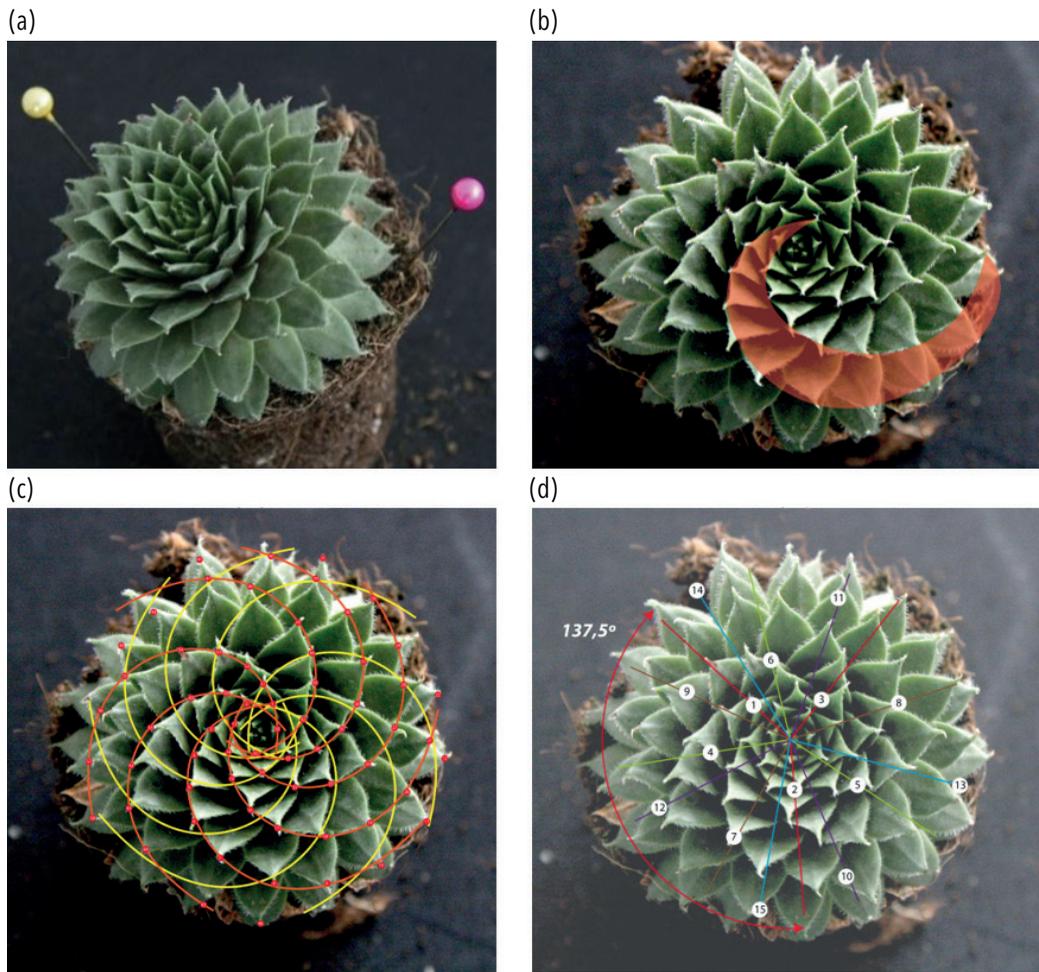
Metodología

En primer lugar, se realiza una preselección del modelo biológico, en cuya estructura sea evidente las premisas de la secuencia de Fibonacci y la ley de divergencia; en este caso se escoge una planta herbácea de la familia de las crasuláceas, conocida por su nombre científico como *Sempervivum tectorum* L. (Figura 3). Esta planta se caracteriza por

presentar hojas verdes suculentas, distribuidas en rosetas de 3 a 4 pulgadas de diámetro y en verano producen flores de color rosa rojizo en tallos de 8 a 12 pulgadas de alto (Appell, 2001).

Las primeras aproximaciones para la obtención de los recursos formales se basan en el simple principio de la observación del modelo biológico. En la Figura 4 se aprecia a simple vista el patrón de espirales que forma las hojas.

Figura 3. (a) *Sempervivum tectorum* L. (b) Dirección de la elipse esférica en el *Sempervivum tectorum* L. (c, d) Ángulo en la sección áurea



La digitalización del elemento natural mediante la fotogrametría cumple con los siguientes pasos: preparación del entorno, toma de datos y proceso de digitalización.

Preparación del entorno

Se optó por utilizar un espacio interior con suficiente entrada de luz natural, por tal motivo se prescindió de un set de luces. Adicionalmente se colocó una superficie y un fondo blanco para que

la luz sea homogénea y evitar que se generen sombras duras que pueden alterar la alineación de las fotografías. Las capturas de imágenes se hicieron mediante dos métodos: una sección con la cámara rotando alrededor del objetivo y otra sección con cámara fija. Para este último, se colocó la cámara sobre un trípode a una distancia de 50cm de la planta, que se situó sobre una plataforma giratoria.

Toma de datos

La toma de datos fotográficos fue realizada en un amplio rango de orientaciones y posiciones. Se registraron imágenes cada 20° para garantizar un mayor solapamiento, esto permitirá detectar más

puntos en común entre fotografías, facilitando la alineación. Como herramienta se utilizó una cámara réflex Canon EOS 400D Digital con un lente de 18-55mm. En general se tomaron 98 fotografías, cuyas características se señalan en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de la cámara e imágenes

Cámara

Modelo de cámara	Canon EOS 400D DIGITAL
Punto F	f/8
Tiempo de exposición	1/50 s
Velocidad ISO	ISO-1600
Distancia focal	55 mm
Modo de flash	Sin flash

Imagen

Dimensiones	3888 x 2592
Ancho	3888 píxeles
Alto	2592 píxeles
Resolución horizontal	72 ppp
Resolución vertical	72 ppp
Profundidad en bits	24
Representación del color	sRGB

Proceso de digitalización

Para el procesamiento de imágenes se utilizó un software fotogramétrico para realizar el siguiente flujo de trabajo: alineación de fotografías, creación de nube de puntos densa, creación de malla y creación de textura. Un software de modelado 3D se utilizará para la optimización de malla, la identificación del patrón de repetición y posteriormente la generación de los recursos morfológicos de sólido 3D a partir de dicho patrón.

Alineación de fotografías

Una vez obtenido los datos fotográficos se cargan al software y se alinean a una calidad alta, es decir, que el programa identifique los puntos en común que existe entre las imágenes. Algunas fotografías que no logren ser alineadas, serán descartadas por el algoritmo del programa. Al finalizar este proceso se genera una nube de puntos de baja densidad y se evidencia cómo se han distribuido las imágenes (Figura 4-a).

Creación de nube de puntos densa

Posteriormente se genera el cálculo de la nube densa que da una pre visualización con más detalle del objeto. Para este caso se generaron 1 000 154 puntos (Figura 4-b).

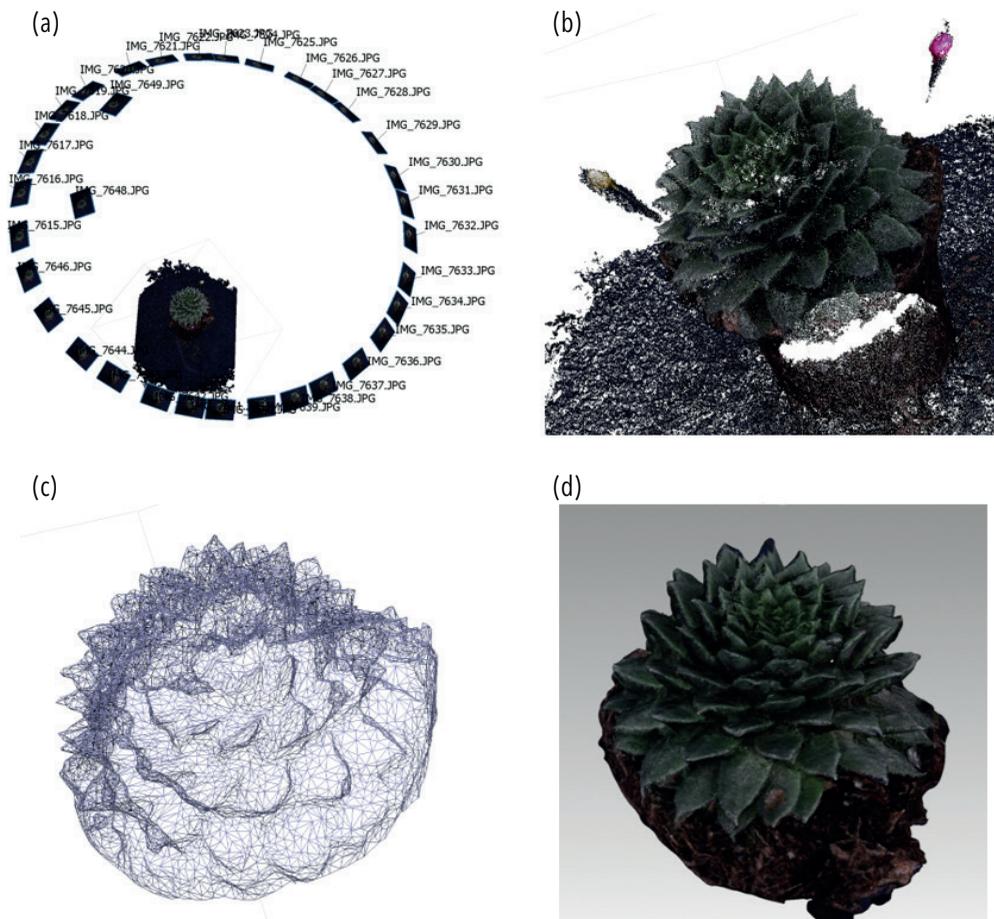
Creación de malla

La tercera operación es la creación de malla, que consiste en generar aristas y caras triangulares mediante las cuales el objeto adquiere una superficie. Para este trabajo se generaron 13 191 caras (Figura 4-c).

Creación de textura

El último proceso que integra el flujo de trabajo con el software es la de creación de textura. Las imágenes, que se generaron por la proyección de las fotografías alineadas, se aplican a la superficie del objeto por medio de un sistema de coordenadas. Dichas imágenes le dan al modelo final mayor realismo. Se cumple este último paso, a pesar que no será necesario para la generación de los recursos morfológicos (Figura 4-d).

Figura 4. (a) Alineación de fotografías. (b) Creación de nube de puntos densa. (c) Creación de malla. (d) Creación de textura



Resultados

El resultado previo obtenido, tras efectuar los pasos necesarios, es la digitalización de la planta, con gran similitud a la forma orgánica real, que permite ser visualizada en 360° y donde se aprecia claramente la forma y la distribución de las hojas (Figura 5). Para tener una visualización previa a las estructuras finales, se grafica una línea por el espacio tridimensional tocando las puntas de las hojas claramente visibles, siguiendo las distribuciones helicoidales de las hojas, como se muestra en la Figura 6. Dichas líneas servirán como referencia para realizar los primeros trazos hacia una forma tridimensional y claramente relacionado a la morfología de la *Sempervivum tectorum L.*

Se hace uso de un software de modelado 3D para la generación de los recursos morfológicos. Para su construcción se sigue el recorrido de las líneas, que nacen del centro de la planta y se dirigen hacia abajo en dirección helicoidal. Esta trayectoria crea un patrón en forma de hélice que se repite siete veces. La repetición se hace en sentido radial, tomando como referencia el eje vertical, de esta manera se crea un vórtice en la corona del sólido (Figura 7). A partir de esta estructura se realiza algunas variaciones morfológicas, respetando la dirección de la hélice matriz, las mismas que se pueden apreciar en las Figuras 8, 9 y 10.

Figura 5. Planta *Sempervivum tectorum L.* digitalizada aplicando la fotogrametría



Figura 6. Distribución helicoidal de las hojas, ángulo de divergencia.

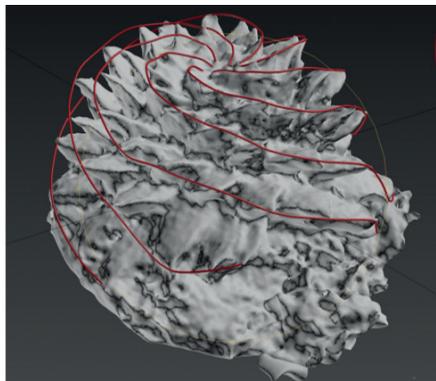


Figura 7. Propuestas de recursos formales tridimensionales basados en la planta *Sempervivum tectorum* L.

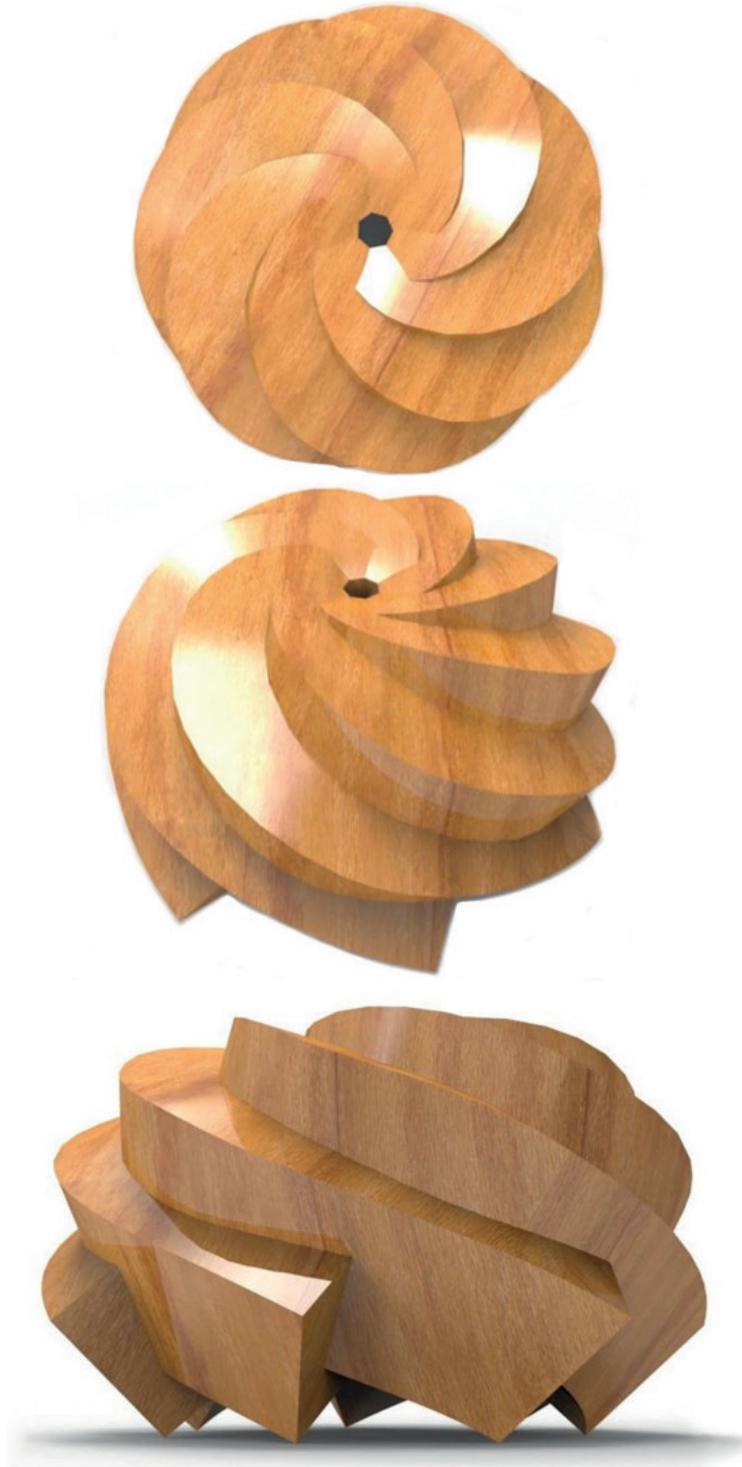


Figura 8. Propuestas de recursos formales tridimensionales basados en la planta *Sempervivum tectorum* L.



Figura 9. Propuestas de recursos formales tridimensionales basados en la planta *Sempervivum tectorum* L.



Figura 10. Propuestas de recursos formales tridimensionales basados en la planta *Sempervivum tectorum* L.



Conclusiones

La secuencia Fibonacci es un orden de crecimiento y distribución proporcional que se encuentra inherente en la naturaleza. En la botánica se denomina filotaxis, que define la disposición de las hojas en el tallo siguiendo un patrón de crecimiento llamado ángulo de la divergencia o ángulo de sección áurea, que es un ángulo de rotación a partir del punto central, mediante el cual los nuevos elementos se van organizando a medida que crecen. A lo largo de este proyecto se ha detectado visualmente que la planta *Sempervivum tectorum* L. cumple con esta proporción, donde las hojas más pequeñas crecen en el centro y van creciendo a medida que se van alejando siguiendo el patrón de hélice.

La fotogrametría puede ser una valiosa herramienta para la digitalización de formas naturales aplicables a objetos industriales, previamente a la obtención de datos que son transmitidos por nube de puntos y sometidos por software especializados. Gracias a esto se pudo obtener un registro de la forma y volumen de la planta *Sempervivum tectorum* L. de manera fácil, rápida y casi exacta, para disponer un objeto que sea cómoda su manipulación en el ordenador.

Los estudios de las formas de la naturaleza permiten explorar conceptos de diseño para ser plasmados en sistemas de inspiración para nuevos productos, arquitectura y espacios. La biomimética es la ciencia que realiza dicho estudio y actúa como fuente recurrente de creatividad en aplicaciones de manera superficial/reductiva o profunda/holística. Este artículo se basó en la primera, buscando ideas de la planta *Sempervivum tectorum* L. para adoptar su morfología en futuras soluciones formales y funcionales del ámbito del diseño. Por último, se puede utilizar estas formas como punto de referencia para aplicar modificaciones continuamente en sus superficies y obtener propuestas más creativas y con alta innovación morfológica. También pueden interactuar entre sí para aplicar intersecciones entre formas y obtener nuevos sólidos compuestos y más complejos.

Referencias

- Appell, S. (2001). *The Potted Garden: New Plants and New Approaches for Container Gardens*. Brooklyn Botanic Garden. <https://books.google.es/books?id=Cf8k8KDhb0cC>
- Arrondo, E. (2015). *Naturaleza Inspiradora 80 Casos de Biomimética*. Andoáin.
- Badarnah, L., & Kadri, U. (2015). A methodology for the generation of biomimetic design concepts. *Architectural Science Review*, 58(2), 120-133. <https://doi.org/10.1080/00038628.2014.922458>
- Barnes, A. (2011). *Four Basic Steps of a Close-Range Photogrammetry Project*. <http://gmvc.cast.uark.edu/photogrammetry/four-basic-steps-of-a-close-range-photogrammetry-project-3/>
- Benyus, J. (1997). *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. HarperCollins. <https://n9.cl/9rwxv>
- Bravais, L., & Bravais, A. (1837). *Essai sur la disposition des feuilles curvisériées*. https://books.google.com.ec/books/about/Essai_sur_la_disposition_des_feuilles_cu.html?id=nfOCHAAA-CAAJ&redir_esc=y
- Centre Pompidou-Metz. (2012). *Ronan & Erwan Bouroullec Bivouac Press Pack*. Centre Pompidou-Metz. https://www.centrepompidou-metz.fr/sites/default/files/issuu/bivouac_presspack_en.pdf
- Chakrabarti, A., Siddharth, L., Dinakar, M., Panda, M., Palegar, N., & Keshwani, S. (2017). Idea Inspire 3.0—A Tool for Analogical Design. *Systems and Technologies*, 2, 475-485. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3521-0_41

- Dondis, D. (2007). *La Sintaxis de la Imagen. Introducción al alfabeto visual*. Gustavo Gili, SL.
- Ferrando, I., & Segura, C. (2010). La sucesión de Fibonacci como herramienta para modelizar la naturaleza. *Modelling in Science Education and Learning*, 3(5), 45-54. <https://doi.org/10.4995/msel.2010.3111>
- Fra Paleo, U. (2011). *Diccionari Terminològic de Fotogrametria*. Institut Cartogràfic de Catalunya - ICC.
- Hruska, L., Hall, P., Antonelli, P., Aldersey, H., & Roberts, R. (2008). *Design and the Elastic Mind*. The Museum of Modern Art.
- Moreno, M., & Castillo, D. (2018). El uso de la fotogrametría para la digitalización de documentos cartográficos de gran formato: La experiencia de la Planoteca de la Junta de Adelanto de Arica (PJAA), Chile. *Intervención Revista Internacional de Conservación Restauración y Museología*, 9(17), 80-90. <https://doi.org/10.30763/Intervencion.2018.17.193>.
- Muñiz, R. (2017). Biomimética. Herramientas de Diseño Inspiradas en la Naturaleza. *Tekhné*, 20(2), 23-38.
- Okabe, T. (2015). Biophysical optimality of the golden angle in phyllotaxis. *Scientific Reports*, 5(1), 1-7. <https://doi.org/10.1038/srep15358>
- Okabe, T. (2016). The riddle of phyllotaxis: Exquisite control of divergence angle. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 85(4), 1-17. <https://doi.org/10.5586/asbp.3527>
- Page, T., Thorsteinsson, G., & Gyu Ha, J. (2010). Natural Sections in Product Design. *International Journal of Contents*, 6(3), 71-82. <https://doi.org/10.5392/IJoC.2010.6.3.071>
- Paixão, A., Resende, R., & Fortunato, E. (2018). Photogrammetry for digital reconstruction of railway ballast particles-A cost-efficient method. *Construction and Building Materials*, 191, 963-976. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.048>
- Ruiz, P. (2019). *Posibilidades y limitaciones de la digitalización 3d en el campo de la ingeniería mecánica* (Tesis de pregrado, Universidad de Cantabria). Universidad de Cantabria. <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/17045/419818.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Shipman, P., & Newell, A. (2004). Phyllotactic Patterns on Plants. *Physical Review Letters*, 92(16), 1-4. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.92.168102>
- Tavsan, F., & Sonmez, E. (2015). Biomimicry in Furniture Design. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 197, 2285-2292. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.07.255>
- Ulrich, K., & Eppinger, S. (2013). *Diseño y Desarrollo de Productos*. McGraw-Hill.
- Viñolas, I., & Marlet, J. (2005). *Diseño ecológico: Hacia un diseño y una producción en armonía con la naturaleza*. Blume.
- Volstad, N., & Boks, C. (2012). On the use of Biomimicry as a Useful Tool for the Industrial Designer. *Sustainable Development*, 20(3), 189-199. <https://doi.org/10.1002/sd.1535>