

Colección Morfología y Diseño

Texturas bioinspiradas

y fabricación digital

David A. Torreblanca-Díaz
Ever Patiño Mazo



Universidad
Pontificia
Bolivariana

Colección Morfología y Diseño

Texturas bioinspiradas y fabricación digital

David A. Torreblanca-Díaz
Ever Patiño Mazo



745.2
T689

Torreblanca-Díaz, David A., autor
Texturas bioinspiradas y fabricación digital / David A. Torreblanca-Díaz, Ever Patiño Mazo, Autores -- 1. edición -- Medellín : UPB, 2021.
254 páginas, 28 x 21 cm. (Morfología y Diseño)
ISBN: 978-958-764-957-4 (versión digital)

1. Diseño biomimético – 2. Naturaleza en el diseño – 3. Estructuras naturales
4. Diseño – Patrones – I. Patiño Mazo, Ever, autor – II. Título (Serie)

CO- MdUPB / spa / rda
SCDD 21 / Cutter-Sanborn

© Ever Patiño Mazo
© David A. Torreblanca-Díaz
© Editorial Universidad Pontificia Bolivariana
Vigilada Mineducación

Texturas bioinspiradas y fabricación digital

ISBN: 978-958-764-957-4 (versión digital)
DOI: <http://doi.org/10.18566/978-958-764-957-4>
Primera edición, 2021
Facultad de Diseño Industrial
CIDI

Grupo de Investigación de Estudios en Diseño (GED)
Proyecto: Repertorio de superficies y texturas bioinspiradas a través de experimentaciones morfológicas con tecnologías de fabricación digital.
Radicado 601B-05/16-35 Línea de Investigación en Morfología Experimental (LIME)

Gran Canciller UPB y Arzobispo de Medellín: Mons. Ricardo Tobón Restrepo

Rector General: Pbro. Julio Jairo Ceballos Sepúlveda

Vicerrector Académico: Álvaro Gómez Fernández

Decana Escuela de Arquitectura y Diseño: Juliana Restrepo Jaramillo

Director de la Facultad de Diseño Industrial: Andrés Hernando Valencia Escobar

Editor: Juan Carlos Rodas Montoya

Gestoras Editoriales: Ana Elena Builes Vélez y Natalia Builes Escobar

Coordinación de Producción: Ana Milena Gómez Correa

Diagramación: Ana Mercedes Ruiz Mejía

Corrección de Estilo: Editorial UPB

Diseño de manual de estilo de la colección Morfología y diseño:
Sara Restrepo Osorio, Mateo Arbeláez Patiño y Juan Camilo Muriel

Diseño de portada: Ever Patiño Mazo

Fotografía portada: David A. Torreblanca-Díaz

Dirección Editorial:
Editorial Universidad Pontificia Bolivariana, 2021
Correo electrónico: editorial@upb.edu.co
www.upb.edu.co
Teléfax: (57)(4) 354 4565
A.A. 56006 - Medellín - Colombia

Radicado: 2046-20-11-20

Prohibida la reproducción total o parcial, en cualquier medio o para cualquier propósito, sin la autorización escrita de la Editorial Universidad Pontificia Bolivariana.

Contenido

Prólogo	5	5. Materialización de muestras	128
1. Presentación	10	5.1 Criterios y parámetros.....	129
2. Introducción	31	5.2 Fabricación de las muestras.....	133
2.1. Bioinspiración y biomimética.....	34	5.3 Análisis de muestras	198
2.2. Superficies biológicas.....	37	6. Repertorio digital y casos de aplicación	214
2.3. Morfología experimental	42	6.1. Metodología para la aplicación de texturas bioinspiradas	217
2.4. Tecnologías de fabricación digital en el contexto de la Cuarta revolución industrial	47	6.2. Casos de aplicación: proyectos de grado de Diseño Industrial	224
3. Caracterización de patrones morfológicos.....	53	7. Conclusiones.....	238
3.1. Observación preliminar	55	7.1. Limitaciones	241
3.2. Clasificación de patrones	57	7.2. Trabajo futuro.....	242
3.3. Abstracción de patrones	89	Agradecimientos	244
4. Transformaciones	96	Biografía de los autores.....	246
4.1. Modelo paramétrico asociativo	98	Referencias.....	248
4.2. Experimentación con software paramétrico	119	Sitios web de interés.....	252



Prólogo

Luis Alfonso Ramírez Arango



El interés del presente libro se centra en el análisis de las superficies de frontera entre los organismos y sus entornos, propiamente de las superficies de plantas y hongos, y se enfoca en el estudio de la geometría de sus texturas con el propósito de transferir dichas características para la solución de problemas de diseño relacionados con las interfaces, entendidas como el espacio en el que se articula la interacción entre el cuerpo humano, el artefacto y el objeto de la acción, tal como las define Gui Bonsiepe (1999).

Por otro lado, desde la biología, las fronteras o membranas en términos de una definición mínima y general de la organización biológica, son un factor constituyente de la vida misma e inauguran una dicotomía afuera/adentro que expresa una diferenciación de procesos que caracteriza a los sistemas vivos.

Si bien el libro se centra en primera instancia en el lado externo de la dicotomía biológica, en su cerramiento y en la interacción, paradójicamente, quiero hacer énfasis en las aperturas que este trabajo proyecta:

- (i) La apertura de las membranas como continuación lógica (bio-lógica) del estudio actual.
- (ii) La apertura del método paramétrico usado en el estudio.
- (iii) La apertura que permite la institución de un repertorio como lugar en el que se dispondrá el presente trabajo para un conocimiento en construcción.

Con respecto a (i) la apertura de las membranas como continuación lógica del estudio actual, se puede decir que la membrana (bio-lógica) es abierta en dos sentidos. Como se expresa en la presentación del libro, el haberse centrado en primera instancia en el tema de la frontera que separa el interior del exterior del individuo biológico es fundamental, en todo el sentido de la palabra, en cuanto es esa membrana la que inaugura la vida y constituye materialmente la individuación, para proteger la integridad del sistema vivo. Pero, además, porque la dicotomía interior/exterior expresa una diferenciación de procesos que se complementan y dejan entrever su viabilidad.

Moreno y Barandiara (2004) proponen una secuencia de pasos de creciente complejidad organizativa como el camino que conduce, desde el mundo físico químico, a los seres vivos a partir de la dicotomía fundamental interior-exterior.

La primera forma de la dicotomía interior-exterior aparece como un sistema auto encapsulado con un borde activo, afirman y establecen dos procesos complementarios pero asimétricos: constructivos e interactivos.

En términos muy generales se puede decir que los sistemas vivos se basan en esos dos procesos complementarios y circulares, pero asimétricos: los internos, de auto mantenimiento, constructivos (metabólicos) y los interactivos con el medio ambiente (como mecanismos de frontera).

Al establecerse la frontera los procesos constructivos constituyen el sistema, en cuanto son la red de producción de sus propios componentes y definen su interior, pero esta red necesita ser alimentada y protegida, con flujos de energía y materia provenientes del exterior a través de la membrana del sistema, es decir, produce procesos interactivos. El mantenimiento del sistema constructivo implica que la organización interna, de alguna manera, sea la que en principio determina y restringe esos flujos de materia y energía; en otras palabras, hacen que la membrana sea selectiva a los requerimientos interiores. Es por esta circularidad que los sistemas vivos se consideran autónomos.

No obstante, las condiciones del entorno no son enteramente de su dominio puesto que el sistema vivo debe ser dinámico y adaptable. La adaptabilidad es la capacidad de un sistema para regular sus estados y su relación con el entorno dentro de los límites de su viabilidad: ello implica la aparición de un desacoplamiento de un conjunto de mecanismos que no participan directamente en el ciclo constructivo de la red interior y, por lo tanto, se convierten en tratamientos con el medio ambiente que cambian algunas condiciones internas o externas para su propio beneficio.

La adaptabilidad toma dos formas básicas, según si los mecanismos de regulación tienen lugar en el nivel constructivo o interactivo. En el primer caso, las perturbaciones internas o externas son compensadas cuando se ajustan o transforman los procesos constructivos (homeostasis y alostasis). En el segundo caso, la forma de adaptabilidad resulta ser de particular interés porque da lugar a una agencia adaptativa: la adaptación a las perturbaciones se logra a través de interacciones recursivas con el medio ambiente para que el proceso interactivo se convierta en un ciclo de tal manera que las interacciones sean funcionales, ahora, en virtud de los cambios inducidos fuera del sistema o, más específicamente, en las relaciones entre el sistema y su entorno. La aparición de esta capacidad adaptativa implica la emergencia de sistemas de detección y mecanismos efectores en la membrana puesto que la regulación adaptativa está vinculada con el entorno del medio ambiente y, a la vez, con la organización constitutiva de la autonomía.

Los señalamientos sobre la apertura de la membrana hacia afuera y hacia dentro, como se afirma explícitamente en el texto, al que hacemos referencia cuando dice que en el alcance del proyecto se propuso un modelo asociativo, con base en un software paramétrico y usando principios de transformación, pero que la experimentación con los patrones extraídos de la naturaleza puede migrar para utilizar fenómenos naturales de mayor complejidad como los sistemas L, la gravedad, la presión ocasionada por fluidos, la capilaridad, la hidratación y deshidratación y la selección natural, entre otros. Aquí solo he resaltado su importancia y la posibilidad de su tratamiento a partir del trabajo ya emprendido.

En efecto:

Un diseño parametrizado no es algo cerrado, es decir, presenta (ii) apertura del método paramétrico; es una forma abierta que puede producir variaciones en función de los parámetros introducidos que, al definir una geometría concreta y particular, generan una tipología de geometrías posibles delimitadas por los valores de los parámetros que se puedan introducir. Un diseño parametrizado posee una capacidad morfogenética, capaz de dar cuenta paulatinamente de la secuencia de pasos de creciente complejidad organizativa que se ha expuesto brevemente en los párrafos anteriores, al pretender señalar las posibilidades de la forma abierta orgánica como un modelo de autonomía básica.

Así mismo, (iii) la apertura que permite la institución de un repertorio, como lugar en el que se dispondrá el presente trabajo, abre las puertas también en dos sentidos, no solo para la utilización por parte del diseñador, lo que es claro en el caso de las texturas, como se demuestra en este libro, sino también para una profundización continua en la complejidad de los sistemas vivos.

Gebeshuber y Drack (2008) distinguen dos métodos para la biomimética: por analogía y por inducción, a los que se puede asignar diferentes actividades. La biomimética por analogía comienza con un problema de tecnología y trata de encontrar problemas análogos en la naturaleza con las respectivas soluciones, estas podrían ser útiles en la solución del problema propuesto. La biomimética por inducción se refiere a ideas que surgen de enfoques desde los estudios propiamente biológicos, sin intención de aplicarlas en un problema concreto.

Respecto a la biomimética por inducción los autores aluden a las posibilidades que facilita la biología técnica, término popularizado por el biólogo Werner Nachtigall (1994). Como afirma Nachtigall (1994), la biología técnica intenta entender y describir mejor las construcciones y tipos de procedimientos de los sistemas vivos a través de los aportes del saber físico y del técnico. La ventaja de este método es que puede complementar la comprensión de los principios básicos biológicos para descubrir cómo funcionan los sistemas vivos en términos de principios físicos, lo que facili-

taría la producción de sus aplicaciones biomiméticas, que luego podrían usarse en diferentes procedimientos por analogía. A mi manera de ver, ese fue el camino que la Línea de Investigación en Morfología Experimental -LIME- asumió y cuyo resultado está expuesto en el presente texto y disponible de manera abierta en el Repertorio para su uso en futuros proyectos de diseño y como base o inicio del camino de investigación; que abre el tema de la complejización de las relaciones dentro/fuera de los sistemas biológicos a las que me he referido por establecer analogías inspiradas en las paredes celulares de las plantas, de cubiertas, envolturas, membranas, pieles de edificios u objetos e interactuando con sus entornos, en algunos casos, reguladas según los requerimientos de sus interiores y en otros adaptativas, lo que hace que esos requerimientos metabólicos interiores ahora sean modulados en relación con los cambios en las condiciones ambientales discriminados en la frontera.

Luis Alfonso Ramírez Arango
Medellín, 13 de septiembre de 2019

Referencias

- Bonsiepe, G. (1999). Del objeto a la interfase: mutaciones del diseño (No. 655.26). Infinito.
- 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.
- Moreno, A. y Barandiara, X. (2004). A Naturalized Account of the Inside-Outside Dichotomy. *Philosophica*, 73(11-26), 17.
- Nachtigall, W. (1994). Creación de forma y biónica: diseño biológico. *Temas de disseny*, (10), 149-155.

1. Presentación



La vida se originó hace unos 4.000 millones de años y existen pruebas de la existencia de organismos similares a las bacterias desde hace 3.500 millones de años. Además, es un hecho que todas las especies actuales son el resultado de un proceso evolutivo de esos primeros organismos básicos. Evolución significa cambio a lo largo del tiempo y Darwin la definió como descendencia con modificación, es decir, plantea que los linajes que descienden de antepasados comunes divergen con el tiempo, a medida que se adaptan a diferentes ambientes para responder a las múltiples exigencias y requerimientos de esos contextos (Ayala, 2012). Darwin propone también la idea de selección natural:

Llamamos selección natural a los efectos combinados en los organismos vivos de las variaciones heredadas, la posibilidad de tener una herencia abundante, los cambios ambientales y el paso del tiempo. A lo largo de las generaciones, estas fuerzas conforman a los organismos para adecuarse al entorno, ya que solo los individuos mejor adaptados a su entorno vivirán lo suficiente para reproducirse y difundir sus características favorables a las siguientes generaciones (Battey & Fellowes, 2016, pág. 114).

En este escenario, las superficies y texturas han jugado un rol activo en la adaptación de los organismos e inciden directamente en los procesos evolutivos de las especies. Malshe y otros (2018) aseveran que las superficies y subsuperficies son interfaces entre los organismos y su entorno, con un rol crítico en su adaptación y sobrevivencia; las denominadas pieles biológicas interactúan con factores ambientales agresivos, tales como: temperatura, humedad, agentes abrasivos, bacterias y virus. Para combatir estos factores agresivos las superficies biológicas han evolucionado originando un diseño único con propiedades multifuncionales. En las **Figuras 1 y 2** se puede apreciar la piel rígida de insectos o exoesqueleto, con múltiples funciones para estos organismos, por ejemplo: dar protección ante las inclemencias del clima y ataques de sus depredadores, regular la temperatura corporal, entre muchos otros.



Figura 1. Imagen de un insecto caelífero, un suborden del orden Orthoptera del filo Arthropoda, comúnmente conocido como saltamontes. Fotografía de Silvia Gallego.



Figura 2. Imagen de un insecto de la especie *Umbronia spinosa*, un hemíptero de la familia Membracidae. Fotografía de David A. Torreblanca-Díaz.

La biomimética y la bioinspiración son disciplinas que estudian los modelos de la naturaleza para imitar los diseños o procesos biológicos para resolver problemas humanos (Benyus, 2012). Estas disciplinas usan como referentes los materiales, estructuras, sistemas y estrategias de la naturaleza para ser transferidos al mundo humano-artificial, a través de las metodologías multi, inter y transdisciplinarias integrando las áreas de la biología, el diseño, la arquitectura y la ingeniería. En las últimas décadas el diseño bioinspirado y la biomimética han logrado un fuerte impulso, en gran parte, por la aparición de las Tecnologías de Fabricación Digital (TFD) y software CAD (Computer Aided Design) paramétrico-asociativos, estos, junto con el desarrollo de nuevos materiales y otras tecnologías disruptivas, han facilitado y potenciado la materialización de propuestas de diseño basados en referentes naturales, en el contexto del fenómeno denominado la Cuarta revolución industrial. Esta revolución plantea un rol protagónico de las tecnologías digitales y, como consecuencia, nuevos paradigmas para el diseño, la fabricación y la producción, en una fusión tecnológica en entornos físicos, digitales y biológicos (Schwab, 2016). Por ejemplo, New Balance y Nervous System diseñaron un calzado deportivo que utiliza como referentes patrones de la naturaleza, aprovecharon las ventajas de los software paramé-

trico-asociativos y la impresión 3D para diseñar un producto personalizado, con geometrías complejas y de alto rendimiento; el calzado posee una amortiguación de densidad variable que se personaliza según la manera en que una persona corre. Este proyecto amplía las posibilidades del diseño de calzado con herramientas digitales y el uso de morfologías biorreferenciadas.

El diseñador holandés Joris Laarman, junto a Anita Starr en su estudio Joris Laarman Lab, también han utilizado referentes naturales en proyectos de diseño, a través de una constante experimentación con tecnologías digitales, materiales y diversos procesos (Joris Laarman Lab, 2021). Un ejemplo paradigmático es la silla Bones, su geometría está basada en las morfologías de árboles y huesos, proyectada a través un software CAD, desarrollado por General Motors para el diseño de automóviles; este software, por medio de un algoritmo evolutivo, permite encontrar la geometría óptima para su desempeño estructural; los prototipos se construyeron con aluminio fundido y resina transparente de poliuretano e integraron TFD con procesos convencionales para hacer los modelos (máster), moldes y otros procedimientos constructivos, en un proceso experimental sin precedentes (Bryden, 2014). (Ver **Figuras 3 y 4**).



Figura 3. Imagen de la silla Bones del diseñador holandés Joris Laarman y su equipo de trabajo. Imagen de © Joris Laarman Lab, (Laarman, J., Starr, A., 2021).

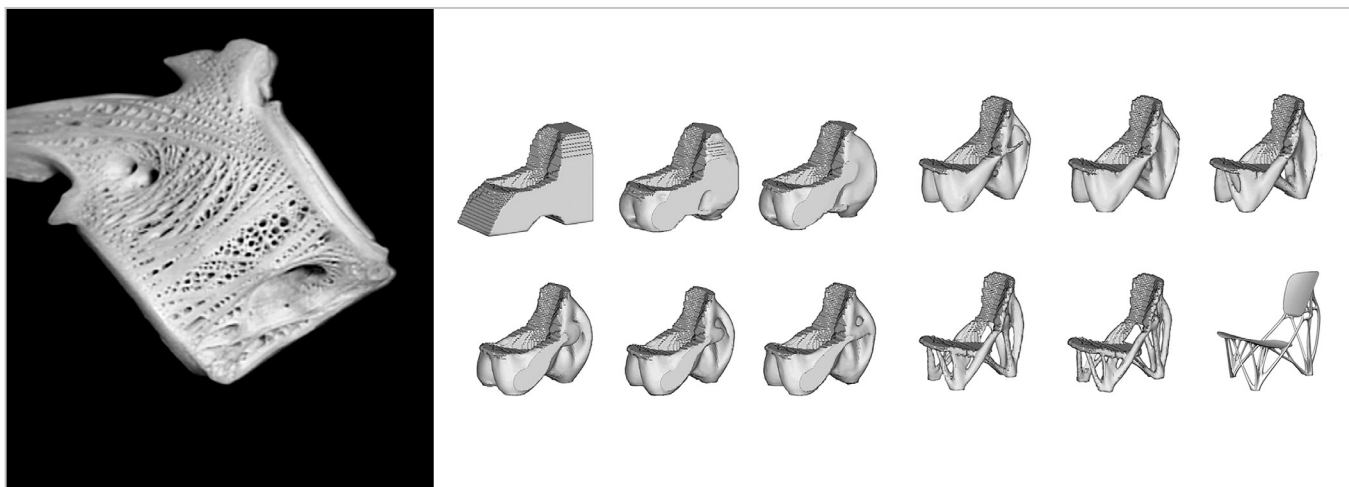


Figura 4. Imagen del referente natural y la optimización topológica generativa del proyecto Bones, del diseñador holandés Joris Laarman y su equipo de trabajo. Imagen de © Joris Laarman Lab (Laarman, J., Starr, A., 2021).

El Institute for Computational Design and Construction (ICD) dirigido por el arquitecto Achim Menges y el Institute of Building Structures and Structural Design (ITKE) liderado por el ingeniero Jan Knippers de la University of Stuttgart en Alemania, diseñan innovadores pabellones como resultado de investigaciones multidisciplinarias que integran biomimética, diseño computacional, experimentación con nuevos materiales y robótica. El ICD/ITKE Research Pavilion 2014-15 fue el resultado de un año y medio de trabajo de investigadores y estudiantes de arquitectura, ingeniería y ciencias biológicas. Se propuso un sistema constructivo basado en las telarañas submarinas de la *Agyroneda Aquatica*, más conocida como araña de agua. Este organismo construye una burbuja de aire para sobrevivir bajo el agua, primero genera una red horizontal, debajo sitúa la burbuja de aire y la refuerza con una disposición jerárquica

de fibras orientadas desde el centro, originando una estructura ligera y estable ante las fuerzas del entorno.

En el caso del ICD/ITKE Research Pavilion 2014-15, un brazo robótico construyó una piel de material compuesto reforzado con fibra de carbono diseñado con algoritmos computacionales, la fibra se depositó en una delgada membrana inflada, inicialmente soportada por la presión del aire, luego se rigidizó sucesivamente en la medida que el brazo robótico la reforzó con fibra desde el interior imitando los patrones geométricos y constructivos característicos de la araña de agua, obteniendo una estructura eficiente, ligera y resistente a esfuerzos mecánicos. En las **Figuras 5, 6, 7 y 8** se pueden ver fotos y esquemas del proyecto.



Figura 5. Foto del ICD/ITKE Research Pavilion 2014-15, Stuttgart, Alemania, 2015. Imagen de © ICD/ITKE, University of Stuttgart (Menges 2021).



Figura 6. Foto de la *Agyroneda Aquatica*, más conocida como araña de agua, referente para el proyecto ICD/ITKE Research Pavilion 2014-15, Stuttgart, Alemania, 2015. Imagen de © ICD/ITKE, University of Stuttgart (Menges 2021).

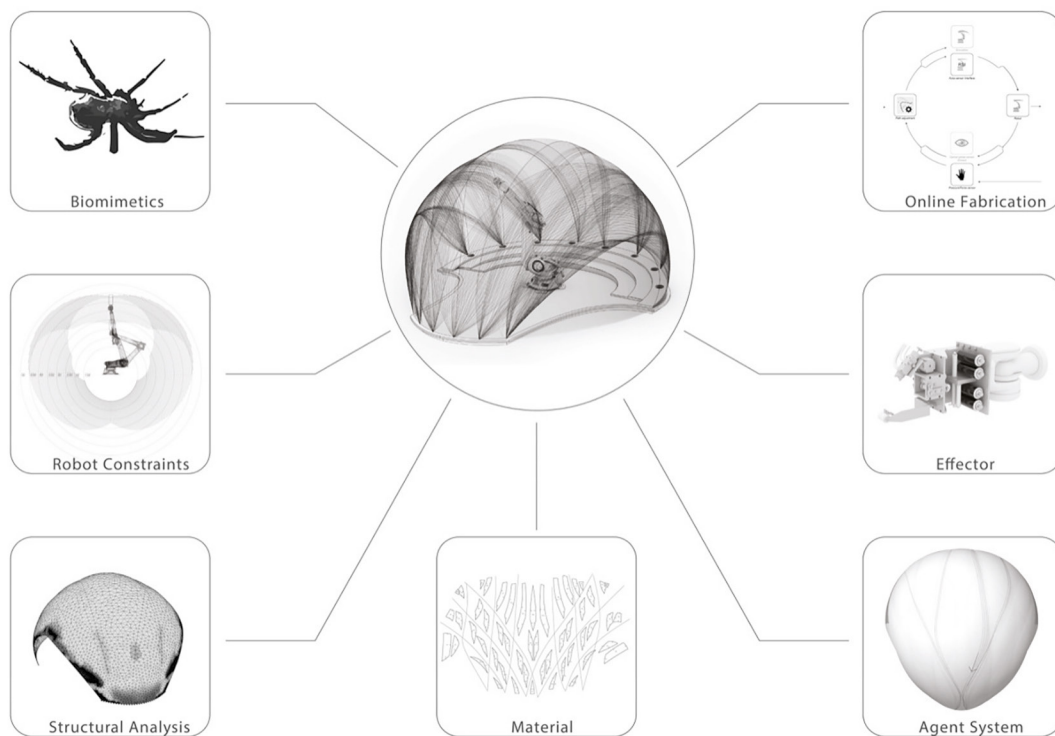


Figura 7. Esquema de la investigación para el ICD/ITKE Research Pavilion 2014-15, Stuttgart, Alemania, 2015. Imagen de © ICD/ITKE, University of Stuttgart (Menges 2021).



Figura 8. Esquema del sistema constructivo basado en la araña de agua (*Agyroneda Aquatica*) para el proyecto ICD/ITKE Research Pavilion 2014-15, Stuttgart, Alemania, 2015. Imagen de © ICD/ITKE, University of Stuttgart (Menges 2021).

El Mediated Matter Group, es un grupo de investigación multidisciplinario del MIT (Massachusetts Institute of Technology) fundado y dirigido por la destacada diseñadora y arquitecta israelí Neri Oxman, quien es también profesora asociada del Media Arts and Sciences del MIT. El objetivo de este grupo de investigación es la búsqueda de nuevas estrategias para diseñar productos, sistemas y materiales, a través de la intersección entre diseño, biología, ciencias computacionales, tecnologías de fabricación digital e ingeniería de materiales. Las investigaciones de Oxman buscan ampliar la integración entre sistemas artificiales (construidos por el ser humano) y naturales, a través del uso de principios de diseño basados en la naturaleza y la invención de nuevas tecnologías, para dar paso a una nueva ecología. Las áreas de aplicación de las investigaciones del Mediated Matter Group incluyen diseño arquitectónico, diseño de productos, diseño de vestuario, así como la invención de nuevas tecnologías para fabricación digital. Por ejemplo, en el proyecto Pneuma 2, Lung Armor se estudiaron estructuras de la naturaleza que incorporan múltiples

funciones de manera eficiente, usualmente mediante el crecimiento de patrones estructurales en múltiples capas y escalas. El hueso esponjoso, por ejemplo, está diseñado como un sólido celular en su mesoescala y un compuesto fibroso en microescala. Combinadas, las estructuras celulares y las texturas de fibra proporcionan una relación peso/volumen altamente eficiente que mantienen estructuras muy fuertes y ligeras. Como se puede ver en la **Figura 9**, se fabrican prototipos con una impresora 3D de la empresa Stratasys que cuenta con la tecnología de multimaterialidad; se combina un patrón estructural celular con un patrón geométrico punteado que se adapta a la integración de funciones aparentemente contradictorias: la estructura celular esponjosa proporciona una armadura protectora ligera que absorbe los golpes, el patrón punteado divide el tejido blando y duro, las regiones de mayor rigidez siguen el límite exterior de la estructura celular y mantienen su integridad estructural, mientras que el tejido blando se encuentra dentro.

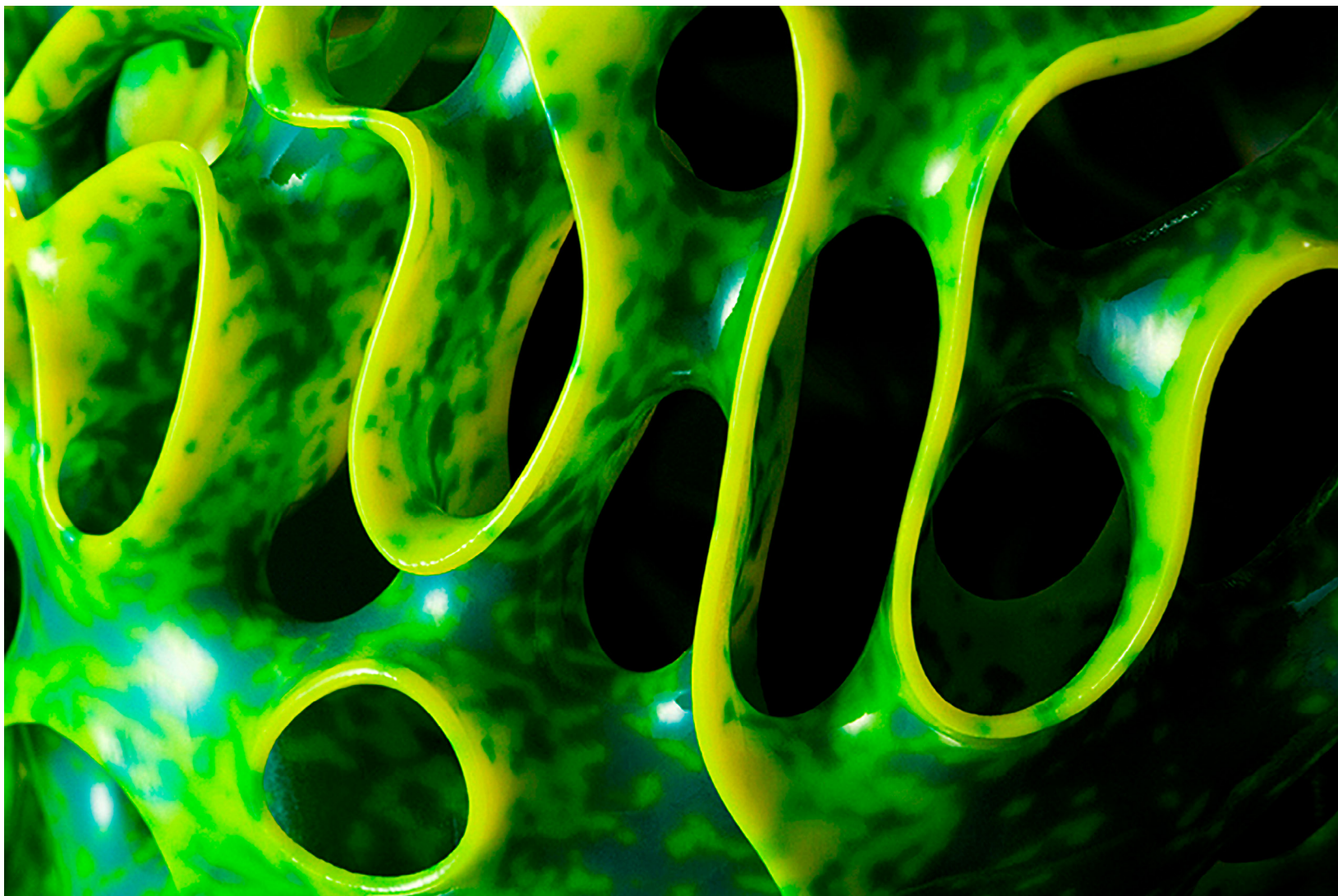


Figura 9. Imagen de un prototipo del proyecto *Pneuma 2 Lung Armor*, de la investigadora Neri Oxman del MIT. Fabricación con una impresora 3D StratasyS que integra múltiples materiales en el mismo proceso (Oxman, 2021).

Con estos antecedentes la *Línea de Investigación en Morfología Experimental -LIME-*, del Grupo de Investigación de Estudios en Diseño -GED-, perteneciente a la Facultad de Diseño Industrial de la Escuela de Arquitectura y Diseño de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín, Colombia, determinó las siguientes preguntas de investigación:

¿Cómo transferir las características morfológicas de texturas biológicas a elementos artificiales, a través de tecnologías digitales? ¿De qué manera generar transformaciones morfológicas basadas en principios de la naturaleza, a través de software CAD paramétrico-asociativos? ¿Es viable integrar texturas bioinspiradas en procesos de diseño de productos para facilitar la solución de diferentes problemáticas?

Con lo anterior, la Línea de Investigación en Morfología Experimental identificó un vacío del conocimiento en torno a cómo transferir las características morfológicas de las texturas de las superficies biológicas a elementos artificiales, en el contexto de un proyecto de diseño. Se formuló el proyecto de investigación Repertorio de texturas bioinspiradas, a través de experimenta-

ciones morfológicas con tecnologías de fabricación digital, cuyo objetivo principal fue crear un repertorio digital de superficies y texturas digitales bioinspiradas, a través de software CAD paramétrico-asociativos y su materialización, a través de las TFD. El repertorio fue hecho con base en las morfologías de texturas de plantas y hongos presentes en el Valle de Aburrá en Colombia, y se planteó para ser usado por diseñadores, arquitectos, ingenieros e integrantes de las Industrias Culturales y Creativas -ICC-, con el objeto de dar respuesta a los requerimientos planteados en cada proyecto de diseño.

De los 5 reinos de la naturaleza: animal, plantas, hongos, monera y protista, se seleccionaron los reinos plantas y hongos, teniendo en cuenta que estos, a partir del uso de estrategias evolutivas, se han adaptado a ambientes y condiciones de vida muy complejas. Además, representan un campo abundante, biodiverso y de fácil accesibilidad para la toma de muestras, esto lo convierte en un conjunto casi inagotable de especímenes de estudio (Valencia-Escobar & Urdinola, 2019). De la **Figura 10** a la **14** se pueden apreciar algunas de las diversas texturas vegetales disponibles en el Valle de Aburrá.

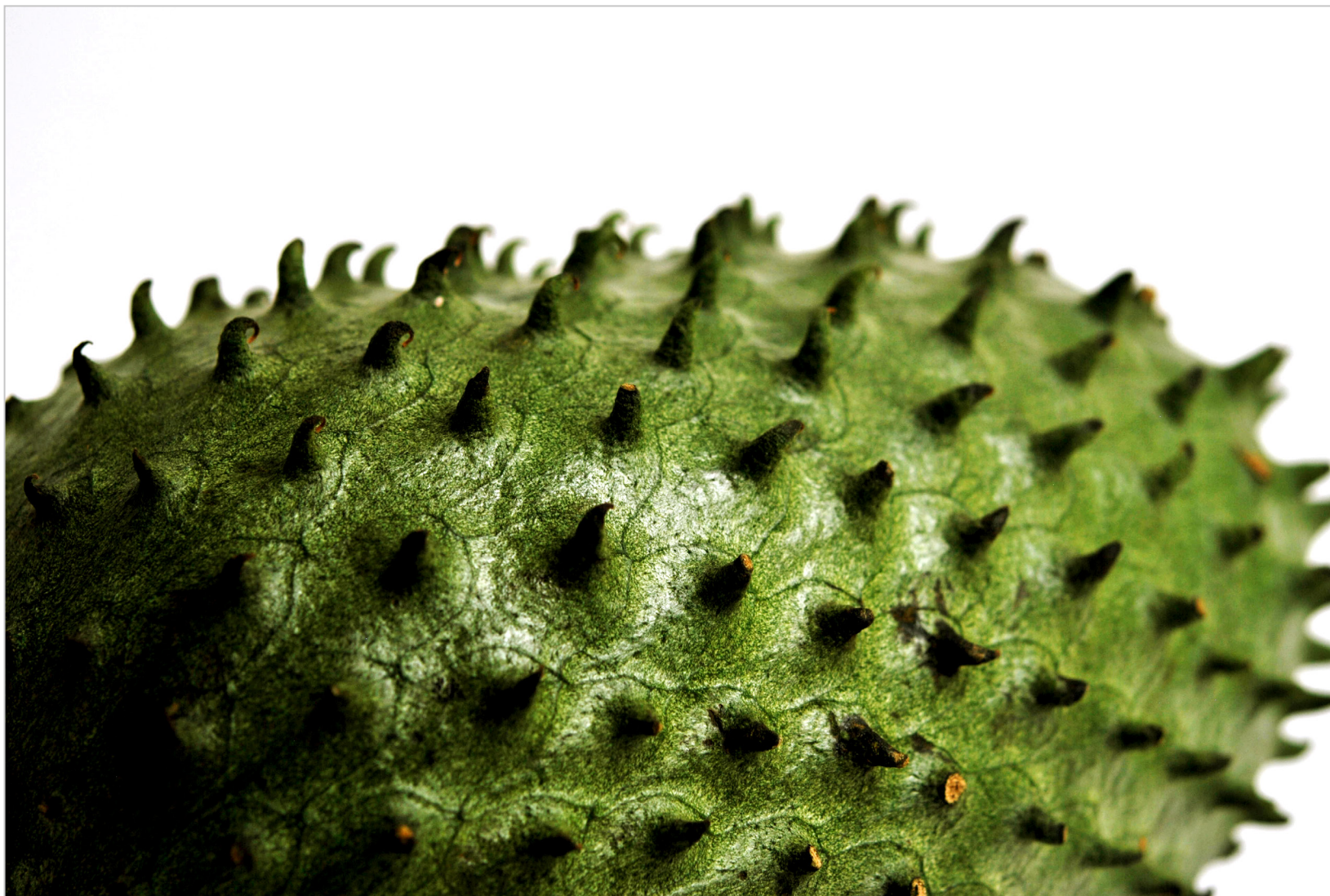


Figura 10. *Textura de la guanábana (Fruto de la Annona muricata).*
Fotografía de David A. Torreblanca-Díaz.



Figura 11. Textura de la pitahaya (Fruto del *Selenicereus megalanthus*).
Fotografía de David A. Torreblanca-Díaz.



Figura 12. *Textura de cidra colombiana (Fruto del *Sechium edule*).*
Fotografía de David A. Torreblanca-Díaz.

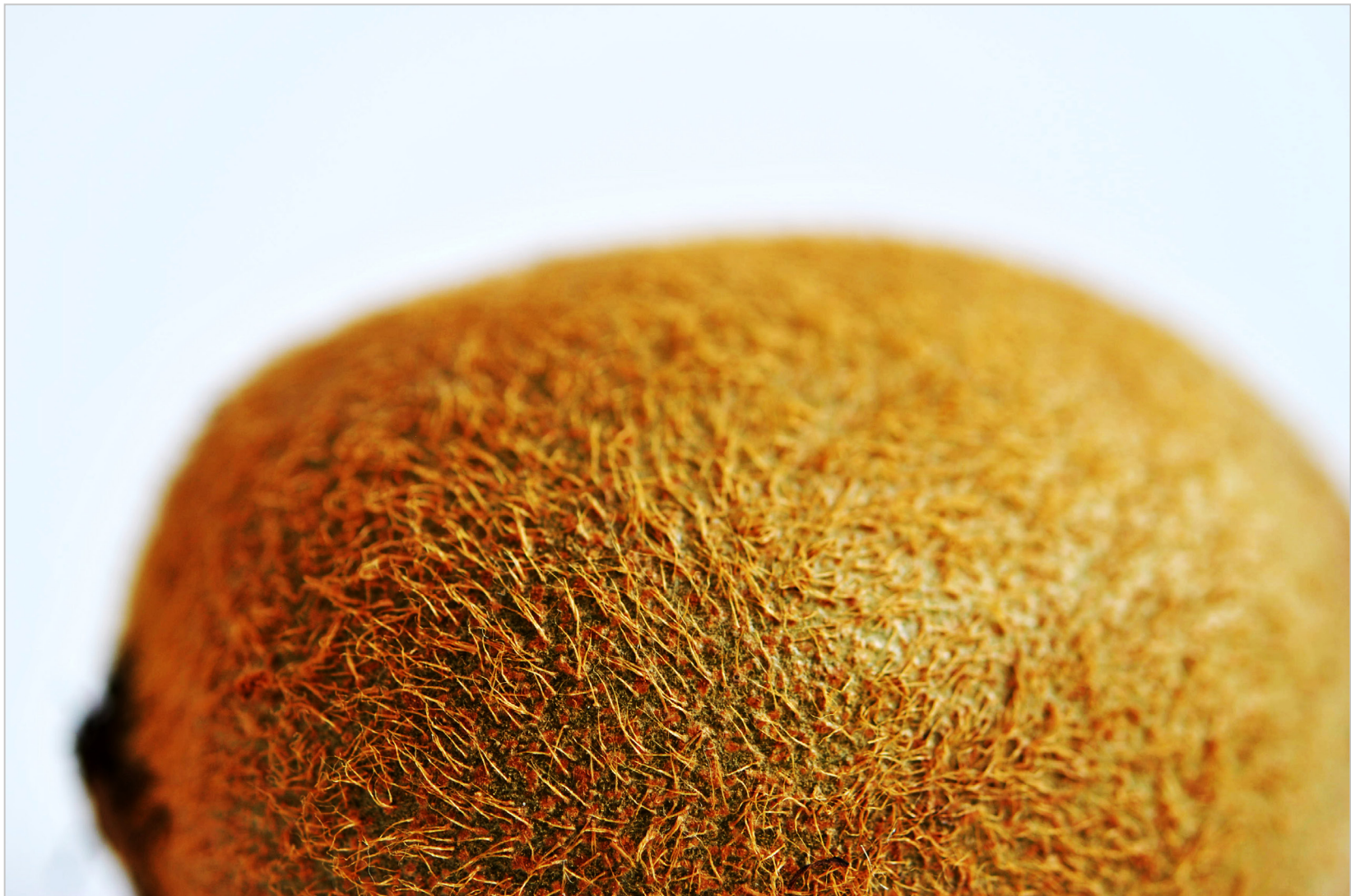


Figura 13. *Textura del kiwi (Fruto de la Actinidia deliciosa).*
Fotografía de David A. Torreblanca-Díaz.



Figura 14. Textura del zapallo (Fruto de la *Cucurbita pepo* var. *giromontiina*).
Fotografía de David A. Torreblanca-Díaz.

Para lograr el objetivo planteado y con un enfoque empírico-analítico, se propuso una investigación exploratoria centrada en la experimentación con tecnologías digitales y las posibilidades de materialización de morfologías naturales a través de las tecnologías de fabricación digital. En este punto es importante aclarar que, en definitiva, el proyecto presenta el proceso de abstracción, transferencia y aplicación de texturas de la naturaleza para proyectos de diseño.

Ahora bien, en el proyecto se hicieron análisis cualitativos de la información obtenida como resultado del trabajo colaborativo y multidisciplinario de investigadores de las áreas de diseño industrial, ingeniería y arquitectura. También se destaca la sinergia vivida entre profesores-investigadores con estudiantes de pregrado pertenecientes al semillero de la línea de investigación -MORFOlab-, así como interacciones con diferentes actores externos: asesores, empresas y un pasante de doctorado.

La investigación comenzó con un registro fotográfico de plantas y hongos del Valle de Aburrá, posteriormente se realizó la abstracción digital de las texturas en el software CAD Rhinoceros®,

se hizo la parametrización y transformaciones morfológicas de las texturas con Grasshopper®, una herramienta paramétrica y asociativa que funciona en el software CAD Rhinoceros®, se fabricaron muestras con diferentes materiales y tecnologías de fabricación digital, se formuló una propuesta metodológica y, por último, se utilizaron las texturas bioinspiradas en proyectos de grado de Diseño Industrial. En la **Figura 15** se pueden ver las etapas secuenciales de la investigación.

Respecto al alcance del proyecto, en primer lugar, se consideró la configuración del repertorio digital de texturas bioinspiradas del reino vegetal y *Fungi*, en segundo lugar, la construcción de muestras físicas de texturas con diferentes materiales y TFD. Se desarrollaron dos metodologías, una para facilitar la selección y aplicación de las texturas en proyectos de diseño y otra metodología enfocada a las transformaciones morfológicas parametrizadas, según las necesidades de cada proyecto. Por último, se hizo la aplicación del repertorio de texturas en un ámbito académico, específicamente en proyectos de grado de estudiantes de Diseño Industrial de la Universidad Pontificia Bolivariana sede Medellín, Colombia.

Síntesis de la metodología

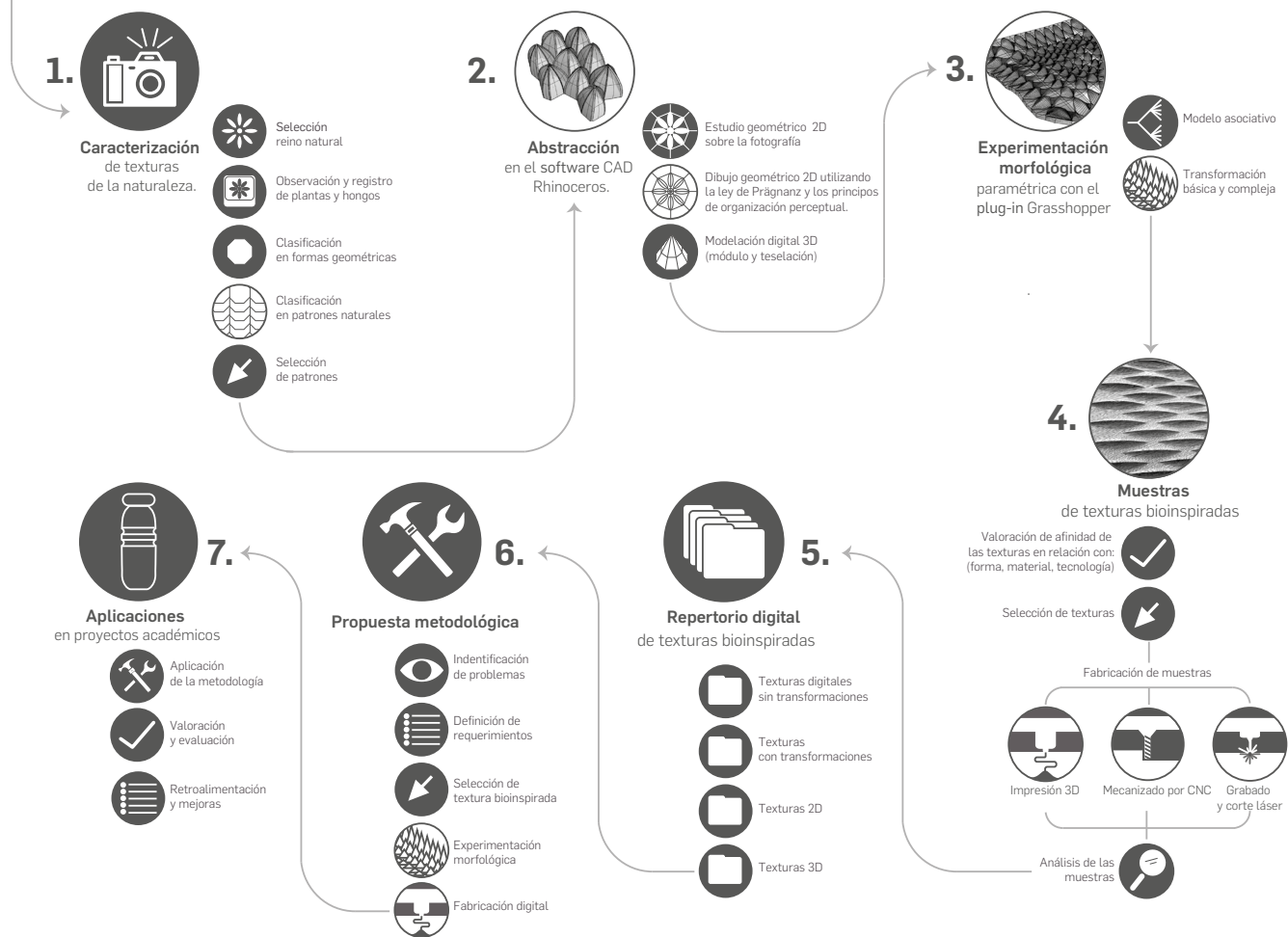


Figura 15. Esquema que sintetiza el proceso investigativo. Esquema de los autores. Dibujo de Ever Patiño y Sara Restrepo Osorio.

El presente libro muestra el marco de referencia, la metodología y los resultados del proyecto mencionado, así como las diferentes actividades y experiencias vividas. El texto comienza con la introducción, en la que se establece el marco de referencia del proyecto, se vinculan diversos ámbitos, como la bioinspiración y la biomimética, las superficies biológicas, la morfología experimental y las tecnologías de fabricación digital en el contexto de la Cuarta revolución industrial, lo que hace evidente el enfoque multi, inter y transdisciplinario de la investigación; luego, se muestra el proceso de caracterización de patrones morfológicos de texturas, desde la observación de superficies biológicas, clasificación en familias morfológicas, selección, hasta la abstracción geométrica en un software CAD. En el siguiente capítulo se aborda la experimentación morfológica digital, en la que se propone un modelo asociativo y los principios de transformación morfológica basado en la naturaleza y el proceso experimentación di-

gital a través de un software CAD paramétrico-asociativo. Luego, se presenta un capítulo que trata sobre la materialización de las muestras, se explican los criterios y parámetros para seleccionar las tecnologías de fabricación, la construcción de las muestras de texturas y su posterior análisis cualitativo. Posteriormente, se explica qué es el repertorio digital de texturas bioinspiradas, cuáles son sus características, metodología de aplicación, ventajas y casos de aplicación en proyectos de grado de estudiantes de Diseño Industrial. Finalmente, se hacen las conclusiones de la investigación, sus limitantes y las oportunidades de próximos trabajos.

Con este libro se espera motivar a investigadores, estudiantes y futuras generaciones a acercarse reflexivamente a estos proyectos colaborativos y transdisciplinarios, que destacan la referenciación de formas, materiales, sistemas y estrategias de la naturaleza para resolver problemas del ser humano a través del diseño.

2. Introducción



Hicieron parte del marco de referencia del proyecto áreas de estudio y disciplinas que, teniendo el estudio de la naturaleza como base, posibilitaron establecer una fundamentación teórica para estructurar conceptualmente el proyecto. Cabe anotar que la relevancia del estudio de la naturaleza para el diseño está, entre otras cosas, en la multiplicidad de formas vivas e inertes que dan sustento a la realidad tal y como se conoce. En los sistemas biológicos, que es el objeto de estudio del presente texto, han actuado tres mil ochocientos millones de años de evolución, que ha creado formas que se han adaptado a un complejo sistema de condiciones físicas y químicas (Valencia, 2018) con base en la selección natural expresado en mutaciones, intercambio de genes y procesos simbióticos, permitiendo la optimización de las estructuras naturales, sus funciones y sus estrategias de supervivencia, haciendo que la red de la vida crezca en tamaño y complejidad hacia formas de diversidad cada vez mayor (Capra, 2002). La selección natural no excluye en su totalidad las

estructuras que carecen de vida, ya que muchas de las especies animales se valen de estructuras acelulares -sin células- para superar los obstáculos impuestos por el entorno natural, como cascos, caparazones, uñas y cuernos (Ver **Figura 16**). Estas últimas soluciones están determinadas, por una parte, por la información genética que coordina el tipo y la velocidad para segregar material rígido y, por otra, por las leyes físicas o fundamentales de la naturaleza que influyen y limitan cualquier forma que crezca en el espacio (Wagensberg, 2005). Janine Benyus (2012) afirma, por ejemplo, que el modo como la naturaleza genera nuevas sustancias y energía para construir estructuras es evidencia de cómo el ser humano puede sobrevivir y adaptarse al ecosistema. Es por esto que, teniendo la naturaleza como base, se presentan a continuación las áreas que fundamentan el texto: (i) bioinspiración y biomimética, (ii) superficies biológicas, (iii) morfología experimental y (iv) tecnologías de fabricación digital en el contexto de la Cuarta revolución industrial.



Figura 16. Caparazón de un caracol compuesto de estructuras acelulares de carbonato de calcio. Fotografía de Alejandro Zuleta.

2.1. Bioinspiración y biomimética

A las disciplinas que utilizan los referentes que provee la naturaleza para traducir los principios, formas, patrones y funciones, y aplicarlos en la construcción humana, como el diseño, la arquitectura y la ingeniería, se les puede denominar disciplinas de diseño biológicamente informado, al que pertenecen la bioinspiración y la biomimética (A. Iouguina, et al., 2014; Patiño, et al., 2018). Todas son actividades proyectuales en la que se toma como referencia la naturaleza para dar solución a problemas humanos. Esta referencia puede enfocarse a la identificación, análisis y síntesis de principios o leyes de funcionamiento, materialización o configuración formal de origen natural que brinden un apoyo al proyecto. Se establece que, si un objeto industrial se diseña fundamentado en la biomimética, podrá adquirir una serie de características que lo harán innovador y eficiente (Vincent, et al 2006; Jirapong, Krawczyk & Elnimeiri, 2002; Coineau & Kresling, 1994; Nachtigall, 1994; Wen, 2008; Patiño, Arango & Jaramillo, 2015; Patiño, et al., 2018).

En un esquema metodológico general para las disciplinas de diseño biológicamente informado, como el que se ve en la **Figura 17**(página siguiente), se identifica y caracteriza inicialmente una necesidad humana, luego se establecen los requisitos para iniciar la búsqueda del referente natural que ayude a encontrar una solución. Se identifican las especies, individuos o elementos naturales que serán analizados. Se extraen de éstos los principios funcionales, formales o materiales. Se sintetizan soluciones ar-

tificiales que den solución a la necesidad y, finalmente, se evalúa la eficiencia de estas soluciones con respecto a otras existentes o la misma necesidad.

Si se sigue de manera organizada esta metodología es factible brindar soluciones desde el diseño que propicien, de manera innovadora y eficiente, el mejoramiento de la calidad de vida de las personas. Este proceso es el que han seguido en su mayoría las personas que se han inclinado por estudiar la naturaleza para aplicarla en la construcción artificial. Esto se justifica en la cantidad de ejemplos del uso eficiente de los recursos y de la alta especialidad en el manejo químico y orgánico, lo que hace que ingenieros, biólogos y médicos busquen constantemente referencias en la naturaleza para dar solución a problemas que enfrentan usualmente. Además, es claro que el análisis y la síntesis de los mecanismos naturales exigen un alto grado de conocimiento teórico desde las matemáticas, la física y la biología, lo que hace que sean éstos y no otros los profesionales que se enfoquen en la biomimética como proceso sistemático e interdisciplinario. Lo anterior ha derivado en que los profesionales de las áreas creativas, diseñadores y arquitectos, tengan dos caminos para llevar a cabo proyectos de diseño basados en la naturaleza. El primero es conformar un equipo interdisciplinario que les permita analizar el tema desde lo conceptual y desde el análisis matemático, físico y biológico. El otro, tratar el estudio de la naturaleza como un concepto abstracto de diseño, sin tener que manejar la complejidad analítica y el trabajo interdisciplinario que exige el modelo anterior.

Metodología

general de las disciplinas biológicamente informadas

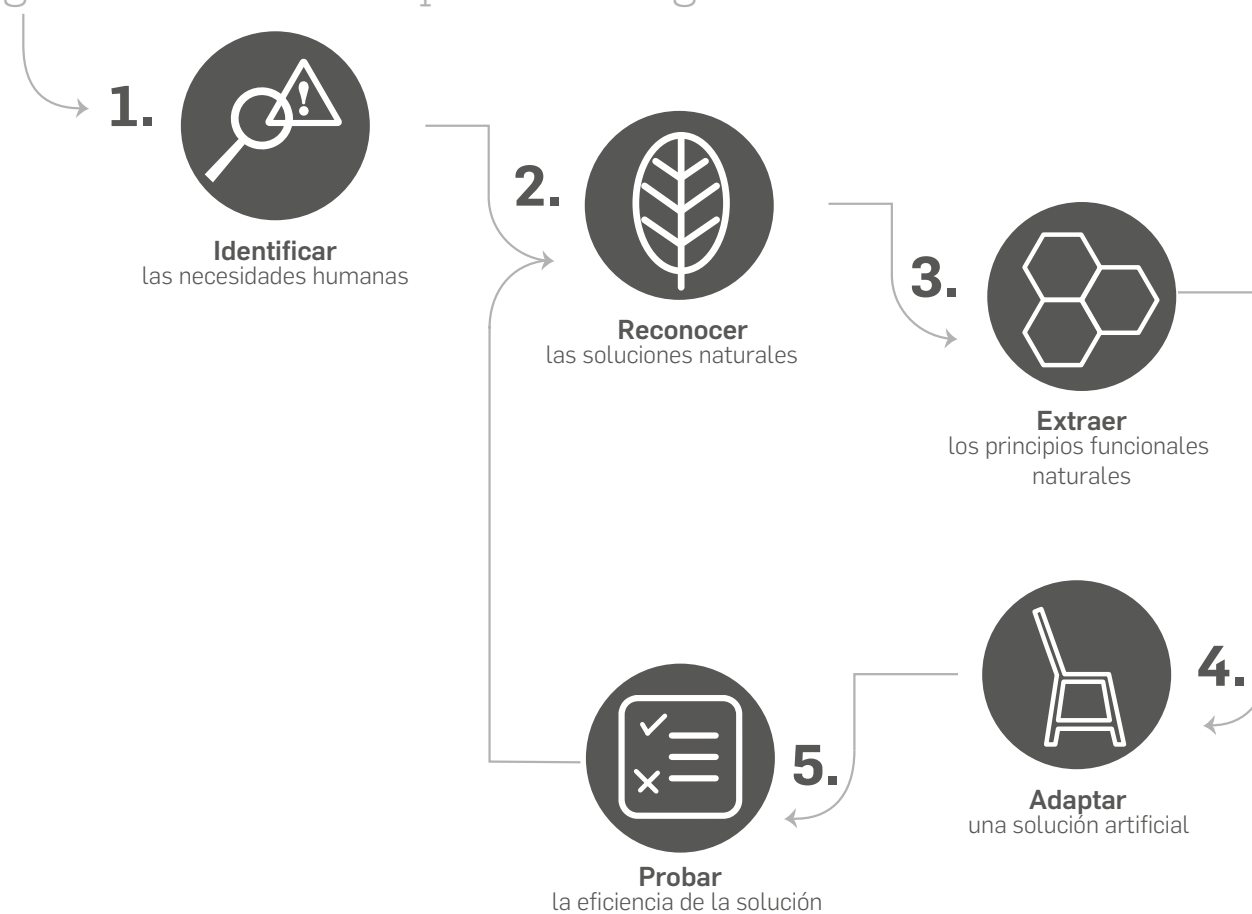


Figura 17. Esquema metodológico general de las disciplinas biológicamente informadas. Esquema de los autores. Dibujo de Sara Restrepo Osorio.

Por ejemplo, las hojas de la planta de la **Figura 18** (siguiente página) presentan nervaduras que se configuran en ramificaciones que se desprenden de un tallo central y que disminuyen su grosor a medida que se alejan de él. Así mismo, no hay un cambio de material, la composición química es la misma, pero es diferente la manera cómo el material se estructura. La suma de la geometría por nervaduras y los cambios en la estructura del material provocan que la hoja pueda resistir la gravedad y las inclemencias del tiempo y así facilitar su fotosíntesis.

Por otro lado, dentro de las disciplinas de diseño biológicamente informado, la bioinspiración tiene como objetivo el estudio de patrones formales representados en esquemas geométricos basados en el análisis de diferentes especies encontradas en la naturaleza (Podborschi y Vaculenco, 2004). Estas especies se analizan por medio de la analogía, es decir, se transfieren por asociación las características geométricas de un dominio biológico a un problema de diseño de un dominio artificial (Moreno et al., 2015). Para este proyecto el primer dominio son las superficies biológicas, las características hacen referencia a las propiedades geométricas y el segundo dominio son superficies y texturas de objetos, textiles y espacios (Patiño, et al., 2018).

2.2. Superficies biológicas

De acuerdo con esta descripción, para este texto no es de interés la transferencia por asociación de todo el individuo como forma

estructural y funcional, sino el análisis de la superficie frontera que divide el interior del individuo del exterior (Wagensberg, 2005). Es decir, no se estudia al individuo como un sistema o estructura funcional, sino que se analiza el perímetro o superficie que diferencia la totalidad del sistema biológico de su entorno y que toma la forma de una membrana o piel (Capra, 2002; Patiño, 2018). Contrario a la construcción humana, en estas superficies naturales predominan las formas curvas y de geometrías complejas. Las únicas superficies naturales relativamente planas son las hojas o estructuras fotosintéticas que deben abarcar la mayor área posible en dirección al cielo y en una menor escala las escamas del pez, las alas de murciélago y las palmas de pato (Vogel, 1998; Patiño, 2018).

En relación con estas superficies delimitadoras y protectoras Gordon (1999) comenta:

Quando la naturaleza inventó algo llamado "vida" debió de buscar, con un poco de ansiedad, un práctico bote para guardarla, porque la vida no hubiera durado mucho desnuda y desguarnecida. En aquellos tiempos el planeta presumiblemente disponía de rocas, arena, agua y una atmósfera, pero debía de andar bastante escaso de materiales utilizables para producir contenedores. Los cascarones duros se pueden hacer con minerales, pero las ventajas de una piel blanda, particularmente en las primeras etapas de la evolución, parecen ser incuestionables (Gordon, 1999, pág. 167).



Figura 18. Configuración de varias hojas para resistir la fuerza de la gravedad.
Fotografía de Alejandro Zuleta.

Estas superficies, que son la interface del cuerpo con el medio ambiente, cambian de nombre y de propiedades según el tipo de organismo. Las plantas tienen, por ejemplo, tejidos protectores de celulosa, llamados epidermis cuando son pequeños y peridermis (cortezas) cuando aumenta de tamaño considerablemente. Igualmente, las frutas poseen una membrana que las protege del exterior llamada epicarpio, compuesta, en su mayoría, por material celulósico, pero con contenido de glándulas con pigmentos, aceites, ceras, ácidos y/o enzimas. Los vertebrados también tienen epidermis, pero formada por células animales, en las que comúnmente se desprenden los pelos, plumas y escamas. Y, por último, los invertebrados tienen una capa dérmica acelular o cutícula que forman caparazones o conchas de queratina.

Así mismo, las superficies biológicas responden a necesidades específicas del individuo: puede contener para dar estructura al cuerpo; puede cumplir la función de proteger al individuo contra ambientes secos, húmedos, fríos o calientes; en algunas especies

hace parte del sistema respiratorio y transporta gases y secreciones; en otras especies interviene en la termorregulación del individuo por el uso de pigmentos y componentes químicos que, además, intervienen en la comunicación; por último, pueden hacer parte de sistemas mecánicos, retener aire, moler alimentos y limpiar el cuerpo del individuo (Gorb, 2006; Patiño, 2018). Por ejemplo, el plumaje en las aves se ubica después de la epidermis (ver **Figura 19**), y, entre otras cosas, cumple con la función de proteger de abrasiones, arañazos y mordeduras, así como la antigua armadura japonesa de plumas protegía a los guerreros de los ataques directos de las katanas (Gordon, 1999); la piel humana (ver **Figura 20**) evita la pérdida de agua por la acción conjunta entre las queratinas, que son proteínas fibrosas y la red de líneas entrecruzadas (Lillywhite, 2006); para finalizar, en la estructura de poros de la cáscara de los pomelos (ver **Figura 21**), se ubican los poros de mayor tamaño en su interior y los poros de menor tamaño en su exterior, esto con el fin de que el pomelo resista eficientemente los impactos por caída (Fischer, et al., 2010).



Figura 19. *Plumaje que, entre otras funciones, cumple con el objetivo de proteger al pato de los predadores. Fotografía de Silvia Gallego.*

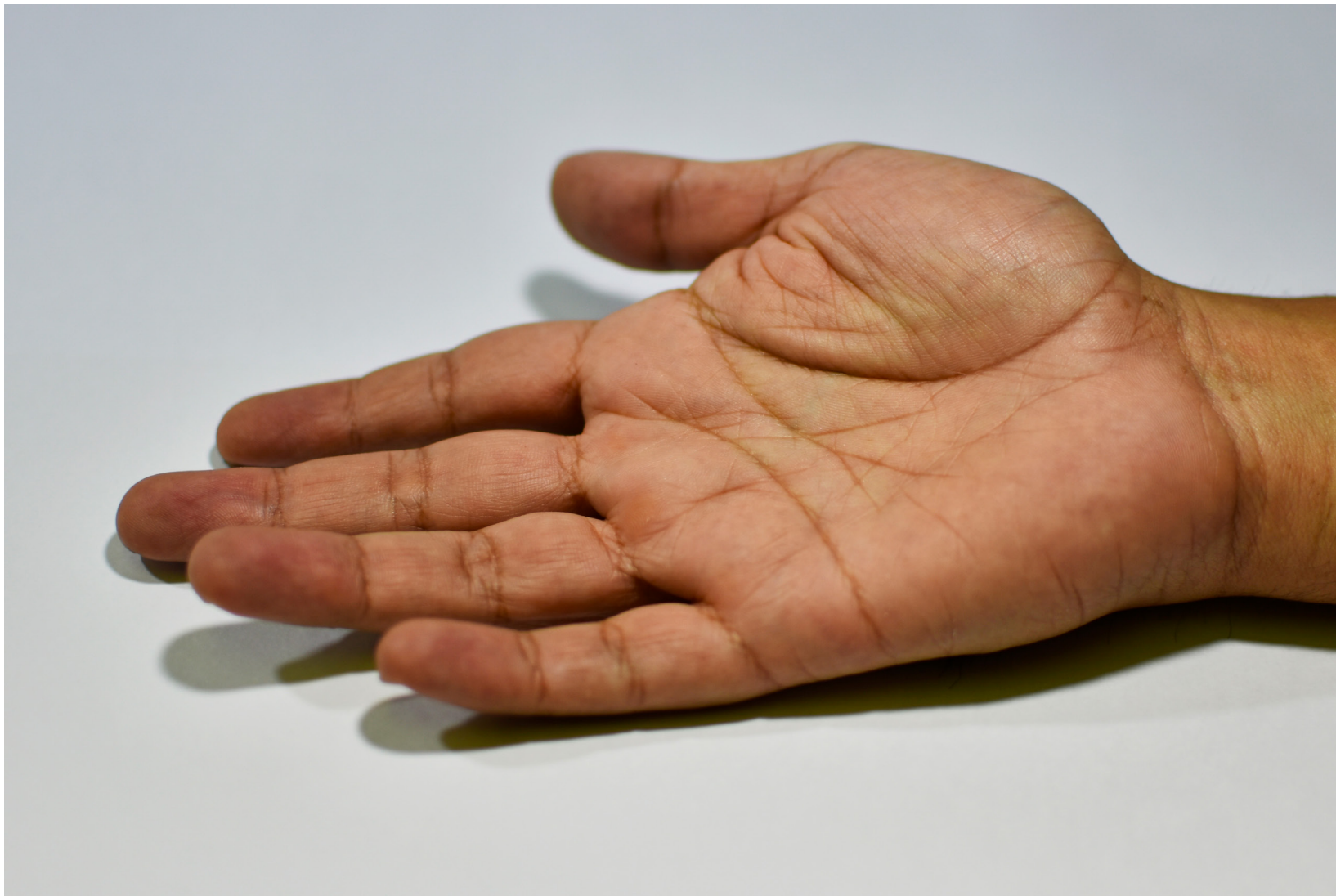


Figura 20. Líneas entrecruzadas en la palma de la mano.
Fotografía de Alejandro Zuleta.

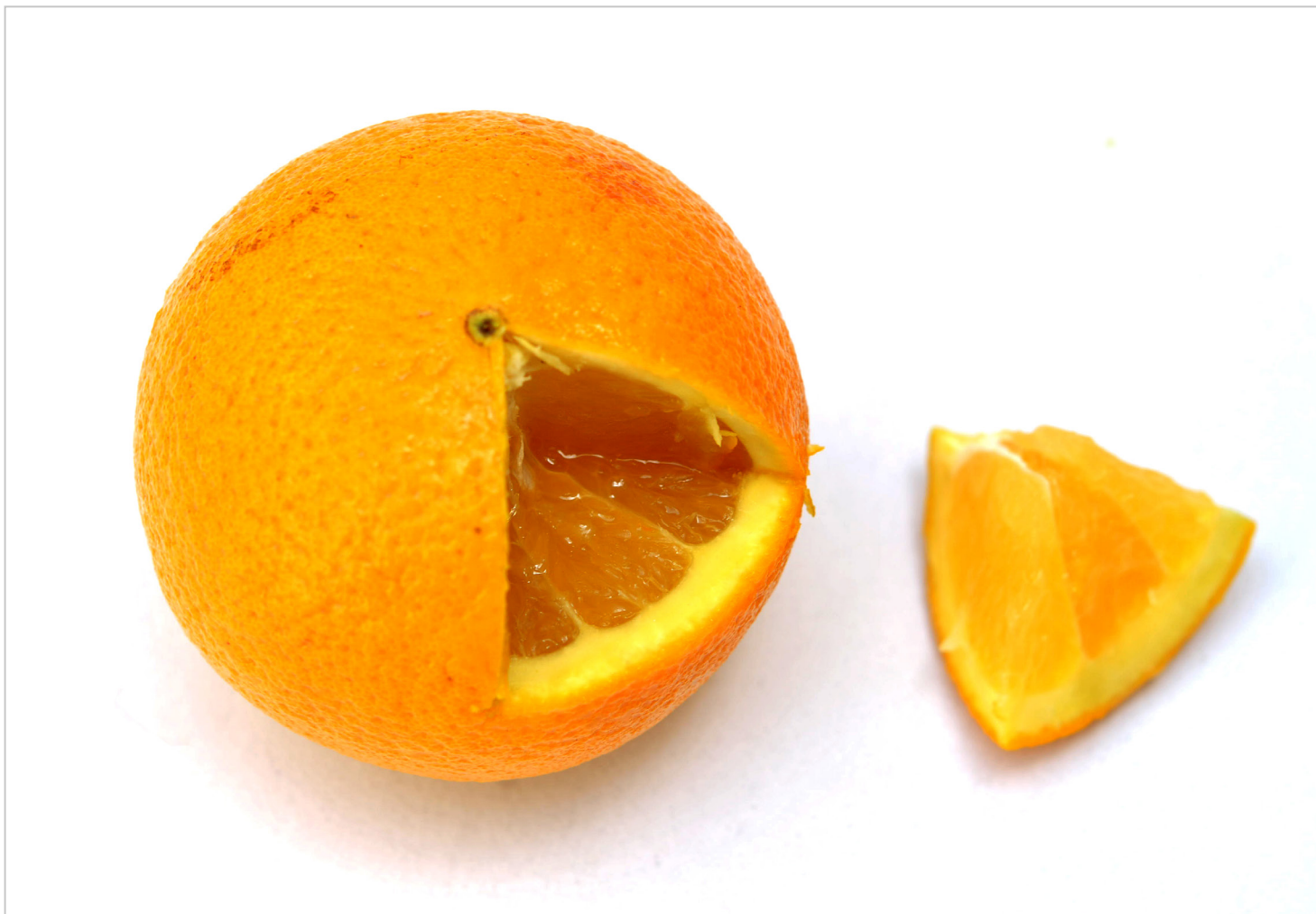


Figura 21. Corte en una naranja común (fruto del *Citrus sinensis*). La naranja y el pomelo (*Citrus paradisi*) al pertenecer al mismo género *Citrus* comparten la característica de porosidad en la cáscara.
Fotografía de David A. Torreblanca-Díaz.

Por otro lado, la configuración geométrica de las superficies biológicas presenta diferentes características. Algunos autores mencionan la probabilidad de emergencia que tienen unos patrones sobre otros en la naturaleza, pero aún no se han efectuado estudios sobre la probabilidad de emergencia de patrones geométricos y sus características en las superficies biológicas. Por ejemplo, Wagensberg (2005) comenta que la forma que predomina en la naturaleza viva e inerte es la esfera y las formas esferoides, debido a mecanismos isotrópicos, de homogeneidad de fuerzas y, por un deterioro uniforme, con el principal objetivo de proteger al individuo, y con los objetivos secundarios de contener, independizar, estabilizar estructuralmente, desplazar y autodefender (Patiño, 2018).

A pesar de lo anterior, no se sabe si específicamente en las superficies biológicas este patrón sigue siendo igual de predominante, o si hay algún tipo de patrón que prevalece o sobresale. Para este texto, estos patrones se analizarán configurados como redes, mallas y teselaciones, algunas regulares y otras irregulares, explicadas desde la geometría euclidiana y no euclidiana, respectivamente. Las redes son un ejemplo claro de la comprensión sistémica de la naturaleza porque exhiben relaciones interconectadas a partir de un patrón común a todo lo vivo, donde hay vida, dice Capra (2002), hay redes.

Para terminar, algunas investigaciones mencionan que los fenómenos que causan las geometrías pueden ser principios generales, mientras que otros plantean, desde la visión de los sistemas

complejos, que no hay fenómeno o proceso biológico que sea uno igual al otro, dependiendo siempre de las múltiples relaciones que establece el individuo con todo el entorno (Maldonado, 2011). Sin embargo, resulta práctico hacer uso de la agrupación de algunos principios con el fin de comprenderlos y utilizarlos en el diseño. Algunos de estos principios son, por ejemplo: el principio de la mínima acción, la entropía, la sinergia, el comportamiento sistémico, el caos, la complejidad y el mutualismo.

2.3. Morfología experimental

Por otra parte, además de la exploración geométrica que pueda hacer el diseñador de las formas y principios en la naturaleza con base en la biomimética y la bioinspiración, se puede adentrar en la exploración de las formas, los materiales y las tecnologías, a partir de sus propiedades, con el objetivo, por ejemplo, de construir repertorios, valorarlos perceptualmente y desarrollar geometrías novedosas y atractivas. Es por ello que actualmente la experimentación formal es uno de los referentes de trabajo más vigente, en el que los diseñadores utilizan diferentes herramientas, elementos y estrategias para el desarrollo de nuevas metodologías, tecnologías y productos innovadores. El advenimiento de los programas de computador que pueden programarse fácilmente para que los procesos de generación y transformación de la forma se hagan de manera más o menos automática, acompañados de las tecnologías de fabricación digital, han llegado para entregar nuevos recursos para la experimentación y soportar, en cierta medida, nuevos productos.

Esta experimentación, que debe entenderse como una de las estrategias que se presenta para el rompimiento de los paradigmas morfológicos, ha sido poco documentada desde lo científico y desde lo académico por el gremio del diseño industrial (Sierra & Patiño, 2005), y esto ha provocado que los productos resultantes se presenten más como piezas únicas de una novedad formal elevada, pero difícilmente serializables (Trujillo & Valencia, 2012).

La morfología experimental puede definirse como el resultado de un proceso activo y vivencial de exploración geométrica, en el que se hace uso de herramientas de tipo experimental, tanto físicas como digitales, para el despliegue de la configuración tridimensional de la materia (Valencia, 2009; Trujillo & Valencia, 2012). Adicionalmente, se puede vincular directamente con lo que ha denominado diseño experimental, con el que se hace referencia a la actividad proyectual orientada hacia la exploración y la experimentación motivada por la curiosidad sobre un asunto poco explorado (Tharp & Tharp, 2014). Es un proceso activo y vivencial en tanto la participación del diseñador es imprescindible y dinámica y se espera que, a medida que gane experiencia, se modifique de manera significativa y constructivista su propio proceso de diseño. Así mismo, se puede definir como una investigación experimental en la medida en que son procesos metódicos en los que

se identifican entradas, variables y salidas, pero que igualmente necesitan ser comprobados porque no se sabe con certeza cuál será el resultado (Patiño, 2019). En este campo de trabajo, no necesariamente se espera obtener objetos útiles o funcionales, sino, también, referentes morfológicos, repertorios o bibliotecas geométricas que permitan el desarrollo futuro de objetos industriales con un alto potencial de novedad formal (Valencia, 2009). Dentro del proceso experimental se utilizan técnicas que pueden catalogarse de dos clases: las físicas (analógicas) y las digitales (computacionales). En la **Figura 22** se puede ver, por ejemplo, una técnica física similar a la que utilizó Antoni Gaudí (1856-1926) para diseñar la Sagrada Familia en Barcelona. Gaudí dejaba colgar una serie de cadenas que, por la acción de la gravedad, se configuraban como curvas catenarias, mientras él las construía físicamente las observaba en un espejo en la parte inferior y las trazaba de manera invertida; estas curvas se constituyeron como los arcos estructurales que sostienen la Sagrada Familia. En la **Figura 23** se puede observar la aplicación de la catenaria como superficie estructural, en este caso, se sumergió un textil en yeso y se dejó secar mientras la gravedad lo modificó; después del secado, se invirtió y se configuró como un sistema estructural de superficie activa, es decir, una forma cuya superficie trabaja estructuralmente.



Figura 22. Técnica física similar a la utilizada por Gaudí en la Sagrada Família. Consta de cadenas con un espejo en la parte inferior. Maqueta de Valeria Londoño. Fotografía de Ever Patiño.

Así es que las técnicas físicas -analógicas-, representan el conjunto de actividades en las que el diseñador propicia la generación y transformación de la forma a partir del manejo de soportes físicos manualmente, que se estructuran desde el trabajo directo con fenómenos naturales. Las digitales, por su parte, hacen uso de herramientas computacionales de dibujo, modelación, cálculo, simulación, análisis, y fabricación. En ellas el uso de algoritmos y programas de modelación tridimensional se convierten en el principal esquema de trabajo e, inclusive, en algunos casos, se utiliza una combinación de los dos tipos de técnicas. Ver **Figura 23**, siguiente página.

La vivencia del diseñador, en función de la generación y transformación de la forma, puede darse de manera intuitiva, metódica o bajo una combinación de las dos. En la primera, el diseñador se enfrenta al proceso sin esperar controlar las consecuencias que tienen para la morfología los cambios en los parámetros de entrada. Esto es, se hacen cambios aleatorios sobre las variables que determinan la morfología y se espera el resultado, que puede ser o no motivo de análisis posterior. La manera metódica implica que, desde el principio del proceso, se conozcan las variables, sus características e implicaciones directas sobre la

morfología. Con esto en mente se diseña un experimento para validar si el impacto esperado fue el real obtenido. En la manera combinada, se utiliza una mezcla en la que se controlan unas de las variables y otras se dejan para que la incertidumbre actúe sobre ellas. De este modo, el resultado final, si bien se esperaba, tendrá características particulares que se produjeron por causas no controladas.

Combinando lo intuitivo y lo metódico, Frei Otto (1925 – 2015) definió el concepto *form-finding* como el proceso mediante el cual se desarrollan actividades experimentales de generación y transformación de la forma, a partir de la manipulación de algunas de las variables que influyen el procedimiento, con el fin de dejar que la incertidumbre haga parte crucial del proceso de desarrollo de las formas. El *form-finding* toma como base principios físicos como la gravedad, la tensión superficial, la densidad, la presión atmosférica, entre otros, y los aplica a una serie de soportes físicos para analizar los resultados obtenidos (Otto & Rash 2001). En la actualidad, estos conceptos que produjo la experimentación física migraron a las técnicas digitales con herramientas como el diseño algorítmico y la fabricación digital (Hensel & Menges, 2008).



Figura 23. Superficie formada por un textil impregnado en yeso, en el que la acción de la gravedad derivó en curvas catenarias. Luego de secado el textil se invirtió y se convirtió en una cáscara estructural. Fotografía de Ever Patiño.

De igual modo, el *form-finding* puede aplicarse en la búsqueda y transformación de formas concebidas como configuraciones globales, así también como en la búsqueda de superficies que se puedan utilizar en el diseño, puesto que las superficies no son la totalidad del material, pero son una parte que ayuda a proteger, proveer estructura, dar características comunicativas y sensitivas al material y cambiar, en definitiva, la manera como son percibidos los productos. Desde esta mirada son muy pocas las investigaciones que se preocupan por la temática desde el entendimiento de la relación entre los materiales, las superficies y el sentido del tacto de una manera sistemática y con el propósito de hacer frente a estos aspectos dentro de los proyectos de diseño. La morfología experimental estudia las superficies y las propiedades sensoriales de los materiales, definidas como aquellas propiedades que pueden ser percibidas por los seres humanos por medio de los sentidos y que logran evocar respuestas psicológicas y, algunas veces, fisiológicas. Algunas de las propiedades sensoriales son el color, la textura, el olor, el sonido y constituyen el centro de la apreciación estética del producto, lo que produce diferentes sensaciones que modifican, rápida e involuntariamente, la percepción que tenga el usuario de un producto.

2.4. Tecnologías de fabricación digital en el contexto de la Cuarta revolución industrial

Para terminar la fundamentación teórica del texto, se dará una introducción a las Tecnologías de Fabricación Digital, como una

herramienta que permite un acercamiento a la bioinspiración, a las superficies biológicas y a la morfología experimental desde el uso de las técnicas digitales. También se presentará el concepto de la Cuarta revolución industrial, como un fenómeno impulsado por las tecnologías digitales en interacción con un conjunto de tecnologías disruptivas con el fin de replantear los paradigmas del diseño, la fabricación y la producción.

Para comenzar, en la década de los 90 surgen las denominadas Tecnologías de Fabricación Digital (TFD), consideradas la evolución de las tecnologías CNC (Computer Numerical Control) o tecnologías de control numérico, originadas en la década de los 40. En ese momento, la Parsons Corporation en Michigan, Estados Unidos, logró fabricar piezas complejas para aeronaves, a través de una fresadora manejada computacionalmente y usando coordenadas numéricas (Groover, 1997).

Las TFD se pueden definir como un conjunto de tecnologías para materializar una pieza, prototipo, sistema o series cortas de productos, directamente de un archivo digital proveniente de un software CAD (Computer Aided Design), a través de diversas técnicas, materiales y acabados. Las TFD constituyen un sistema tecnológico integrado que vinculan el uso de software CAD, CAM (Computer Aided Manufacturing), CAE (Computer Aided Engineering) con hardware, tales como impresoras 3D, fresadoras por CNC, cortadoras láser, escáneres, entre otros dispositivos. Actualmente, las TFD ofrecen ventajas técnicas sin

precedentes para diversos ámbitos, tales como el diseño industrial, diseño de vestuario, arquitectura, ingeniería, medicina, por mencionar algunos. Algunas de las ventajas son: la fabricación de piezas poliméricas sin moldes, objetos personalizados, alto nivel de precisión, materialización de geometrías complejas, fabricación de ensamblajes armados, integración de diferentes materiales en un solo proceso (multimaterialidad), fabricación remota, entre otros (Torreblanca, 2016).

Las máquinas de fabricación digital se pueden clasificar de diferentes maneras, el modo más utilizado considera el método para obtener piezas. Según este criterio se dividen en dos categorías: tecnologías de fabricación digital sustractiva y tecnologías de fabricación digital aditiva (Fernández Vicente, 2012). Las tecnologías de fabricación sustractiva fueron las primeras tecnologías de fabricación digital creadas, se caracterizan por el corte o desbaste de material a utilizando archivos CAD, que en un principio eran en 2D (dos dimensiones), luego se fueron utilizando archivos CAD 3D (en tres dimensiones). Algunos ejemplos de estas tecnologías son: fresadoras CNC, tornos CNC, centros de mecanizado CNC, corte láser por agua y por plasma. Las tecnologías de fabricación sustractiva, aunque han evolucionado, presentan diversas desventajas respecto a las tecnologías aditivas, por ejemplo, tienen limitaciones geométricas según los ejes y rangos de libertad de la máquina. De igual modo, el desbaste de material deriva en un gasto considerable de energía y de herramientas. En la **Figura 24** y **25** (siguiente

página) se pueden ver experimentaciones morfológicas materializadas a través de una fresadora CNC de tres ejes.

Por otra parte, las tecnologías de fabricación digital aditiva son las más recientes en su tipo. Según la ASTM (American Society for Testing and Materials) se basan en un proceso de adición de capas de material que se van adhiriendo secuencialmente, una tras otra, hasta obtener el objeto físico correspondiente al archivo CAD 3D, enviado previamente desde una computadora. Según Gibson, Rosen, & Stucker (2014) la fabricación aditiva, o popularmente conocida como impresión 3D, es un proceso utilizado en diferentes industrias para crear rápidamente una parte, pieza o sistema, antes de la fabricación de la versión comercial del producto. Las tecnologías de fabricación digital aditiva son las más avanzadas y con mayores ventajas técnicas, en comparación con los procesos tradicionales, incluso, son superiores técnicamente a las tecnologías de fabricación digital sustractiva. Por ejemplo, son las únicas que hacen posible fabricar mecanismos funcionales en una sola operación con sus ensamblajes ya armados, geometrías complejas imposibles de ser fabricadas con otras técnicas y acabados superficiales que involucran la impresión de imágenes a través de tintas en el mismo proceso. Lefteri (2008) asevera que las tecnologías de fabricación digital aditiva tienen amplias ventajas, por ejemplo, poseen más libertad para obtener geometrías complejas que no tienen equivalentes en otros procesos. (Ver **Figura 26**).

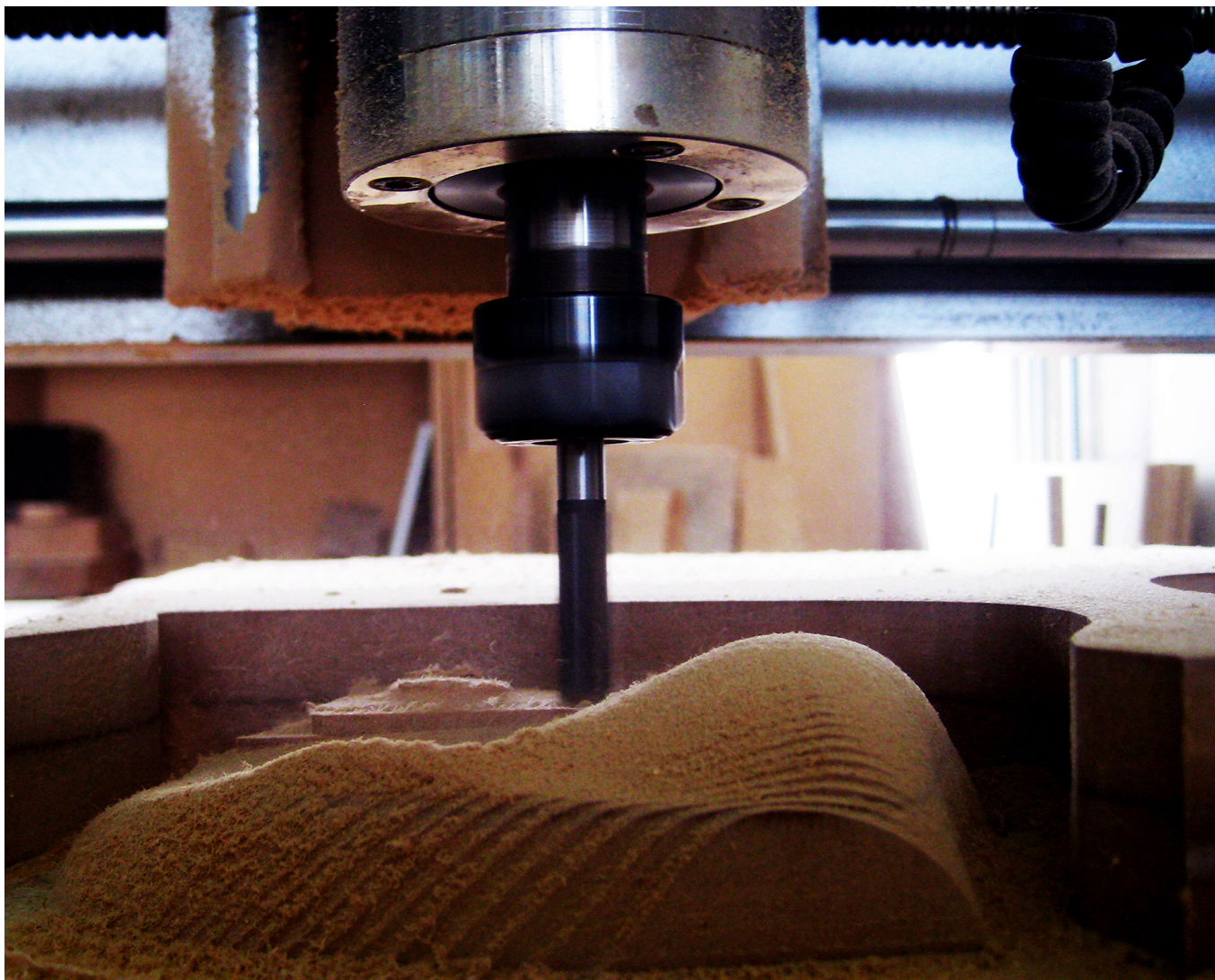


Figura 24.
*Experimentación
morfológica
materializada a través
de fresado por CNC de
tres ejes, material MDF.
Modelación, fabricación
y fotografía de David A.
Torreblanca-Díaz.*

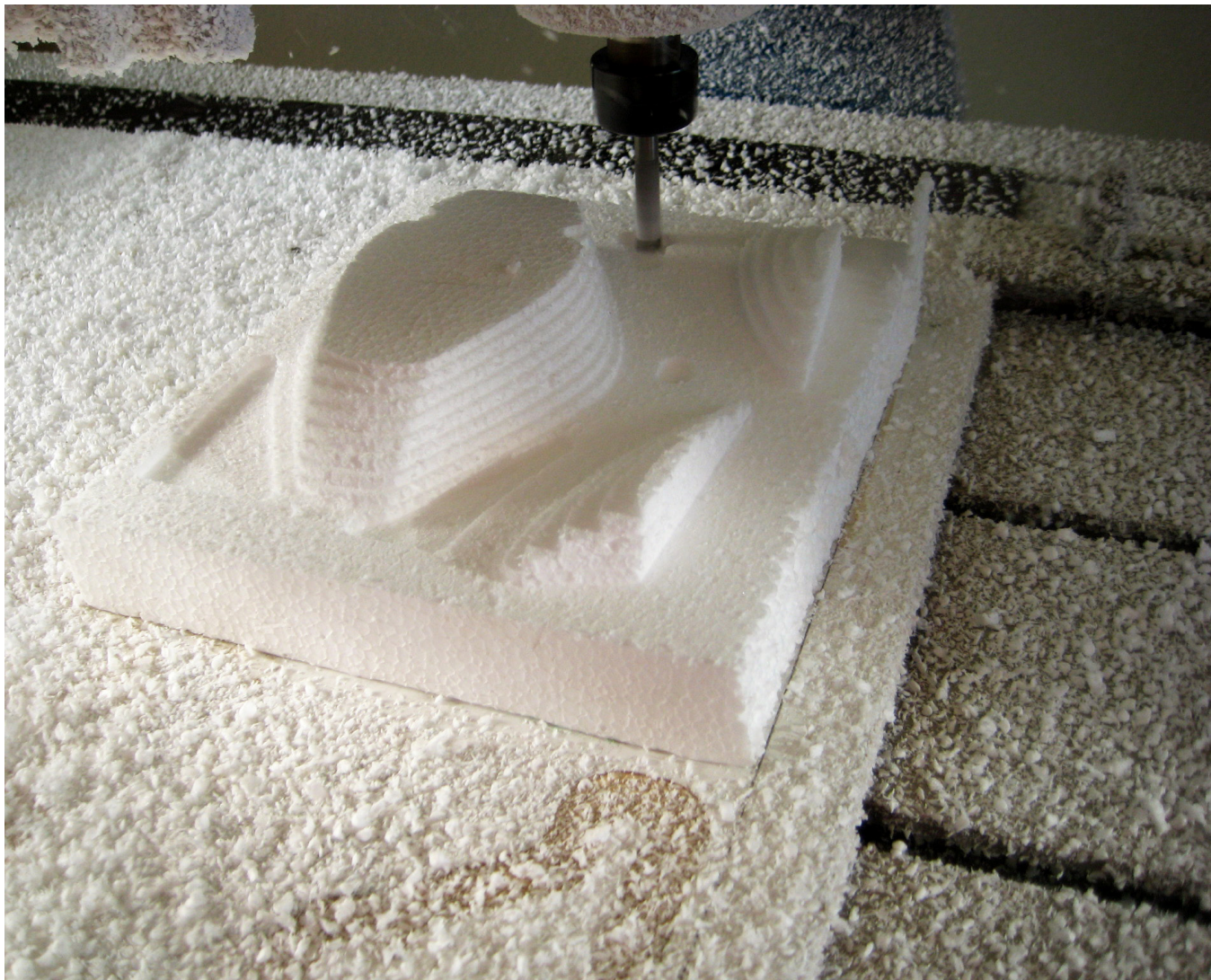


Figura 25.
Experimentación morfológica materializada a través de fresado por CNC de tres ejes, material espuma de poliestireno de alta densidad (30 kg x mt³). Modelación, fabricación y fotografía de David A. Torreblanca-Díaz.



Figura 26. Ejemplo de tecnologías de fabricación aditiva, a partir de un proceso abstracción y experimentación biorreferenciado. Trabajo de la estudiante de Diseño Industrial Karen Rodríguez Castrillón y con la asesoría de la profesora Elsie Arbeláez. Fotografía de David A. Torreblanca-Díaz.

Las TFD han tenido un alto impacto en las disciplinas proyectuales porque cambiaron radicalmente el proceso de diseño y afectaron la manera de idear, representar y validar propuestas. Esto ha ocurrido, en gran medida, por la integración entre las TFD y software CAD paramétricos y asociativos, lo que hace posible desarrollar entidades más complejas, dinámicas y adaptativas, capaces de responder a diferentes estímulos y funciones, en entornos de trabajo más flexibles e inteligentes para dar respuestas eficientes y eficaces a los requerimientos de cada proyecto. La aparición de los software paramétrico-asociativos ha sido clave en la evolución del diseño en contextos digitales, en tanto propone nuevos entornos, herramientas y modos de trabajo. También, se puede decir que están planteando nuevos paradigmas metodológicos y cognitivos porque inciden directamente en una amplia gama de ámbitos como la arquitectura, el diseño industrial, la ingeniería y el diseño de vestuario (Oxman, 2017).

En estas últimas décadas, simultáneamente con la aparición de las TFD y los software CAD paramétricos, se observa la irrupción de otras tecnologías: los nanomateriales que originan el diseño de materiales desde sus propiedades moleculares; los materiales inteligentes (smart materials), que responden a estímulos externos; el internet de las cosas (Internet of things), que permite la comunicación entre humanos y objetos, incluso entre objetos, emerge la robótica colaborativa, la integración entre software de

alto desempeño y computadores con capacidad para procesar grandes volúmenes de datos en forma responsiva (Big Data), la evolución creciente de la inteligencia artificial.

Estas tecnologías nacen simultáneamente con fenómenos socio-culturales, como la cultura maker, que plantea que cualquier persona común puede acceder con facilidad, y a un bajo costo, a diferentes tecnologías para fabricar casi cualquier cosa, para resolver problemas cotidianos y locales con tecnologías digitales globales, lo que es potenciado con una infinidad de recursos digitales, por ejemplo, el open source, una idea de tener acceso libre y gratuito en internet a diferentes herramientas, como software, plug-in, modelos 3D, planos, entre otros recursos.

En este contexto dinámico y complejo, se está gestando el fenómeno que se ha denominado la Cuarta revolución industrial, una revolución que sitúa en el centro a las tecnologías digitales: replantea los paradigmas para el diseño, la fabricación y la producción, amplía las posibilidades de innovación, impacta las sociedades y la economía mundial. Se plantean nuevos escenarios con la implementación de fábricas inteligentes, en plataformas que integran entornos físicos y virtuales, en modelos de trabajo colaborativo, flexibles y multidisciplinarios para dar soluciones a problemáticas locales con tecnologías globales (Schwab, 2016).

3. Caracterización de patrones morfológicos

Ya en este punto y, con la intención de comenzar a exponer la metodología y resultados del proyecto, se presenta el proceso de caracterización que se llevó a cabo para estudiar los patrones morfológicos bioinspirados con los que, posteriormente, se experimentó formalmente, con base en un modelo asociativo basado en un software paramétrico y con las TFD.¹

Como se vio, el desarrollo de superficies funcionales obtenidas haciendo uso de la *bioinspiración* de texturas presentes en la naturaleza, ha despertado interés por las diversas aplicaciones que, desde este ejercicio, se puedan derivar. Como ejemplo se puede evidenciar el trabajo desarrollado por Tsipenyuk y Varenberg (2014), quienes analizaron el efecto de texturas hexagonales presentes en la piel de los anfibios sobre el coeficiente de fricción,

1 El proceso completo de caracterización está descrito en Patiño, E., Torreblanca-Díaz, D. A., Valencia-Escobar, A., & Zuleta, A. (2019). Classification, characterization and abstraction of vegetable surfaces for design. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 14(2), 131-146.

esto con el fin de usar dicha textura en la optimización del diseño de máquinas de afeitar. A pesar de esto, es poca la información que da cuenta de un estudio sistemático que caracterice detalladamente el ejercicio de abstracción de diversidad de patrones de texturas presentes en la naturaleza, específicamente en plantas y hongos, de modo que estos puedan ser aplicados en ejercicios de diseño biológicamente informado, en particular, en procesos de bioinspiración.

Por otro lado, dentro del proceso de diseño bioinspirado, es habitual dejarle la tarea al diseñador de abstraer visualmente el modelo natural sin fijar objetivamente límites o condiciones. Esto ocasiona varios problemas relacionados con la memoria, la experticia y los diferentes estímulos externos que pueda tener el diseñador, determinando variaciones significativas de los resultados de la abstracción entre los investigadores. Es por eso que se planteó una metodología de enfoque cualitativo para la abstracción de texturas naturales superficiales basada en el análisis y síntesis geométrica distribuida en tres fases: (i) observación preliminar, (ii) clasificación de patrones, y (iii) abstracción de patrones.

3.1. Observación preliminar

En esta primera fase se delimitó el objeto de estudio en especies del reino vegetal y *Fungi* del Valle de Aburrá, con el objetivo de facilitar el registro fotográfico y la posterior recolección de muestras. El Valle de Aburrá es una subregión de Colombia ubicada en el medio de la Cordillera Central de los Andes, compuesto por 10 municipios, entre ellos: Medellín. Se diseñó un instrumento de observación con cuatro aspectos principales: información básica, clasificación de plantas y hongos, clasificación geométrica, registro fotográfico y recomendaciones. En la información básica se registró: nombre del fotógrafo, fecha, lugar del registro, nombre común, nombre científico y nombre de los archivos. En la clasificación de plantas y hongos se registró información relacionada con la morfología y se extrajo la textura: hojas, cortezas y tallos, flores, frutos y semillas, musgos, líquenes y hongos. En la clasificación geométrica se utilizó la categorización que se puede ver en la **Figura 27** (siguiente página), en la que se describen gráficamente las formas geométricas desde la línea recta y la línea curva, que ayudaron después a clasificar los patrones encontrados.

El registro fotográfico se llevó a cabo con tres cámaras con las siguientes características: Canon 7D con lente 17-40 mm, Canon Eos Rebel T5 con lente macro de 100 mm y Canon 60D con lente 18-55 mm. La captura se hizo siempre perpendicular a la superficie; en los casos en los que era viable tomar una muestra se recolectó para registrarla en un ambiente controlado, y en los casos en los que se dificultó la recolección por razones de tamaño o de cuidado ambiental, se registraron en sitio. Para facilitar el dimensionamiento y el análisis de las muestras se ubicó una regla en una de las fotografías y se dispusieron las muestras en fondos blancos con entrada de luz natural para no cambiar los colores y facilitar un contraste adecuado entre las luces y las sombras de las fotografías. Igualmente, se usaron los mismos parámetros de composición, iluminación, contraste, enfoque y resolución para garantizar la comparación y el análisis de las fotografías de manera similar. (Ver **Figuras 28 y 29**).

Formas en la naturaleza

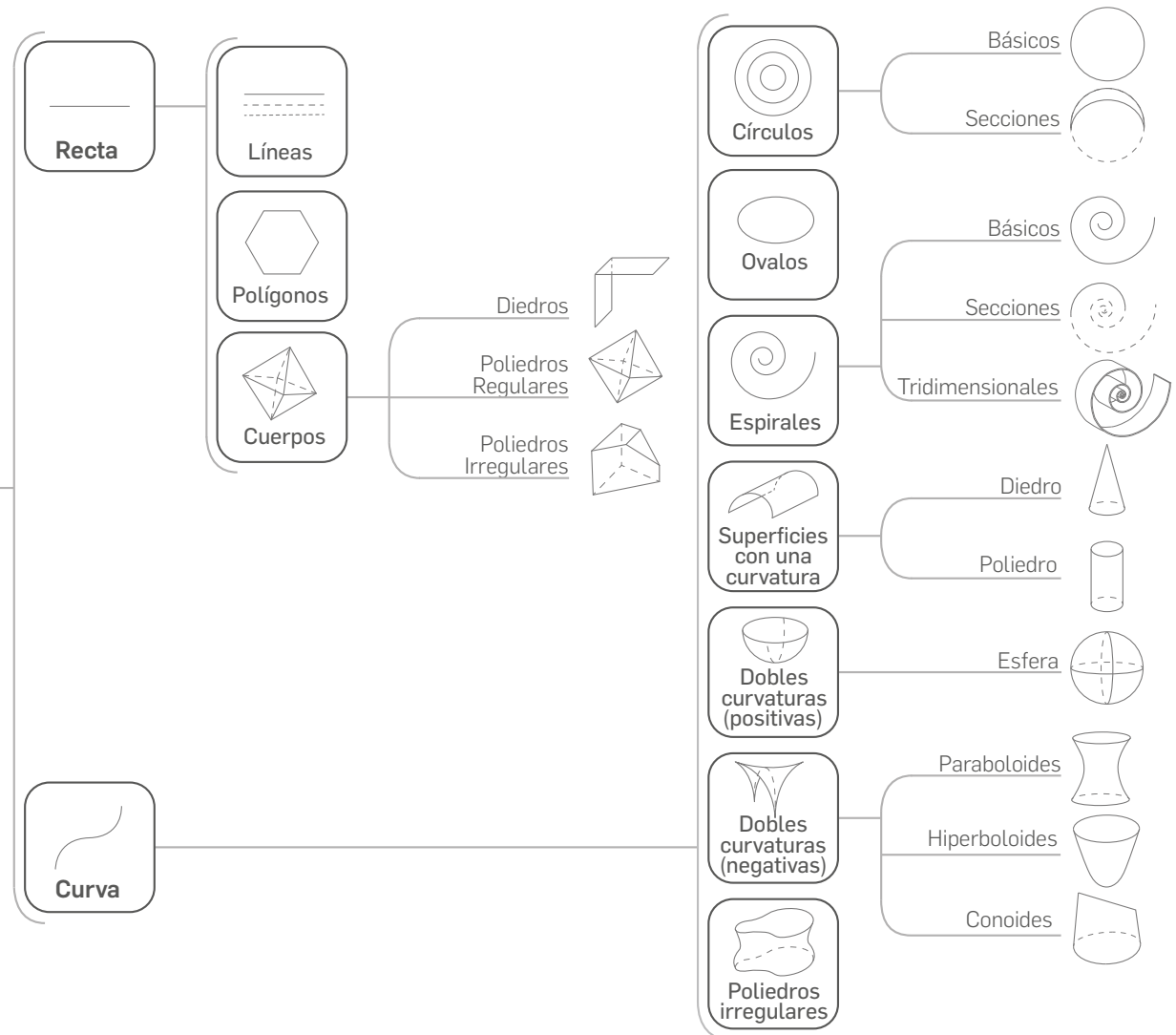


Figura 27. Clasificación general de patrones geométricos en la naturaleza, basado en Patiño & Arbeláez, 2009. Esquema de los autores. Dibujo de Sara Restrepo Osorio.



Figura 28. Proceso de observación y registro fotográfico. Fotografía de Silvia Gallego.



Figura 29. Registro fotográfico y análisis en sitio. Fotografía de Silvia Gallego.

3.2. Clasificación de patrones

En la fase de observación se registraron fotográficamente 225 especies biológicas. Por ello fue necesario, en un primer momento, depurar la información y evaluar la calidad fotográfica. Se desecharon las fotografías que no cumplieran con los criterios de iluminación, enfoque, contraste suficiente para visualizar las texturas y, sobre todo, que no presentaran información visual relevante. En total, quedaron 136 modelos naturales.

Los 136 modelos naturales seleccionados se agruparon como se puede ver en la **Figura 30** de manera manual, se crearon grupos con el objeto de determinar sus características morfológicas predominantes, para lo que se utilizó la clasificación propuesta en la **Figura 31** cruzada por las clasificaciones de patrones formales en la naturaleza que proponen diferentes autores como Wagensberg (2005), Stevens (1987), Otto (1988), Aranda & Lasch (2006), Patiño & Arbeláez (2009). Estas clasificaciones responden, en su mayoría, a patrones geométricos predominantes en todos los reinos de la naturaleza, en todo tipo de estructuras y para todo tipo de funciones. En este caso específico, por ser el objeto de estudio las texturas presentes en las superficies de plantas y hongos, la preponderancia de uno y otro patrón cambió considerablemente. Esto hizo que se necesitara una nueva clasificación, que no es más que un nuevo ordenamiento de las categorías propuestas por los autores que se mencionaron anteriormente (Patiño, Torreblanca, Valencia-Escobar & Zuleta, 2019).



Figura 30. Proceso de agrupación de las texturas. Fotografía de David A. Torreblanca-Díaz.

Se crearon seis categorías con sus respectivas subcategorías que se pueden ver en la **Figura 31** (siguiente página). Las categorías responden a una agrupación de acuerdo con las características morfológicas más relevantes, estas son: (i) geometrías básicas, (ii) geometrías recíprocas, (iii) relieves, (iv) ramificaciones, (v) pliegues y (vi) textura visual. Las categorías no son excluyentes, sino, por el contrario, es factible que una textura esté ubicada en una categoría, pero gracias a la multifuncionalidad de las superficies biológicas, pueda incluir propiedades que respondan con menor relevancia visual a otra categoría (Patiño, Torreblanca, Valencia-Escobar & Zuleta, 2019):

(i) Las geometrías básicas son las morfologías que se pueden describir desde los conceptos básicos de geometría euclidiana. Hacen parte de esta categoría: las líneas, los rombos, los círculos y los diagramas Voronói. (Ver **Figura 32**).

(ii) Las geometrías recíprocas son las estructuras de módulos que se repiten y se apoyan unos a otros. Esta categoría se dividió en: abiertas o cerradas. (Ver **Figura 33**).

(iii) Los relieves son geometrías que se proyectan desde una superficie base hasta un punto por fuera de ella. Se diferencia de la categoría de pliegues en que en esta hay una red de puntos separados entre sí desde donde se proyectan los polígonos de la superficie base. Se dividió en: lineales, sinclásticas y conoides. (Ver **Figura 34**).

(iv) Las ramificaciones son bifurcaciones que se alejan de un centro o una línea central. Esta categoría se dividió en ramificaciones básicas y fractales, las primeras son, en su totalidad, nervaduras de hojas y los fractales son composiciones tridimensionales de un líquen. (Ver **Figura 35**).

(v) Los pliegues son modelos naturales similares a los relieves, pero con la diferencia de que la proyección sobre la superficie no son puntos sino líneas continuas regulares e irregulares. Hacen parte de la categoría: pliegues sinuosos, pliegues rectos regulares y pliegues irregulares. (Ver **Figura 36**).

(vi) La textura visual son modelos que no presentan cambios tridimensionales en la textura. Están presentes en un volumen, pero la textura está formada por cambios de pigmentación. La categoría está dividida en: círculos, líneas con simetrías y patrón irregular. (Ver **Figura 37**).

Clasificación morfológica de texturas

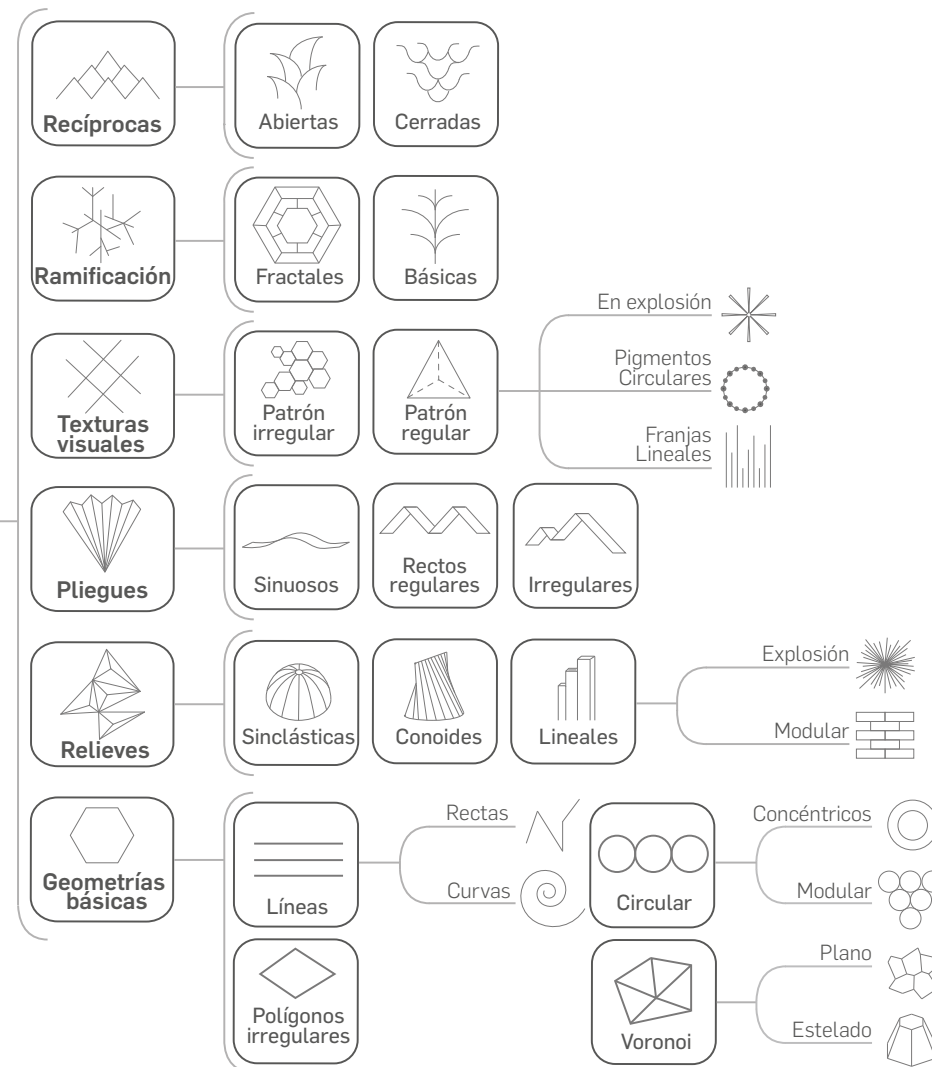


Figura 31. Clasificación de patrones naturales. Esquema de los autores.
Dibujo de Sara Restrepo Osorio.

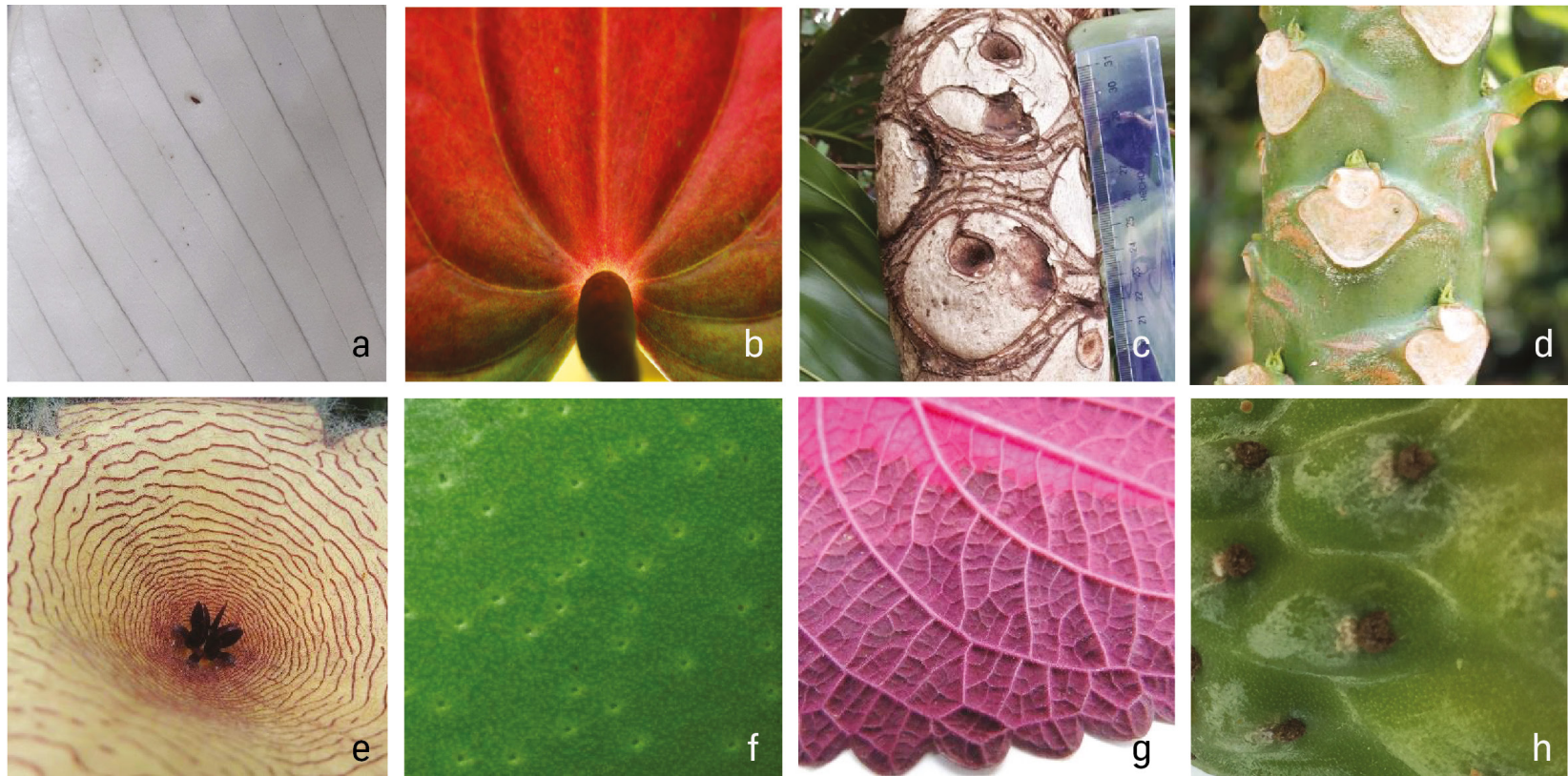


Figura 32. Geometrías básicas. (a) línea recta, (b) línea curva en explosión, (c) y (d) rombos, (e) circular concéntrica, (f) circular modular, (g) Voronoi plano, (h) Voronoi estelado. Fotografías de los estudiantes del semillero de investigación Morfolab, UPB.



Figura 33. Geometrías recíprocas. (a) y (b) abiertas, (c) y (d) cerradas. Fotografías de los estudiantes del semillero de investigación Morfolab, UPB.

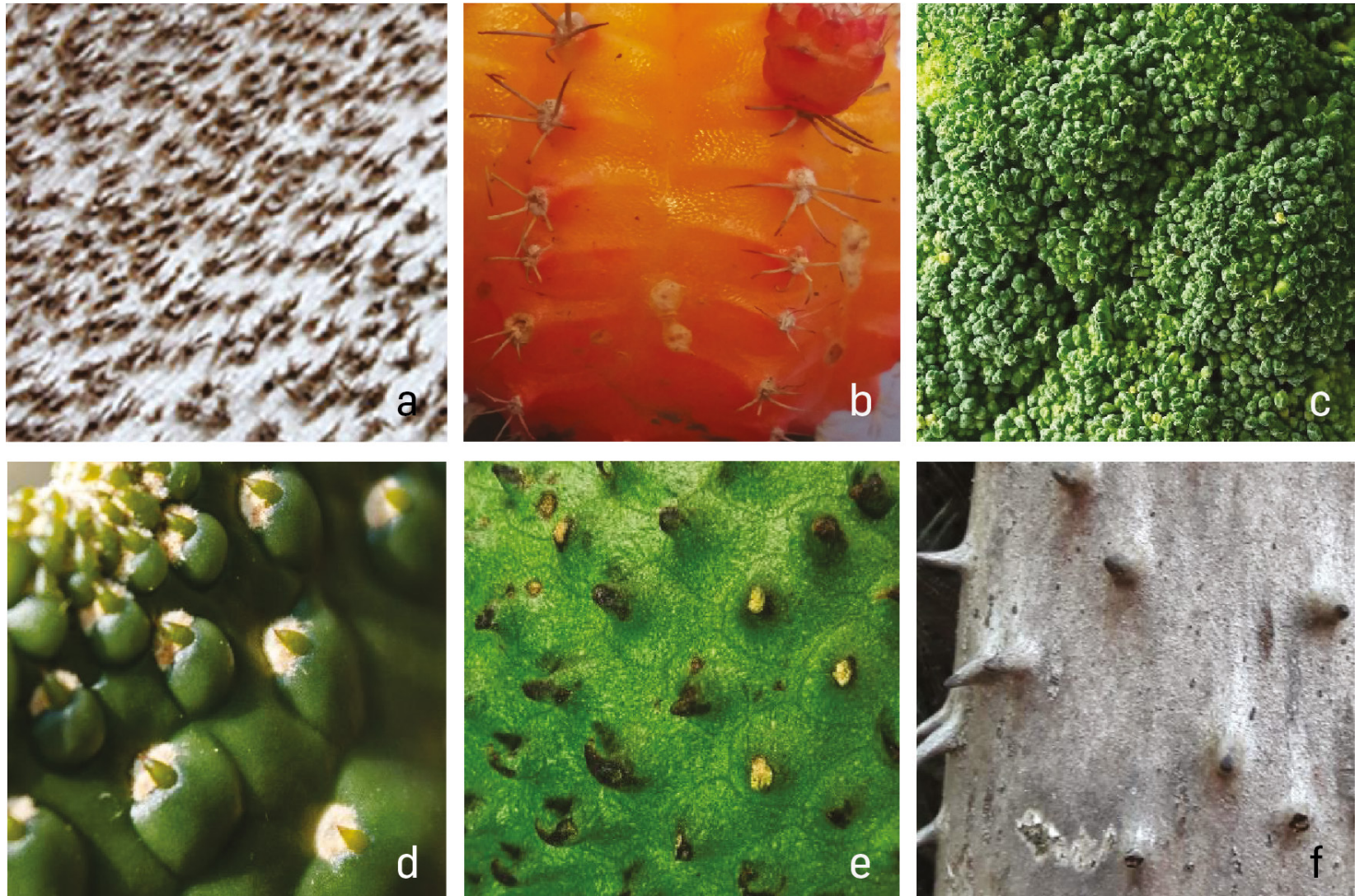


Figura 34. Relieves. (a) lineal modular, (b) lineal en explosión, (c) y (d) sinclásticas, (e) y (f) conoides. Fotografías de los estudiantes del semillero de investigación Morfolab, UPB.



Figura 35. Ramificaciones. (a) y (b) básicas, (c) fractales. Fotografías de los estudiantes del semillero de investigación Morfolab, UPB.

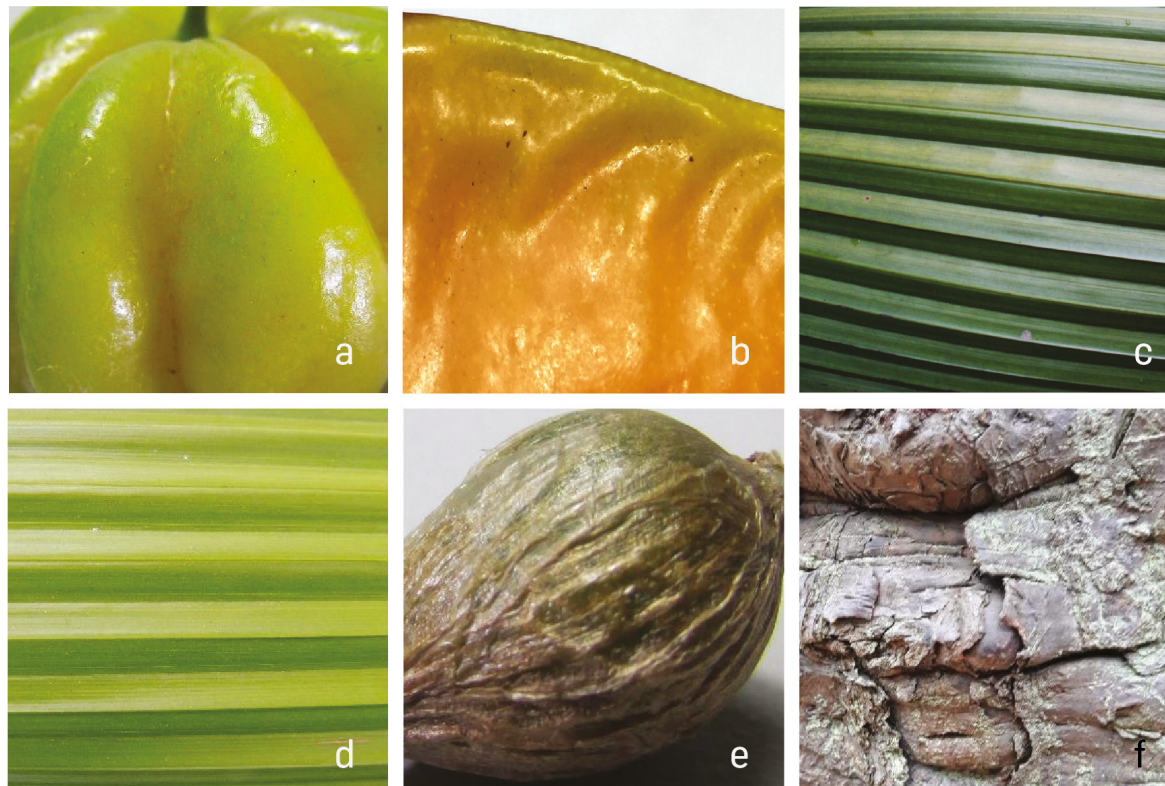


Figura 36. Pliegues. (a) y (b) sinuosos, (c) y (d) rectos regulares, (e) y (f) irregulares. Fotografías de los estudiantes del semillero de investigación Morfolab, UPB.

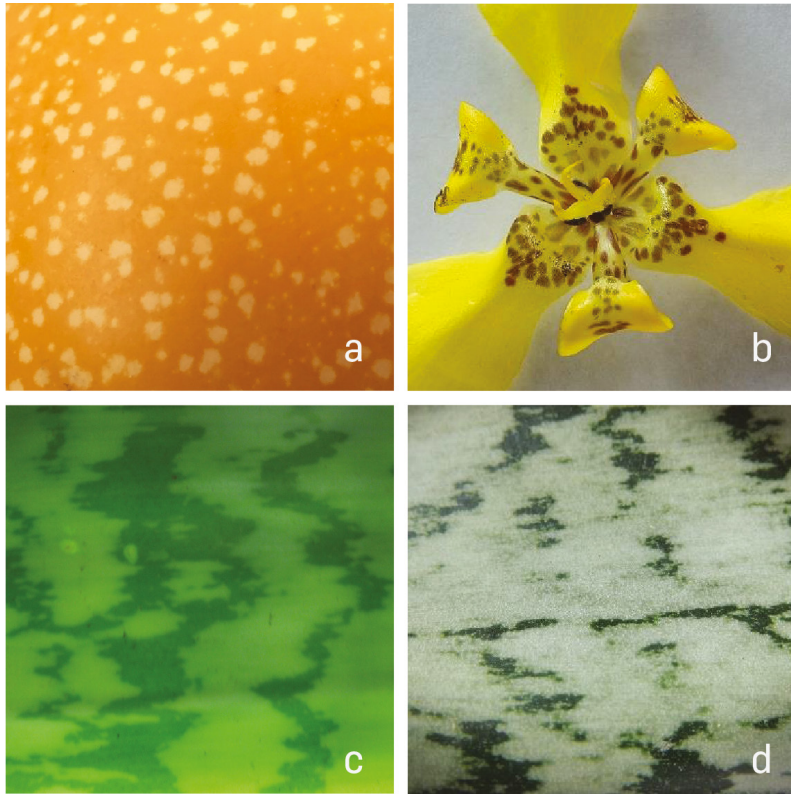


Figura 37. *Textura visual. (a) y (b) patrón regular; (c) y (d) patrón irregular. Fotografías de los estudiantes del semillero de investigación Morfolab, UPB.*

En la **Figura 38** (siguiente página) se observa un cuadro con la síntesis de todas las especies recolectadas. Se evidencia la alta frecuencia de la emergencia de unos patrones con respecto a otros, pero, como no es el objetivo del proyecto verificar este aspecto, se agruparon y clasificaron todos por igual, sin importar la presencia de los modelos en las categorías determinadas.

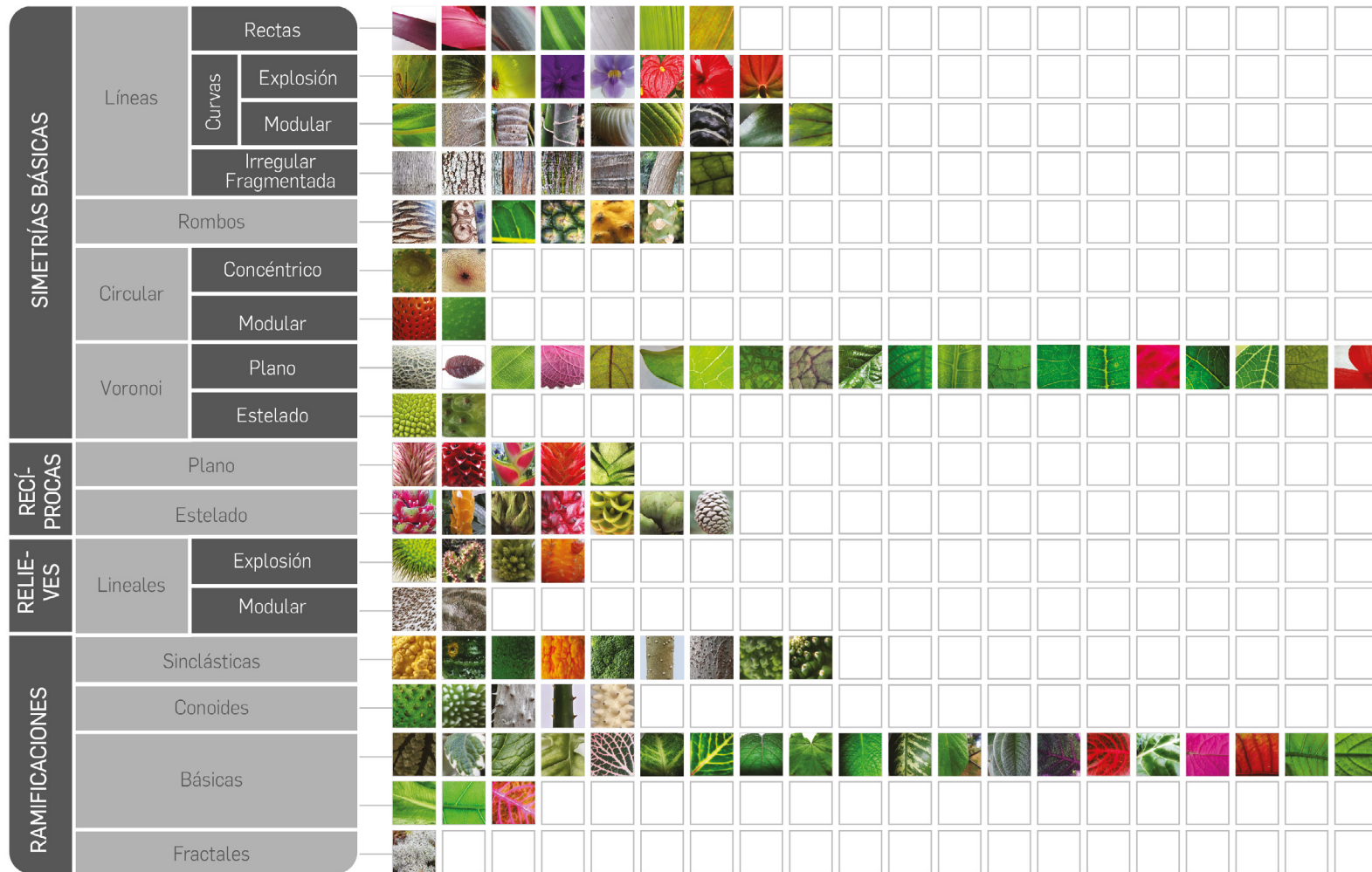


Figura 38. Cuadro de síntesis de las especies recolectadas. Esquema de los autores.
Fotografías de los estudiantes del semillero de investigación Morfolab, UPB.

PLIEGUES	Sinuosos																				
	Rectos Regulares																				
	Irregulares																				
TEXTURA VISUAL	Patrón regular	Franjas Lineales																			
		Pigmentos circulares																			
		Explosión																			
	Patrón irregular																				

Figura 38. (Continuación). Cuadro de síntesis de las especies recolectadas. Esquema de los autores. Fotografías de los estudiantes del semillero de investigación Morfolab, UPB. Dibujo de Sara Restrepo Osorio.

Posteriormente a la clasificación de los patrones, se seleccionaron algunos para ser abstraídos desde una prueba consensual con seis expertos en morfología y bioinspiración. Los profesionales evaluaron cada una de las especies con los criterios y la escala Likert de la **Figura 39** (siguiente página), y seleccionaron 24 especies que se pueden ver de la **Figura 40** a la **60**: *A. Comosus Variegatus*, *Anthurium andraeanum*, *Musa coccinea*, *Microsorium musifolium*, *Phoenix canariensis*, *Stapelia grandiflora*, *Fragaria ananassa*, *Cucu-*

mis melo, *Artocarpus heterophyllus*, *Costus costaceae*, *Pinus pinea*, *Nephelium lappaceum*, *Bismarchia nobilis*, *Spathiphyllum Walliss*, *Justicia brandegeana*, *Icmadophila adversa*, *Eugenia uniflora*, *Washingtonia robusta*, *Blighia sávida*, *Sansevieria trifasciata* y cuatro variedades de *Cucurbita pepo* convar. *microcarpina*. Con la selección de las especies no se buscó abarcar todas las categorías sino identificar aquellas especies que pudieran presentar mayor potencial de aplicación en el diseño de producto, según los criterios definidos.

Criterios para la selección de modelos naturales.

A. Frecuencia:

Definida por Jorge Wagensberg (2004) como una de las propiedades exteriores de las formas y los objetos, la frecuencia es sencillamente el número de individuos que comparten propiedades morfológicas similares. Está relacionada también con la diversidad de las formas, es decir, las variaciones presentes en los modelos que comparten propiedades. Con el objetivo de seleccionar modelos poco explorados, para este caso, mientras menos frecuente, mayor será su valoración.

B. Perspectiva de utilidad:

La doctora Baumeister (2014) determina como uno de los elementos esenciales de la biomimética la posibilidad de construir puentes entre modelos naturales y sus posibles aplicaciones, estos se dan a través del reconocimiento de la oportunidad de utilización de ideas de la naturaleza para obtener algún beneficio físico y/o material.

C. Atracción visual:

Igualmente, la profesora Baumeister(2014)menciona como otro elemento igual de relevante la conexión que ella denomina "estética", definida como la relación que permite al observador sentirse atraído por un modelo natural. Baumeister afirma que es muy difícil encontrar una persona que sostenga que la naturaleza es "fea", ya que dicha atracción y elegancia parece estar muy por encima de los pensamientos filosóficos naturalistas, que sitúan a la naturaleza como principio humanitario primigenio, y por ello, bella, per se.

Escala Likert:



Figura 39. Criterios y escala Likert de selección de patrones. Esquema de los autores. Dibujo de Sara Restrepo Osorio.



Figura 40. Hoja de la *A. Comosus Variegatus*. Fotografía de Silvia Gallego y Carolina Cardona.



Figura 41. Pétalo del *Anthurium andraeanum*. Fotografía de Silvia Gallego y Carolina Cardona.



Figura 42. Hoja de la *Musa coccinea*. Fotografía de Silvia Gallego y Carolina Cardona.



Figura 43. Hoja del *Microsorium musifolium*. Fotografía de Silvia Gallego y Carolina Cardona.



Figura 44. Tallo del *Phoenix canariensis*. Fotografía de Silvia Gallego y Carolina Cardona.



Figura 45. Flor de la *Stapelia grandiflora*. Fotografía de Silvia Gallego y Carolina Cardona.



Figura 46. Fruto de la *Fragaria ananassa*. Fotografía de Silvia Gallego y Carolina Cardona.

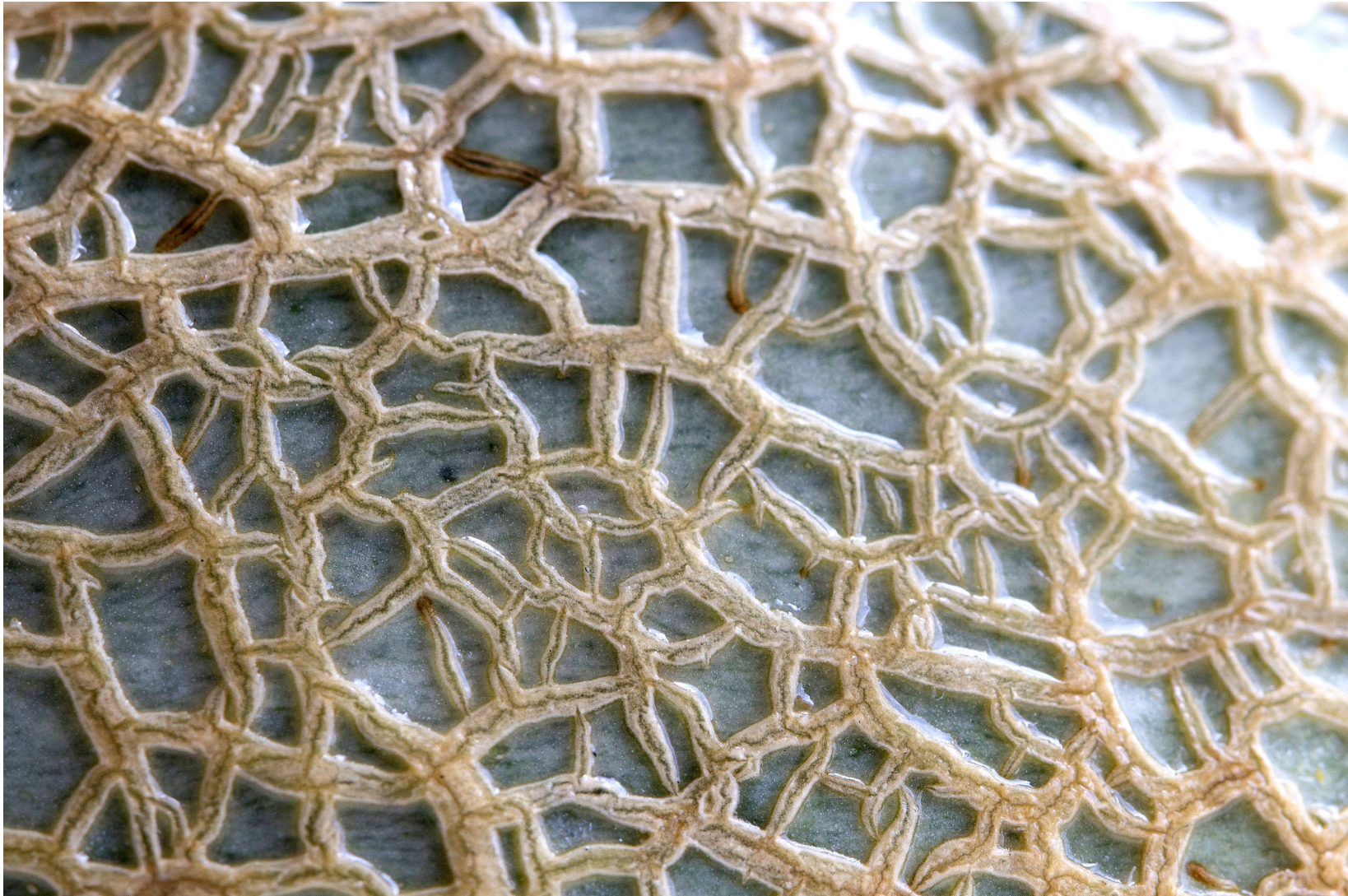


Figura 47. Fruto del *Cucumis melo*. Fotografía de Silvia Gallego y Carolina Cardona.



Figura 48. Fruto del *Artocarpus heterophyllus*. Fotografía de Silvia Gallego y Carolina Cardona.



Figura 49. Flor del *Costus costaceae*. Fotografía de Silvia Gallego y Carolina Cardona.



Figura 50. *Porta semilla de la Pinus pinea. Fotografía de Silvia Gallego y Carolina Cardona.*



Figura 51. Semilla del *Nephelium lappaceum*. Fotografía de Silvia Gallego y Carolina Cardona.



Figura 52. Hoja de la *Bismarckia nobilis*. Fotografía de Silvia Gallego y Carolina Cardona.

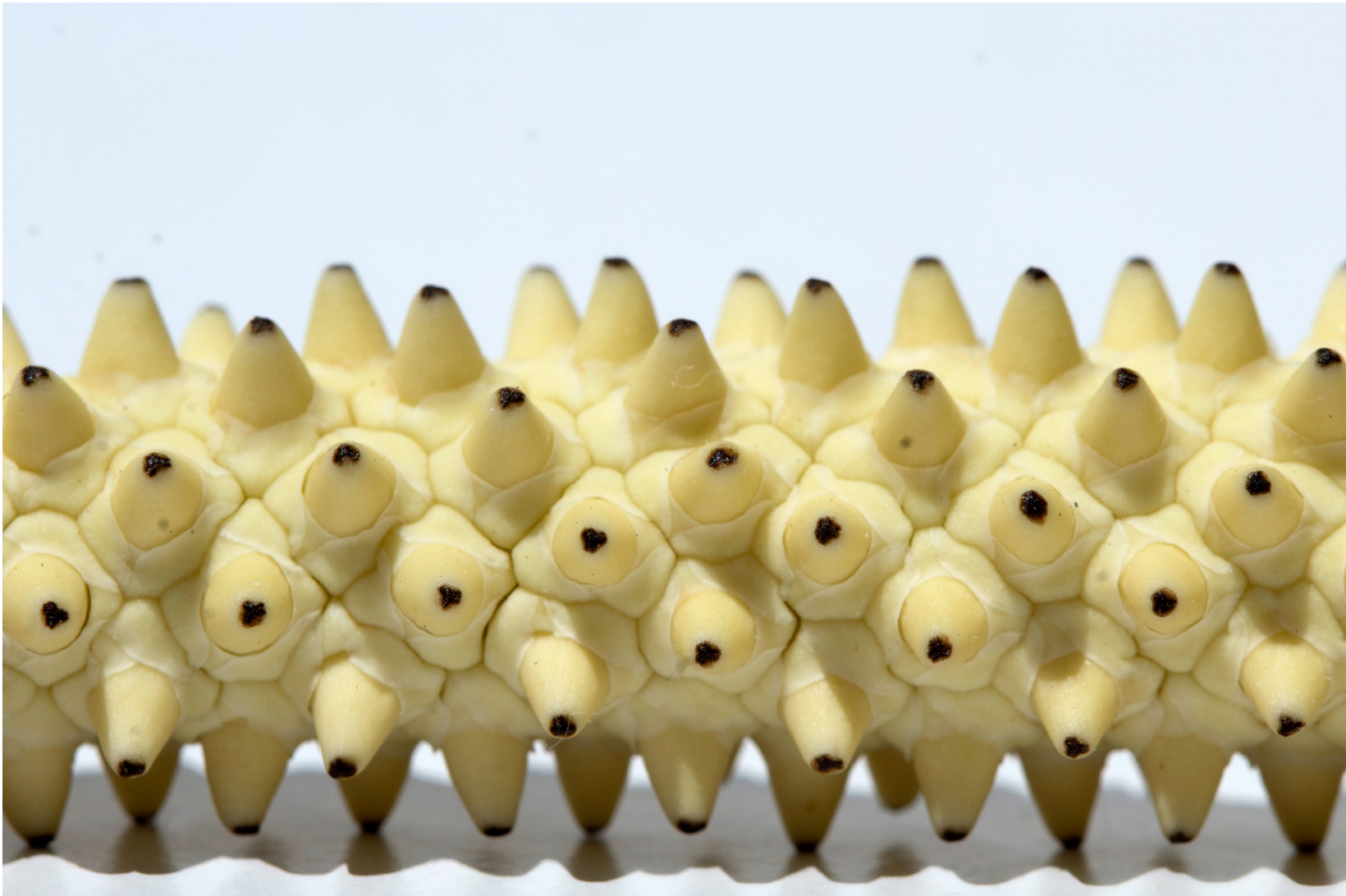


Figura 53. Pistilo de la flor de la *Spathiphyllum Wallisii*. Fotografía de Silvia Gallego y Carolina Cardona.



Figura 54. Hoja de la *Justicia brandegeana*. Fotografía de Silvia Gallego y Carolina Cardona.



Figura 55. *Liquen Icmadophila adversa*. Fotografía de Silvia Gallego y Carolina Cardona.



Figura 56. Fruto de la *Eugenia uniflora*. Fotografía de Silvia Gallego y Carolina Cardona.



Figura 57. Corteza del tallo de la *Washingtonia robusta*.
Fotografía de Silvia Gallego y Carolina Cardona.



Figura 58. Hoja de la *Blighia sávida*. Fotografía de Silvia Gallego y Carolina Cardona.



Figura 59. Hoja de la *Sansevieria trifasciata*. Fotografía de Silvia Gallego y Carolina Cardona.



Figura 60. Fruto de una de las variedades de la Cucurbita pepo convar. Microcarpina. Fotografía de Silvia Gallego y Carolina Cardona.

3.3. Abstracción de patrones

Luego de la selección se continuó con la última fase del proceso, referida a la abstracción de las formas encontradas. Para ello se definió el nivel de abstracción requerido, con el objetivo de determinar metodológicamente los pasos para hacer dicha actividad de una manera objetiva. Después de revisar documentalmente el concepto de diseño bioinspirado, se encontró que esta fase presenta vacíos metodológicos y, paradójicamente, es en ella en la que se definen múltiples cualidades finales que tendrá el producto terminado. En esta fase es necesario abstraer de tal modo el patrón que se haga un ajuste directo entre el modelo natural y la textura artificial, sin llegar a la emulación de todas las propiedades geométricas. La abstracción es una descripción visual desarrollada con base en un proceso inductivo en el que se extraen conclusiones visuales, se fundamenta en la observación y favorece identificar las características que hacen a la textura única y relevante (Comanns, et.al, 2014; Verein Deutscher Ingenieure, 2011; Patiño, Torreblanca, Valencia-Escobar & Zuleta, 2019).

Para este procedimiento se diseñó un instrumento que facilitara representar la descripción visual, interpretando las geometrías basadas en la ley de *Prägnanz* y de los principios de organización perceptual de la Gestalt (Hekkert & Helmut, 2008). Se utilizó la ley de la *Prägnanz* para dibujar los patrones de tal manera que no perdieran sus características geométricas que los hacen únicos, pero que los dibujos fueran sencillos para que perceptualmente

permitieran una lectura fácil. De todos los principios de organización existentes, se utilizaron: simetrías, unidad, similaridad y buena continuidad. El seguimiento geométrico de estos principios y de la ley ayuda a aumentar la preferencia o atractivo visual de los patrones frente a otros (Ramachandran & Hirstein, 1999; Hekkert, 2006; Patiño, Torreblanca, Valencia-Escobar & Zuleta, 2019).

El instrumento se dividió en cuatro partes: (i) información preliminar, en la que se registran los resultados de la observación; (ii) estudio geométrico, en la que se dibuja (calca) sobre la fotografía la información bidimensional con el software CAD Rhinoceros®; (iii) dibujo digital 2D, utilizando la ley de *Prägnanz* y los principios de organización perceptual. En el estudio geométrico y en el dibujo digital se usaron puntos de transición, contornos, simetrías, secciones transversales y figuras básicas como líneas rectas, secciones de círculo, circunferencias, elipses o parábolas; (iv) modelación digital, en la que, también con el software Rhinoceros®, se modela tridimensionalmente el resultado de la abstracción y se repite el módulo en una superficie plana (teselación). La repetición tiene como objetivo ejemplificar la utilidad del módulo sobre una superficie y verificar el nivel de atractivo visual que, desde la percepción, se puede lograr con una textura (Patiño, Torreblanca, Valencia-Escobar & Zuleta, 2019). De la **Figura 61** a la **66** se pueden ver algunos ejemplos de los procesos de abstracción desarrollados en el proyecto: semilla de *Pinus pinea*, fruto del *Artocarpus heterophyllus*, fruto de la *Ananassa fragaria*, semilla del *Nephelium lappaceum*, el líquen *Immadophila adversa*, y la hoja de la *Blighia sapida*.

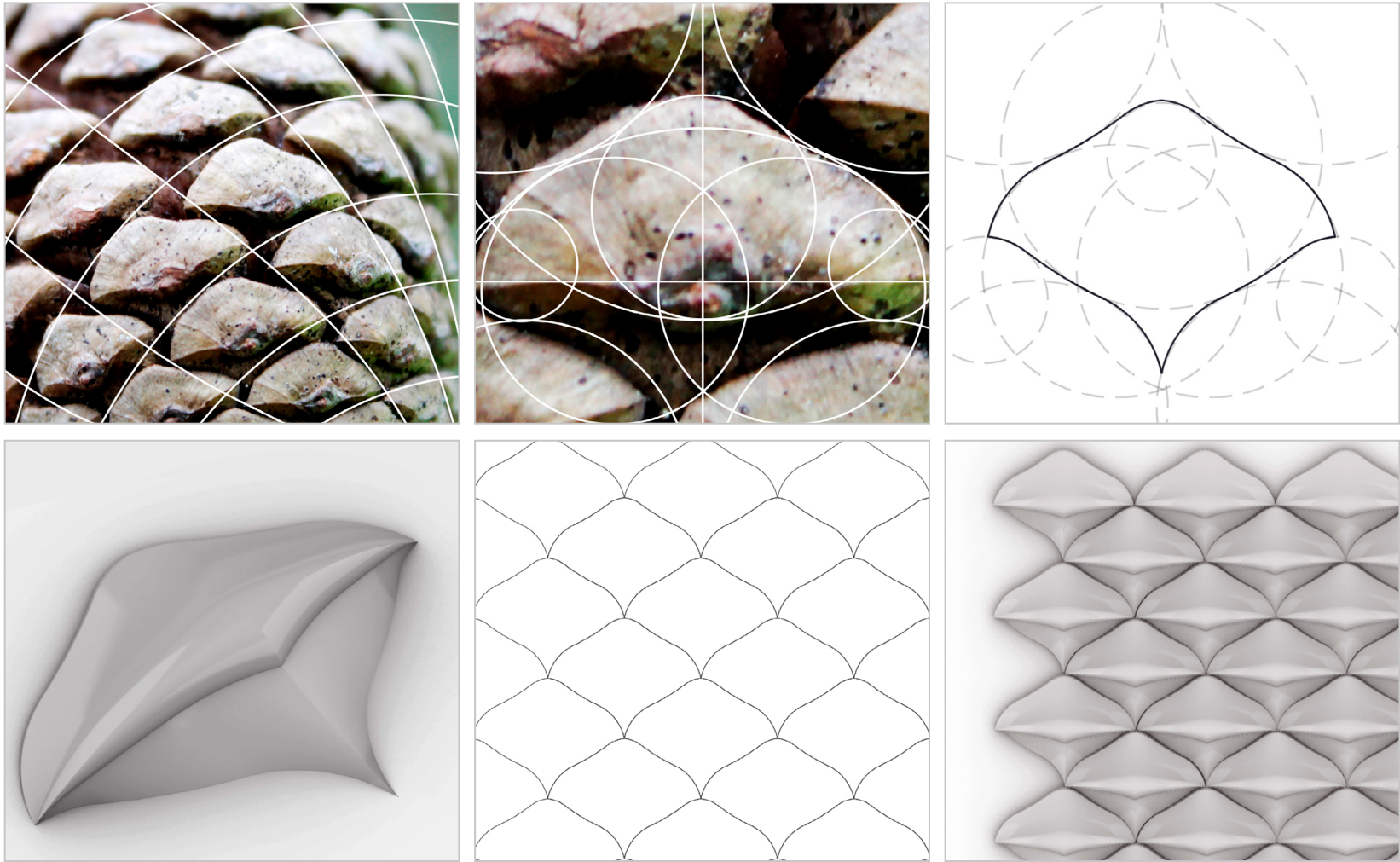


Figura 61. Proceso de abstracción de la semilla de *Pinus pinea* perteneciente a la categoría de geometrías recíprocas. Fotografía de Pablo Montes y modelo digital de Julián Villa.

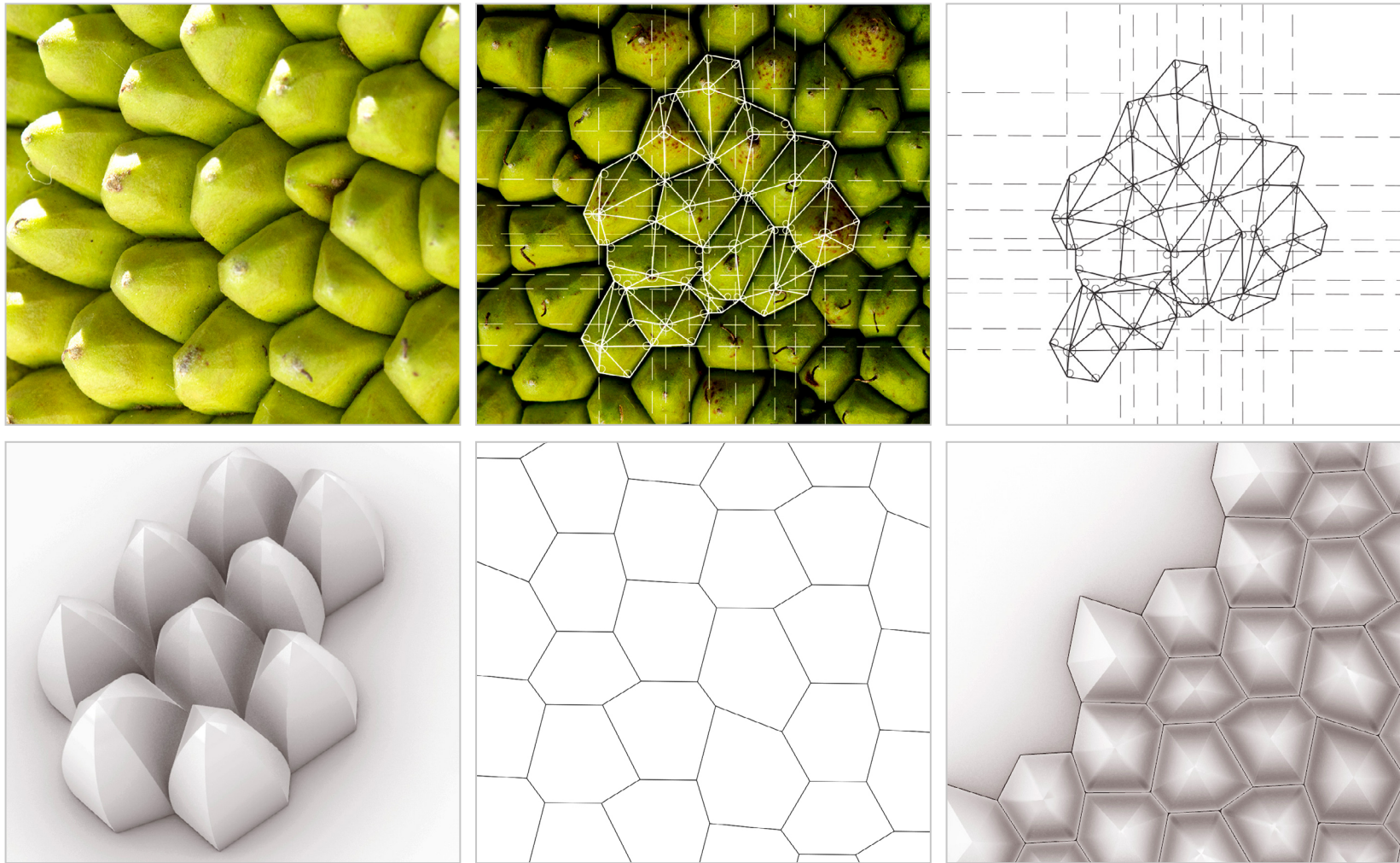


Figura 62. Proceso de abstracción del fruto del *Artocarpus heterophyllus* perteneciente a la categoría de geometrías básicas. Fotografía y modelo digital de Julio Zuluaga.

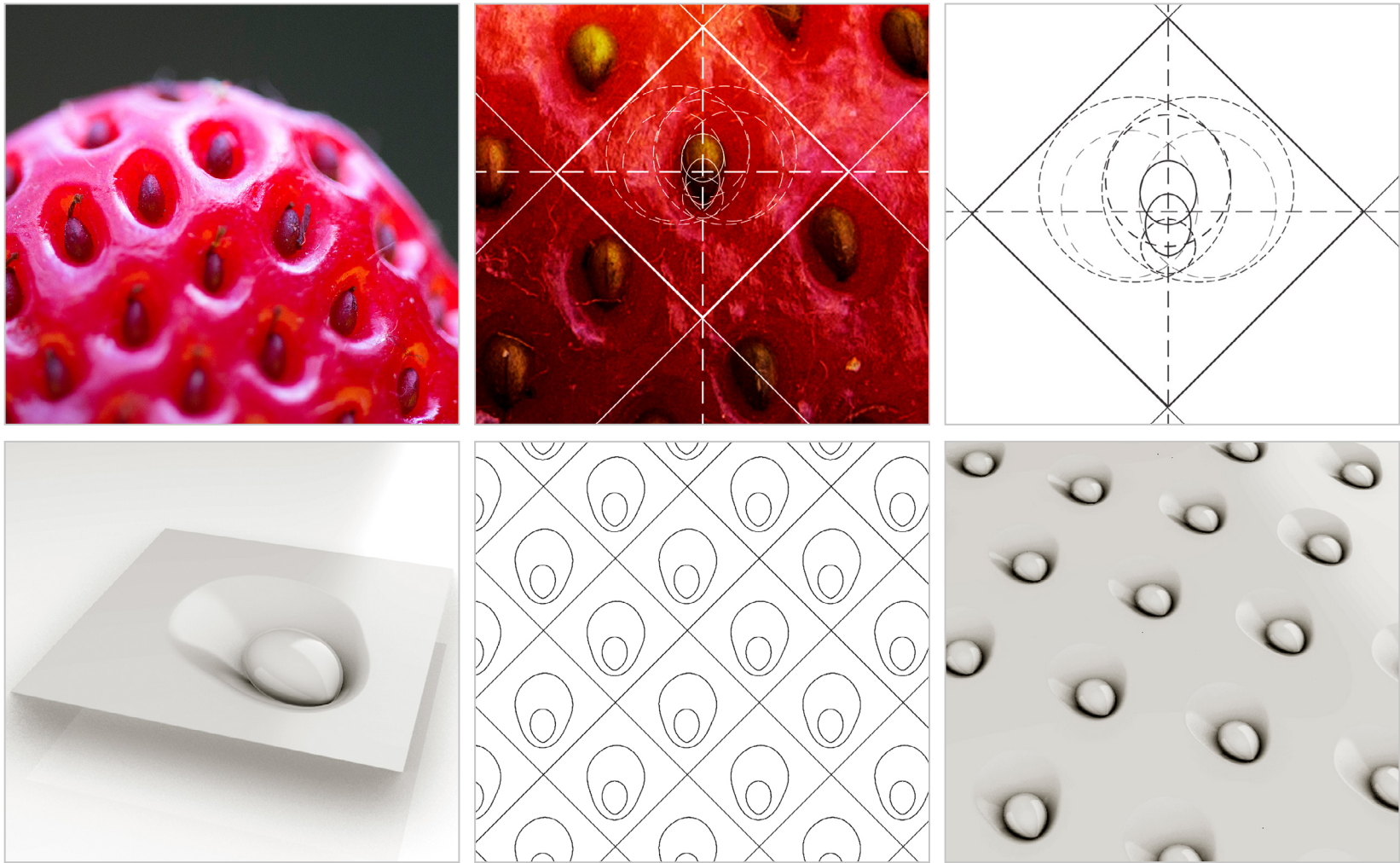


Figura 63. Proceso de abstracción del fruto de la *Ananassa fragaria* perteneciente a la categoría de geometrías básicas. Fotografía y modelo digital de Laura Vargas.



Figura 64. Proceso de abstracción de la semilla del *Nephelium lappaceum* perteneciente a la categoría de los relieves. Fotografía y modelo digital de Laura Vargas.

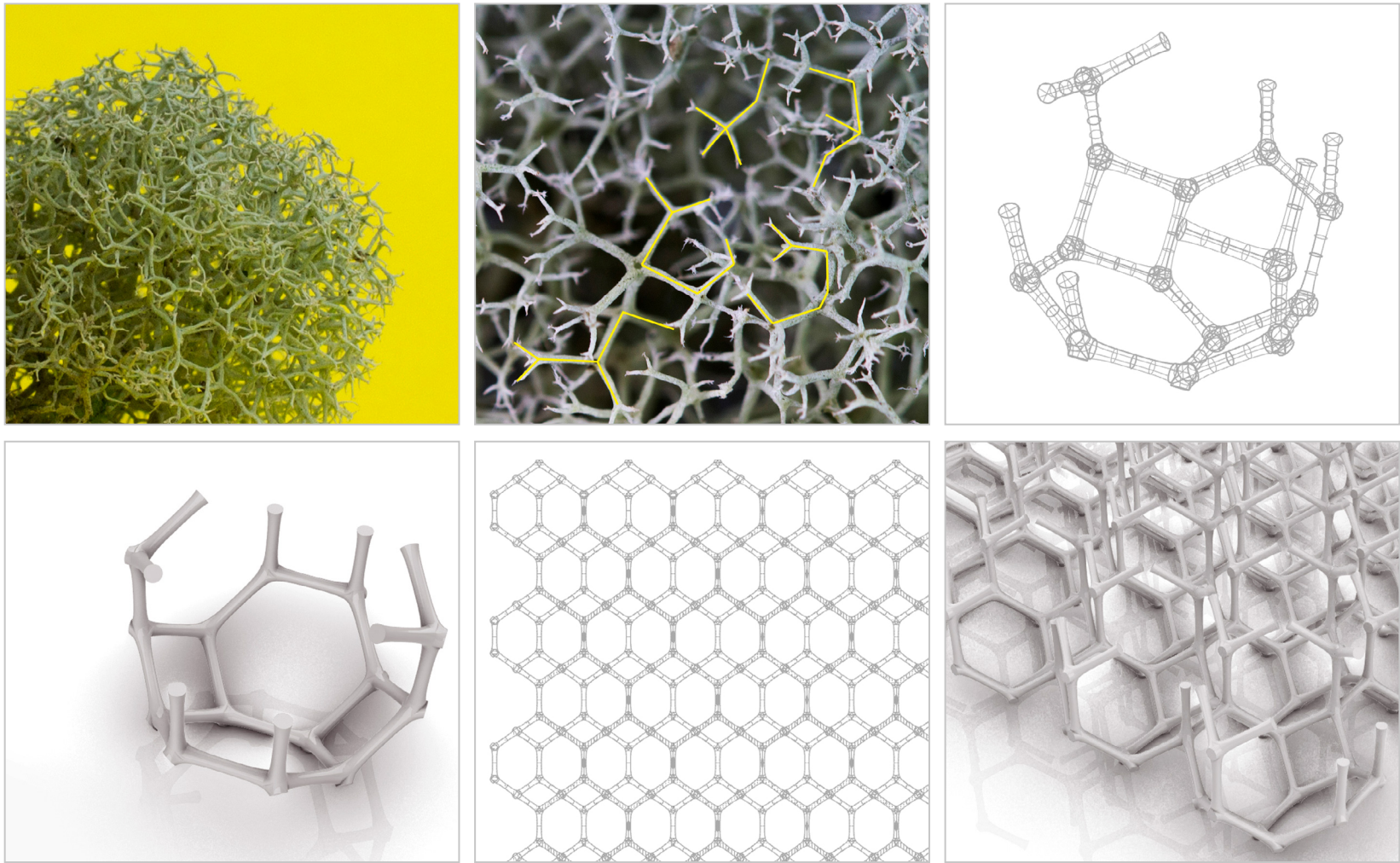


Figura 65. *Proceso de abstracción de liquen Icmadophila adversa perteneciente a la categoría de las ramificaciones. Fotografía de Silvia Gallego y modelo digital de Ever Patiño.*

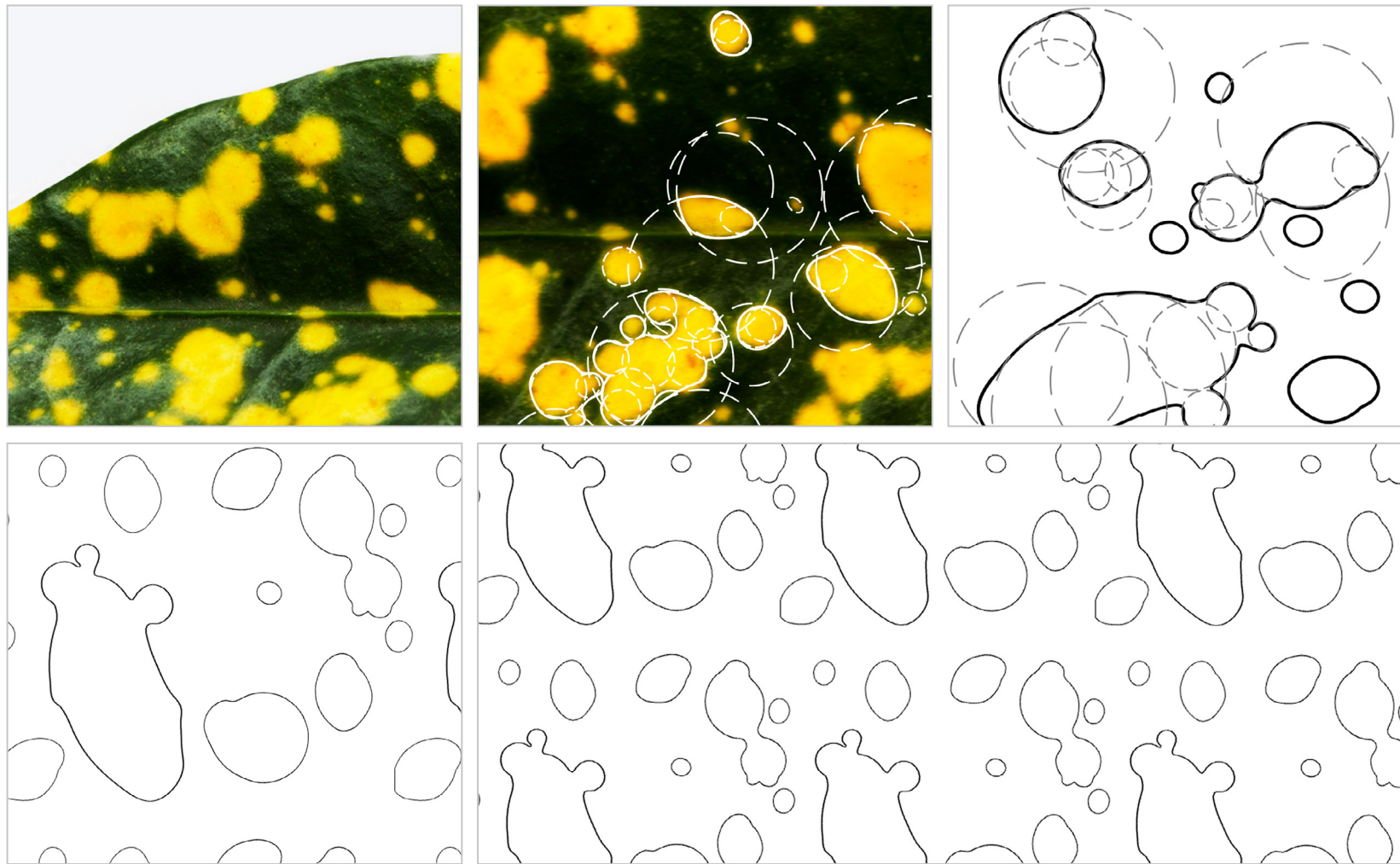


Figura 66. Proceso de abstracción de la hoja de la *Blighia sapida* perteneciente a la categoría textura visual. Fotografía y dibujo digital de Laura Vargas.

4. Transformaciones



Transformaciones y experimentación morfológica digital

Después de la abstracción se hicieron experimentaciones morfológicas con los patrones a partir de un modelo asociativo programado en el software paramétrico Grasshopper². Un modelo asociativo hace parte de un sistema computacional en el que se definen unos principios de formación para generar de manera más o menos automática diversas propuestas geométricas, que pueden alcanzar características de complejidad similares a las encontradas en la naturaleza (Abdelmohsen, 2015; Gürsel, 2012; Schumacher, 2008). Para ello, se utilizan software que facilitan la programación de los algoritmos y la manipulación de las variables (Szalapaj, 2014), con el fin de encontrar diferentes geometrías que respondan a los requerimientos planteados. Al ser un proceso exploratorio, usualmente las geometrías deben ser evaluadas y adaptadas al objetivo del proyecto (Celani, 2008; Burrey & Maher, 2008).

El uso de modelos asociativos desde de un software paramétrico presenta algunas ventajas sobre otras estrategias de generación de formas, por ejemplo: automatiza la etapa de búsquedas morfológicas (Shea, Aish, & Gourtovaia, 2005; Singh, & Gu, 2012); fa-

cilita transitar hacia la fabricación digital; puede generar formas de alta complejidad geométrica que, por otros medios, serían muy difíciles de diseñar, fabricar y comprender (McCormack, Dorin, & Innocent, 2004; Menges, 2005; Chase, 2005; Oxman, 2006); y posibilita la emergencia de formas que se pueden guardar en la memoria a largo plazo y ampliar el repertorio morfológico de los diseñadores (Hopf, 2009).

Por otra parte, los modelos asociativos que usan algoritmos basados en principios biológicos han sido investigados y aplicados en diferentes proyectos. Por ejemplo, Krawczyk (2002) describe la utilización de autómatas celulares para proponer la forma en proyectos arquitectónicos, generando una población inicial de volúmenes y del seguimiento de procesos computacionales evolutivos, formalizar nuevas generaciones de volúmenes. Los autómatas celulares son modelos computacionales, introducidos por John von Neumann en 1951, que simulan el proceso de crecimiento natural y describen la formación de un sistema complejo, con base en la reproducción de individuos simples que interactúan entre sí (Krawczyk, 2002).

Witkin y Kass (1991), describen la generación de los patrones de colores de la piel de las cebras, jirafas y gatos a partir de un sistema computacional de reacción – difusión y lo utilizan para generar texturas algorítmicas en el modelado digital de objetos. Los sistemas de reacción - difusión fueron descritos por primera vez por Alan Turing en 1952, para explicar la base química de la

2 Una versión resumida del proceso de la experimentación morfológica está publicada en: Patiño, E., Torreblanca, D., Valencia-Escobar, A., Zuleta, A. (2017). En: XXI Congreso Internacional de la Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital, Blucher Design Proceedings Vol. 3 Num.12.

morfogénesis desde la distribución en el espacio de una sustancia, y que es influenciada por reacciones químicas locales y por la difusión que hace que las sustancias se expandan (Max Planck Society, 2006).

Así mismo, Galanter (2012) menciona 12 sistemas computacionales basados en procesos bioinspirados que han sido utilizados en diferentes proyectos de arte y diseño, como: sistemas L, simuladores de caos, vida artificial, sistemas aleatorios, simetrías y repeticiones, fractales, mapeo de datos y construcción combinada. A pesar de esto, hay ausencia de modelos asociativos de código abierto, que puedan ser aplicados en el diseño de superficies y texturas para el diseño de productos y espacios, en los que se vinculen simultáneamente diferentes tipos de transformaciones geométricas.

4.1. Modelo paramétrico asociativo

El modelo asociativo que se desarrolló para el proyecto, que se ve en la **Figura 67**, se compone de seis principios de transformación, organizados en dos grupos. El primer grupo son las transformaciones básicas; éste reúne tres transformaciones: distancia, dislocación y rotación. El segundo grupo son las transformaciones complejas y reúne: el crecimiento lineal, el crecimiento diferencial en dos direcciones y el crecimiento diferencial topológico. Ambos grupos se basan en principios biológicos y tienen dos niveles; un nivel "a" de transformación progresivo, y un nivel "b" de transformación aleatoria. A continuación, se describen los dos grupos que definen, conceptual y geométricamente, las transformaciones.

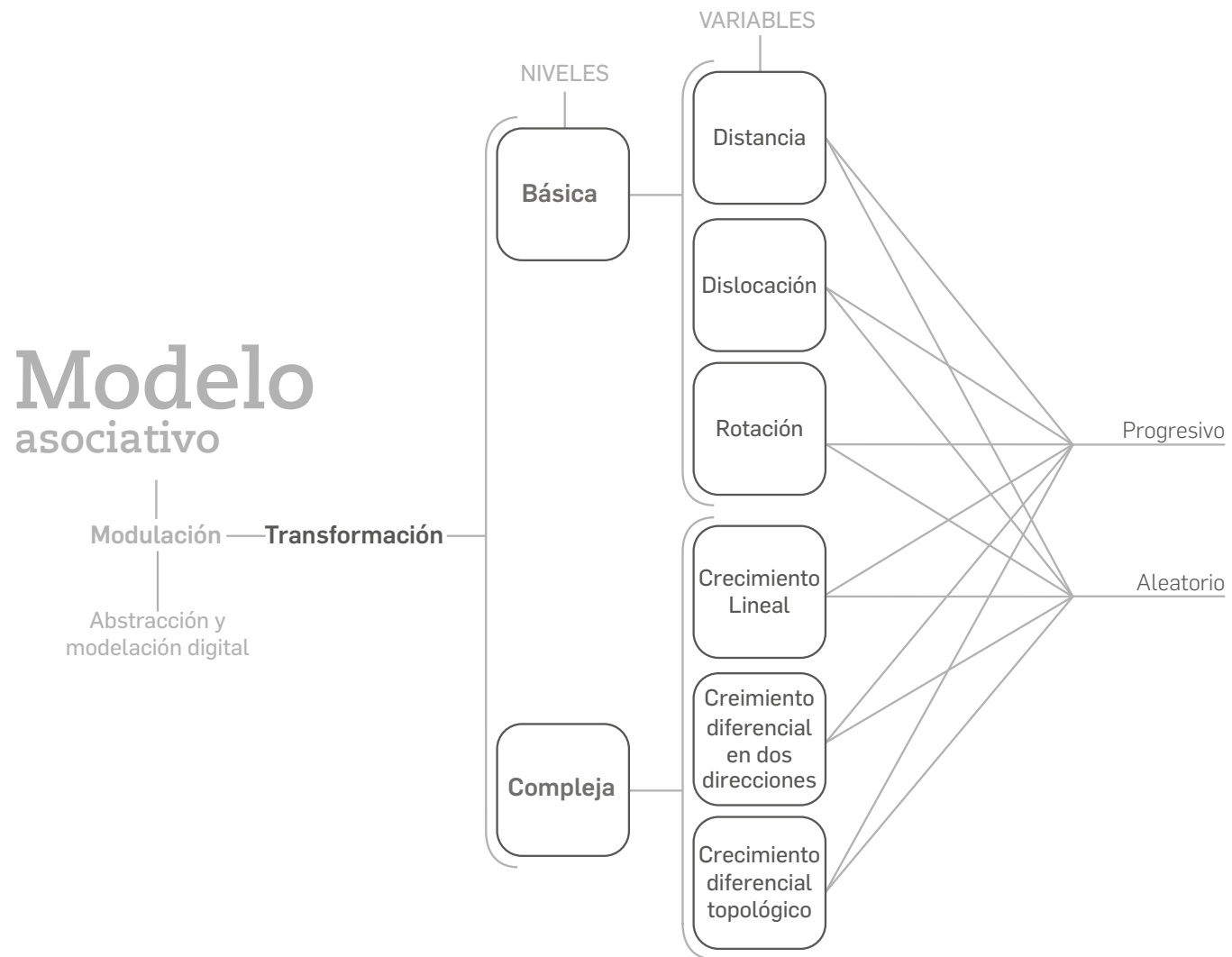


Figura 67. Modelo asociativo del proyecto. Esquema de los autores.
Dibujo de Sara Restrepo Osorio.

Transformación básica

Este tipo de transformación está fundamentada en los procesos biológicos de ordenamiento. Específicamente, en las repeticiones y transformaciones geométricas que dejan el aspecto del objeto prácticamente igual, es decir, las simetrías (Stewart & Golobtsky, 1995, p.42). Las simetrías en la naturaleza tienen como principal objetivo disminuir la información necesaria para construir. Esto significa que necesita menos información genética un individuo con simetría bilateral que un individuo en el que todas sus partes sean diferentes (Wagensberg, 2005). En el reino vegetal, en este caso, en las superficies que separan al individuo de su entorno, predominan la simetría radial y la simetría de traslación. En la simetría radial hay un centro alrededor del que giran las partes, y en la simetría de traslación las partes se mueven a través de un eje que les da la dirección. Esto ocasiona que la textura resultante se perciba visualmente ordenada, estable y equilibrada (Patiño & Arbeláez, 2010).

Para la transformación básica las tres variables que se determinaron fueron la distancia y la dislocación relacionadas con la simetría bilateral y la rotación relacionada con la simetría radial. Igualmente, como la uniformidad y la precisión en las texturas naturales son posibles únicamente en un entorno sin ningún cambio ambiental o perturbación, las variables tienen dos niveles: el nivel progresivo y el nivel aleatorio. Ambos están fundamentados

en el efecto ecofenotípico, que es, el efecto en la geometría que producen los fenómenos del entorno (Williams, 1984); por ejemplo, una hoja de una planta puede ser afectada por el viento, el sol, el agua y el nivel de hidratación, los nutrientes del suelo y los insectos, esto hace que pueda cambiar su color, su rigidez, el ángulo con respecto al tallo y sus dimensiones.

En el nivel progresivo hay una transformación con valores periódicos, por ejemplo, multiplicar los valores por el número áureo 1.618. Este número, también llamado número de oro o phi (Φ), es ante todo una proporción, que ha sido utilizada desde la antigua Grecia para describir matemática y geoméricamente el crecimiento armónico de las ramificaciones de algunas plantas, las nervaduras de las hojas de algunos árboles, en los espirales de los caparazones de algunos moluscos, y en la disposición de los flósculos de los girasoles, entre otros (Patiño & Arbeláez, 2009). Por otro lado, en el nivel aleatorio se asignan aleatoriamente los valores en una franja específica.

En la **Figura 68** se encuentra la nomenclatura que se usa en las descripciones matemáticas y en los esquemas gráficos de las transformaciones; en la **Figura 69** se describen matemáticamente las transformaciones para las tres variables con sus niveles; y para completar la explicación, de la **Figura 70** a la **76** se encuentran los esquemas gráficos que ejemplifican las transformaciones.

Descripción		Descripción	
N	Formato	(-)	Dirección negativa en X o Y, de cada fila o columna
M	Margen	C	Columna
X	Distancia en el eje X	α	Ángulo
Y	Distancia en el eje Y	A	Atractor
XA	Longitud del módulo en X	Hm	Altura mínima
YB	Longitud del módulo en Y	HM	Altura máxima
XAmax	Longitud del cuadrante o la dimensión máxima del módulo en X	H	Altura
YBmax	Longitud del cuadrante o la dimensión máxima del módulo en Y	r	Radio
(+)	Dirección positiva en X o Y, de cada fila o columna	V	Vértices

Figura 68. Nomenclatura de las descripciones y los esquemas gráficos. Tabla de los autores.

	Nivel a (Progresivo)	Nivel b (Aleatorio)
Distancia	Desplazamiento del módulo en +X, +Y A partir de una lista organizada de mayor a menor con la herramienta Random entre 0 y $AX_{max}-AX/2$	Desplazamiento del módulo en +X, +Y A partir de una lista desorganizada con la herramienta Random entre 0 y $AX_{max}-AX/2$
Dislocación	Con una X constante, el módulo se desplaza en -Y y +Y. A partir de una lista en orden ascendente con Random entre $((-AY_{max}) - (-AY/2))$ y $((+AY_{max}) - (+AY/2))$	Con una X constante, el módulo se desplaza en -Y y +Y. A partir de una lista aleatoria con Random entre $((-AY_{max}) - (-AY/2))$ y $((+AY_{max}) - (+AY/2))$
Rotación	El módulo se rota sin tocar el cuadrante a partir de una lista ascendente entre 0° y 360° con el paso del número de oro (1.618). Comienza en la columna 1, de abajo hacia arriba, sigue en la columna 2 de abajo hacia arriba y así sucesivamente.	El módulo se rota sin tocar el cuadrante a partir de una lista aleatoria entre 0° y 360° con el paso del número de oro (1.618). Comienza en la columna 1, de abajo hacia arriba, sigue en la columna 2 de abajo hacia arriba y así sucesivamente.

Figura 69. Descripción matemática de las transformaciones básicas. Tabla de los autores.

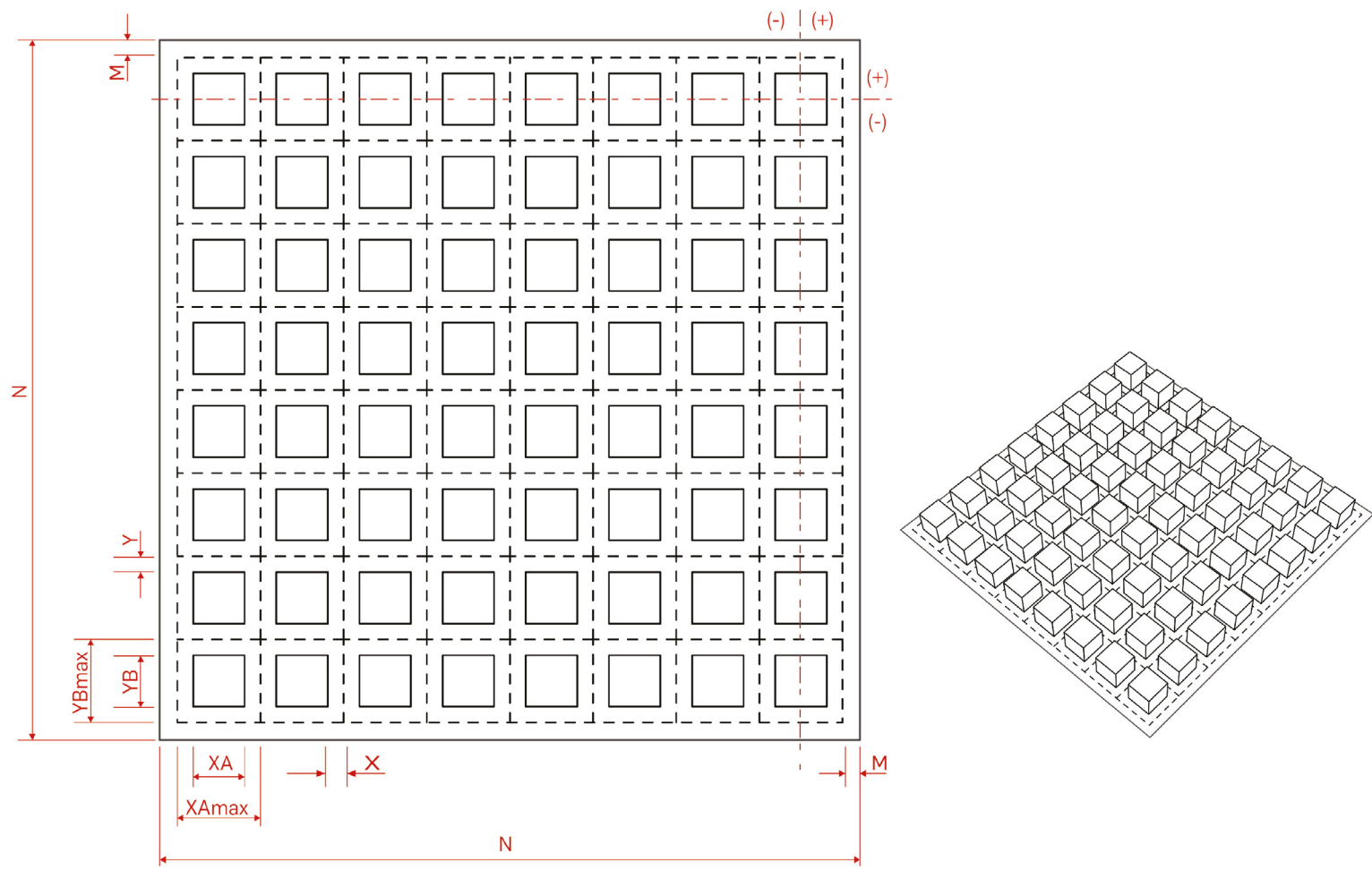


Figura 70. Esquema gráfico de los módulos sin transformación en el formato.
Dibujo de Ever Patiño.

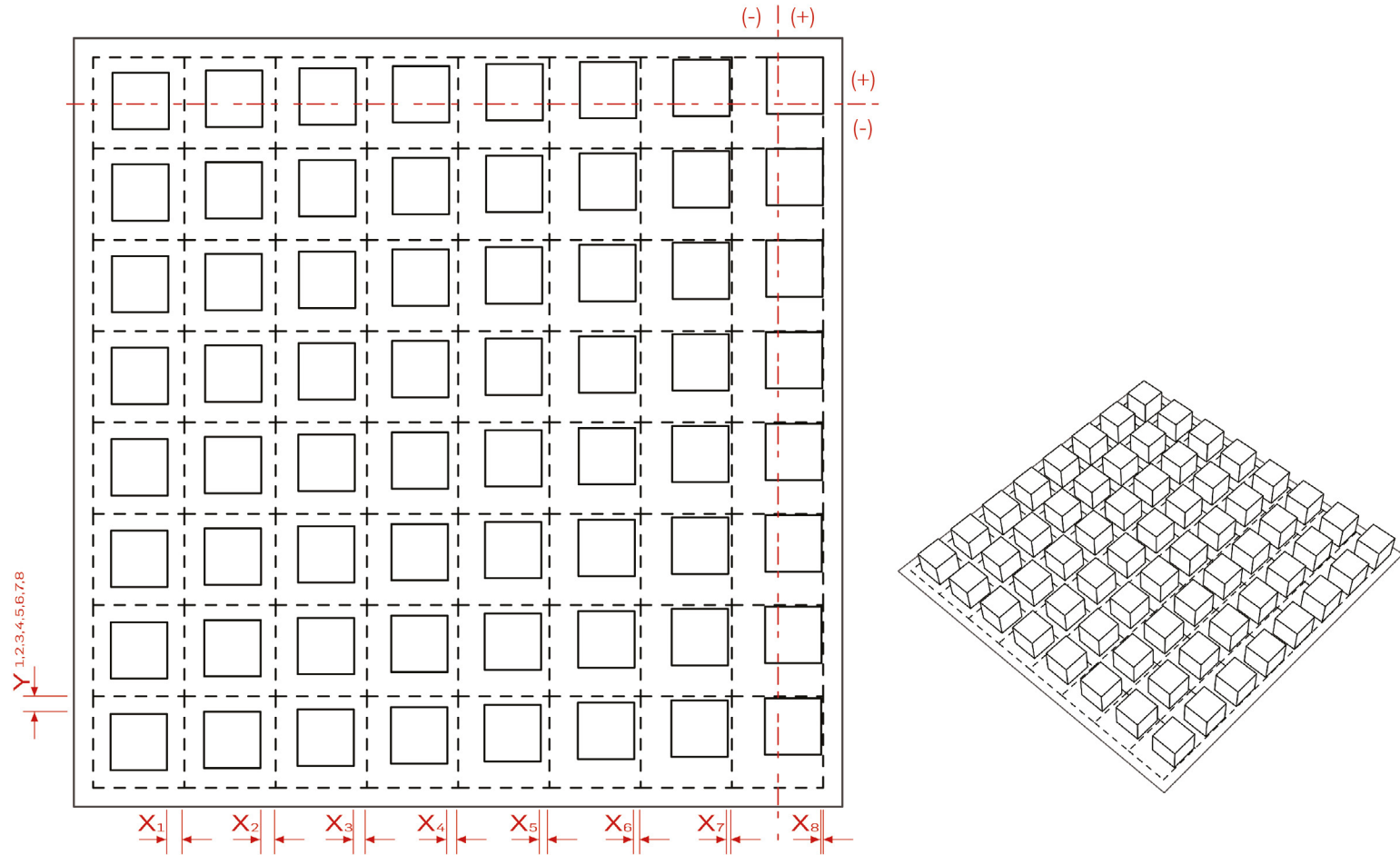


Figura 71. Esquema gráfico de la transformación básica de distancia progresiva. Algoritmo desarrollado por Andrés Obregón. Dibujo de Ever Patiño.

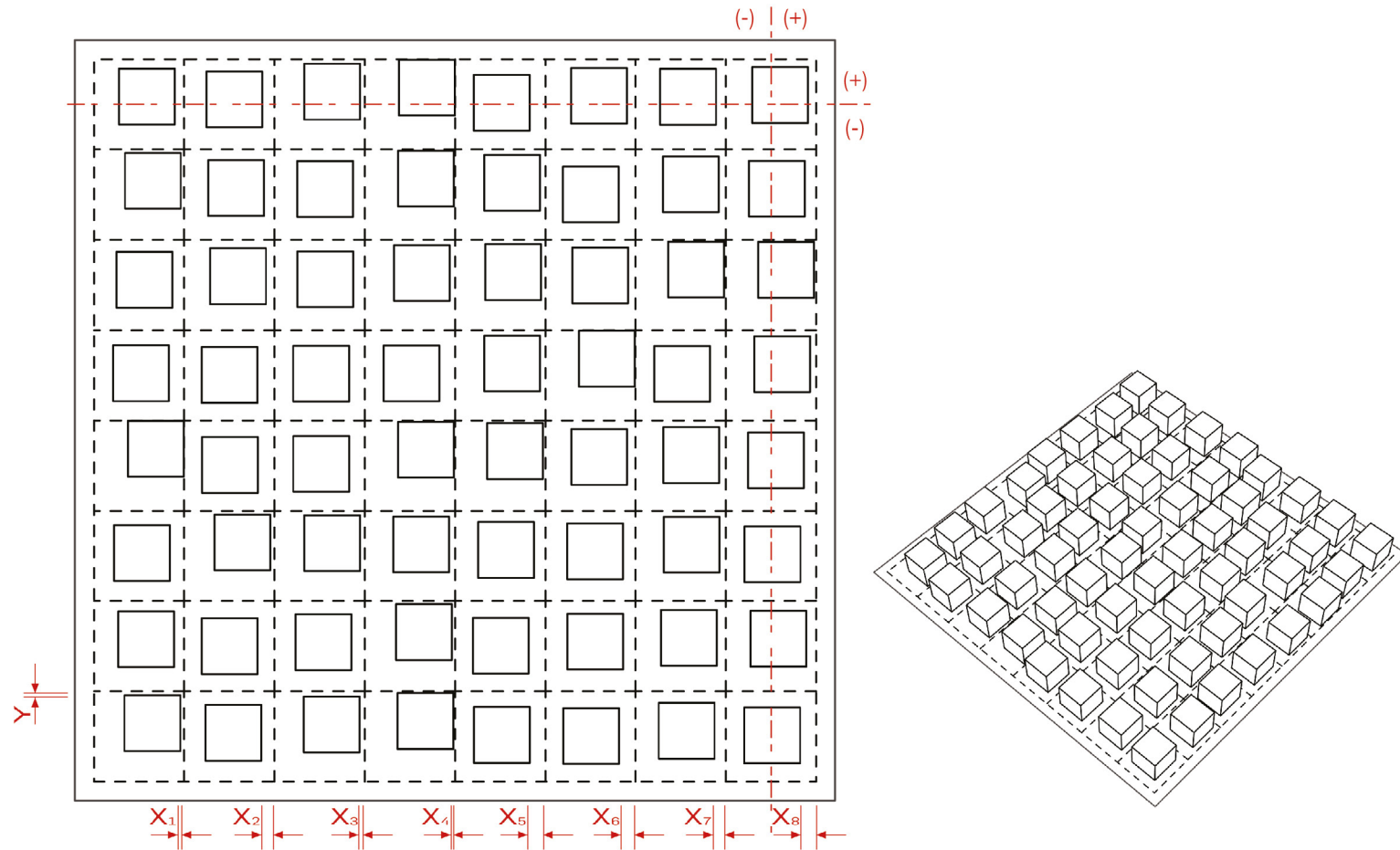


Figura 72. Esquema gráfico de la transformación básica de distancia aleatoria. Algoritmo desarrollado por Andrés Obregón. Dibujo de Ever Patiño.

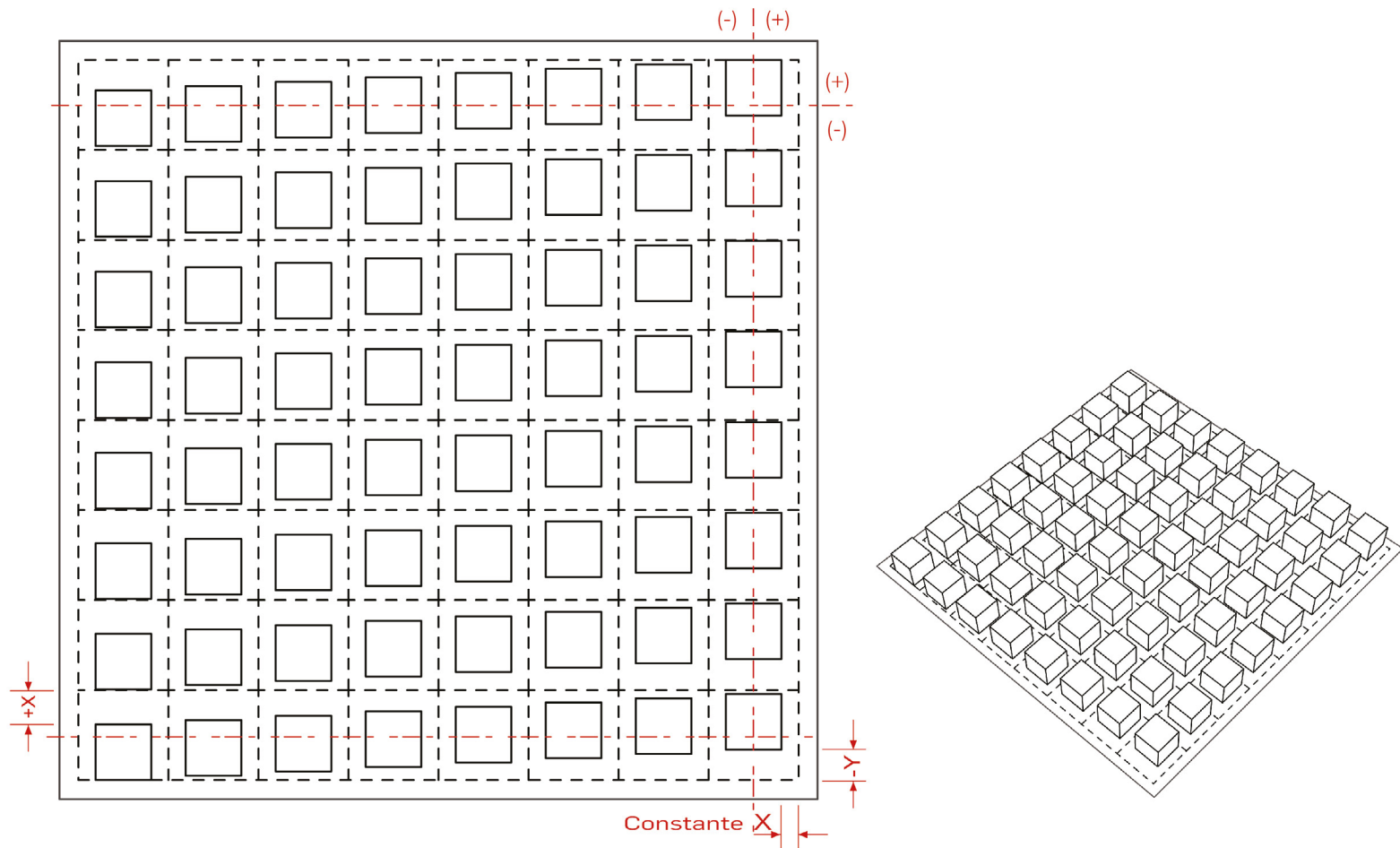


Figura 73. Esquema gráfico de la transformación básica de dislocación progresiva. Algoritmo desarrollado por Andrés Obregón. Dibujo de Ever Patiño.

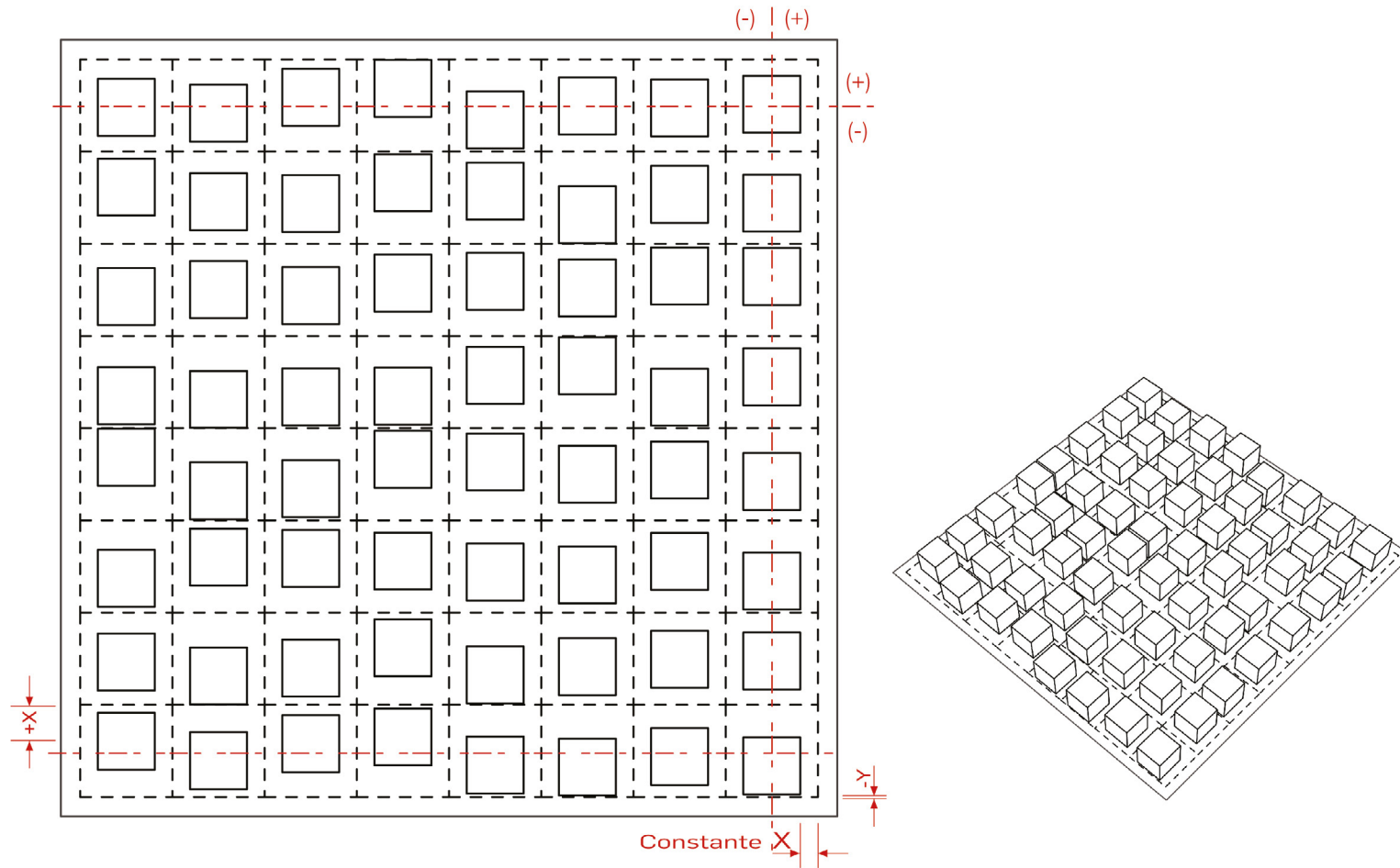


Figura 74. Esquema gráfico de la transformación básica de dislocación aleatoria. Algoritmo desarrollado por Andrés Obregón. Dibujo de Ever Patiño.

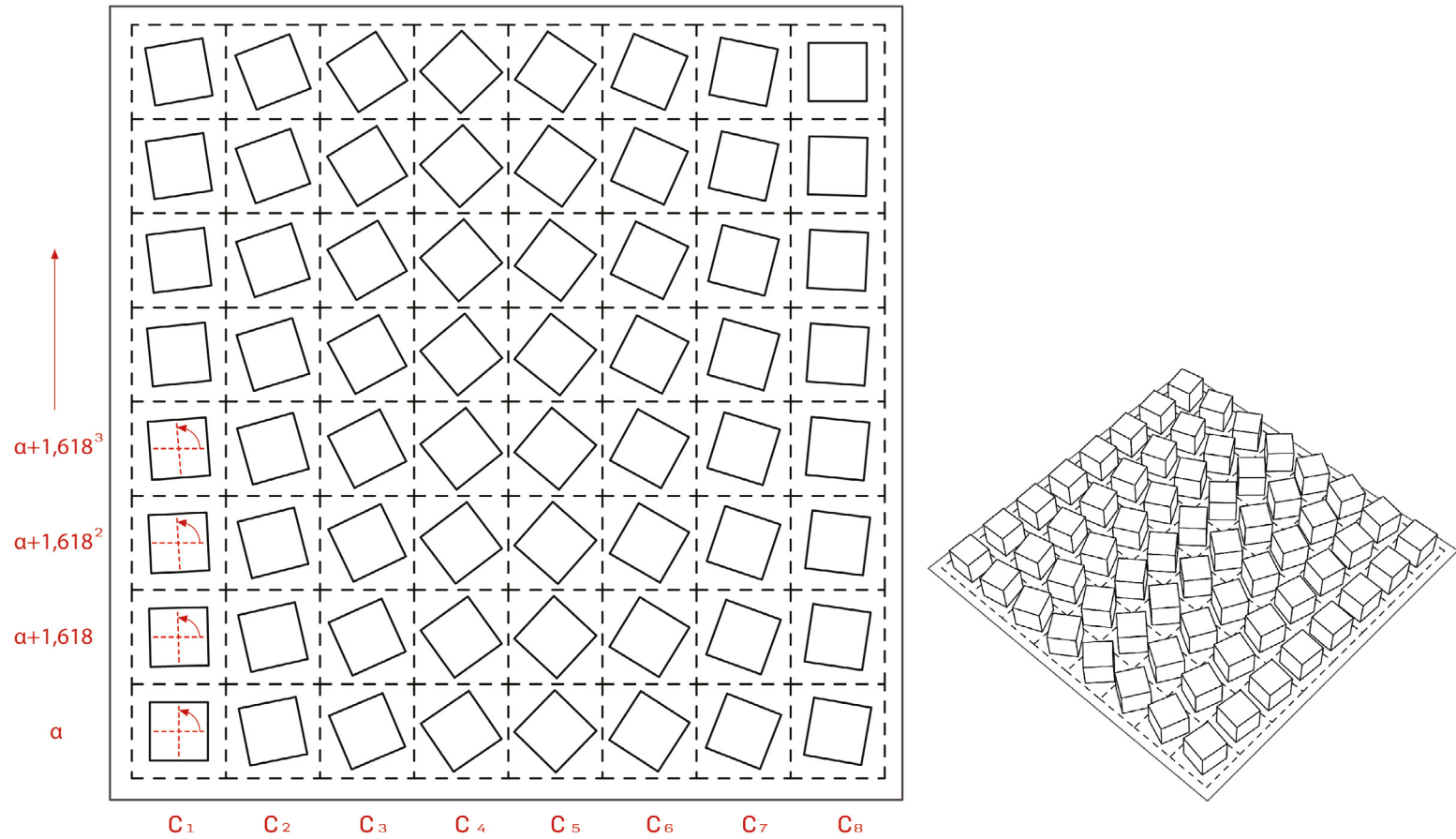


Figura 75. Esquema gráfico de la transformación básica de rotación progresiva.
 Algoritmo desarrollado por Andrés Obregón. Dibujo de Ever Patiño.

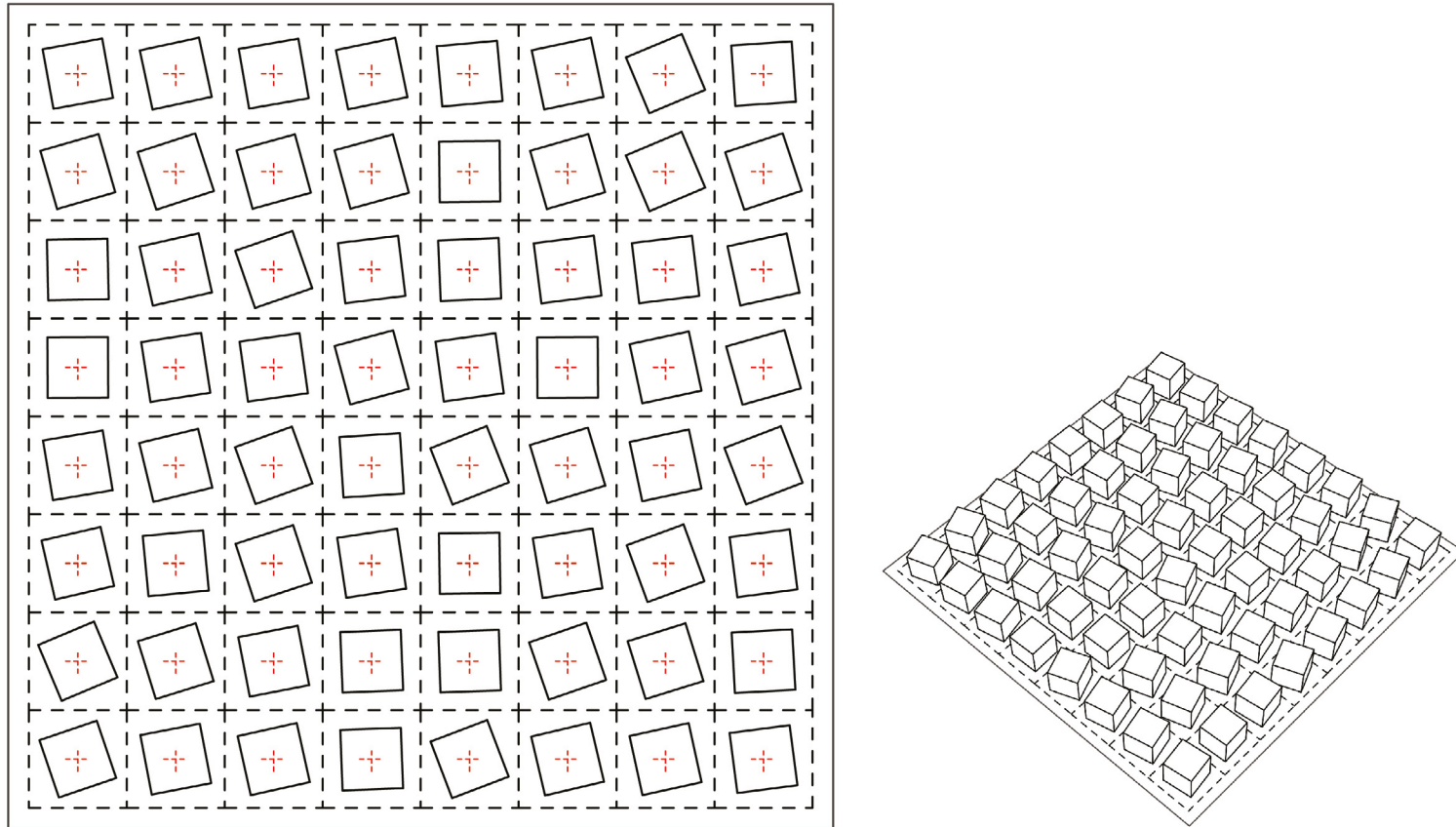


Figura 76. Esquema gráfico de la transformación básica de rotación aleatoria.
Algoritmo desarrollado por Andrés Obregón. Dibujo de Ever Patiño.

Transformación compleja

La transformación compleja está fundamentada en procesos biológicos de crecimiento, en especial, principios que generan y transforman las morfologías. Teóricamente, la velocidad de crecimiento de todas las partes del individuo y el punto de inicio de los mismos inciden considerablemente en la geometría del objeto natural. Por ejemplo, una fruta como la naranja crece del interior hasta al exterior, hincha sus células de una manera más o menos homogénea, esto hace que la fruta adquiera una geometría esférica (Wagensberg, 2005). Para el modelo, se seleccionaron los principios de crecimiento lineal y crecimiento diferencial ya que pueden variar la forma sin cambiar sus propiedades geométricas. (Ver Figura 77, siguiente página).

El crecimiento lineal parte de un punto que, en la configuración global del individuo, coincide con el órgano reproductor, crece en una dirección y mantiene la velocidad constante (Patiño & Arbeláez, 2009). El crecimiento diferencial en dos direcciones está relacionado con la teoría de las transformaciones de Thompson

(2000), crece en un plano cartesiano y ejemplifica los cambios de velocidad de crecimiento en un mismo individuo. El crecimiento diferencial topológico, en su nivel progresivo, sigue el principio de crecer periódicamente más rápido en su centro que en su periferia, lo que produce una forma tridimensional curva (Stevens, 1987). Y, por último, el crecimiento diferencial topológico, en su nivel aleatorio, vincula las velocidades de crecimiento en unos vectores perpendiculares con la superficie original, lo que deriva en una superficie irregular curva.

El crecimiento lineal y el diferencial en dos direcciones exhiben nuevamente los niveles de progresión y aleatoriedad, con el objetivo de vincular el efecto ecofenotípico en su geometría. En la **Figura 77** se describen matemáticamente las transformaciones complejas para las tres variables con sus niveles; y, para complementar la descripción, de la **Figura 78** a la **85** se encuentran los esquemas gráficos que ejemplifican las transformaciones.

	Nivel a (Progresivo)	Nivel b (Aleatorio)
Crecimiento lineal	Cambio de escala en Z de los módulos. A partir de la generación de una lista ascendente de alturas con un Dominio entre la Altura Mínima Hm, que es igual a XA, y la Altura Máxima HM que es un número entero multiplicado por la proporción áurea 1.618. Las diferentes alturas se ubican en una superficie utilizando un punto atractor (A), que le asigna un número relacionado con la distancia del módulo con A. Los módulos que están en el punto más cerca de A se les asigna la Hm y los que se encuentran en el punto más lejano la HM.	Cambio de escala en Z de los módulos a partir de la generación de una lista aleatoria de alturas con Random, con un dominio entre HM que es igual a XA y Hm que es igual a 1.618 x 1.618
Crecimiento diferencial en dos direcciones	Cambio de escala en X y Y del módulo a partir de la generación de una lista ascendente. El dominio es entre XA y XAmax. El cambio de escala se hace en los ejes X y Y desde el centro del módulo. El valor de XA puede variar. El cambio de escala comienza en la columna 1, de abajo hacia arriba, sigue en la columna 2 de abajo hacia arriba y así sucesivamente.	Cambio de escala en X y Y del módulo a partir de la generación de una lista aleatoria con Random para el cambio de escala del módulo. El dominio es entre XA y el XAmax es XA multiplicada por la proporción áurea.
Crecimiento diferencial topológico	Los módulos se adaptan a la superficie de doble curvatura positiva originada por una transición entre dos líneas rectas y un arco ubicado en el medio del formato. La altura máxima (HM) del formato es N/2. La generación del arco está determinada por un radio y un ángulo variable con centro por debajo del formato, de tal modo que se transforme de manera similar a una esfera creciendo desde el interior.	Los módulos se adaptan a la superficie de doble curvatura negativa originada por el cambio de alturas de los vértices del formato. Las alturas se generan a partir de una lista de dimensiones aleatoria con Random. La superficie se genera por una transición entre las líneas rectas V1V2 y V3V4 La altura máxima (HM) de los vértices es N/2

Figura 77. Descripción matemática de las transformaciones complejas.
Dibujo de los autores.

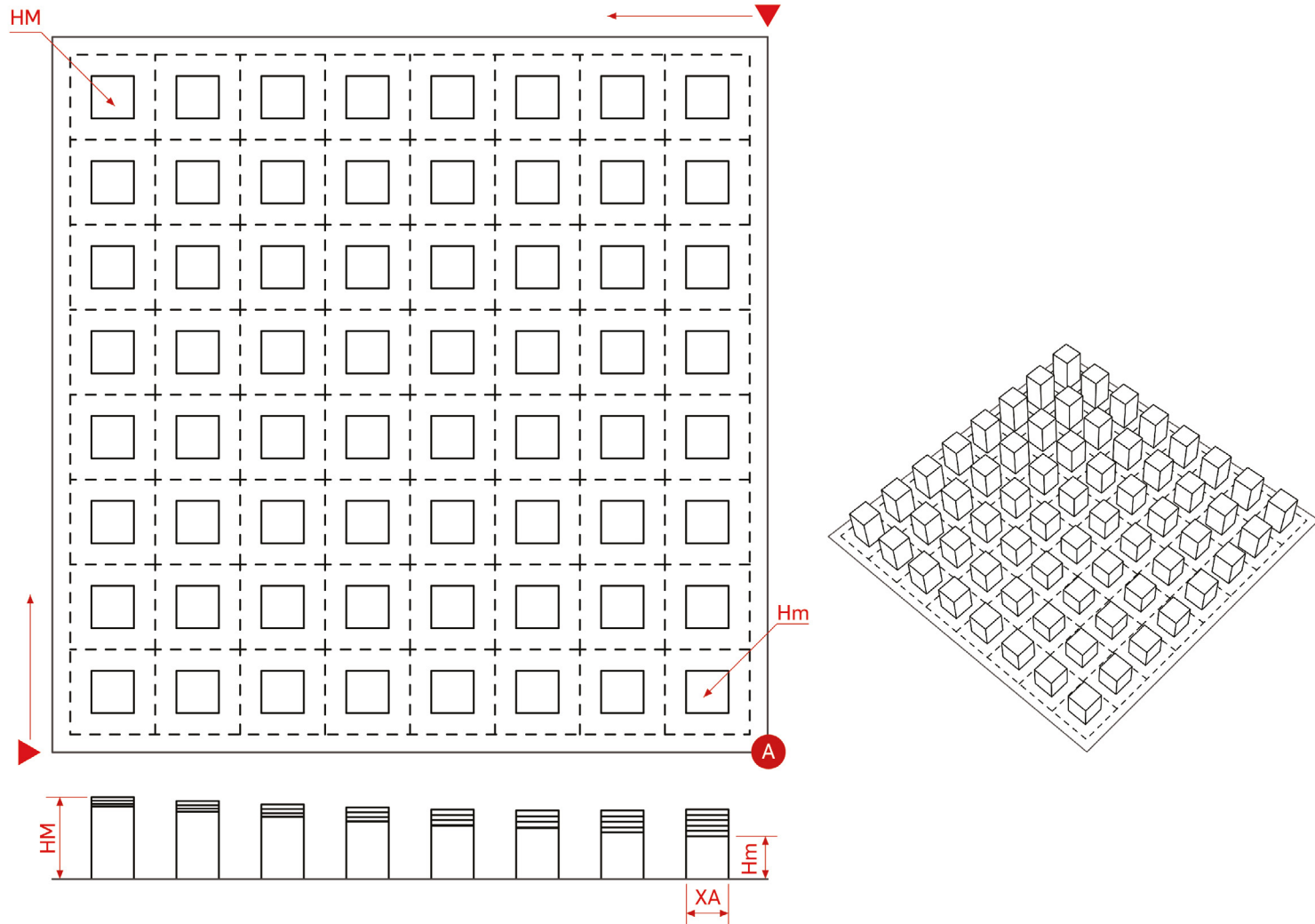


Figura 78. Esquema gráfico de la transformación compleja de crecimiento lineal progresivo. Algoritmo desarrollado por Andrés Obregón. Dibujo de Ever Patiño.

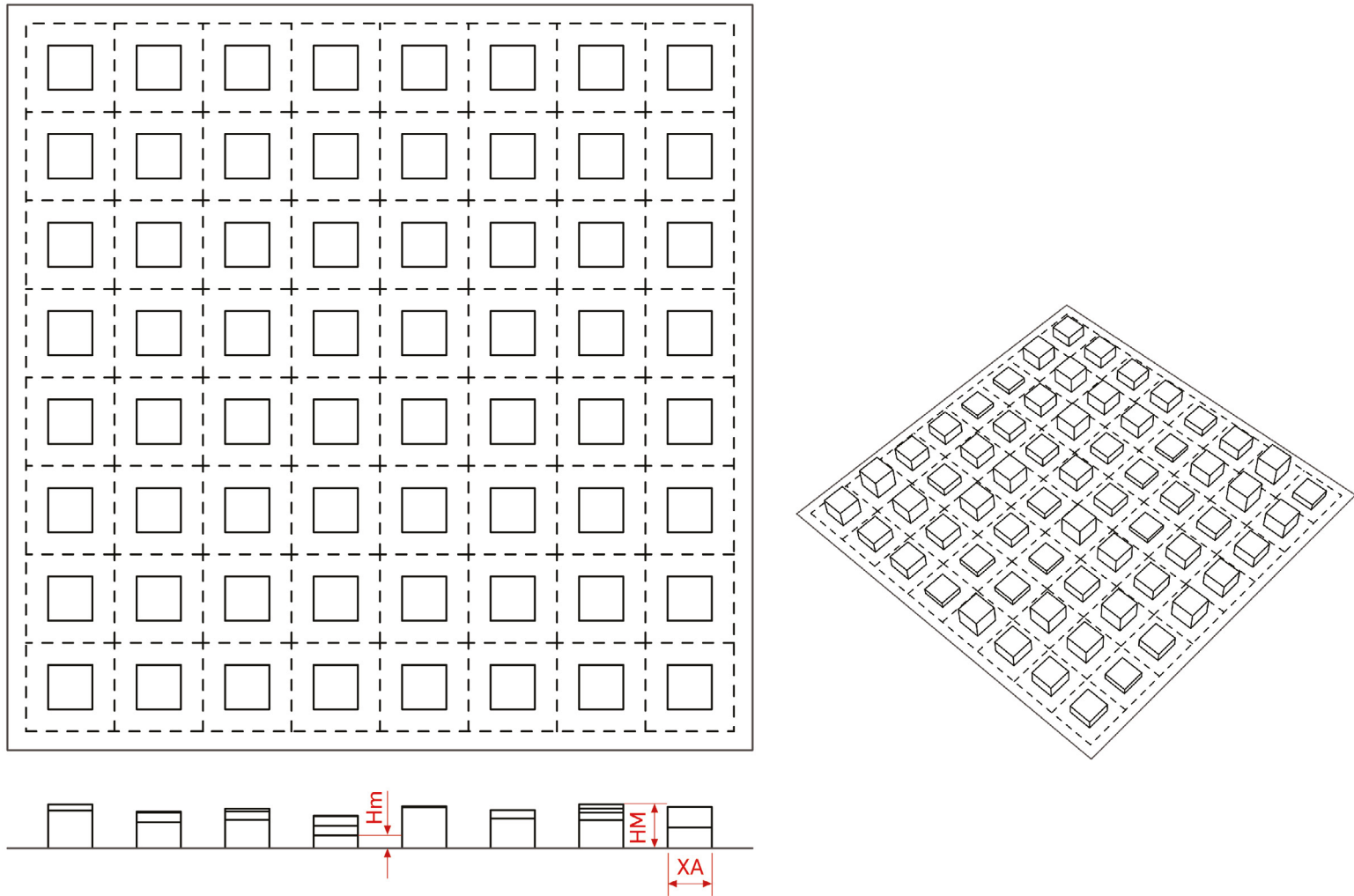


Figura 79. Esquema gráfico de la transformación compleja de crecimiento lineal aleatorio. Algoritmo desarrollado por Andrés Obregón. Dibujo de Ever Patiño.

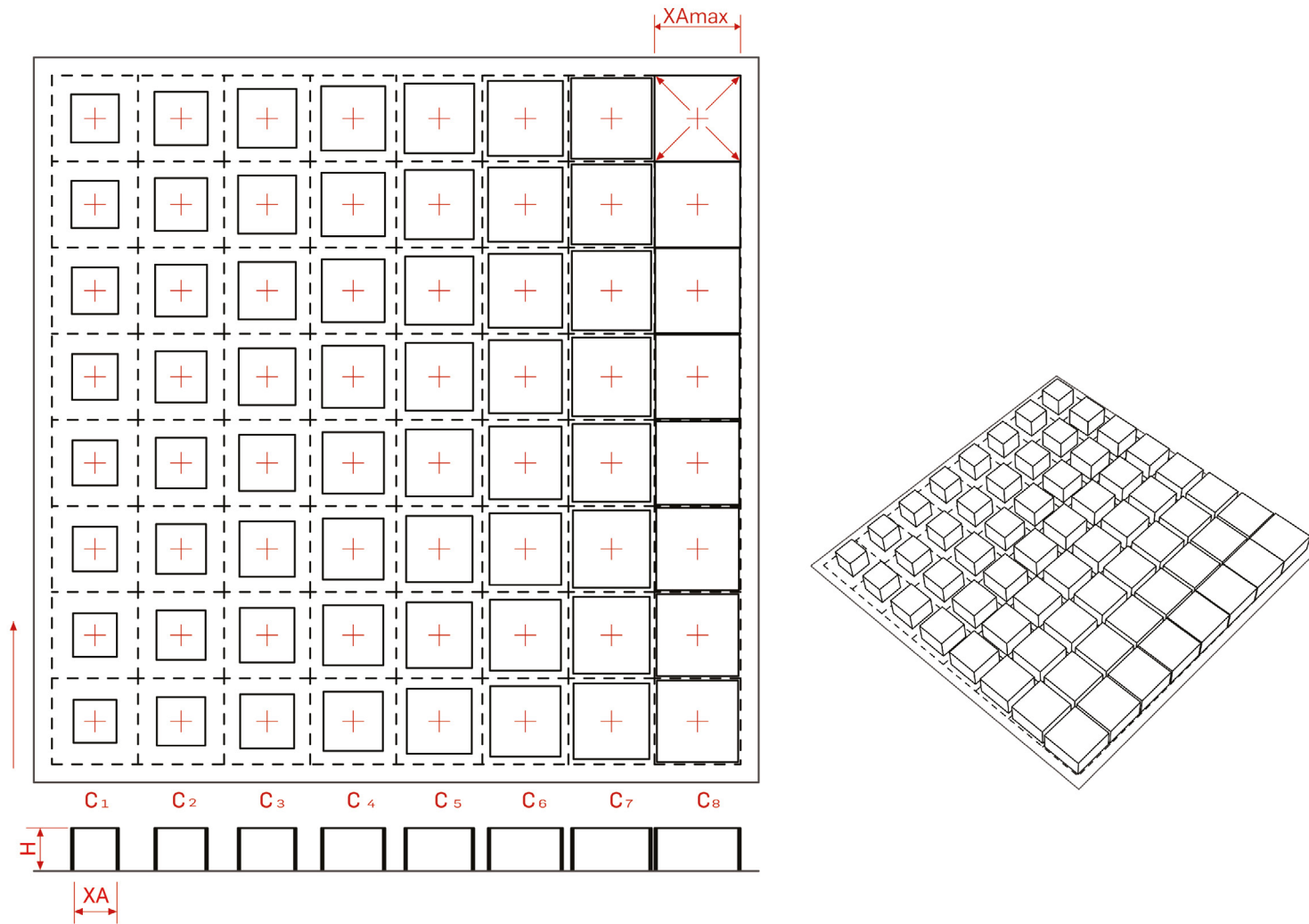


Figura 80. Esquema gráfico de la transformación compleja de crecimiento diferencial en dos direcciones progresivo. Algoritmo desarrollado por Andrés Obregón. Dibujo de Ever Patiño.

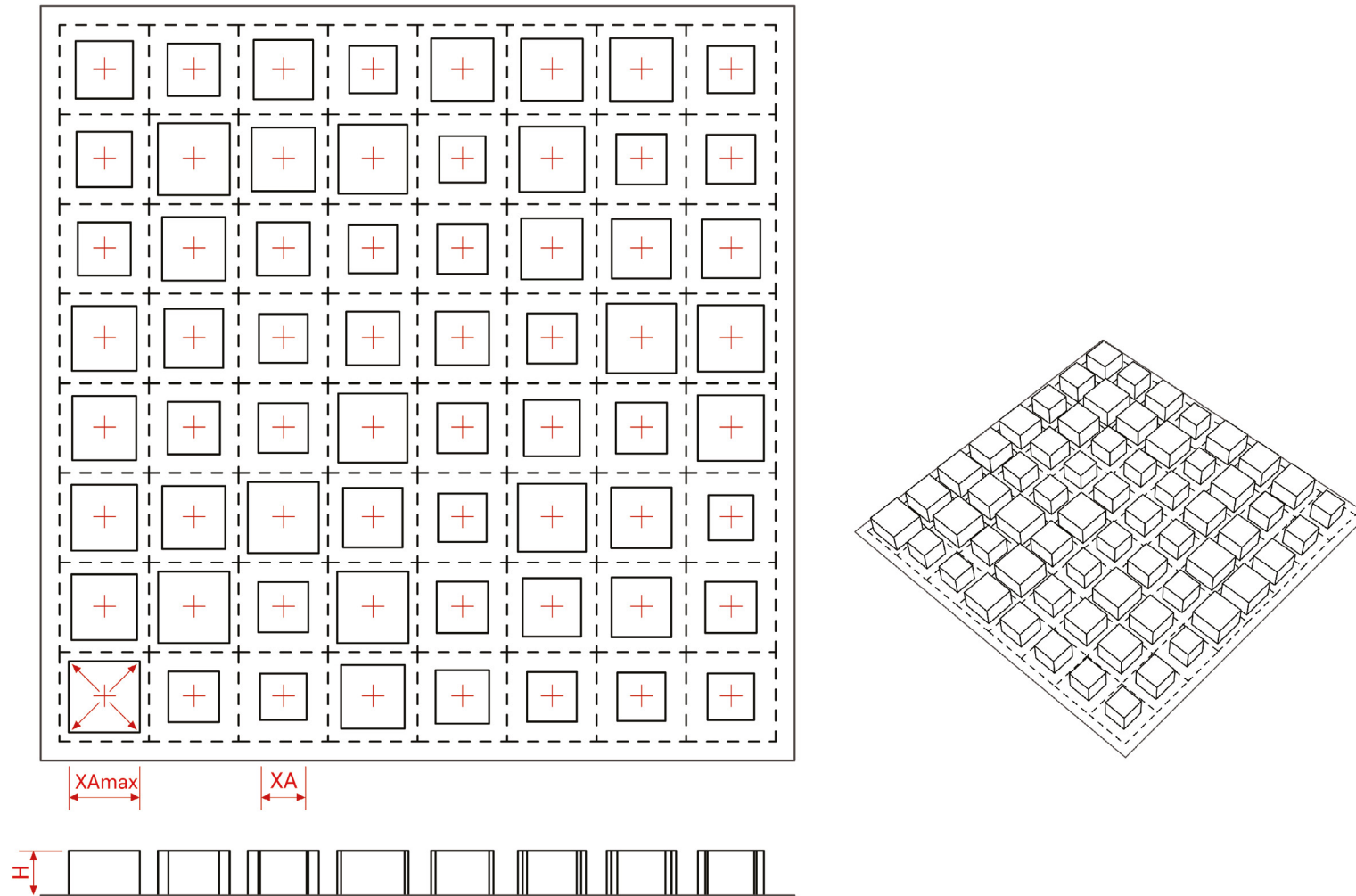


Figura 81. Esquema gráfico de la transformación compleja de crecimiento diferencial en dos direcciones aleatorio. Algoritmo desarrollado por Andrés Obregón. Dibujo de Ever Patiño.

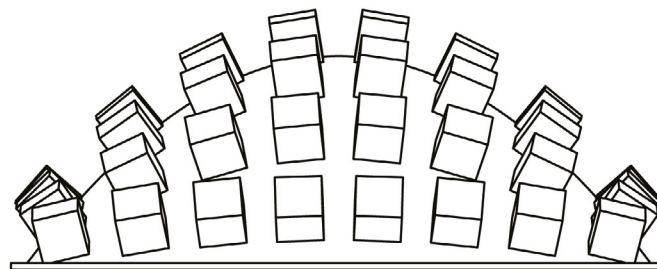
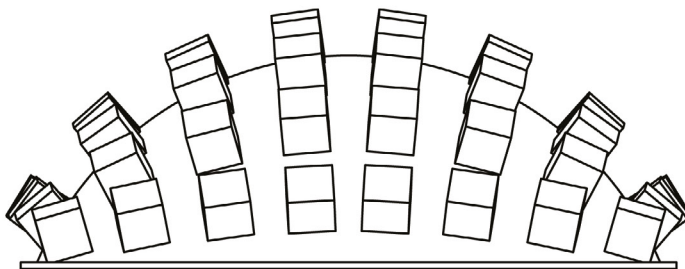
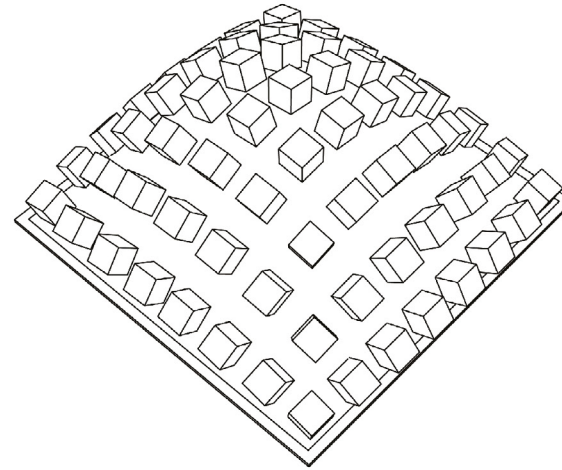
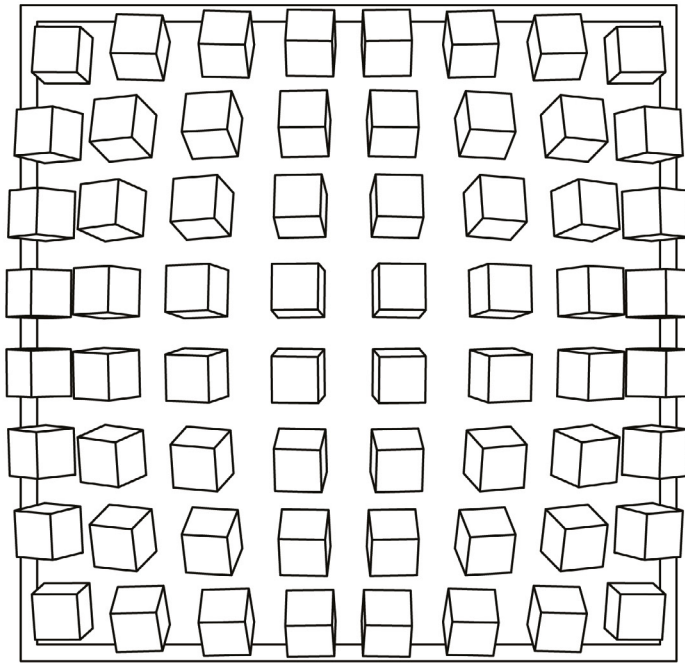


Figura 82. Esquema gráfico de la transformación complejade crecimiento diferencial topológico progresivo. Algoritmo desarrollado por Andrés Obregón. Dibujo de Ever Patiño.

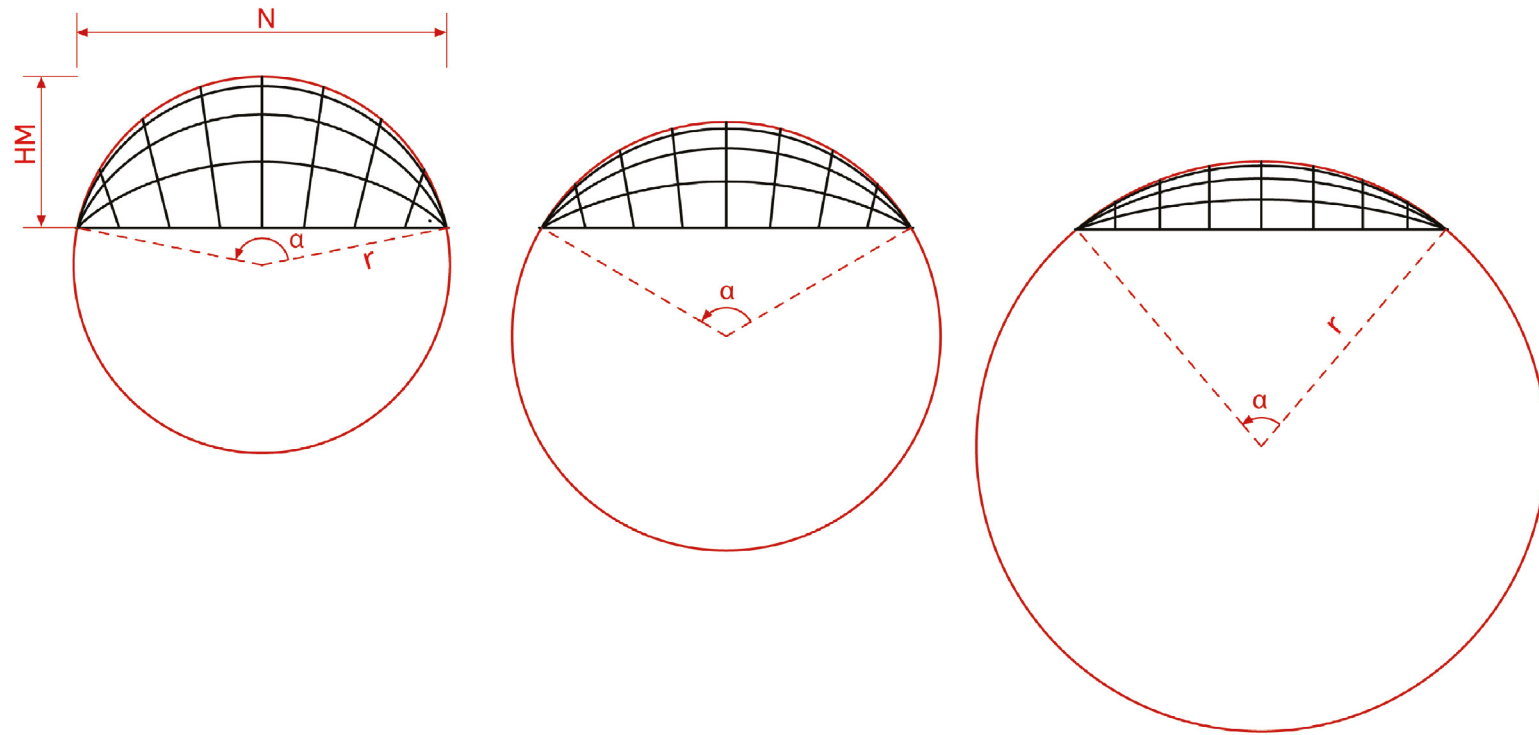


Figura 83. Esquema explicativo de la relación del radio y la sección angular en el crecimiento diferencial topológico progresivo. Algoritmo desarrollado por Andrés Obregón. Dibujo de Ever Patiño.

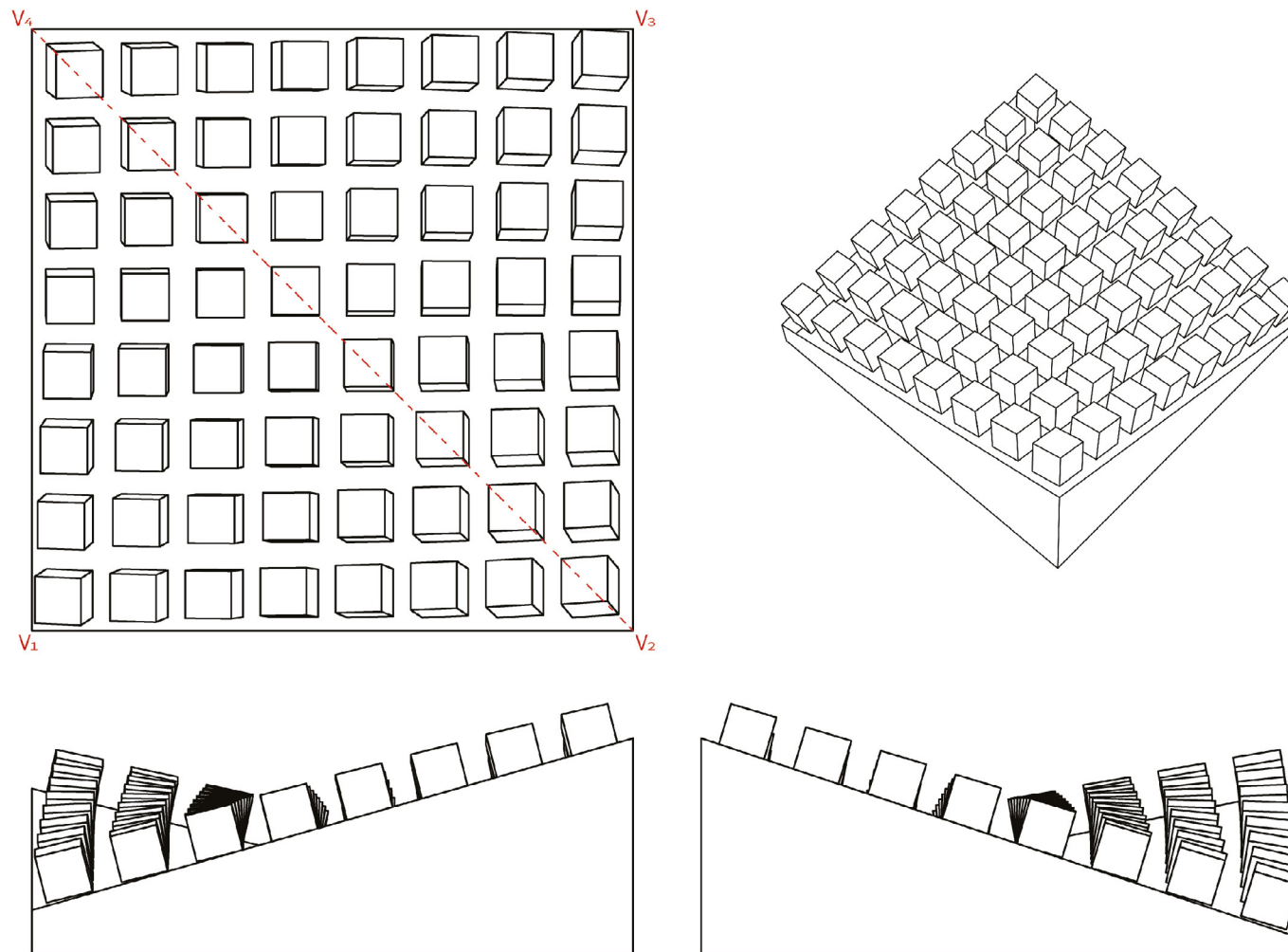


Figura 84. Esquema gráfico de la transformación compleja de crecimiento diferencial topológicoaleatorio. Algoritmo desarrollado por Andrés Obregón. Dibujo de Ever Patiño.

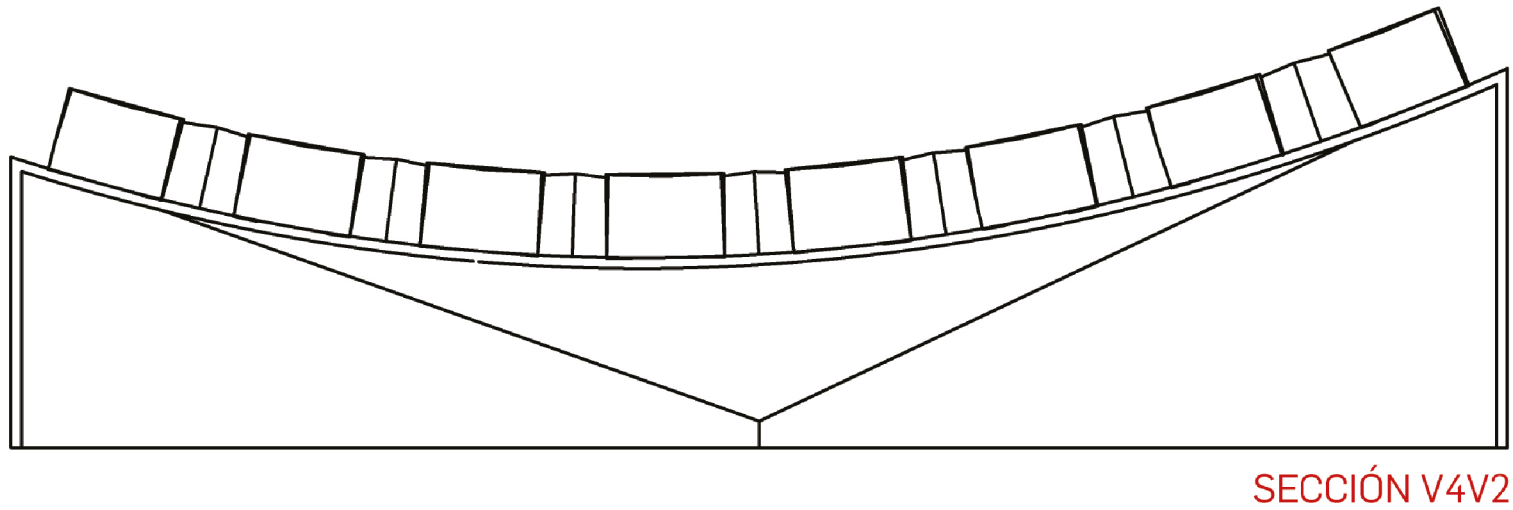


Figura 85. Esquema gráfico de la sección V4V2 en el crecimiento diferencial topológico aleatorio. Algoritmo desarrollado por Andrés Obregón. Dibujo de Ever Patiño.

4.2. Experimentación con software paramétrico

Teniendo en cuenta que se definieron seis tipos de transformaciones, y cada una de ellas tiene dos niveles (3^2+3^2), esto arrojaría 18 combinaciones para cada una de las 24 especies, que representan experimentos digitales independientes, para un total de 432 experimentos que se debían desarrollar en el software paramétrico. Por esto se eligieron con los mismos criterios determinados en el proceso de abstracción, algunas especies con la valoración más alta independiente de la subcategoría y a ellas se les aplicó las transformaciones de manera arbitraria, con el objetivo de explorar diferentes morfologías, pero teniendo en cuenta que estas transformaciones pueden combinarse para buscar texturas y adaptarlas a diferentes superficies.

Por otra parte, la geometría de las abstracciones digitales de las especies seleccionadas limita el tipo de transformaciones que se les puede aplicar. Por ejemplo, un patrón con geometría recíproca estaría categorizada como modulación cerrada, puesto que su configuración y distribución ocasiona que no existan espacios entre los módulos que le faciliten moverse a través de un eje o alrededor de un punto; en este caso, el patrón, como se puede ver en la **Figura 61** no tendría transformación básica. Así mismo, un patrón Voronoi tridimensional como el de la **Figura 62** se le podría aplicar el crecimiento diferencial en dos direcciones y el crecimiento diferencial topológico, pero el crecimiento lineal

cambiaría sustancialmente las propiedades geométricas iniciales del módulo, por lo que no se aplicaría. Es por esto que se desarrollaron dos tablas de valoración para establecer, dependiendo de su geometría, qué transformaciones se pueden aplicar. (Ver **Figuras 86** y **87**).

	Transformación básica	Transformación compleja
Modulación cerrada		x
Modulación abierta	x	x

Figura 86. Tabla de valoración para seleccionar el conjunto de transformaciones dependiendo del tipo de modulación. Una modulación abierta es aquella que muestra espacios planos o vacíos entre los módulos y una modulación cerrada presenta una geometría del módulo sin intersticios o aperturas. Dibujo de los autores.

	Crecimiento lineal	Crecimiento diferencial (dos direcciones)	Crecimiento diferencial topológico
Módulo unidimensional	x	x	x
Módulo tridimensional		x	x
Módulo plano con relieve		x	x

Figura 87. Tabla de valoración para seleccionar el tipo de transformación compleja dependiendo de las propiedades geométricas del módulo. Un módulo unidimensional es una geometría en el plano XY y la textura es dada por los cambios en el pigmento; el módulo tridimensional es una geometría en la que el largo, el ancho y el alto son proporcionalmente similares; y, por último, el módulo plano con relieve es una geometría con proporciones predominantes en el plano XY pero que exhibe un relieve en el eje Z. Dibujo de los autores.

¿Qué son los algoritmos?

Paralelamente a la selección de las transformaciones se desarrollaron los algoritmos en el software paramétrico Grasshopper®. Un algoritmo es un sistema matemático que se compone de unas entradas, un procedimiento y una salida. (Ver **Figura 88**). Esto aplica tanto para un sistema computacional como para un sistema analógico presente en la cotidianidad de la vida diaria. Por ejemplo, para preparar un espagueti a la boloñesa, el cocinero sabe que, además de las entradas, en este caso los ingredientes como tomates, carne, espaguetis, especias, agua y temperatura, tiene que ejecutar un procedimiento a modo de instrucciones, cómo cocinar los espaguetis hasta que estén al dente, cocinar y licuar los tomates con las especias para hacer la salsa. Todo esto para ofrecer a sus comensales un plato bien preparado, es decir, la salida. Si el cocinero tiene las entradas, pero no sabe cómo hacer el procedimiento, no puede cocinar la salida; lo mismo sucede al sentido contrario, si conoce el procedimiento, pero no tiene las entradas en su cocina tampoco puede preparar el alimento. Ver **Figura 88**.

Los algoritmos cumplen la misma función en los sistemas computacionales. En este caso tienen el objetivo de apoyar la experimentación formal, en la medida en que las abstracciones se toman como las entradas del algoritmo, y las transformaciones básicas y complejas son los procedimientos desde donde se obtie-

nen las salidas a modo de variaciones de las abstracciones iniciales. El software que se seleccionó para desarrollar los algoritmos fue Grasshopper®, un plug-in de Rhinoceros® creado en 2007, originalmente se llamó Explicit History y en el 2008 fue nombrado Grasshopper® (Tedeschi, 2014). Dentro de las ventajas del uso de este plug-in frente a otros está su acceso libre y gratuito, el diseño de su interfaz está basada en un lenguaje de programación visual que facilita un acercamiento amigable a personas que no conocen de programación, y periódicamente se desarrollan otros plug-in que apoyan las herramientas de Grasshopper®.

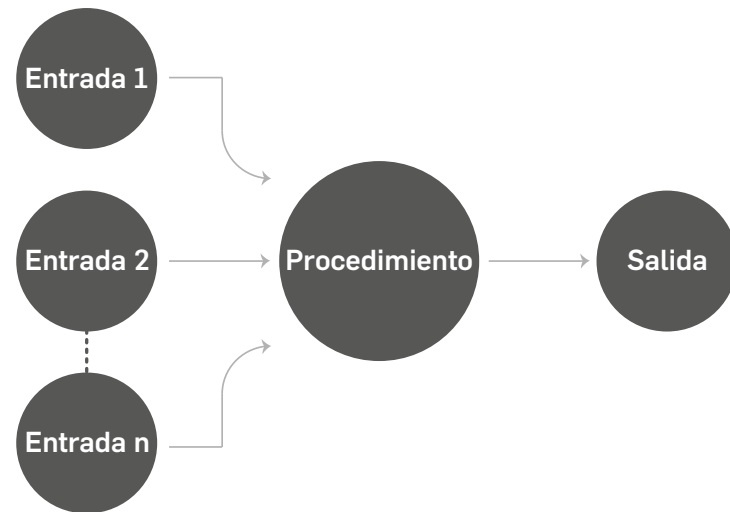


Figura 88. Representación esquemática de un algoritmo. Dibujo de los autores adaptado de Tedeschi, 2014.

Grasshopper® corre sobre el programa Rhinoceros®, y se ubica como una ventana flotante en la que se arrastran componentes al área de trabajo. Por ser un lenguaje de programación visual, como se ve en la **Figura 89** (siguiente página), cada componente tiene inmerso un procedimiento y tiene un punto o varios puntos de entrada, y un punto o varios puntos de salida. En términos generales, las salidas de unos componentes se van conectando con las entradas de otros componentes y así, de manera lógica, hasta llegar a la salida esperada y programar el algoritmo. Por ejemplo, en la **Figura 89** se observa la interfaz de Grasshopper® en el entorno de Rhinoceros®. Mientras se ubican componentes sobre Grasshopper® estos se visualizan en el entorno de Rhinoceros®. En este caso la definición del algoritmo está compuesto por:

- a. Seis puntos que se dibujaron sobre Rhinoceros®, pero que podrían estar representados en Grasshopper® con un valor numérico en X, Y y Z. Cada uno de los cuales se vincula con un componente Point.
- b. Tres componentes Line (línea) que tienen cada una como entradas en A y B dos de los puntos dibujados con anterioridad.
- c. Las salidas de las líneas se conectan a la entrada de un componente de Loft (transición).
- d. Por último, a la salida del componente de Loft se ubica un componente de Surface. Únicamente el componente de Loft ya genera la superficie, pero se utiliza un componente adicional para aclarar el proceso.

Aplicación de las transformaciones con los algoritmos

Como ejemplo del uso de las transformaciones del modelo asociativo desarrollado en el software, se describe paso por paso la generación de un algoritmo para efectuar una transformación básica de rotación progresiva. Las entradas son: (i) la dimensión del panel final en relación con la técnica de fabricación digital seleccionada, (ii) el tipo de grid o cuadrícula que se va a utilizar, en este caso una cuadrícula de rectángulos, (iii) la definición de XA y YB, que es la longitud del módulo, en relación con XAmax y YBmax, que es la longitud del cuadrante o la dimensión máxima del módulo, y (iv) se simplifica el módulo, usando un cubo para facilitar su comprensión. (Ver **Figura 90 a 93**). Así, entonces, para (i) la dimensión del panel se desarrolló una pestaña en la que se vinculan los tipos de fabricación digital con las dimensiones factibles, según el costo de fabricación y las máquinas y herramientas utilizadas. (Ver capítulo 5. Materialización de muestras, sección 5.1. Criterios y parámetros). En este ejemplo, se selecciona la dimensión de fresado CNC que es 200 mm x 200 mm y se determinan ocho módulos en los ejes X y Y. Posteriormente, se encuentra el centro del panel y se conectan centro, dimensión y número de módulos a (ii) la cuadrícula, es decir, al componente que divide el panel en cuadrantes o áreas rectangulares a partir de la información que se le está entregando. Dependiendo del módulo se podría utilizar como base una cuadrícula de rombos o de hexágonos que favorezca, según el caso, un mayor ajuste geométrico. Ver **Figura 90**.

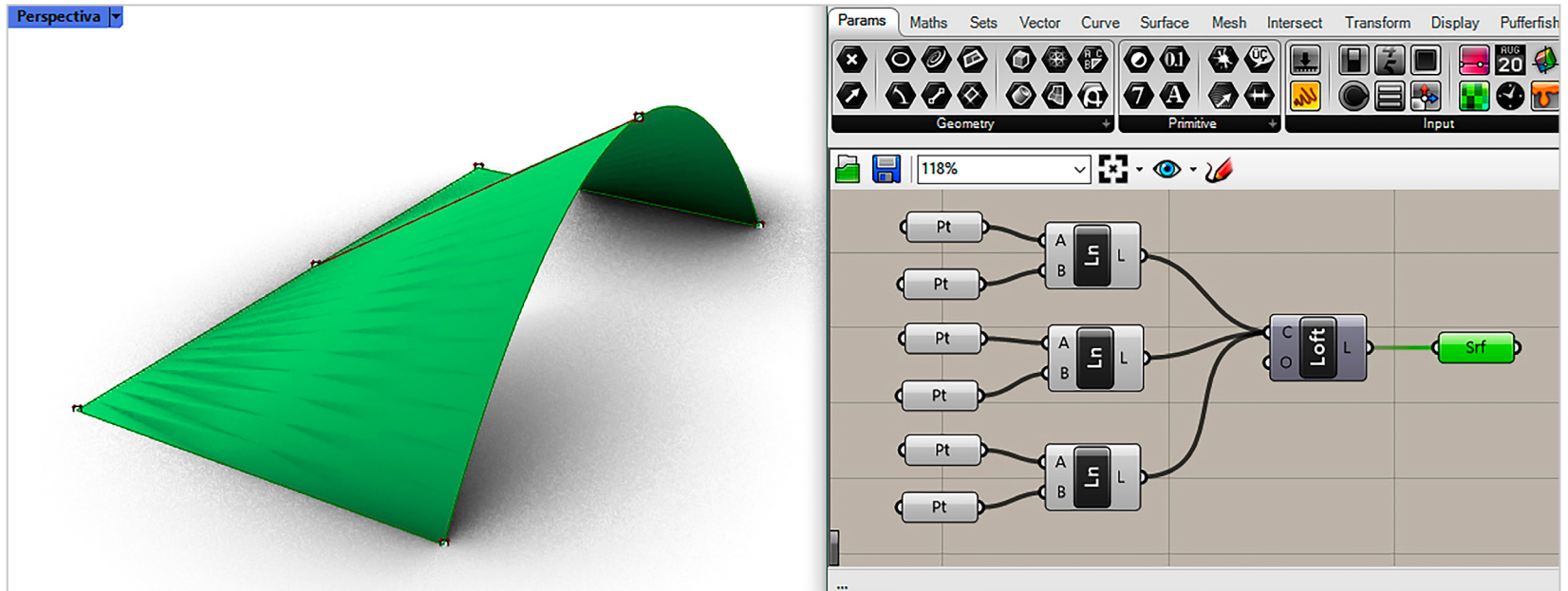


Figura 89. Superficie generada a partir de líneas para mostrar el uso de Grasshopper®. Dibujo de Ever Patiño.

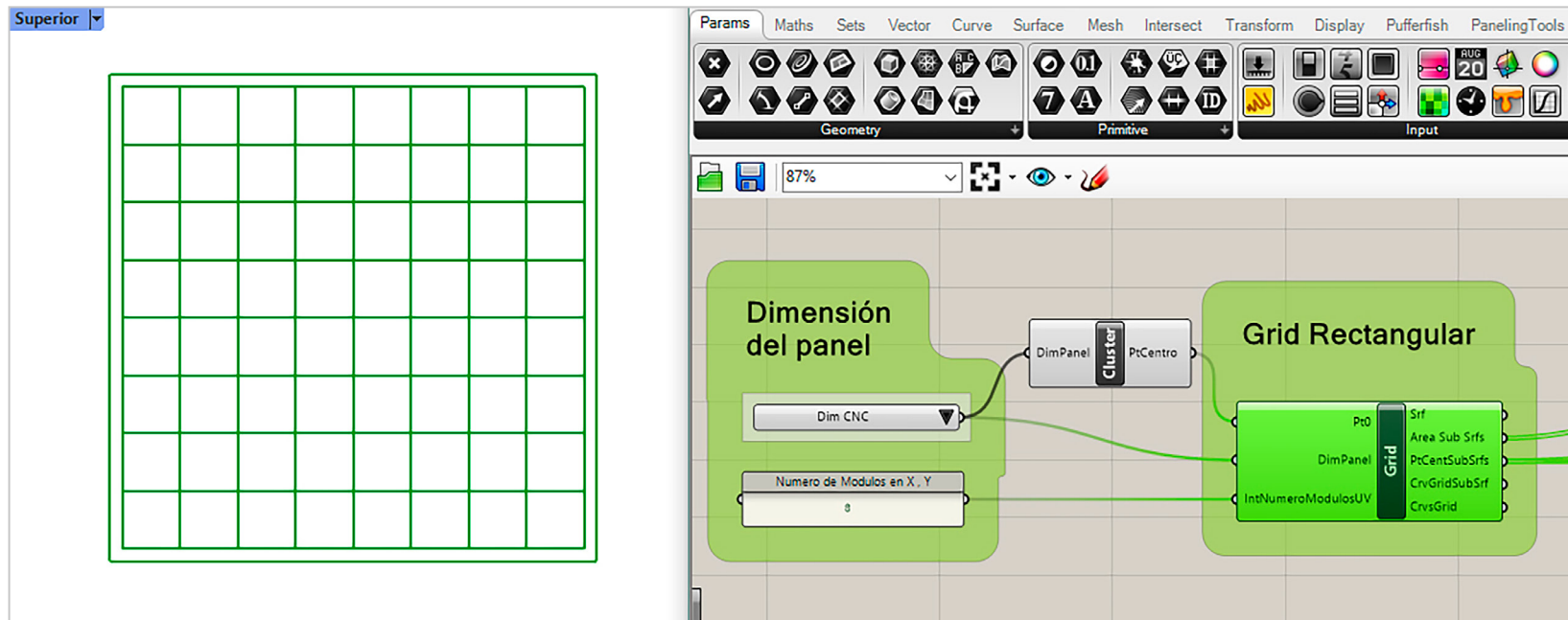


Figura 90. Dos de las Entradas: (i) dimensión del panel y (ii) la grid cuadrada.
 Algoritmo desarrollado por Andrés Obregón. Dibujo de Ever Patiño.

Para completar las entradas, los anteriores componentes se conectan a un componente de Sub superficie que restrinja la longitud del módulo en X y Y, es decir, (iii) XA y YB sobre la base de la longitud máxima en cada cuadrante, o sea, XAmax y YBmax.

Todo esto se conecta al (iv) módulo que, en este ejemplo, es un cubo al que previamente se le definió un plano constructivo XY y un centro. La definición del plano y el centro ubica al cubo en la dirección en la que se construyó la cuadrícula.

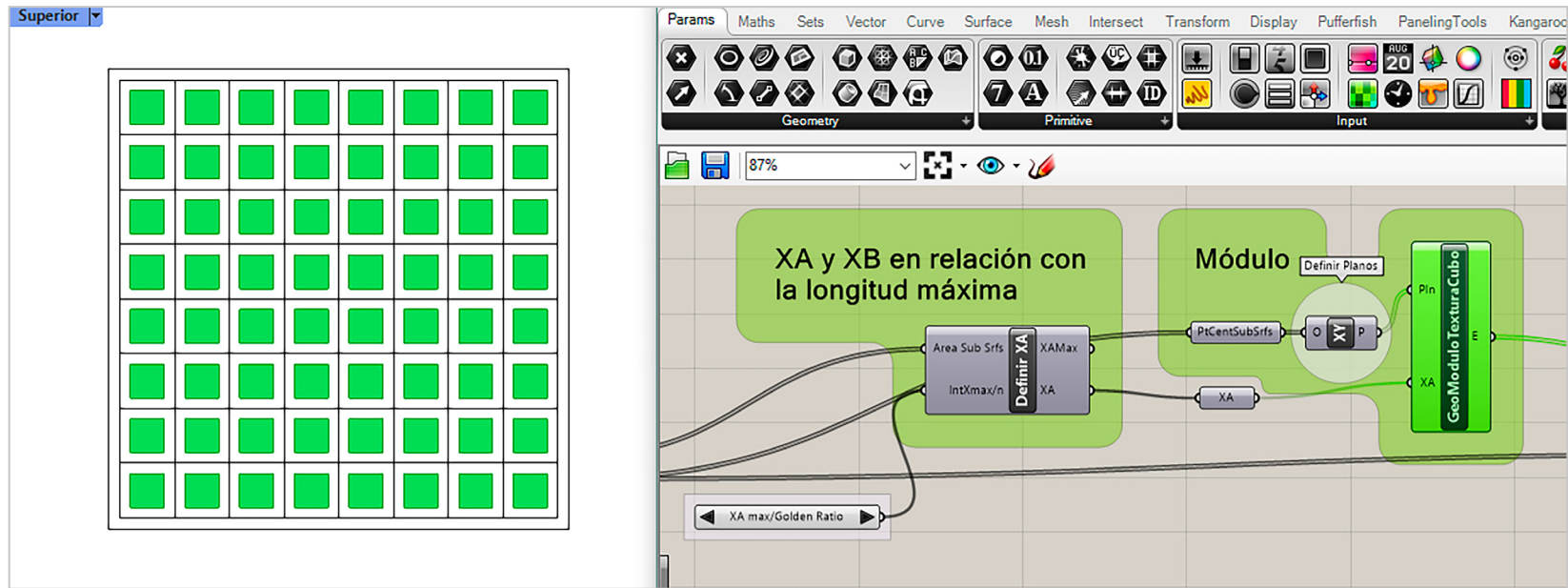


Figura 91. Las otras dos entradas: (iii) la definición de XA y YB en relación con XAmax y YBmax, y (iv) el módulo. Algoritmo desarrollado por Andrés Obregón. Dibujo de Ever Patiño.

Por otro lado, el procedimiento son las instrucciones para hacer las transformaciones básicas programadas a partir de componentes y agrupadas, algunas veces, en un clúster. (Ver **Figura 92**). El clúster es una herramienta que agrupa e integra diferentes procedimientos para que el algoritmo final se lea de manera clara y resumida. Esto significa que dentro de estos elementos hay más componentes que hacen posible que los módulos roten de manera progresiva desde los centros, planos y cuadrículas definidas. Para que se genere una rotación progresiva, en el clúster se define un rango entre un ángulo inicial de cero grados y un ángulo final de noventa grados, se agrega un componente que

genera ángulos de manera aleatoria dentro del rango definido, luego se adiciona un componente que ordena la lista de ángulos de menor o mayor valor para que los módulos roten siguiendo la distribución por columnas. Es decir, en la primera columna, de izquierda a derecha, rota el primer módulo de abajo hacia arriba con el primer ángulo generado; luego, en la misma columna, rota el segundo módulo de abajo hacia arriba con el segundo ángulo generado, y así sucesivamente. Por último, la salida es la textura paramétrica bioinspirada. En la **Figura 93** se pueden ver los componentes que integran el algoritmo.

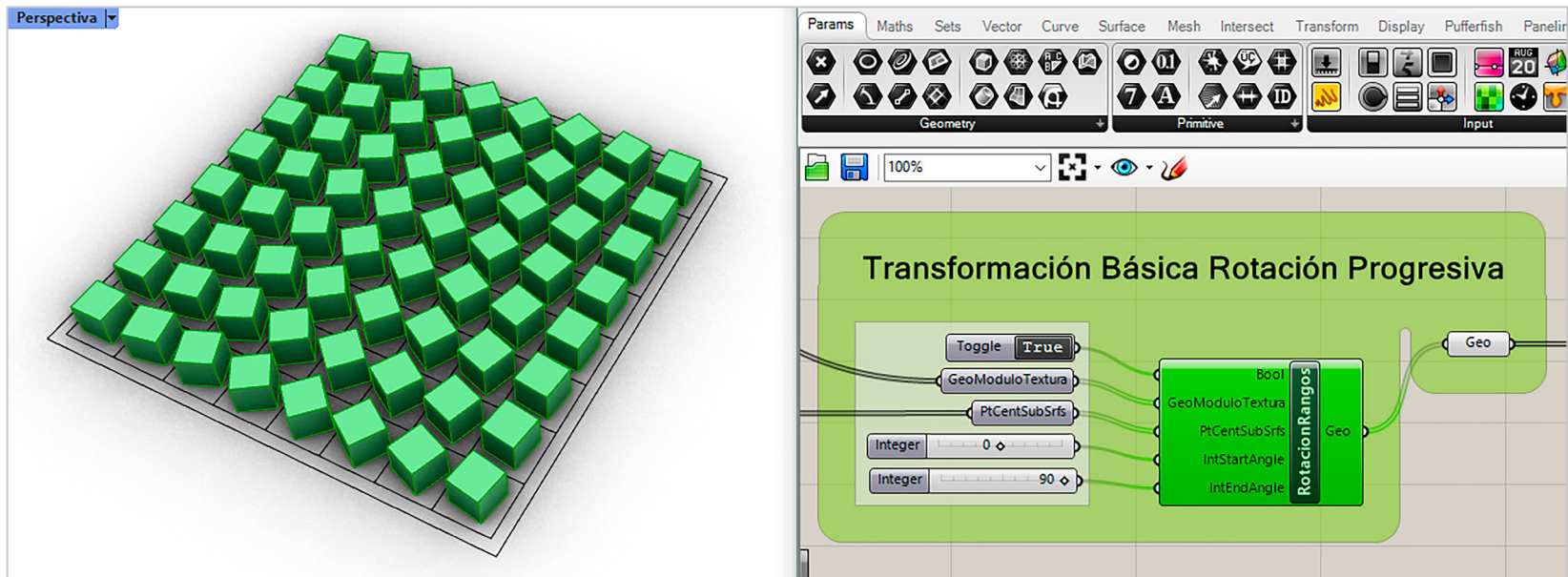


Figura 92. Clúster con los componentes para realizar el procedimiento de rotación progresiva. Algoritmo desarrollado por Andrés Obregón. Dibujo de Ever Patiño.

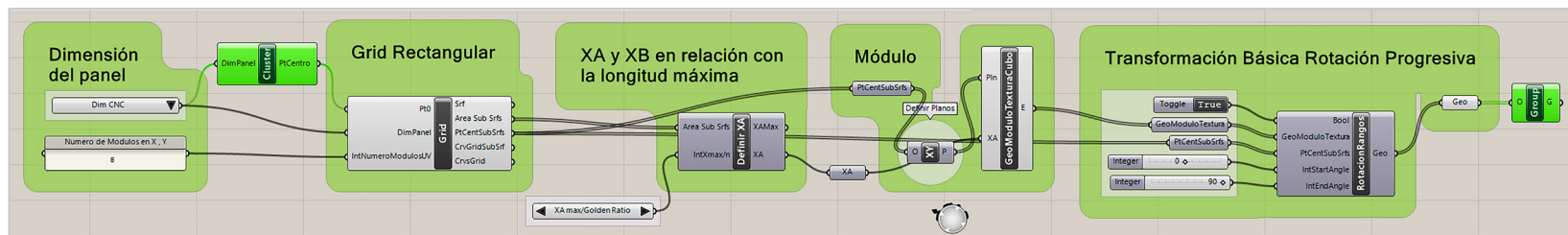


Figura 93. Algoritmo completo para realizar la transformación básica de rotación progresiva. Algoritmo desarrollado por Andrés Obregón. Dibujo de Ever Patiño.

5. Materialización de muestras



Una vez desarrollado el proceso de abstracción y parametrización digital de las transformaciones morfológicas, se hizo la materialización de las muestras físicas a través las siguientes tecnologías de fabricación digital: impresión 3D, fresado por CNC, corte y grabado con láser. Las muestras en diseño, arquitectura e ingeniería se pueden definir como una parte o porción de un material en un formato estandarizado, utilizadas para representar y analizar las características y propiedades de dicho material. El objetivo de las muestras de texturas bioinspiradas fue, por un lado, evaluar la posibilidad de materialización de las texturas con diferentes tecnologías de fabricación digital, por otro lado, facilitar la comprensión y selección de las texturas por sus futuros usuarios por medio del contacto sensorial directo; se considera que la interacción con los materiales y texturas es a través de todos los sentidos y es definida como experiencia multisensorial (Schifferstein & Hekkert, 2007). La percepción de las texturas empieza con la visión, luego continúa con el sentido del tacto y termina con lo cinestésico (Bergen & Adelson, 1988); la interacción con estas muestras se da principalmente a través de los sentidos del tacto y la vista, siguiendo con lo cinestésico al recorrer la superficie con diferentes movimientos; esta experiencia le da la oportunidad a los estudiantes, profesionales e investigadores tener un acercamiento sensorial con piezas construidas con el material y proceso final, esto puede traer como consecuencia una mayor comprensión de las texturas bioinspiradas y la subsecuente visualización de aplicaciones en sus proyectos.

5.1 Criterios y parámetros

Para el desarrollo de las muestras se hizo inicialmente una selección de las texturas bioinspiradas, se analizó la afinidad de la morfología de cada una con las tecnologías de fabricación digital y se hizo una tabla de valoración; la afinidad se definió como la capacidad y efectividad de la tecnología de fabricación digital para materializar la morfología de la textura natural con fidelidad. En la tabla se ingresaron las texturas, su categoría morfológica y las tecnologías de fabricación digital, estas últimas organizadas en tecnologías sustractivas: láser, fresado por CNC; y aditivas: impresión 3D por Deposición de Hilo Fundido y DLP (Digital Light Processing). Para la evaluación se considera un puntaje máximo de 5 y un mínimo de 1, siendo 5 el mayor puntaje (máxima afinidad) y 1 el mínimo (afinidad nula). Con esta tabla se pudo definir cuál tecnología sería la más adecuada para cada textura y si su materialización es viable con tecnologías aditivas o sustractivas, esto último se puede deducir del promedio por área en la tabla. El análisis de los resultados de esta tabla permitió seleccionar las tecnologías adecuadas para cada textura y descartar aquellas con afinidad nula, esto redujo el número de muestras y optimizó la etapa de materialización. (Ver **Figura 94**).

Tabla de valoración

para aplicación de tecnologías de Fabricación Digital



Texturas Bioinspiradas

Textura natural	Categoría	Tecnologías de fabricación sustractiva				Tecnologías de fabricación aditiva		
		Grabado Láser	Corte Láser	Fresado por CNC	Promedio	Deposición de hilo fundido	Impresión 3D por rayo UV	Promedio
	Líneas/Rectas	5	2	1	2,7	1	3	2
	Geometrías Básicas/Líneas/Curvas/Explosión	3	2	2	2,3	2	5	3,5
	Geometrías Básicas/Líneas/Curvas/Modular	4	4	5	4,3	3	4	3,5
	Geometrías Básicas/Líneas/Irregular Fragmentada	5	4	1	3,3	1	2	1,5
	Geometrías Básicas/Rombos	3	3	4	3,3		5	2,5
	Geometrías Básicas/Circular/Concéntrico	5	4	1	3,3	1	1	1
	Geometrías Básicas/Circular/Modular	3	3	3	3,0	2	5	3,5

Figura 94. Tabla para la valoración de tecnologías de fabricación digital en relación con las texturas bioinspiradas. Esquema de los autores.

Para diseñar las muestras se consideraron diversos parámetros, las dimensiones y materiales se estandarizaron con el objeto de reducir las variables a analizar y evaluar los resultados con mayor facilidad. Se definieron formatos para cada proceso y se consideraron aspectos como el formato de las máquinas y de los materiales, el presupuesto disponible, entre otros. Con respecto al acabado superficial de las muestras, con el objeto de analizar la calidad de cada muestra sin tener interferencias, se decidió mantener las piezas tal y como se obtienen como resultado de la fabricación, sin someterlas a postprocesos, como pinturas, barnices o pulidos. En las **Figuras 95 y 96** (siguiente página) se pueden ver los formatos asignados para cada tecnología y algunos formatos de la textura referenciada en la especie *Phoenix canariensis*.

	Tecnologías	Materiales	Formatos en milímetros
1	Corte, marcado y grabado láser	MDF de 3 mm de espesor	100x100 mm, 200x200 mm
		Madera contrachapada (Plywood) de 3.2 mm de espesor	
2	Fresado por CNC	Acrílico transparente (clear) de 2 mm de espesor	200x200 mm
		Roble colombiano o roble andino, especie <i>Quercus humboldii</i>	
3	Impresión 3D: FDM	ABS Plus, color blanco	100x100 mm
4	Impresión 3D: Tecnología DLP	Resina epóxica, color rojo translúcido, gris o blanco	50x50 mm

Figura 95. Tabla para definición de materiales, procesos y formatos de muestras. Esquema de los autores

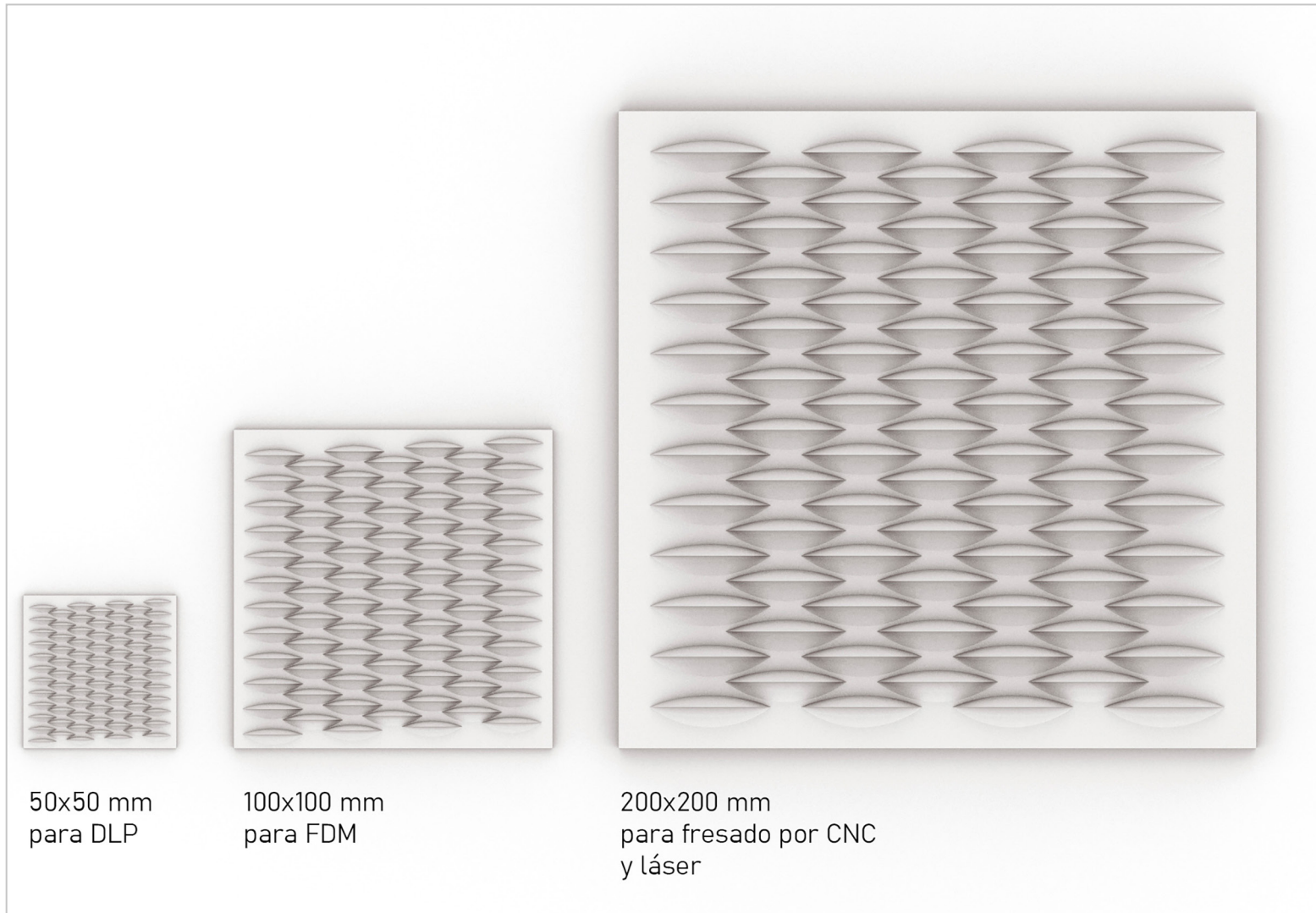


Figura 96. *Diferentes formatos en milímetros para muestras de la textura referenciada en la especie Phoenix canariensis. Esquema de los autores.*

Las muestras se clasificaron en estándar y con transformaciones, las texturas estándar son aquellas cuyas geometrías son el resultado de un proceso de síntesis geométrica y modulación (Ver sección 3.3. Abstracción de patrones). Las texturas con transformaciones son aquellas que, además, han sido parametrizadas y modificadas con base en algoritmos basados en la naturaleza (Ver sección 4.2. Experimentación con software paramétrico). Aunque el objetivo principal del proyecto estuvo centrado en la materialización con tecnologías digitales, se hicieron también muestras con procesos analógicos, como termoformados de láminas poliméricas y piezas de concreto, esto evidencia las amplias posibilidades de aplicación de las texturas y la factibilidad de integración entre técnicas digitales y analógicas.

5.2 Fabricación de las muestras

Inicialmente, se organizaron todos los archivos de las texturas en carpetas, según los tipos de tecnologías y los formatos correspondientes. Todos los archivos digitales fueron hechos en el software CAD Rhinoceros® y se exportaron a formatos CAD universales, estos se pueden definir como archivos de alta compatibilidad para ser utilizados en cualquier tipo de software CAD, incluso en programas de dibujo vectorial, tal es el caso de Adobe Illustrator® (*.ai) en el caso de las texturas bidimensionales. Los tipos de archivos asignados para cada tecnología fueron los siguientes:

- Corte, marcado y grabado láser: AutoCAD Drawing Exchange (*.dxf) y Adobe Illustrator® (*.ai)
- Impresión 3D, ya sea FDM, DLP (Digital Light Processing) o estereolitografía: STL (Stereolithography) (*.stl)
- Fresado por CNC: Rhino3D Models (*.3dm) para ser usado con el plug-in de Rhinoceros® denominado Rhino CAM, para otros softwares CAM: (Stereolithography) (*.stl), IGES (*.igs) y STEP (*.stp; *.step).

Luego, se hizo una planeación de la etapa de materialización según etapas y fechas, se organizaron los equipos de trabajo, integrados por profesores-investigadores y estudiantes de pregrado de Diseño Industrial del semillero -MORFOlab- de la Línea de Investigación en Morfología Experimental -LIME-. Por último, se asignaron los lugares dónde se fabricarían las piezas, ya fuera en el RhinoFabStudio de la Universidad Pontificia Bolivariana, o bien con proveedores externos.

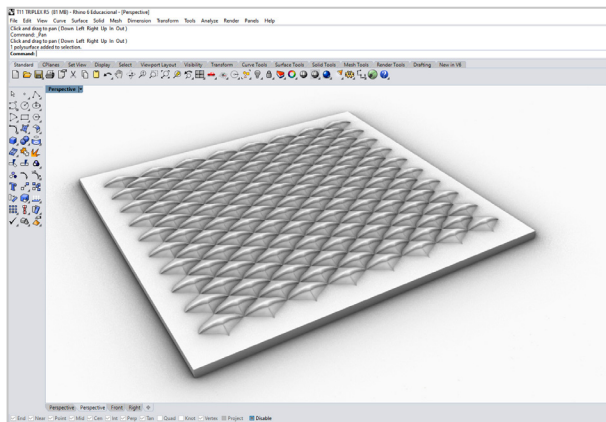
Se hizo un registro fotográfico constante y sistemático del proceso de materialización y los resultados obtenidos. A continuación, desde la **Figura 97** hasta la **166** se puede ver una selección de las fotos de muestras hechas con diferentes materiales, técnicas y tecnologías.

Muestras

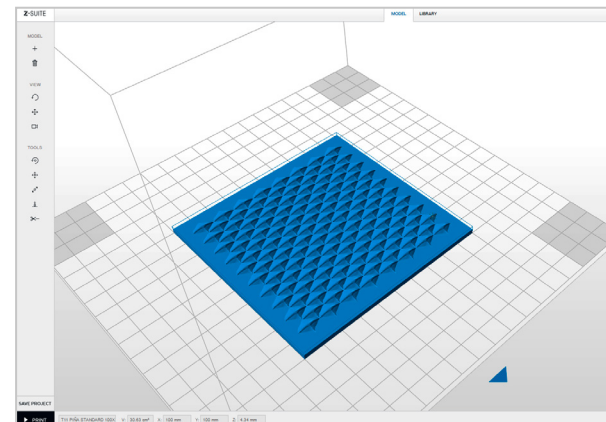
Fabricación digital aditiva

Síntesis visual del proceso de fabricación aditiva

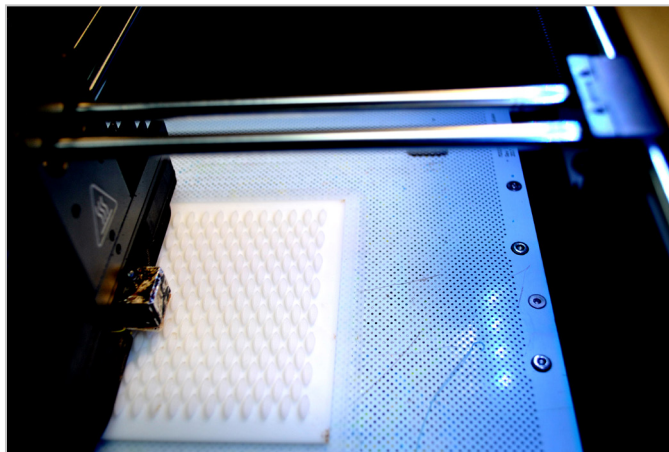
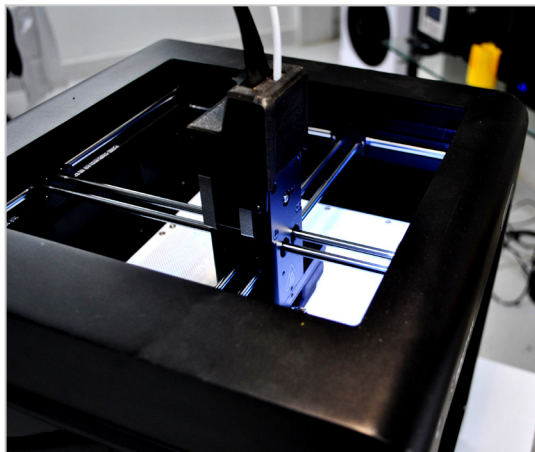
1. Exportación de archivo desde un software CAD



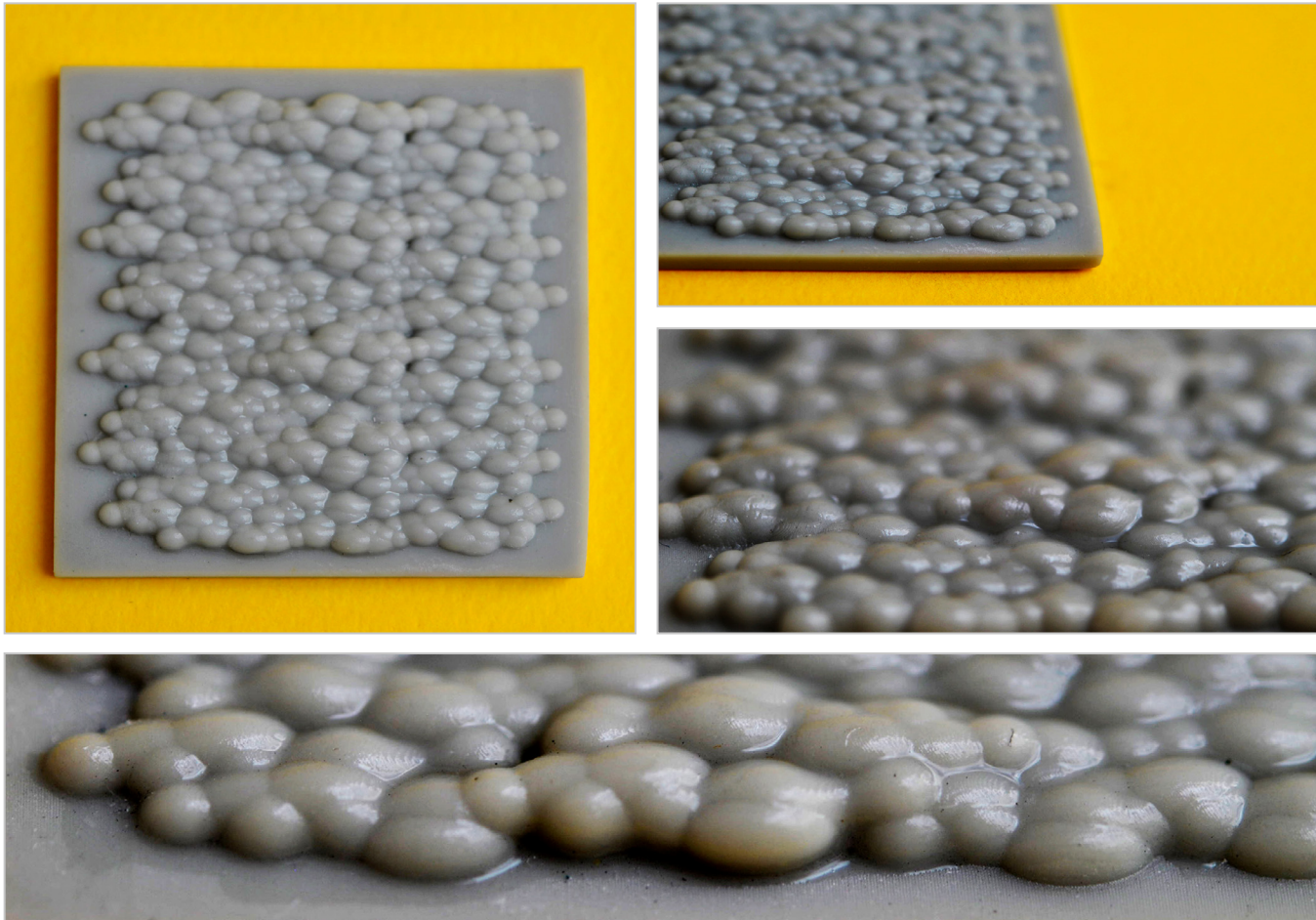
2. Importación de archivo y definición de parámetros en un software CAM para impresión 3D



3. Materialización de muestra a través de impresión 3D

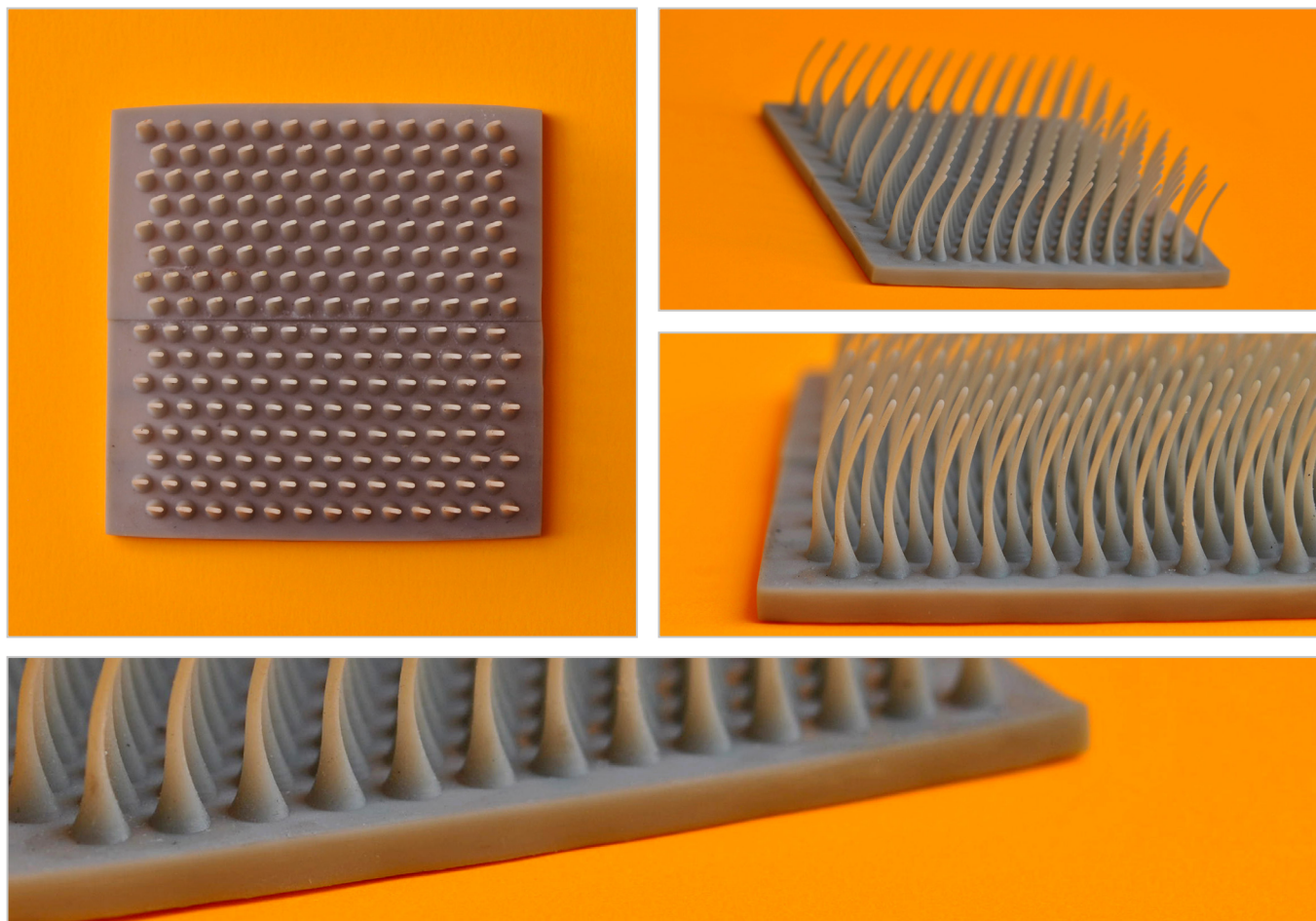


Figuras 97, 98, 99 y 100. Secuencia del proceso de materialización con tecnologías de fabricación digital aditiva. Fotografías y modelos digitales de David A. Torreblanca-Díaz y estudiantes del semillero -MORFOlab-.



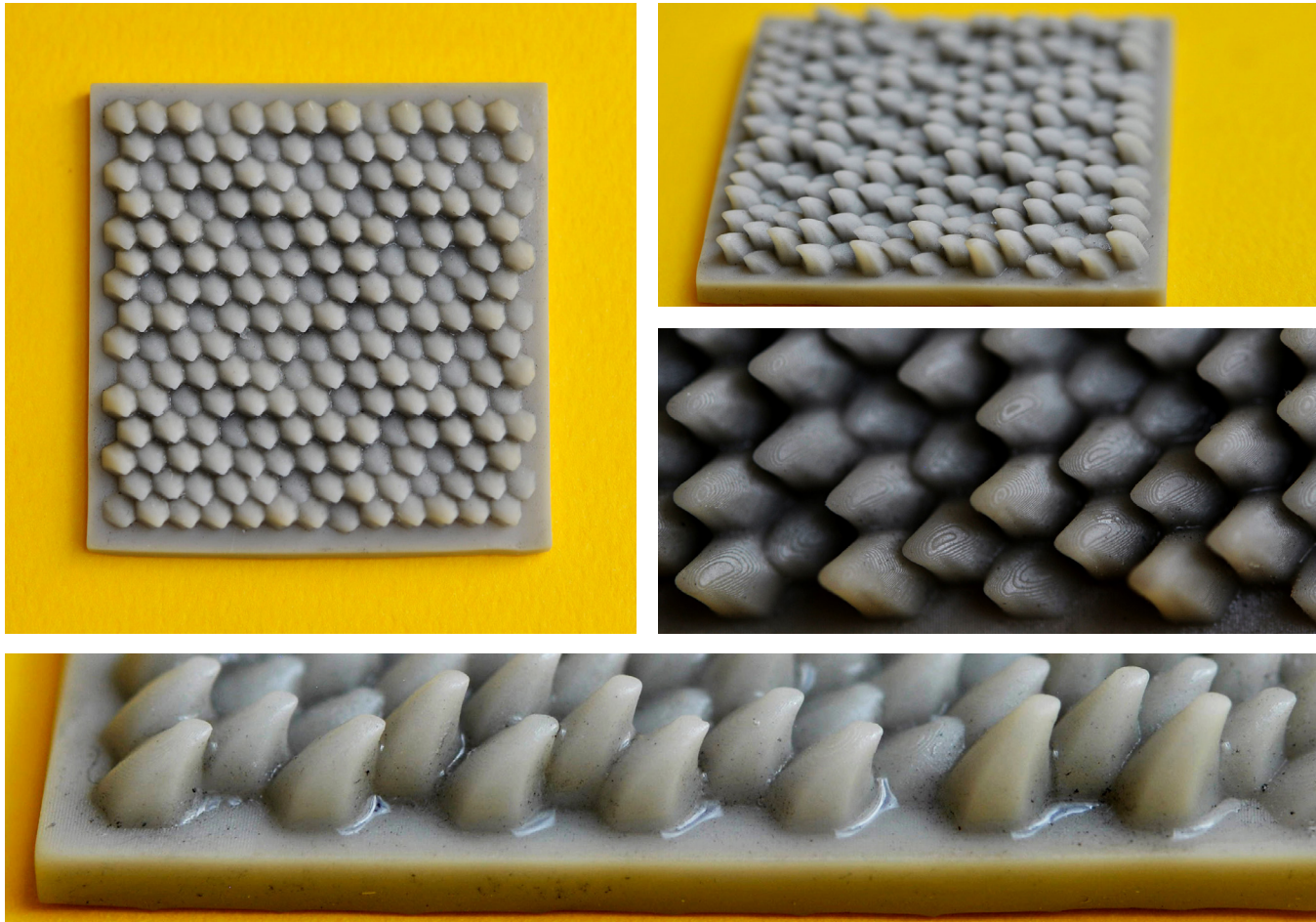
Especie: *Theobroma cacao*
Tipo de textura: estándar
Material: resina epóxica termocurable Freeprint grey de Detax (polímero)
Tecnología: impresión 3D tipo DLP (Digital Light Processing) / impresora Asiga PRO 50
Dimensiones: 50 x 50 x 4 mm

Figura 101. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz



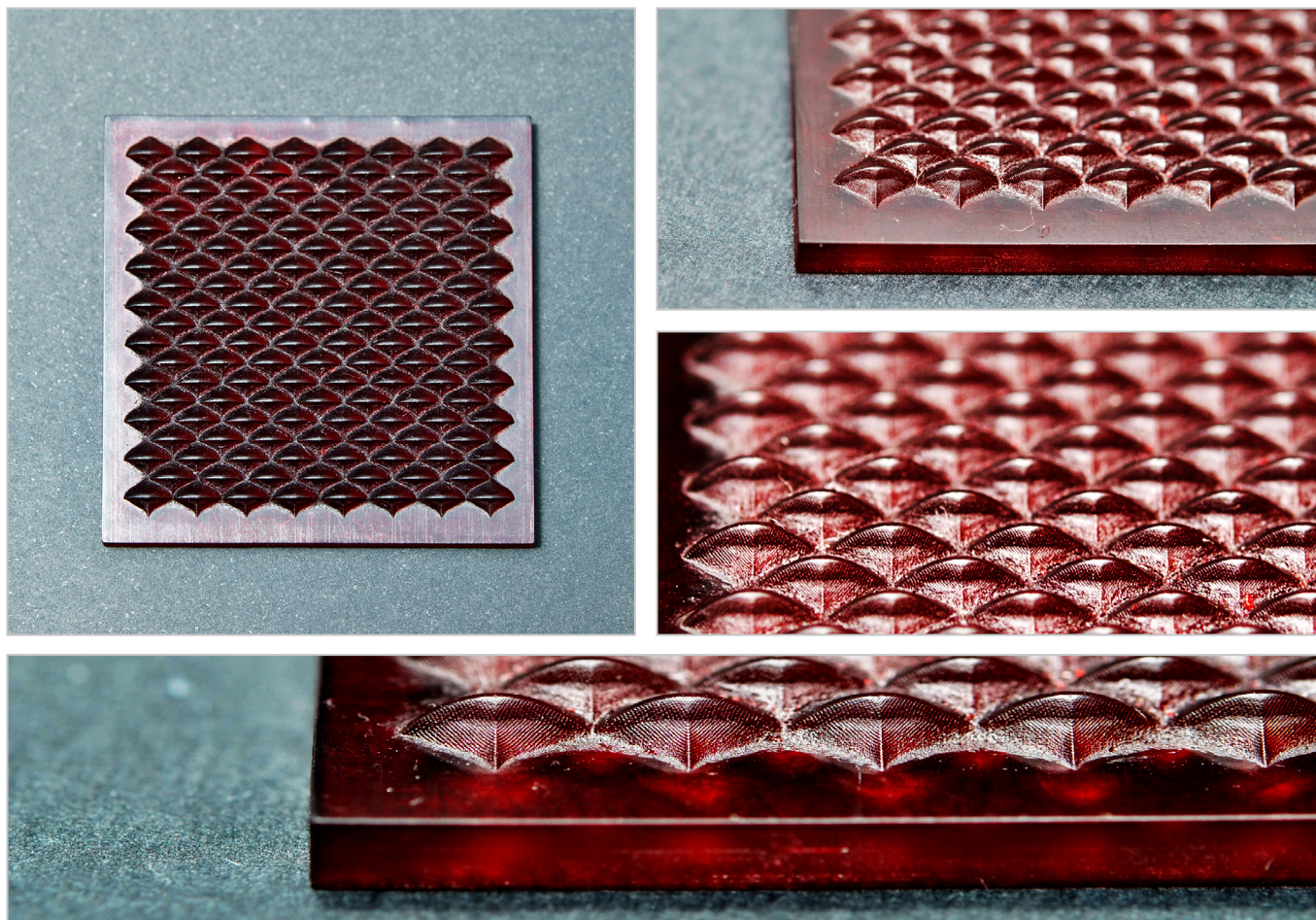
Especie: *Nephelium lappaceum*
 Tipo de textura: estándar
 Material: resina epóxica termocurable Freeprint grey de Detax (polímero)
 Tecnología: impresión 3D tipo DLP (Digital Light Processing) / impresora Asiga PRO 50
 Dimensiones: 90 x 90 x 25 mm

Figura 102. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz



Especie: *Pitahaya*, fruto de las especies *Hylocereus* y *Selenicereus*, de la familia *Cactaceae*
Tipo de textura: estándar
Material: resina epóxica termocurable Freeprint grey de Detax (polímero)
Tecnología: impresión 3D tipo DLP (Digital Light Processing) / impresora Asiga PRO 50
Dimensiones: 50 x 50 x 6 mm

Figura 103. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz



Especie: *Pinus pinea*
Tipo de textura: estándar
Material: resina epóxica termocurable Fusion red (polímero)
Tecnología: impresión 3D tipo DLP (Digital Light Processing) / impresora Asiga PRO 50
Dimensiones: 50 x 50 x 4 mm

Figura 104. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz



Especie: *Artocarpus heterophyllus*

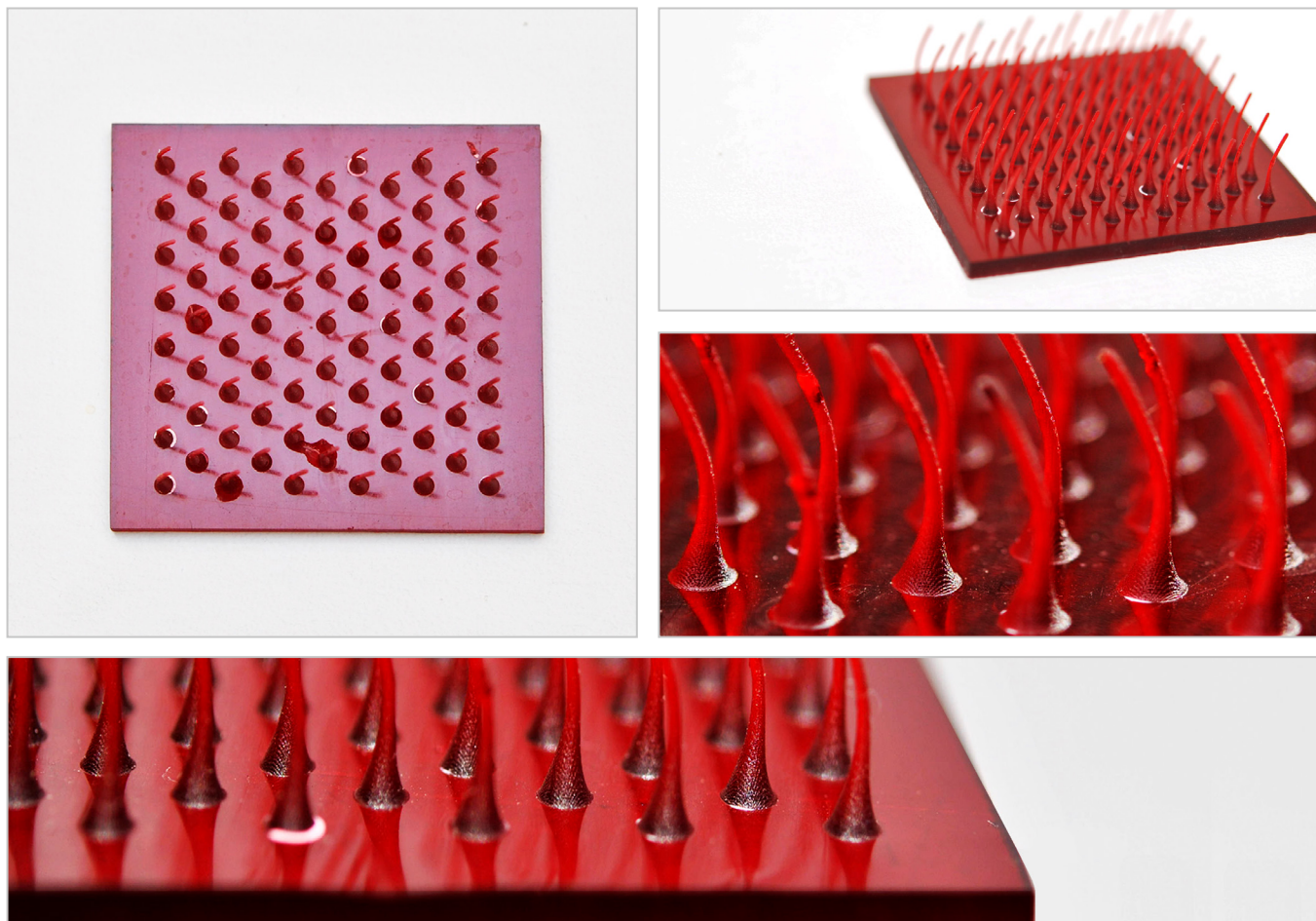
Tipo de textura: estándar

Material: resina epóxica termocurable Fusion red (polímero)

Tecnología: impresión 3D tipo DLP (Digital Light Processing) / impresora Asiga PRO 50

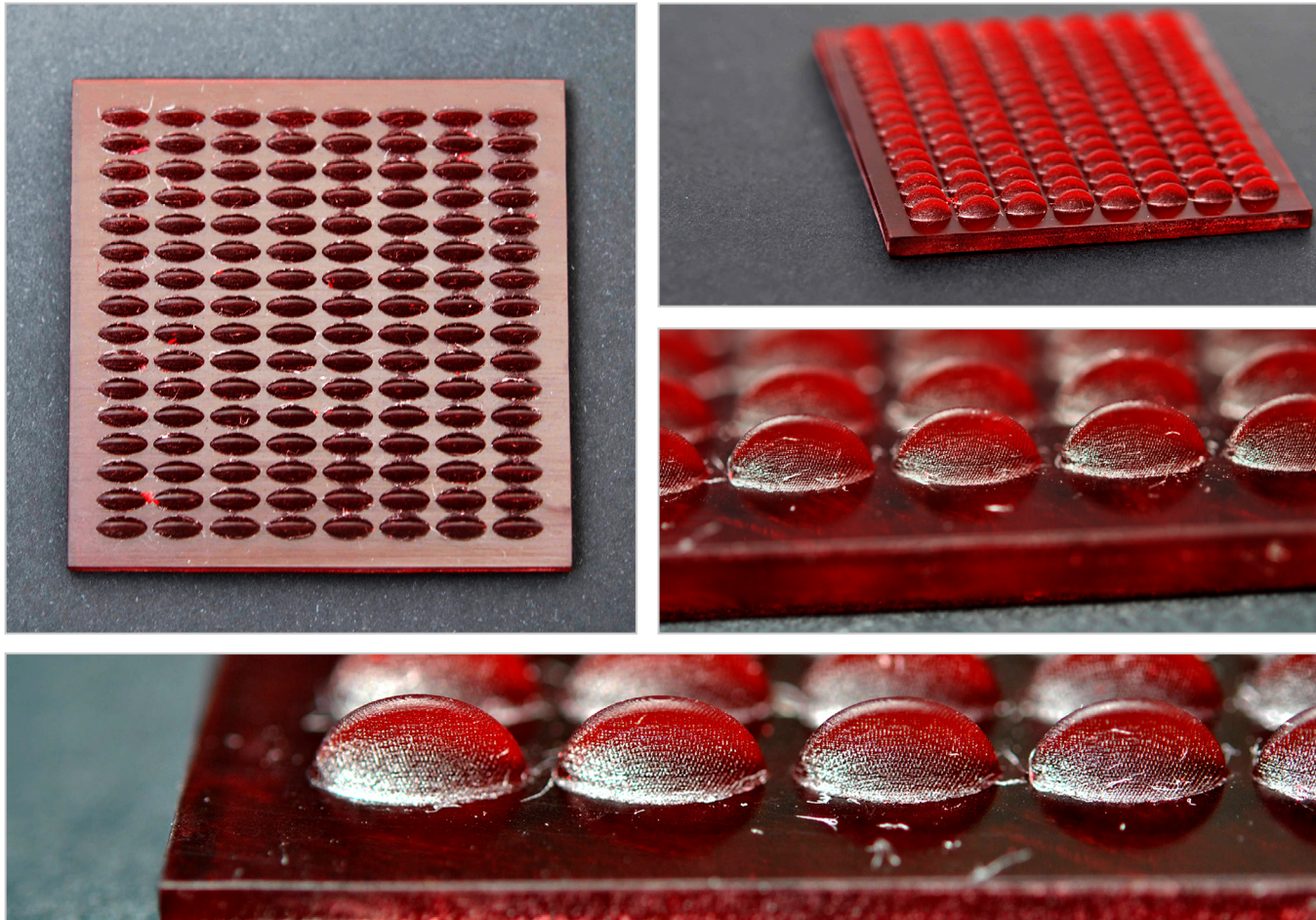
Dimensiones: 50 x 50 x 4 mm

Figura 105. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz



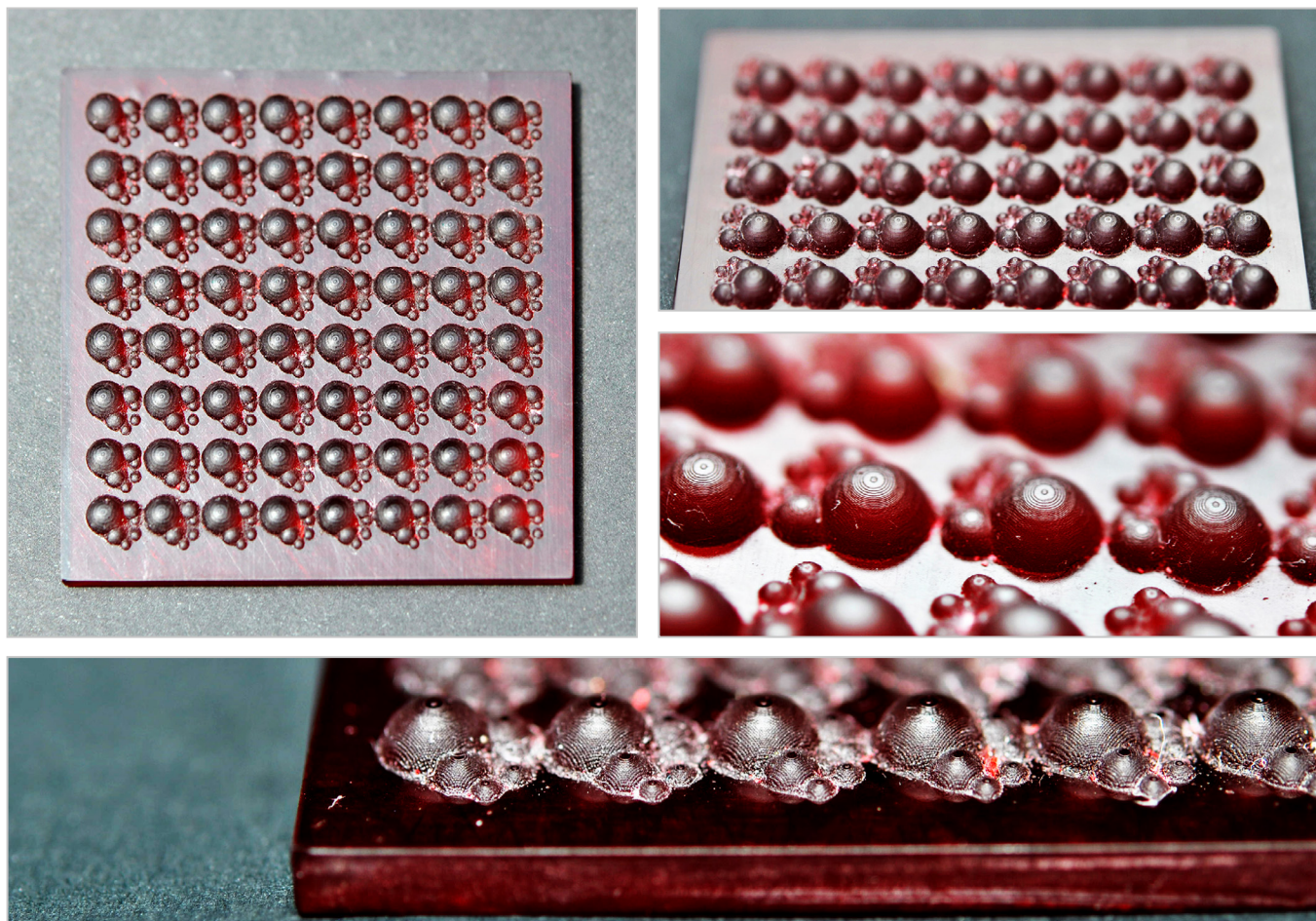
Especie: *Nephelium lappaceum*
 Tipo de textura: estándar
 Material: la resina epóxica termocurable Fusion red (polímero)
 Tecnología: impresión 3D tipo DLP (Digital Light Processing) / impresora Asiga PRO 50
 Dimensiones: 50 x 50 x 10 mm

Figura 106. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz



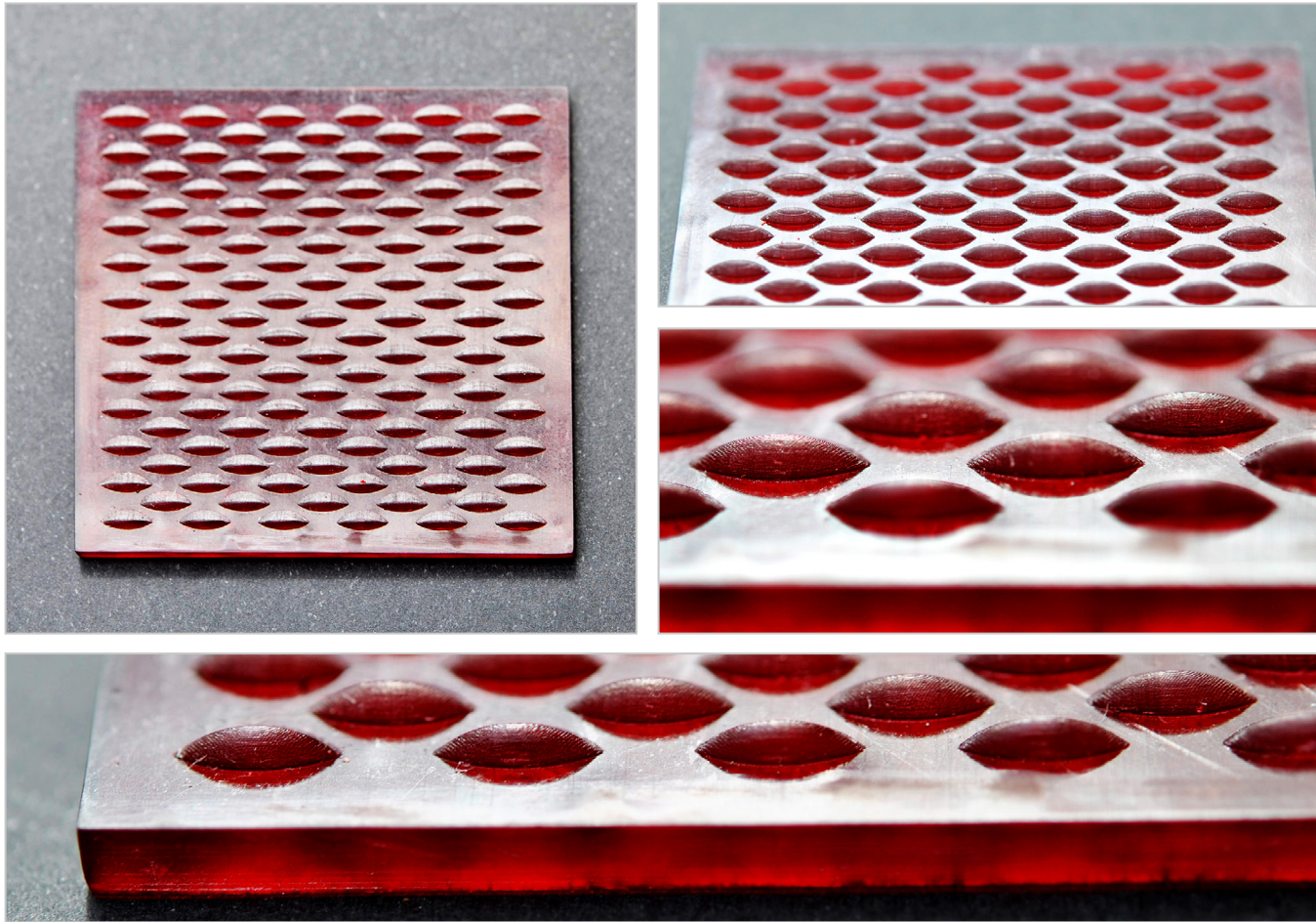
Especie: *Eugenia uniflora*
Tipo de textura: estándar
Material: resina epóxica termocurable Fusion red (polímero)
Tecnología: impresión 3D tipo DLP (Digital Light Processing) / impresora Asiga PRO 50
Dimensiones: 50 x 50 x 5 mm

Figura 107. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz



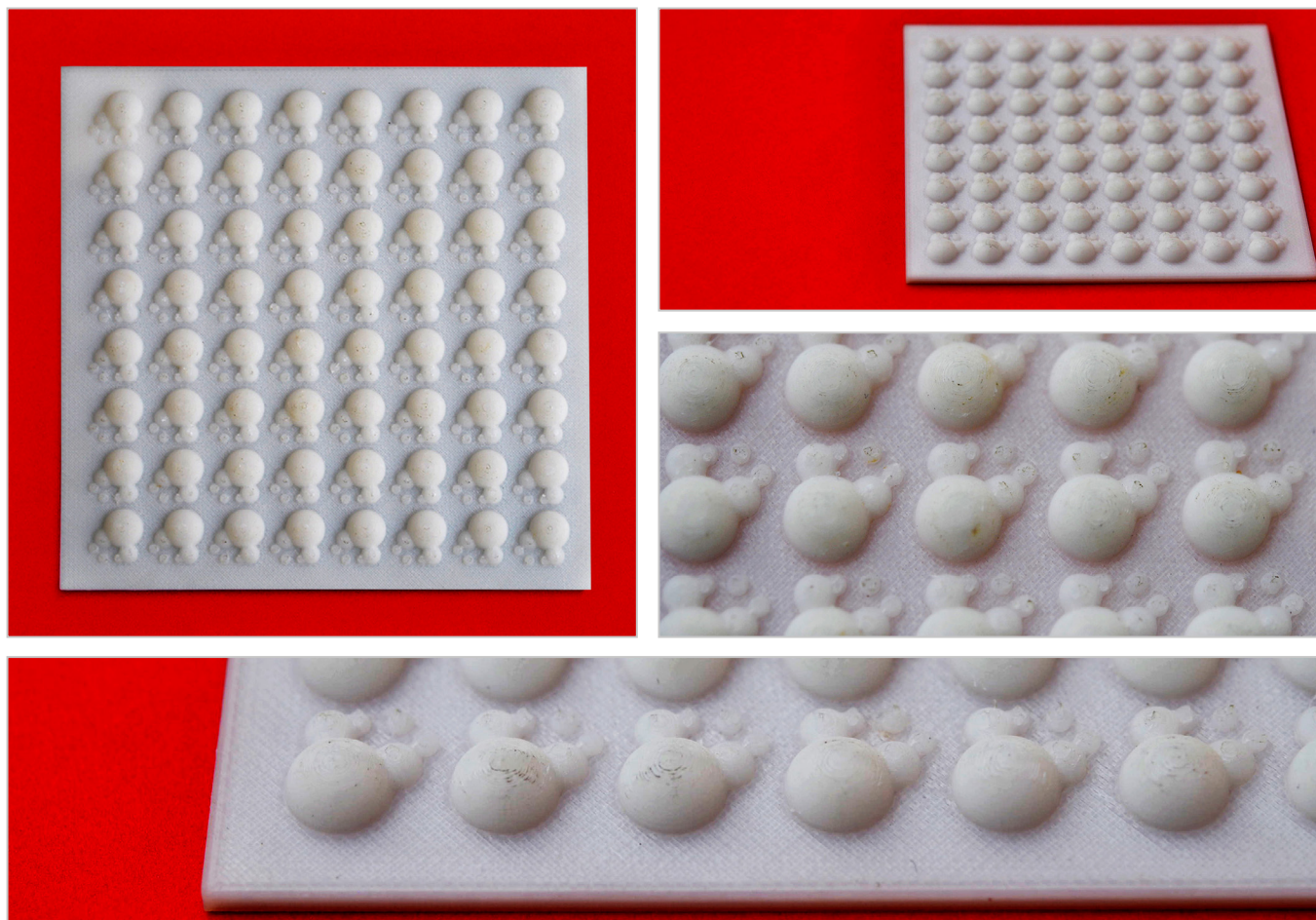
Especie: *Cucurbita pepo*
Tipo de textura: estándar
Material: resina epóxica termocurable Fusion red (polímero)
Tecnología: impresión 3D tipo DLP (Digital Light Processing) / impresora Asiga PRO 50
Dimensiones: 50 x 50 x 4 mm

Figura 108. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz



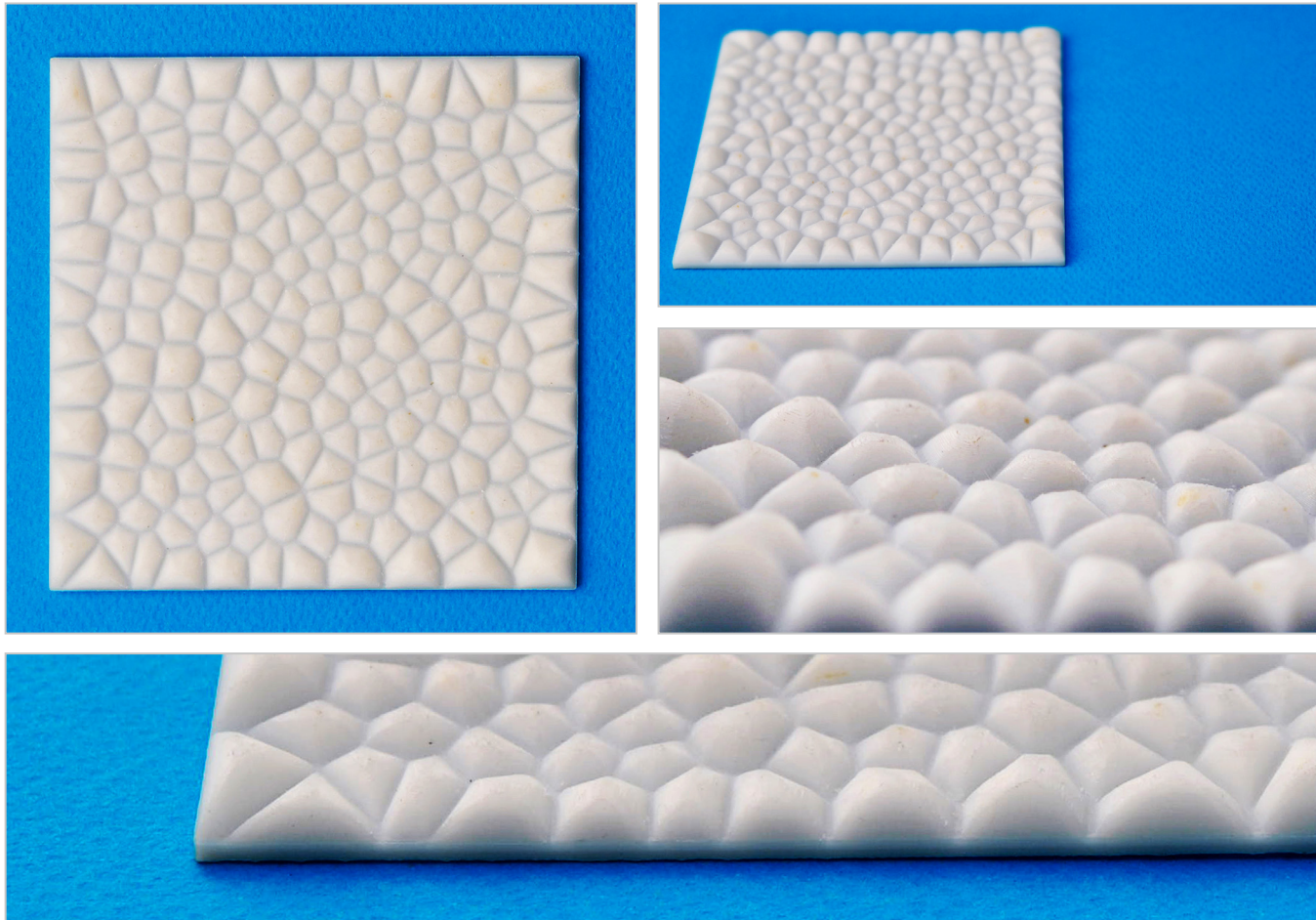
Especie: *Phoenix canariensis*
Tipo de textura: estándar
Material: resina epóxica termocurable Fusion red (polímero)
Tecnología: impresión 3D tipo DLP (Digital Light Processing) / impresora Asiga PRO 50
Dimensiones: 50 x 50 x 3 mm

Figura 109. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz



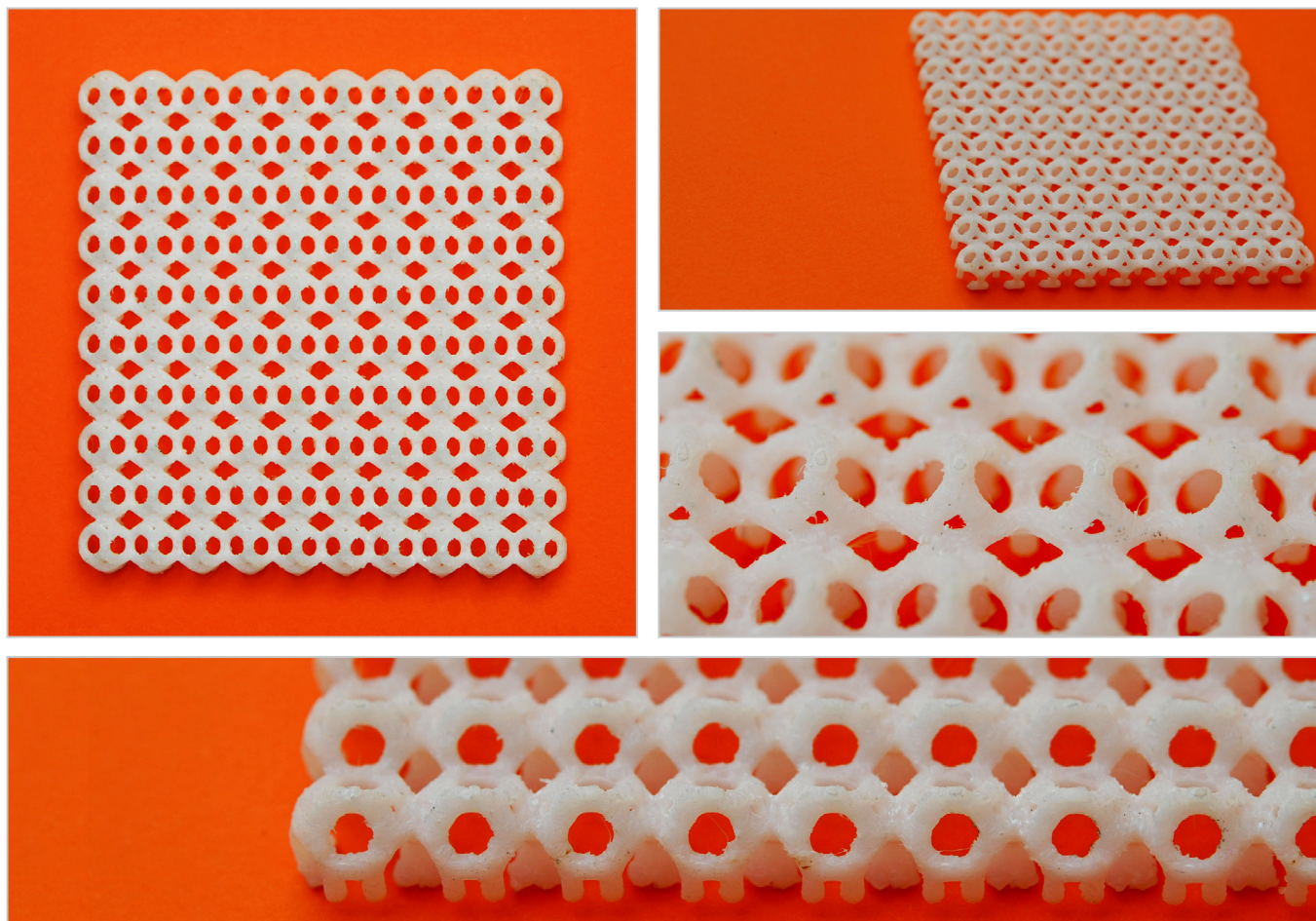
Especie: *Cucurbita pepo*
Tipo de textura: estándar
Material: ZABS plus (polímero)
Tecnología: impresión 3D tipo FDM (Fused Deposition Modeling) / impresora Zortrax M-200
Dimensiones: 100 x 100 x 6 mm

Figura 110. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz



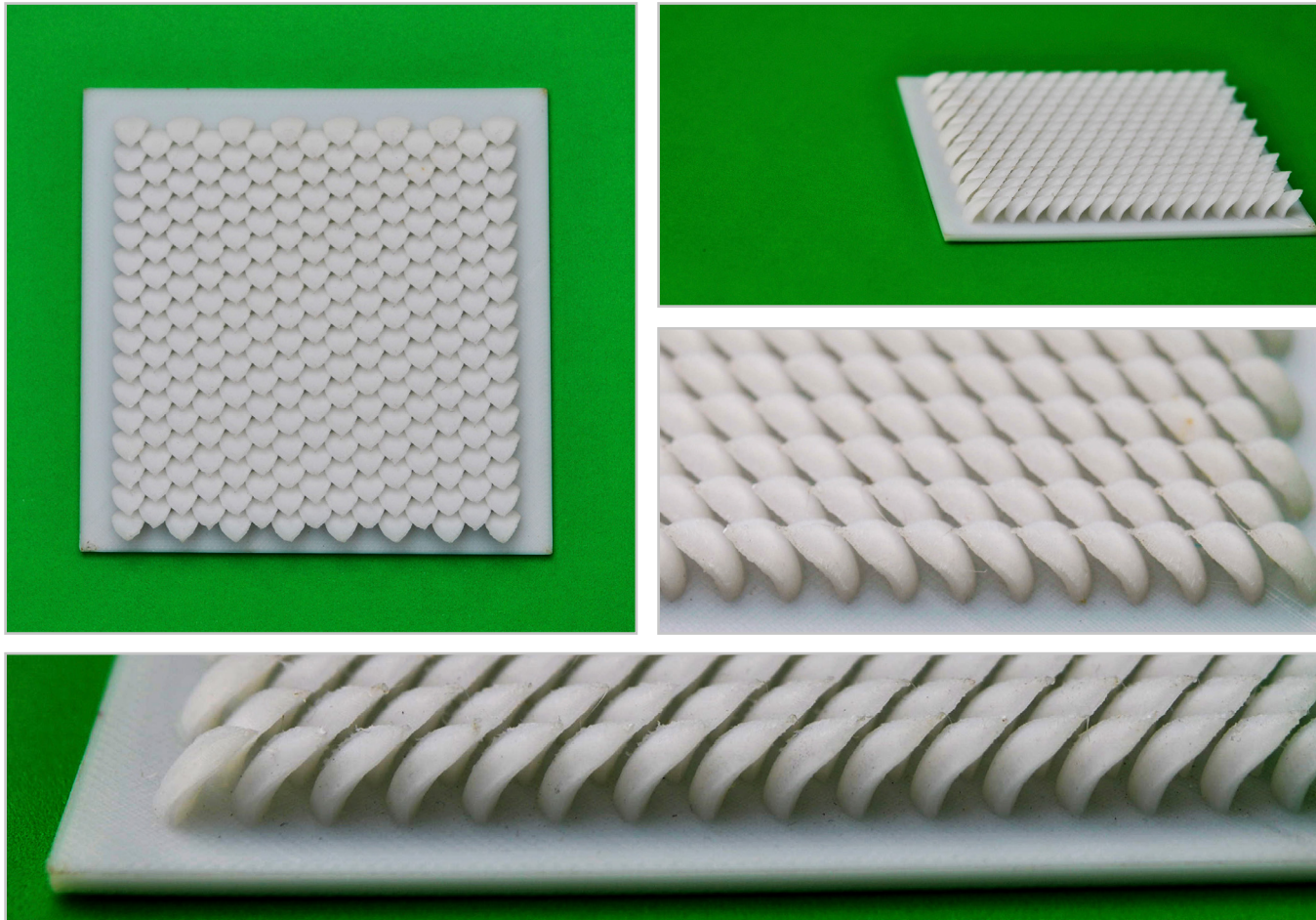
Especie: *Artocarpus heterophyllus*
Tipo de textura: estándar
Material: ZABS plus (polímero)
Tecnología: impresión 3D tipo FDM (Fused Deposition Modeling) / impresora Zortrax M-200
Dimensiones: 100 x 100 x 5 mm

Figura 111. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz



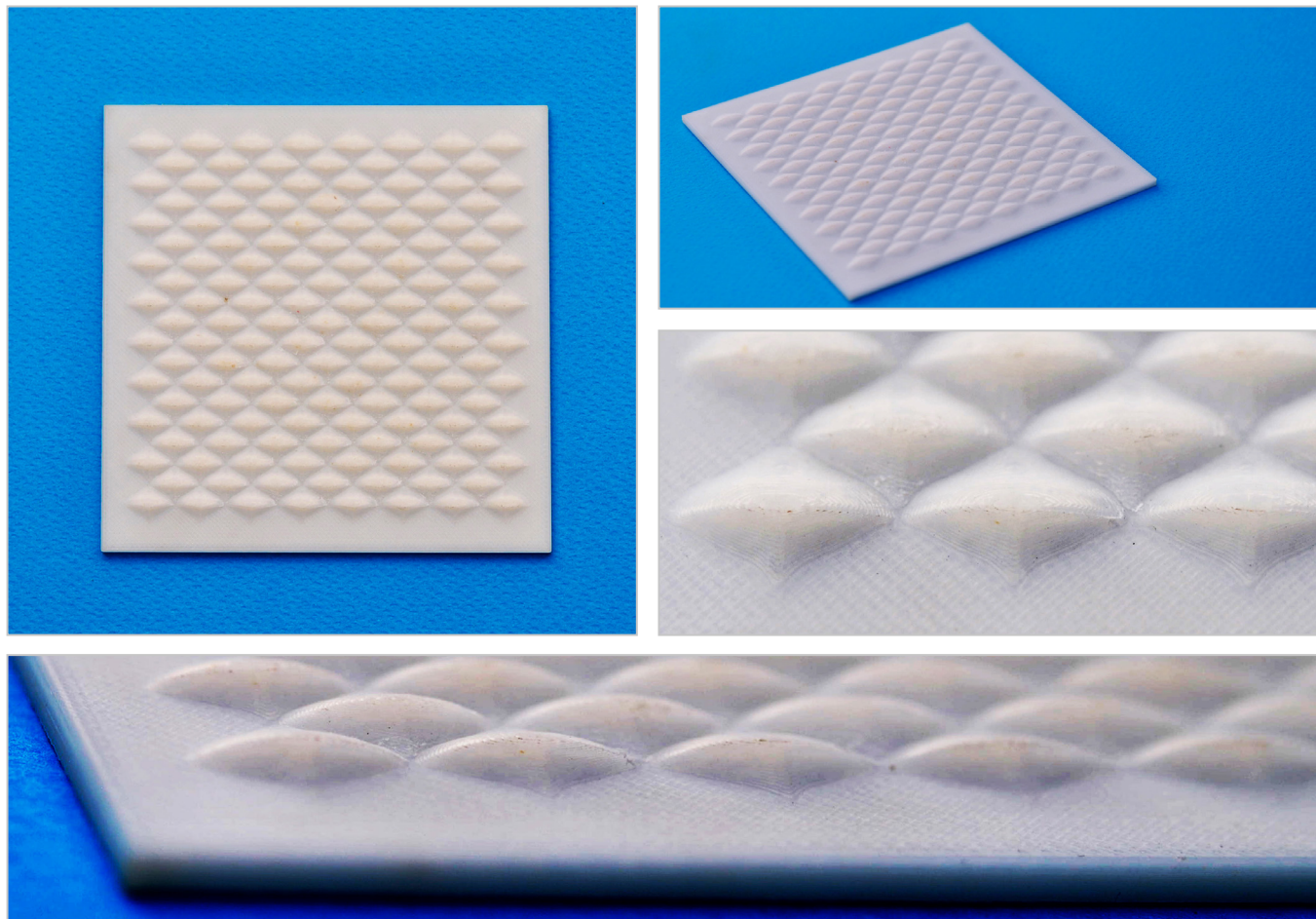
Especie: *Imdadophila adversa*
Tipo de textura: estándar
Material: ZABS plus (polímero)
Tecnología: impresión 3D tipo FDM (Fused Deposition Modeling) / impresora Zortrax M-200
Dimensiones: 100 x 100 x 10 mm

Figura 112. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz



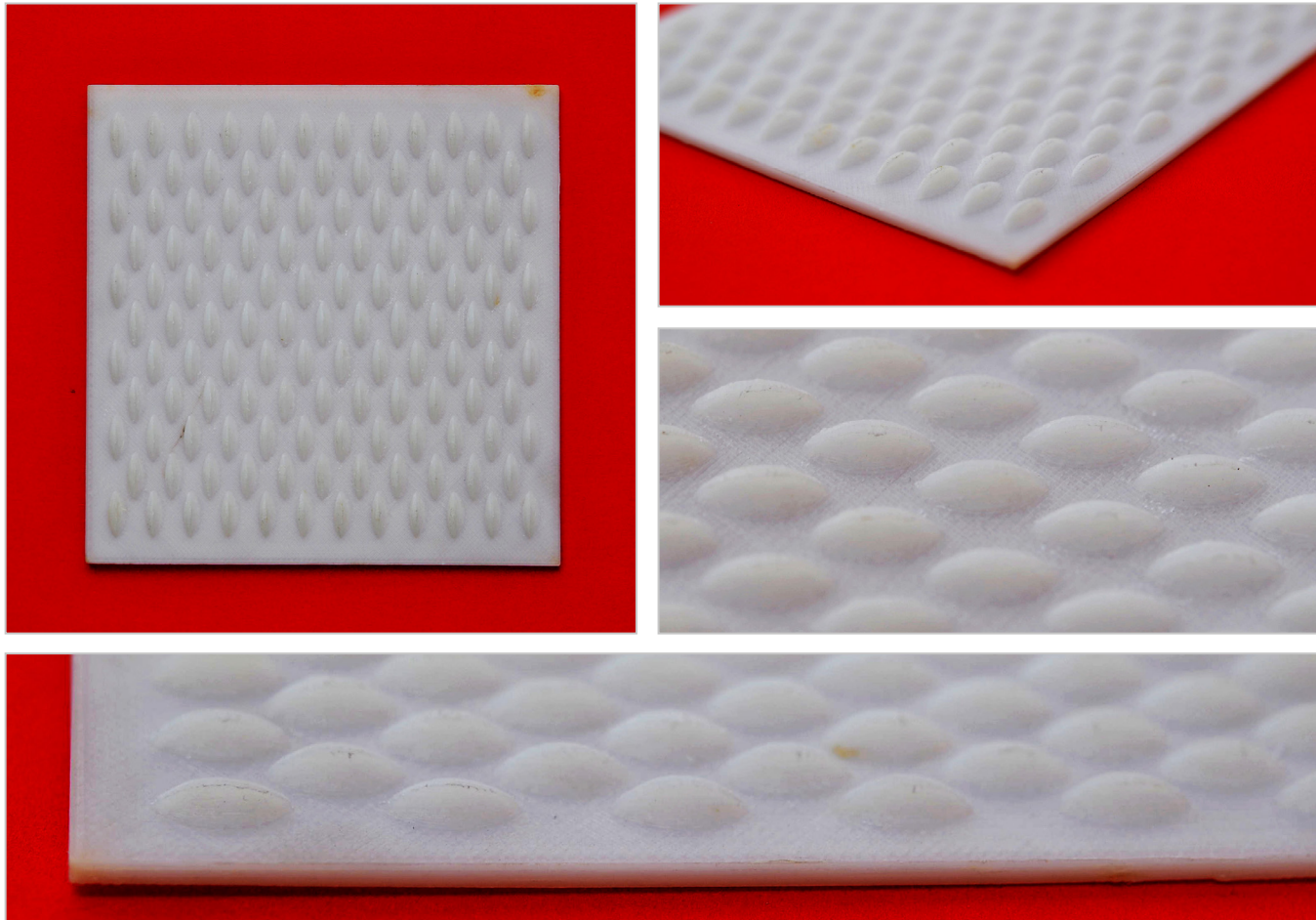
Especie: *Costus costaceae*
Tipo de textura: estándar
Material: ZABS plus (polímero)
Tecnología: impresión 3D tipo FDM (Fused Deposition Modeling) / impresora Zortrax M-200
Dimensiones: 100 x 100 x 10 mm

Figura 113. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz



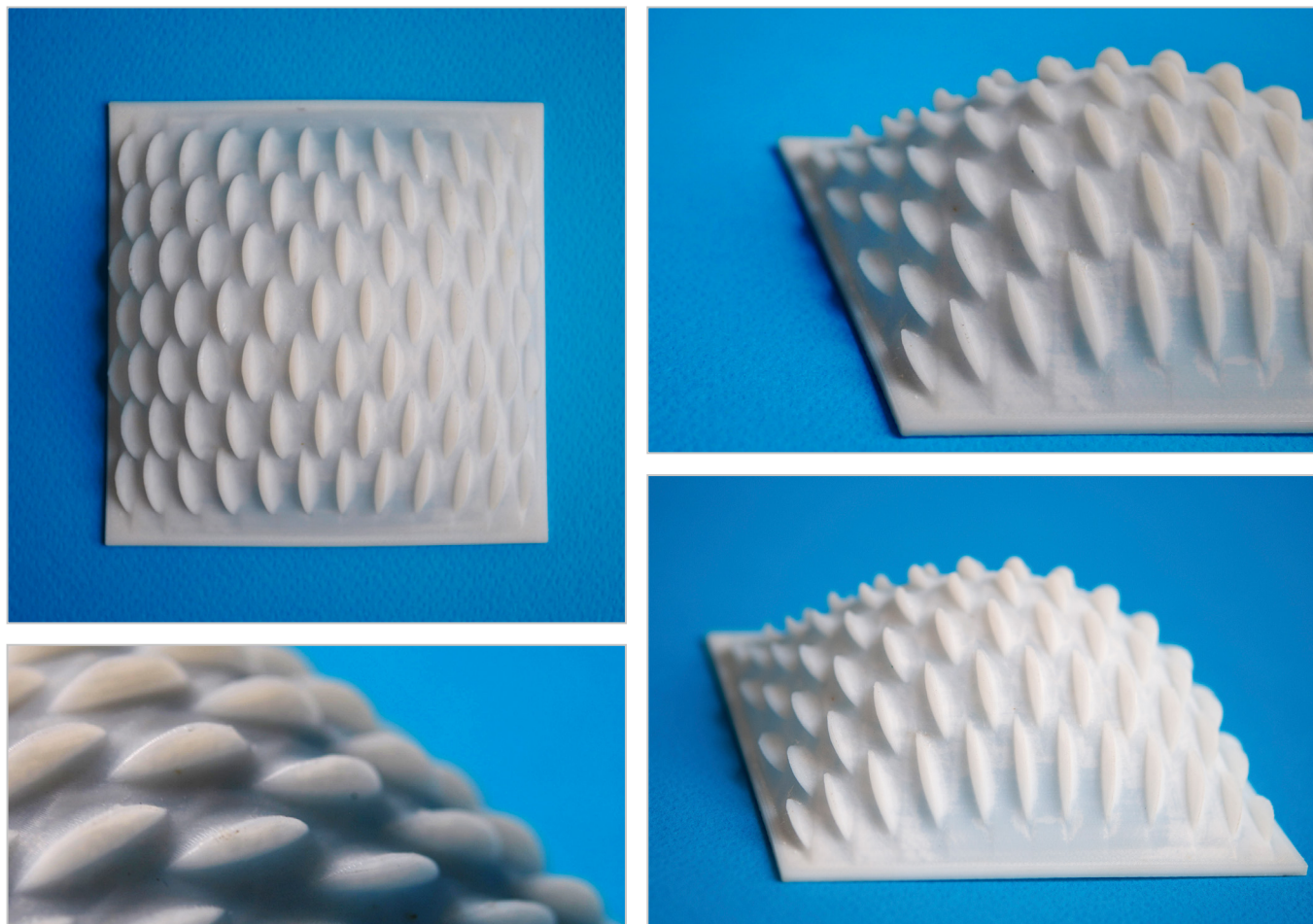
Especie: *Pinus pinea*
Tipo de textura: estándar
Material: ZABS plus (polímero)
Tecnología: impresión 3D tipo FDM (Fused Deposition Modeling) / impresora Zortrax M-200
Dimensiones: 100 x 100 x 5 mm

Figura 114. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz



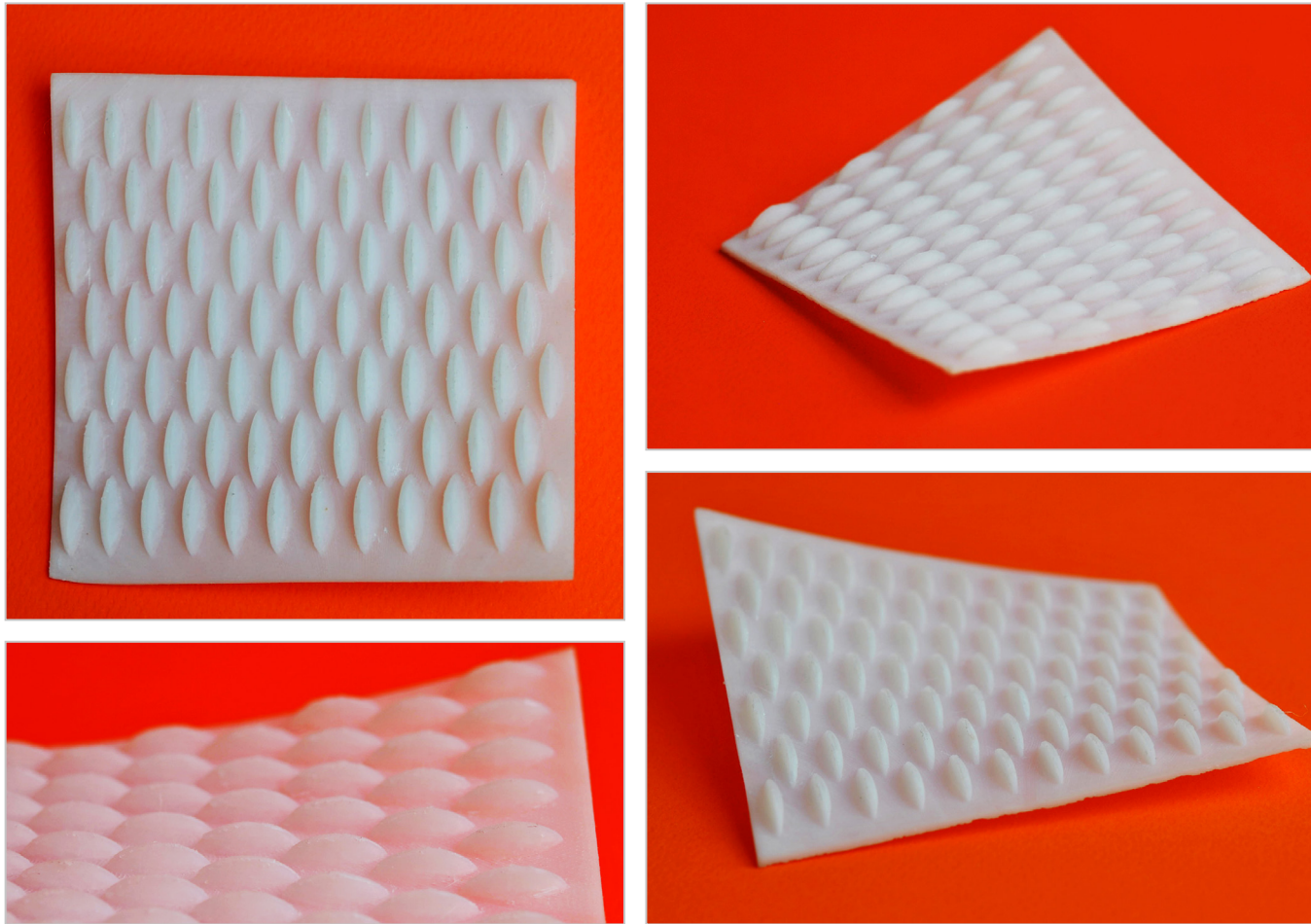
Especie: *Phoenix canariensis*
Tipo de textura: estándar
Material: ZABS plus (polímero)
Tecnología: impresión 3D tipo FDM (Fused Deposition Modeling) / impresora Zortrax M-200
Dimensiones: 100 x 100 x 4 mm

Figura 115. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz



Especie: *Phoenix canariensis*
Tipo de textura: con transformación / transformación compleja de crecimiento diferencial topológico progresivo
Material: ZABS plus (polímero)
Tecnología: impresión 3D tipo FDM (Fused Deposition Modeling) / impresora Zortrax M-200
Dimensiones: 100 x 100 x 40 mm

Figura 116. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz



Especie: *Phoenix canariensis*

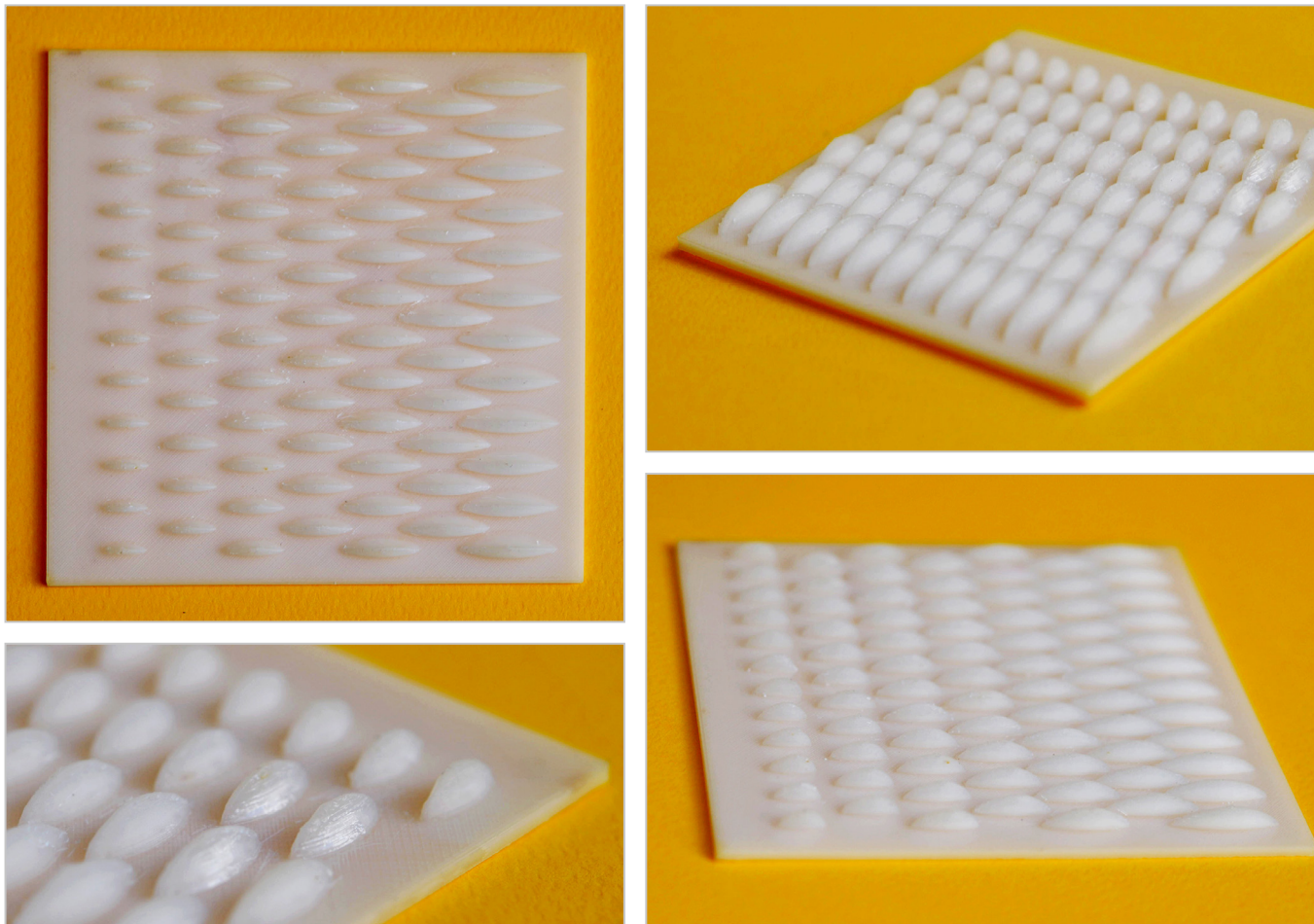
Tipo de textura: con transformación / transformación compleja de crecimiento diferencial topológico aleatorio

Material: ZABS plus (polímero)

Tecnología: impresión 3D tipo FDM (Fused Deposition Modeling) / impresora Zortrax M-200

Dimensiones: 100 x 100 x 25 mm

Figura 117. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz



Especie: *Phoenix canariensis*
Tipo de textura: con transformación / transformación compleja de crecimiento diferencial en dos direcciones progresivo
Material: ZABS plus (polímero)
Tecnología: impresión 3D tipo FDM (Fused Deposition Modeling) / impresora Zortrax M-200
Dimensiones: 100 x 100 x 7 mm

Figura 118. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz



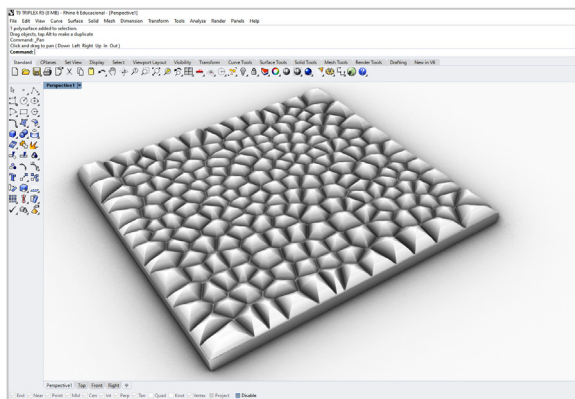
Muestras

Fabricación digital sustractiva

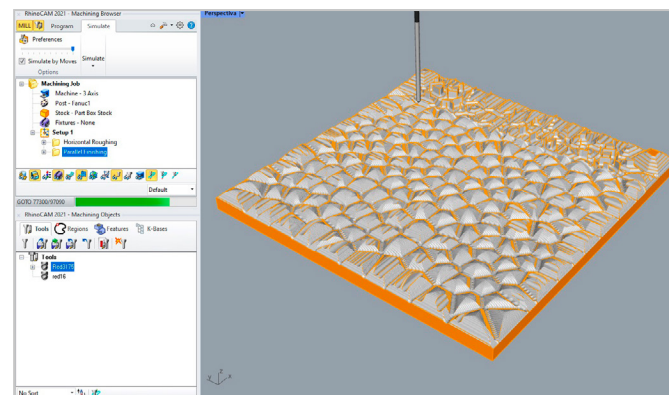
Fotografía de David A. Torreblanca-Díaz

Síntesis visual del proceso de fresado por CNC

1. Exportación de archivo desde un software CAD



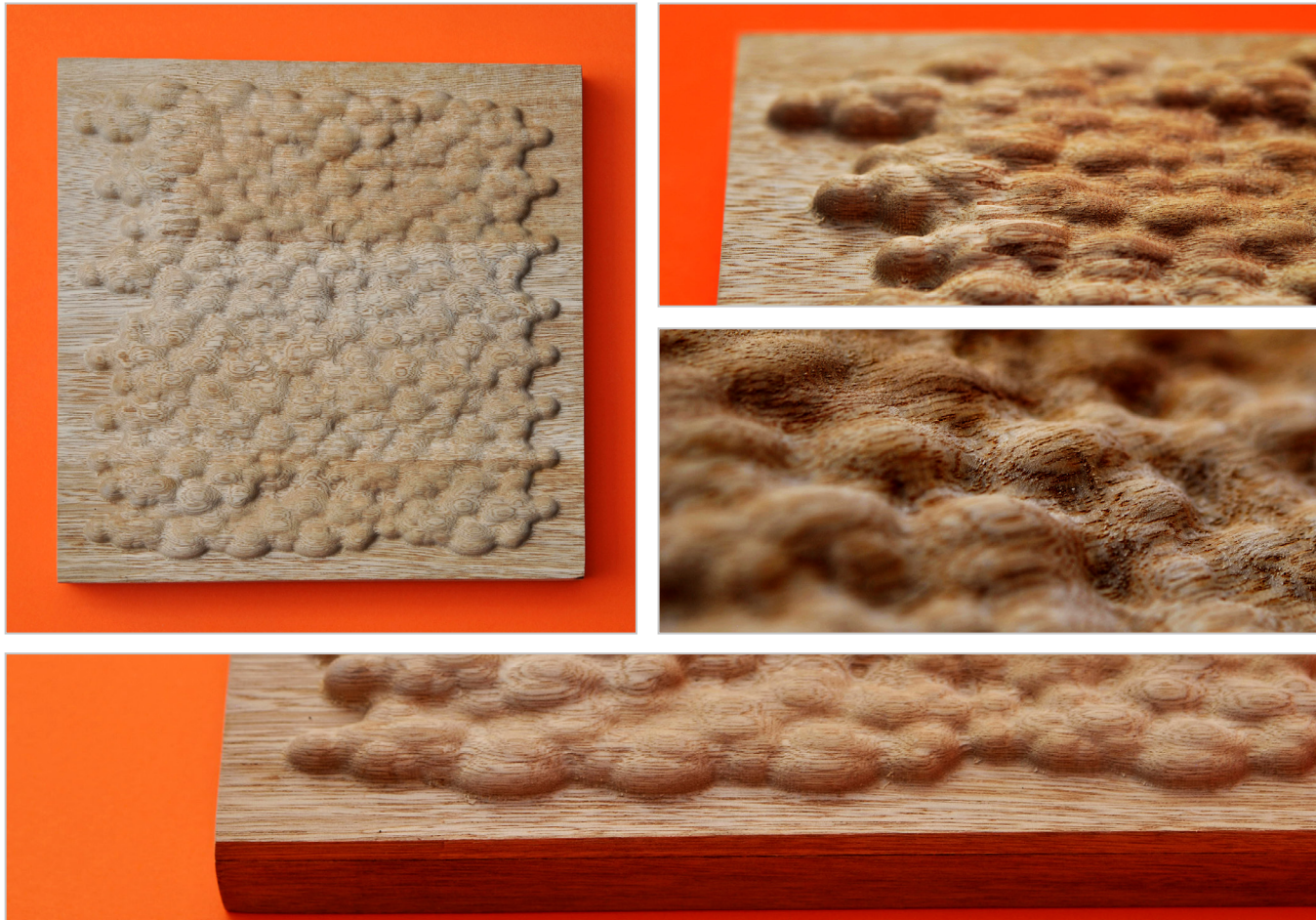
2. Importación de archivo y definición de parámetros en un software CAM para fresado por CNC



3. Materialización de muestra a través de fresado por CNC

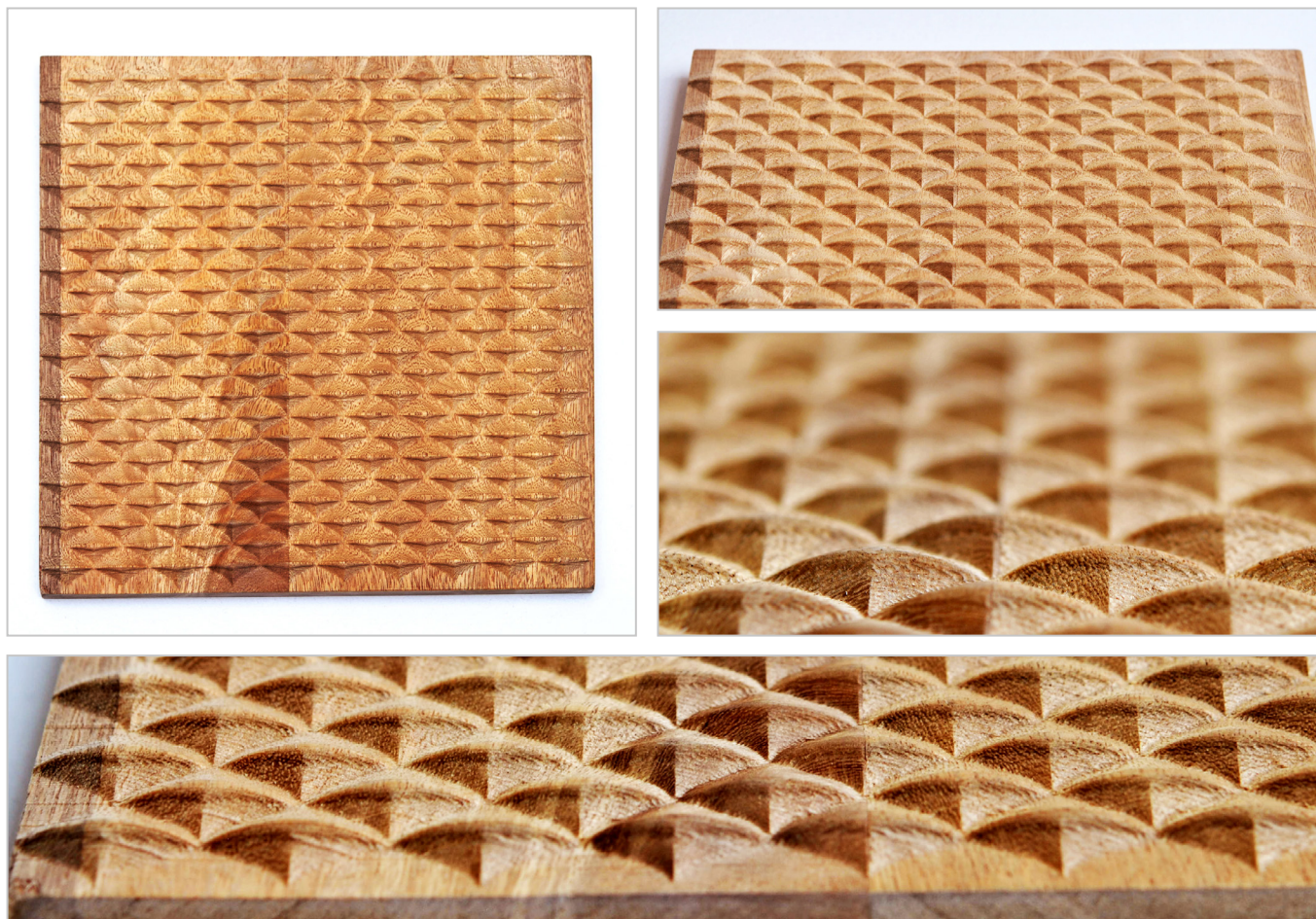


Figuras 119, 120, 121 y 122. Secuencia del proceso de materialización con la tecnología de fresado por CNC. Fotografías y modelos digitales de David A. Torreblanca-Díaz y estudiantes del semillero -MORFOlab-.



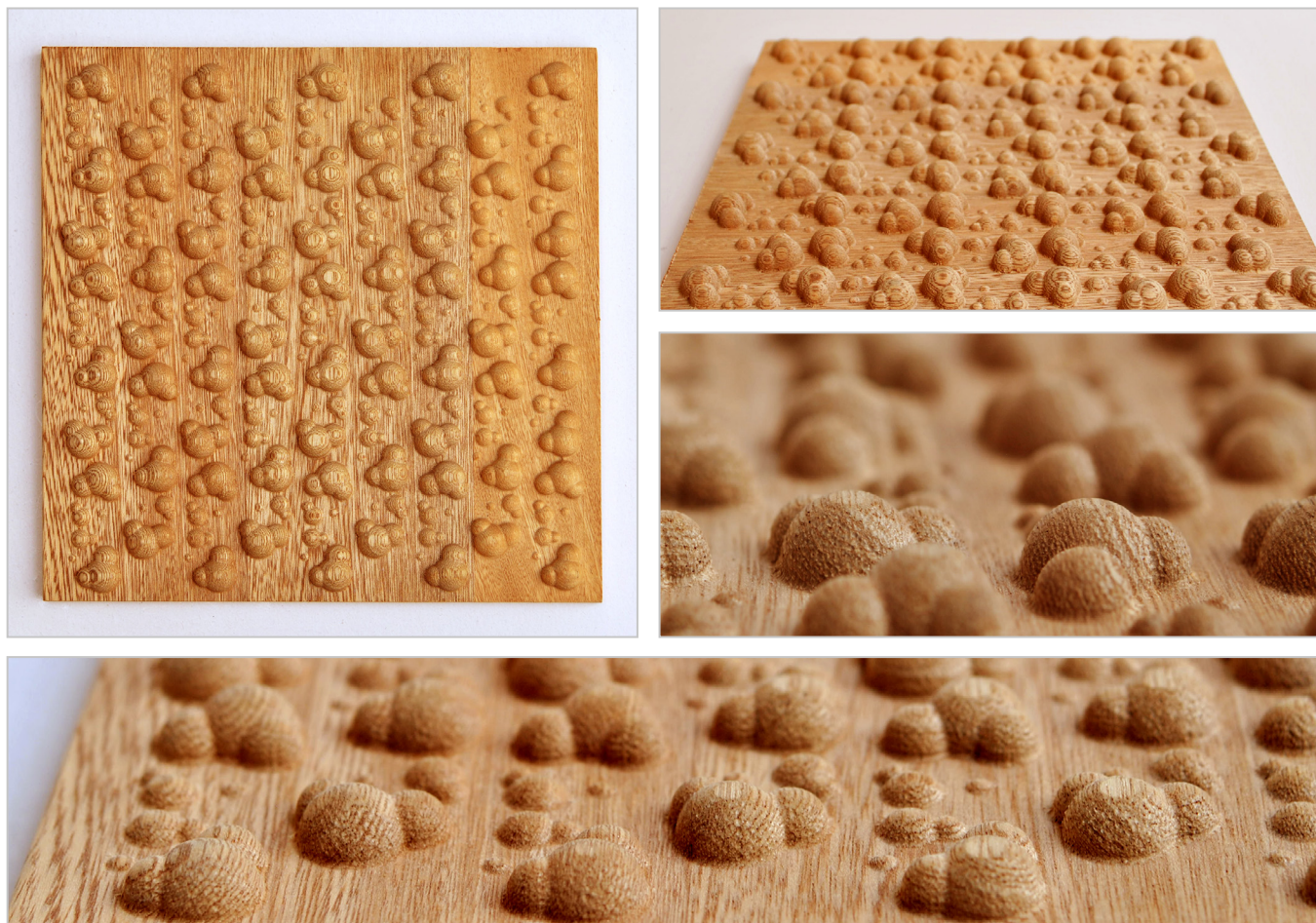
Especie: *Theobroma cacao*
Tipo de textura: estándar
Material: roble colombiano (*Quercus humboldtii*)
Tecnología: fresado por CNC
Dimensiones: 200 x 200 x 35 mm

Figura 123. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.



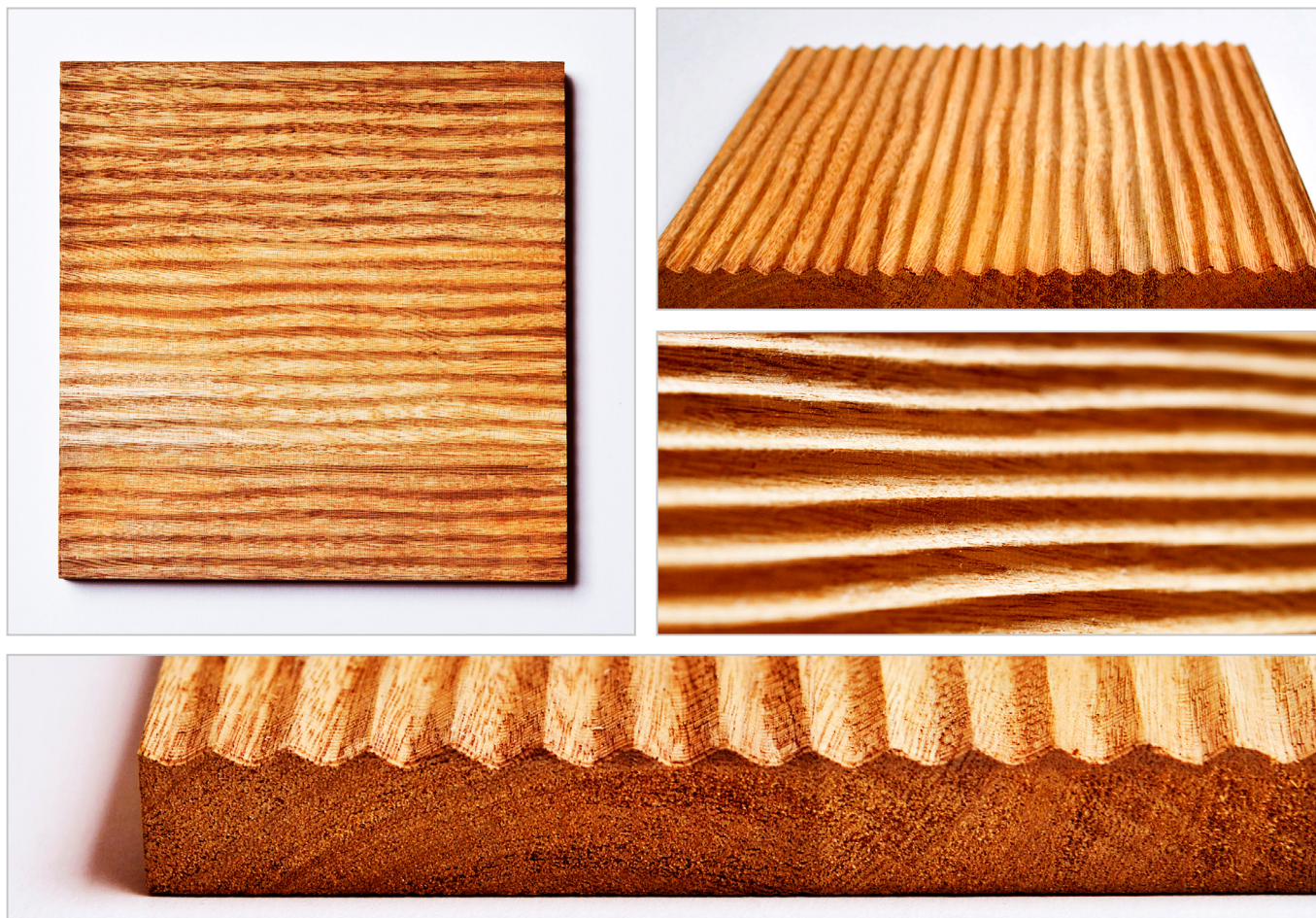
Especie: *Pinus pinea*
Tipo de textura: estándar
Material: roble colombiano (*Quercus humboldtii*)
Tecnología: fresado por CNC
Dimensiones: 200 x 200 x 18 mm

Figura 124. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.



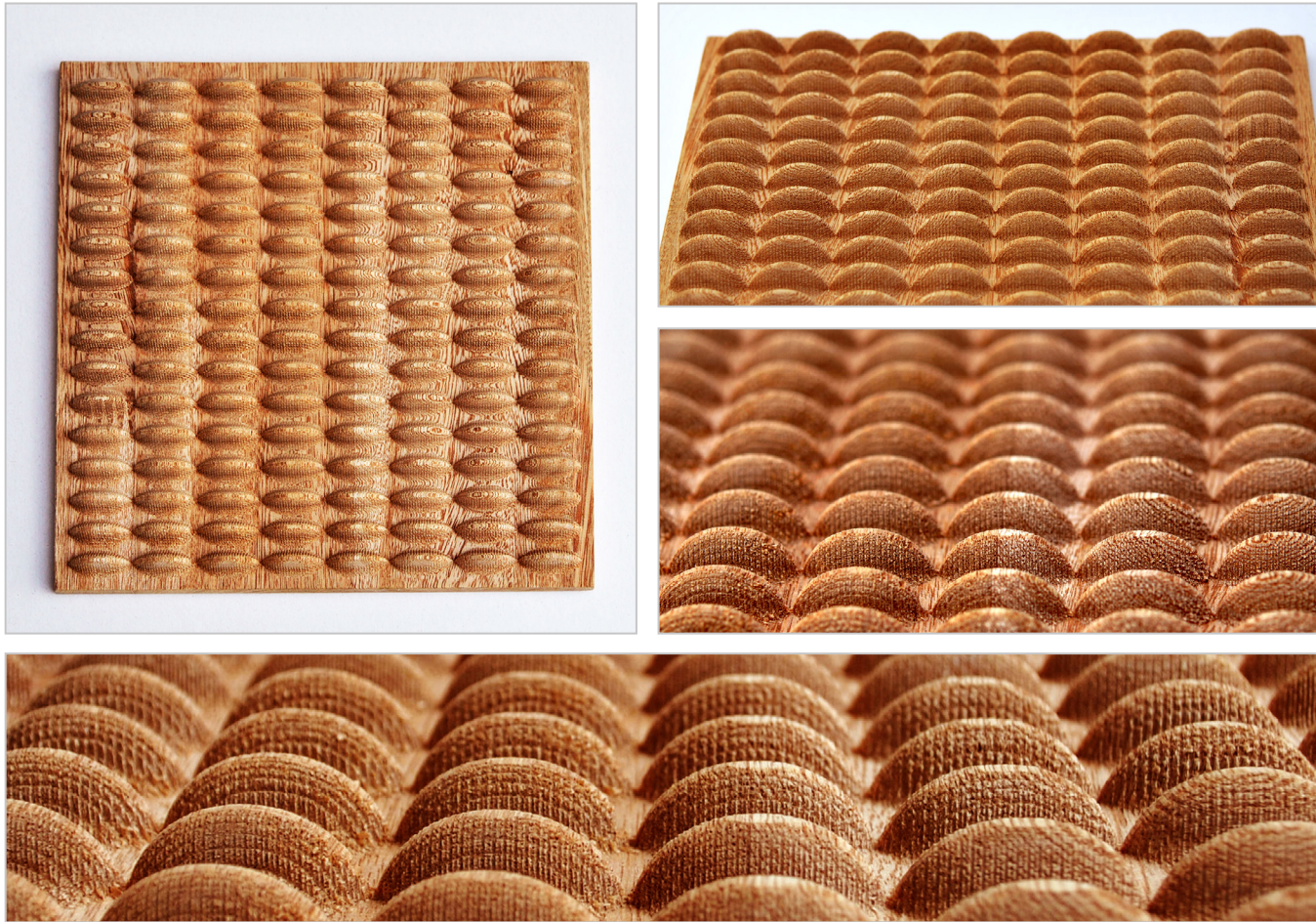
Especie: *Cucurbita pepo*
Tipo de textura: estándar
Material: roble colombiano (*Quercus humboldtii*)
Tecnología: fresado por CNC
Dimensiones: 200 x 200 x 18 mm

Figura 125. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.



Especie: *Bismarchia nobilis*
Tipo de textura: estándar
Material: roble colombiano (*Quercus humboldtii*)
Tecnología: fresado por CNC
Dimensiones: 200 x 200 x 18 mm

Figura 126. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.



Especie: *Eugenia uniflora*
Tipo de textura: estándar
Material: roble colombiano (*Quercus humboldtii*)
Tecnología: fresado por CNC
Dimensiones: 200 x 200 x 18 mm

Figura 127. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.



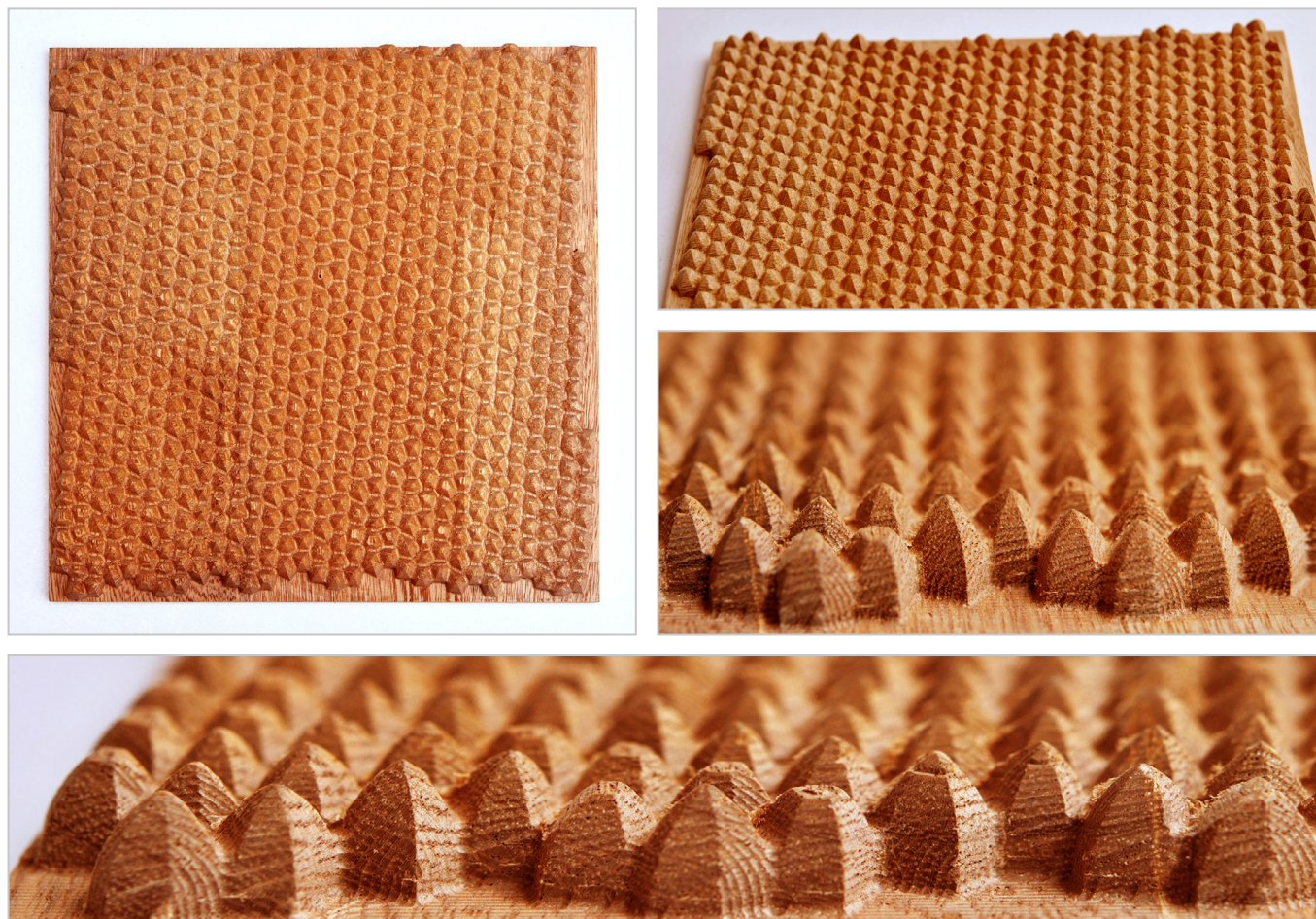
Especie: *Phoenix canariensis*
Tipo de textura: estándar
Material: roble colombiano (*Quercus humboldtii*)
Tecnología: fresado por CNC
Dimensiones: 200 x 200 x 18 mm

Figura 128. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.



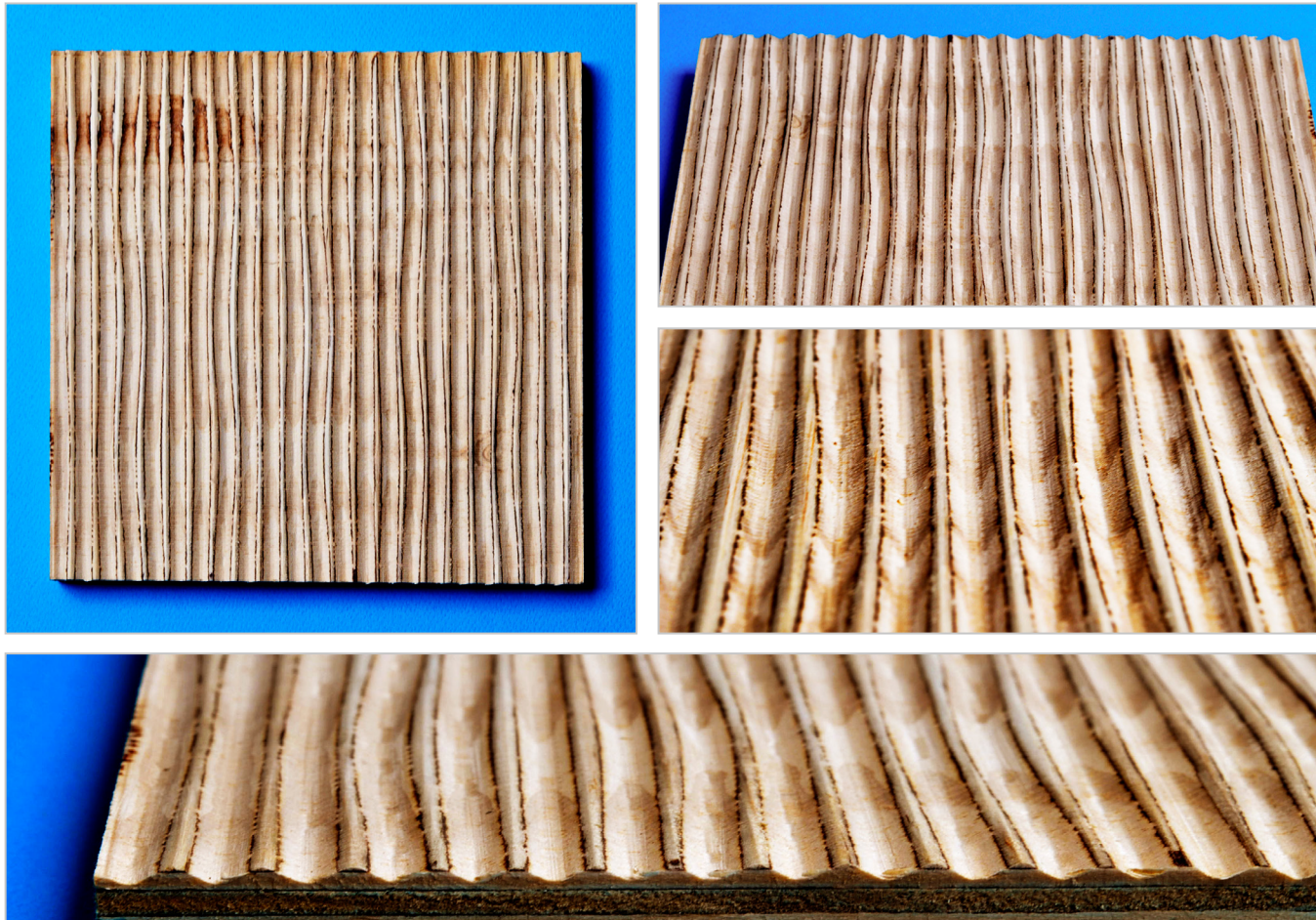
Especie: *Artocarpus heterophyllus*
Tipo de textura: estándar
Material: roble colombiano (*Quercus humboldtii*)
Tecnología: fresado por CNC
Dimensiones: 200 x 200 x 18 mm

Figura 129. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.



Especie: *Artocarpus heterophyllus*
Tipo de textura: estándar
Material: roble colombiano (*Quercus humboldtii*)
Tecnología: fresado por CNC
Dimensiones: 200 x 200 x 18 mm

Figura 130. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.



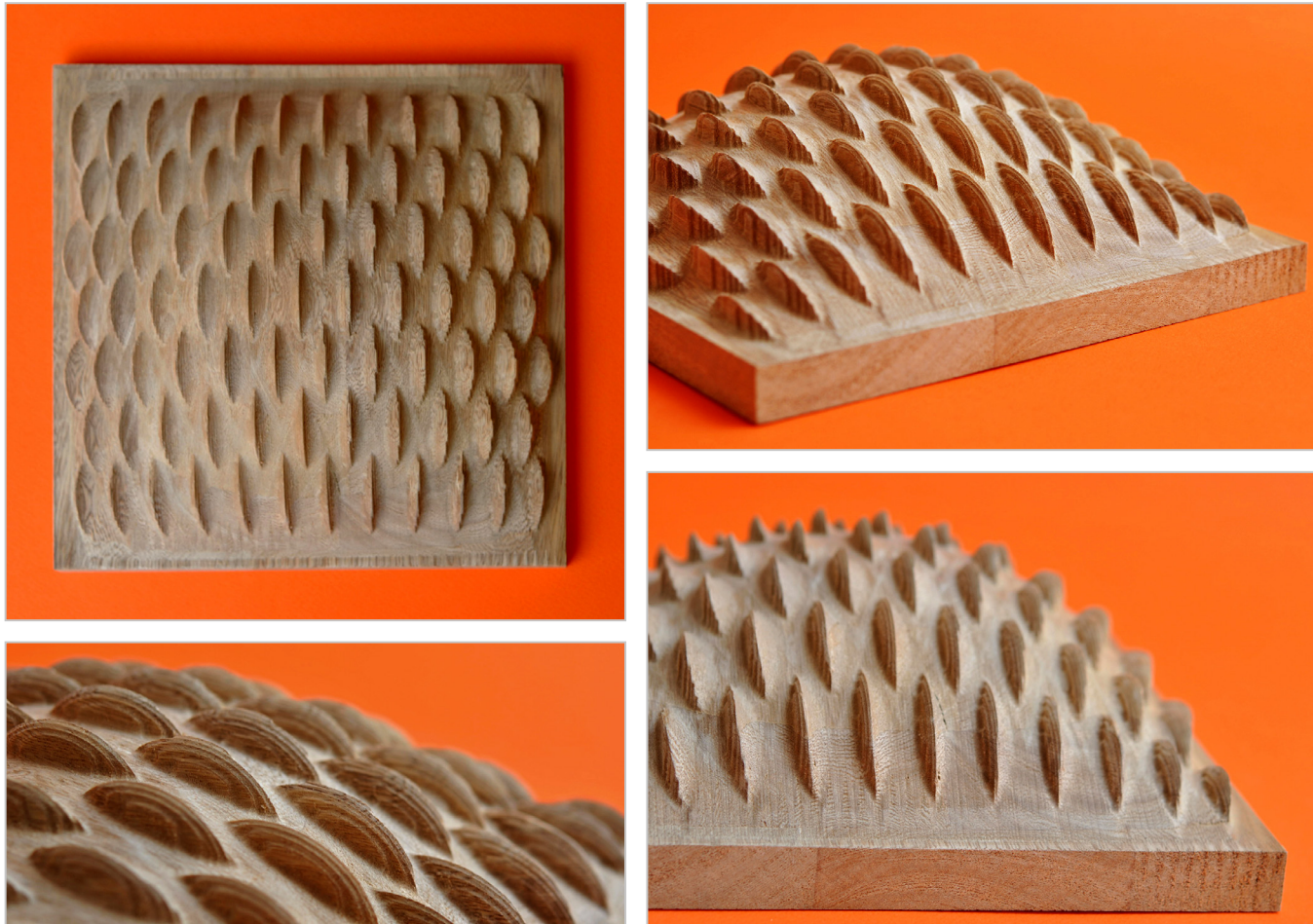
Especie: *Bismarchia nobilis*
Tipo de textura: estándar
Material: madera contrachapada (plywood) o también conocido como Triplex
Tecnología: fresado por CNC
Dimensiones: 200 x 200 x 18 mm.

Figura 131. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.



Especie: *Artocarpus heterophyllus*
Tipo de textura: estándar
Material: madera contrachapada (plywood) o también conocido como Triplex
Tecnología: fresado por CNC
Dimensiones: 200 x 200 x 15 mm

Figura 132. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.



Especie: *Phoenix canariensis*

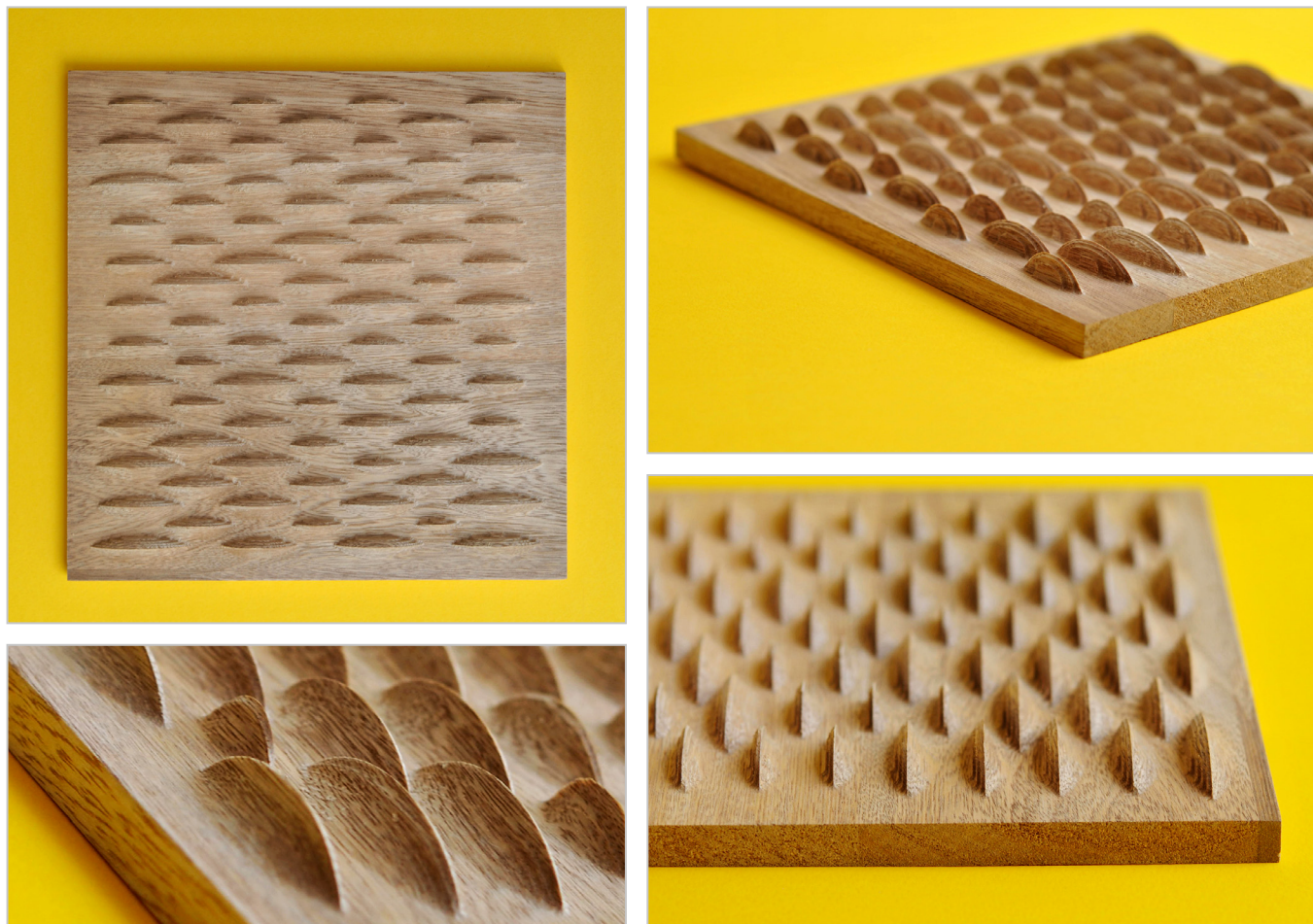
Tipo de textura: con transformación / transformación compleja de crecimiento diferencial topológico progresivo

Material: roble colombiano (*Quercus humboldtii*)

Tecnología: fresado por CNC

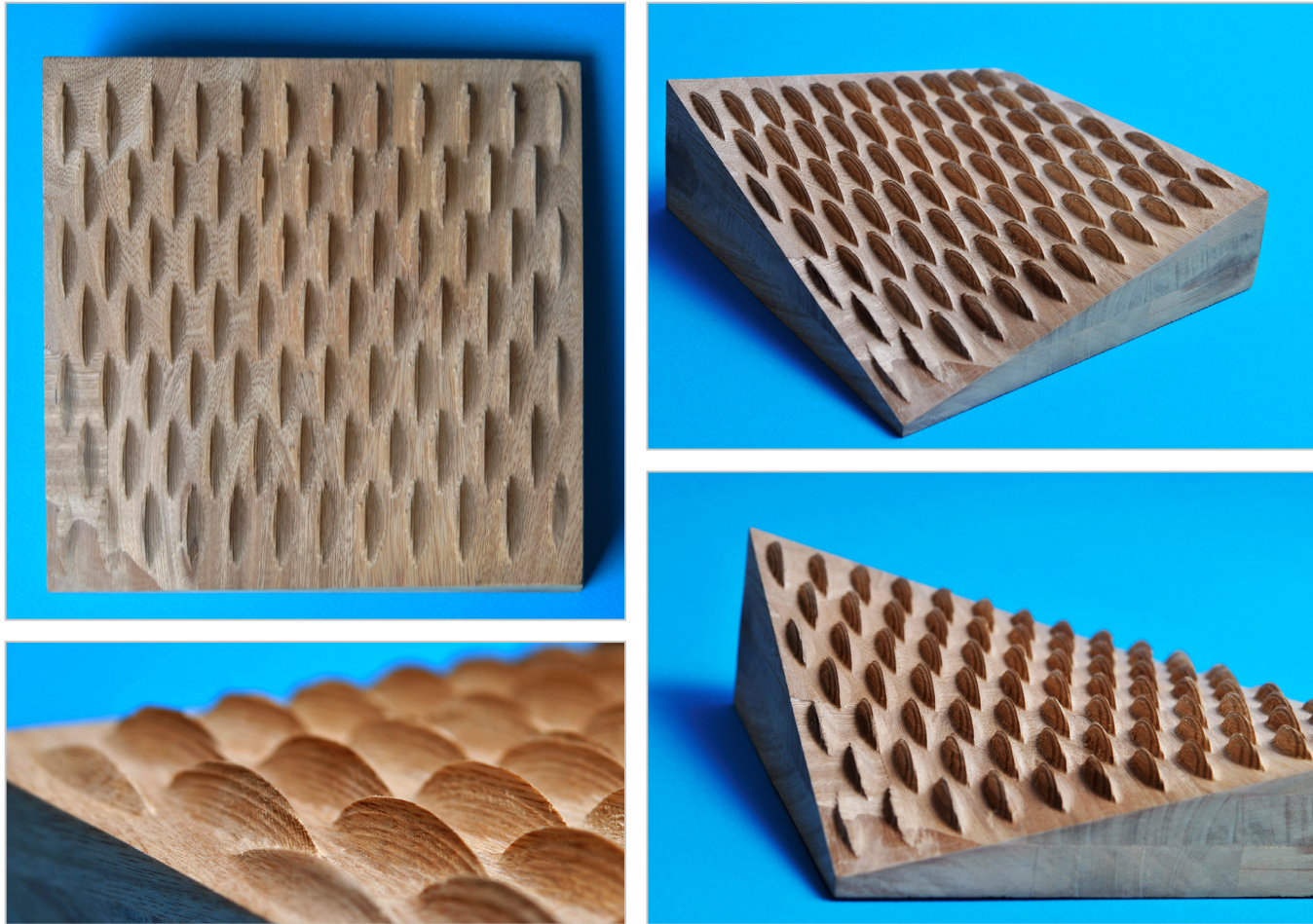
Dimensiones: 200 x 200 x 70 mm

Figura 133. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.



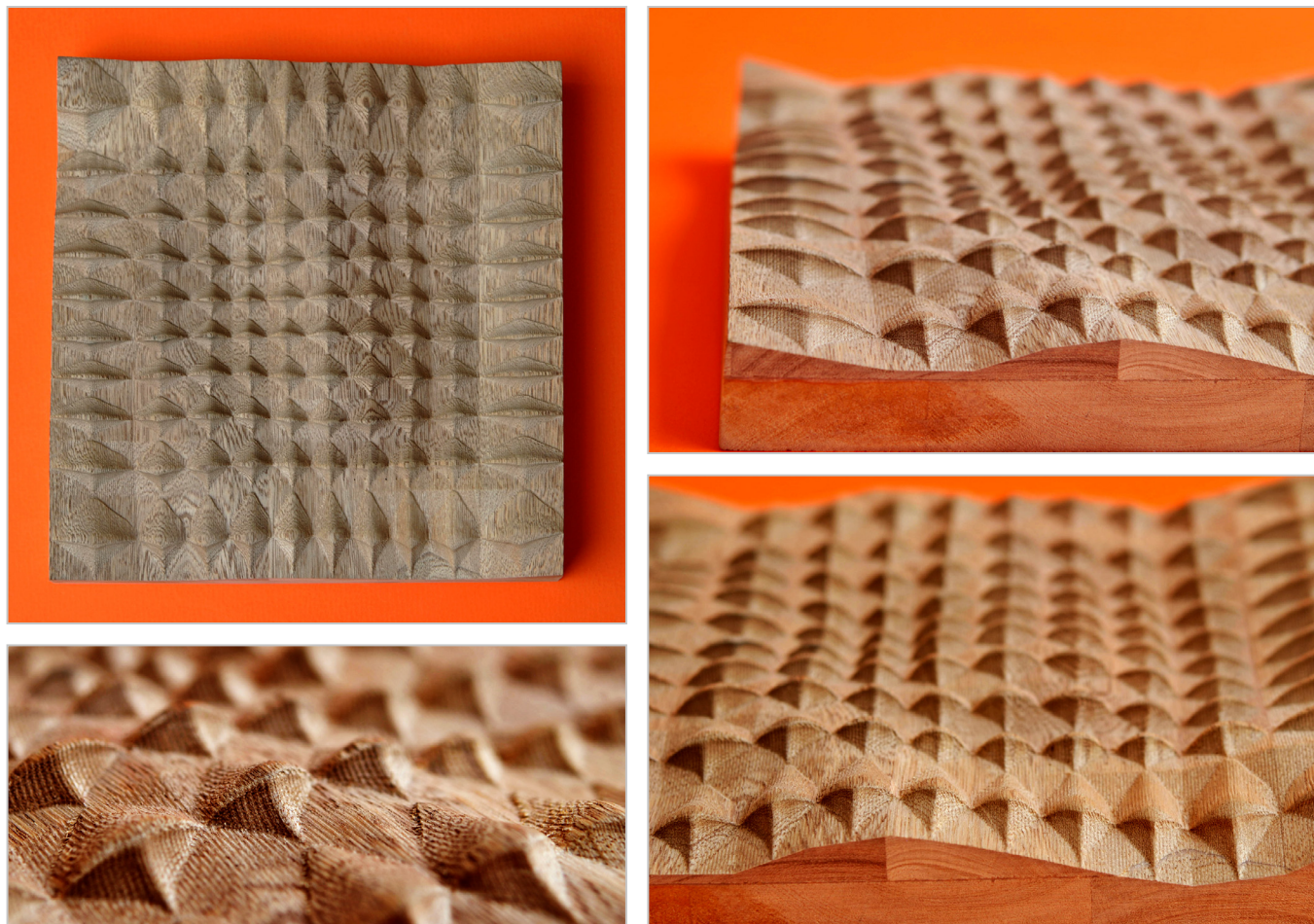
Especie: *Phoenix canariensis*
Tipo de textura: con transformación / transformación compleja de crecimiento diferencial aleatorio
Material: roble colombiano (*Quercus humboldtii*)
Tecnología: fresado por CNC
Dimensiones: 200 x 200 x 18 mm

Figura 134. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.



Especie: *Phoenix canariensis*
Tipo de textura: con transformación / transformación compleja de crecimiento diferencial topológico aleatorio
Material: roble colombiano (*Quercus humboldtii*)
Tecnología: fresado por CNC
Dimensiones: 200 x 200 x 72 mm

Figura 135. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.



Especie: *Pinus pinea*
Tipo de textura: con transformación / transformación compleja de crecimiento diferencial topológico, versión exploratoria
Material: roble colombiano (*Quercus humboldtii*)
Tecnología: fresado por CNC
Dimensiones: 200 x 200 x 33 mm

Figura 136. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.



Especie: *Pinus pinea*

Tipo de textura: con transformación / transformación compleja de crecimiento diferencial topológico, versión exploratoria

Material: madera contrachapada (plywood) o también conocido como Triplex

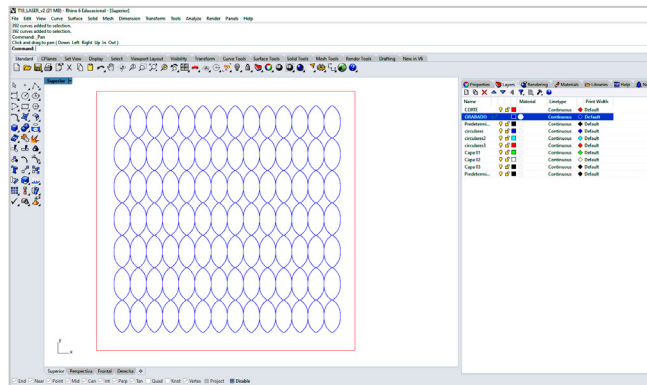
Tecnología: fresado por CNC

Dimensiones: 200 x 200 x 33 mm

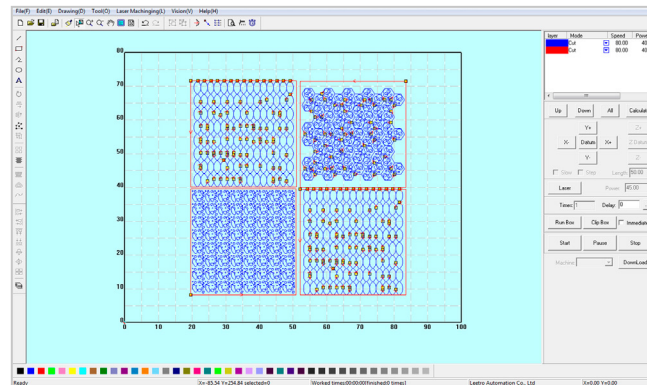
Figura 137. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.

Síntesis visual del proceso de corte, marcado y grabado con Láser

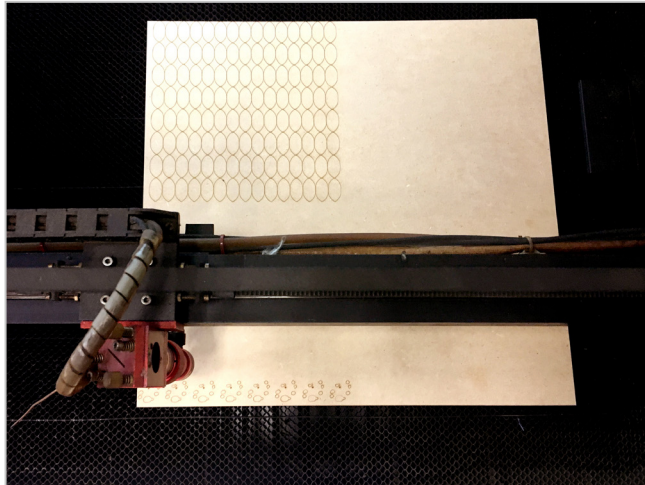
1. Exportación de archivo desde un software CAD



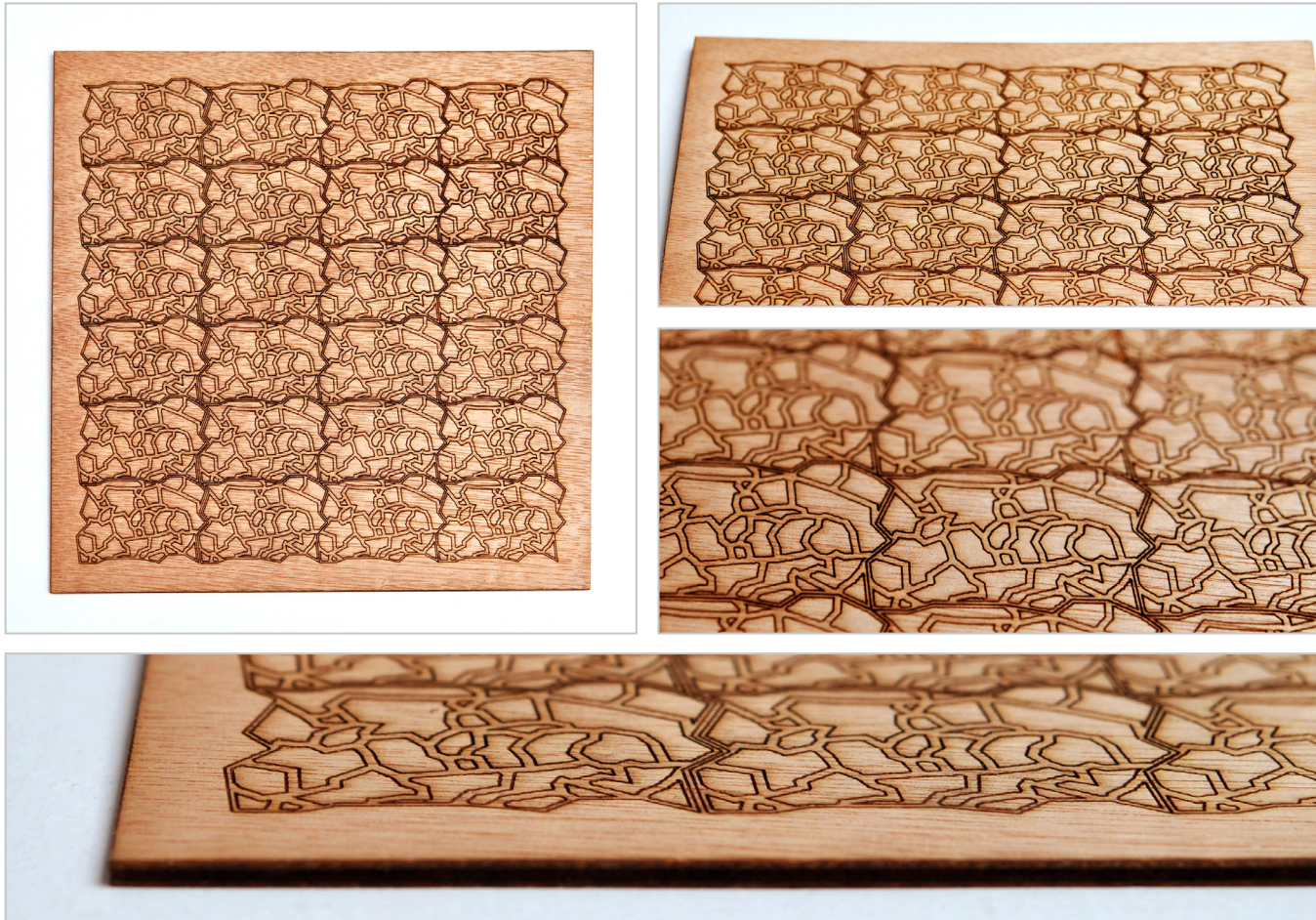
2. Importación de archivo y definición de parámetros en un software CAM para corte, marcado y grabado con láser



3. Materialización de muestras a través de corte y marcado con láser

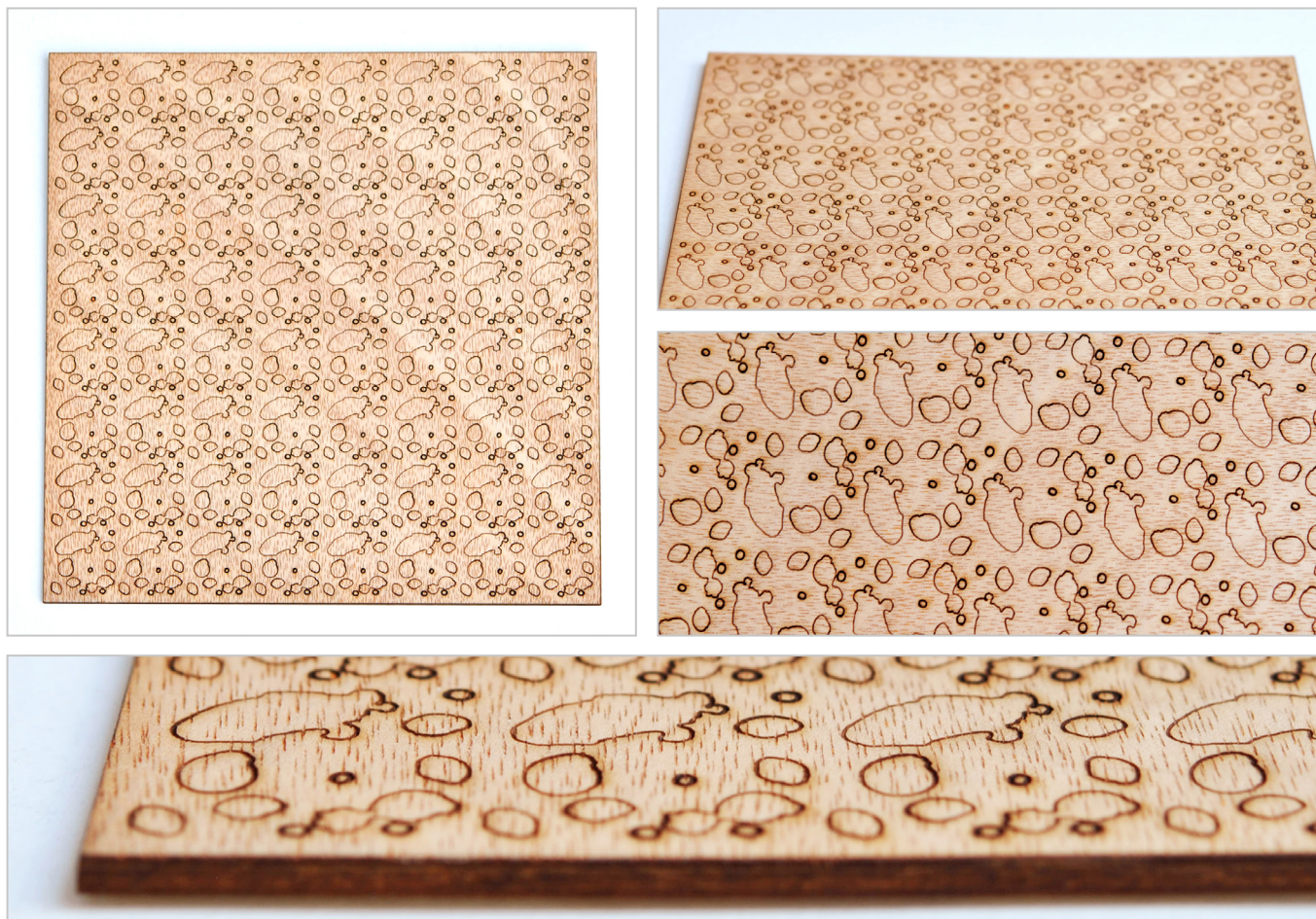


Figuras 138, 139, 140 y 141. Secuencia del proceso de materialización con la tecnología láser. Fotografías y modelos digitales de David A. Torreblanca-Díaz y estudiantes del semillero -MORFOlab-.



Especie: *Cucumis melo*
Tipo de textura: estándar
Material: madera contrachapada (plywood) o también conocido como Triplex, de 3.2 mm. de espesor
Tecnología: marcado con láser
Dimensiones: 200 x 200 x 3.2 mm

Figura 142. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.



Especie: *Blighia sávida*

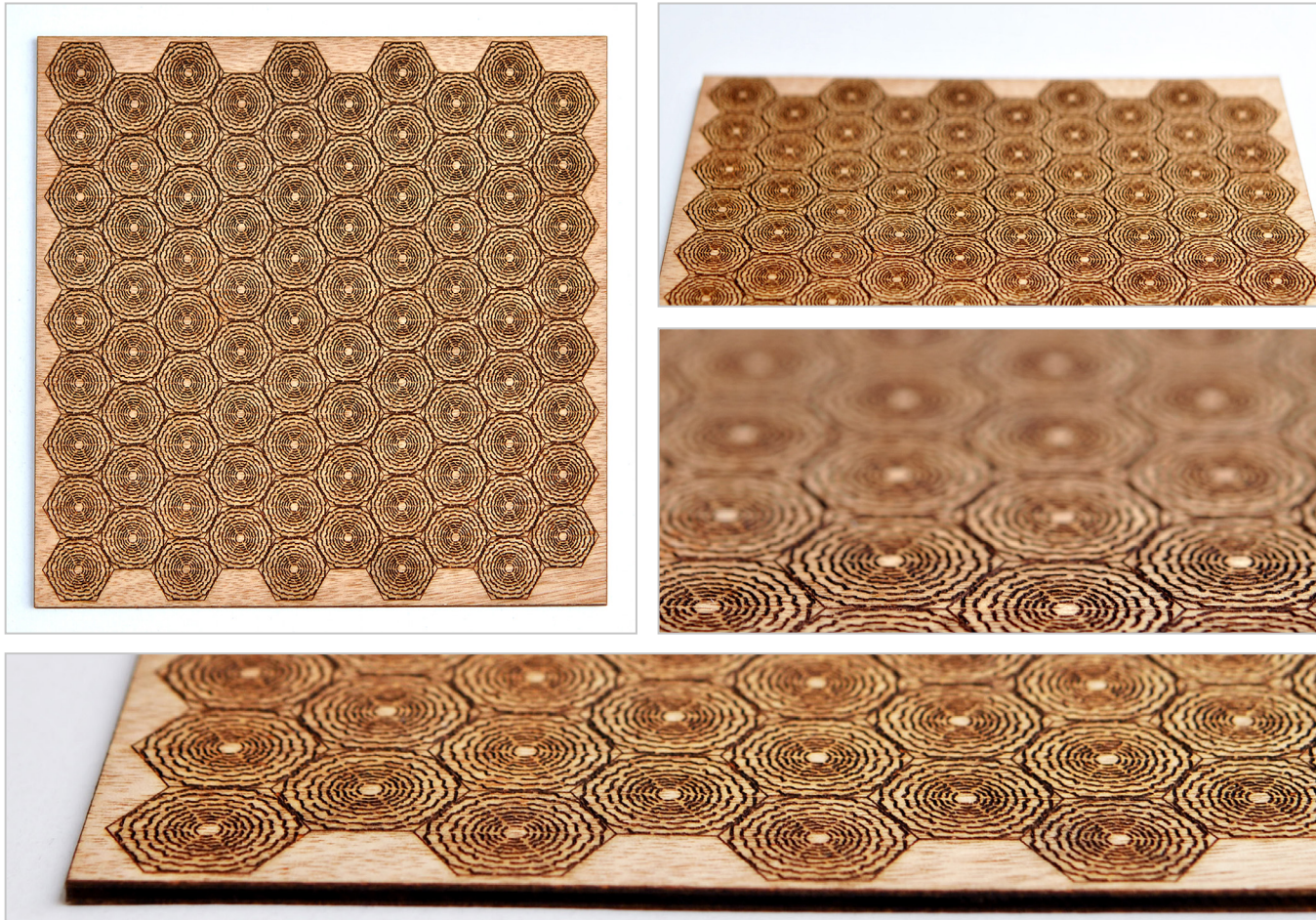
Tipo de textura: estándar

Material: madera contrachapada (plywood) o también conocido como Triplex, de 3.2 mm. de espesor

Tecnología: marcado con láser

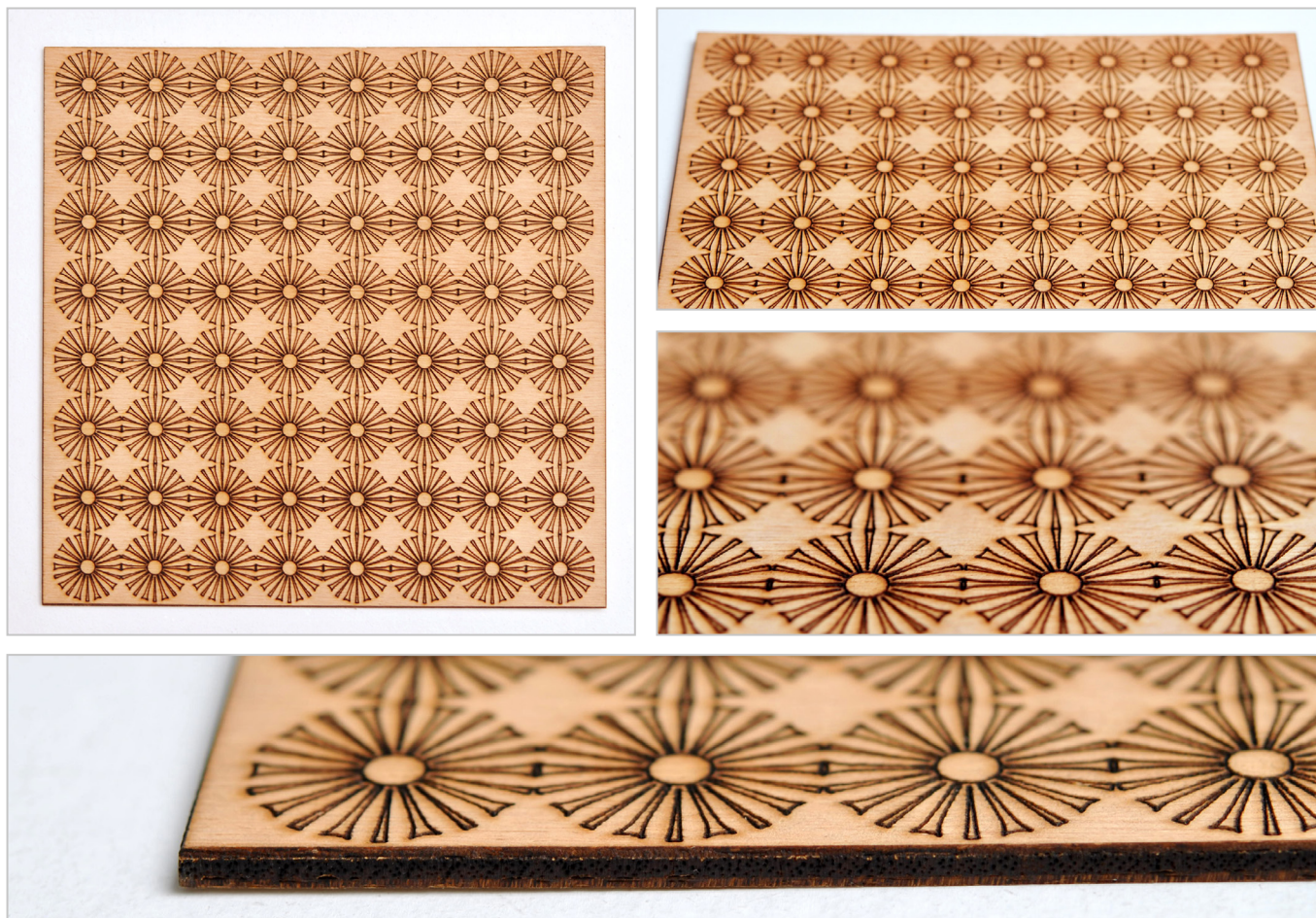
Dimensiones: 200 x 200 x 3.2 mm

Figura 143. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.



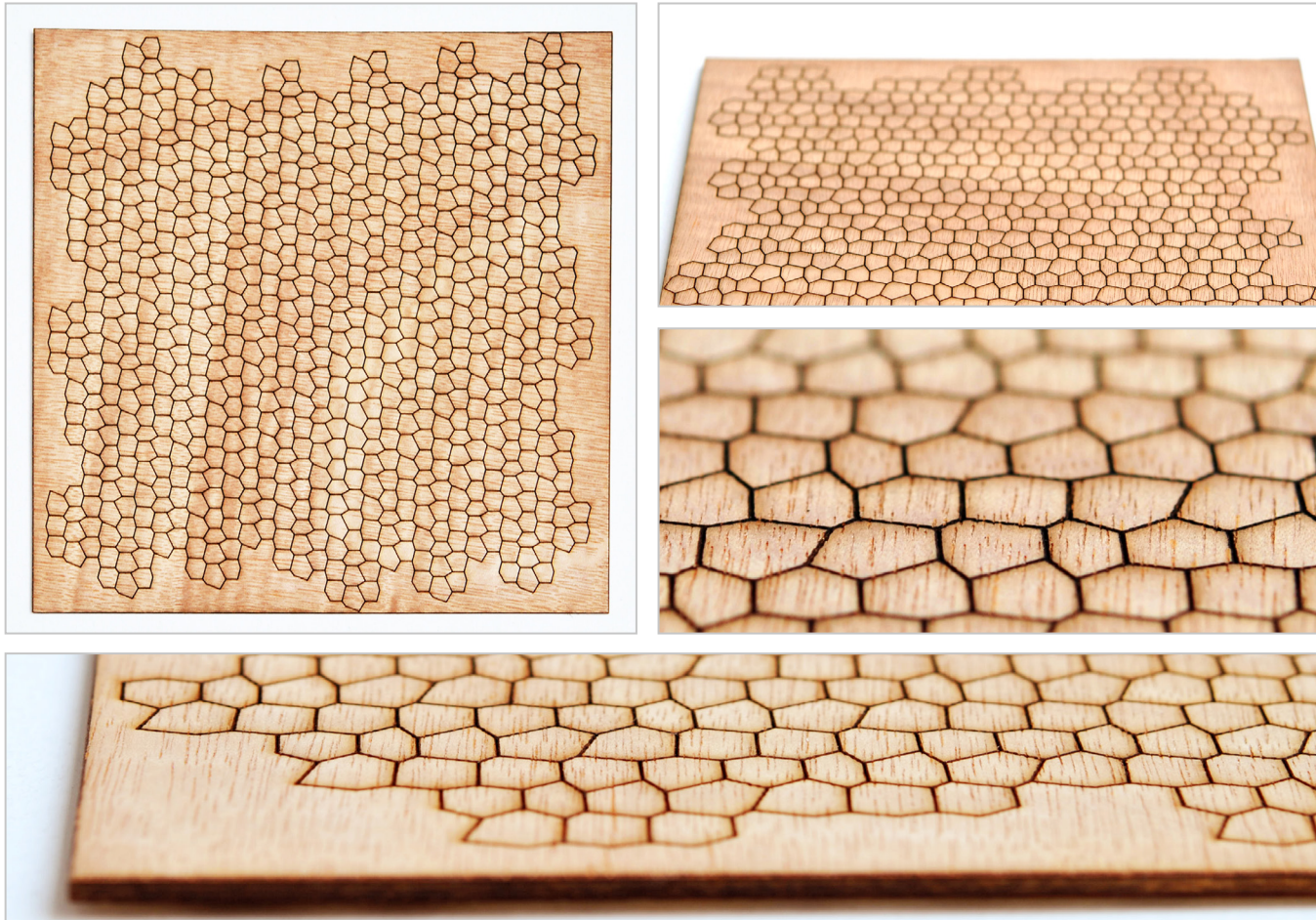
Especie: *Stapelia grandiflora*
Tipo de textura: estándar
Material: madera contrachapada (plywood) o también conocido como Triplex, de 3.2 mm. de espesor
Tecnología: marcado con láser
Dimensiones: 200 x 200 x 3.2 mm

Figura 144. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.



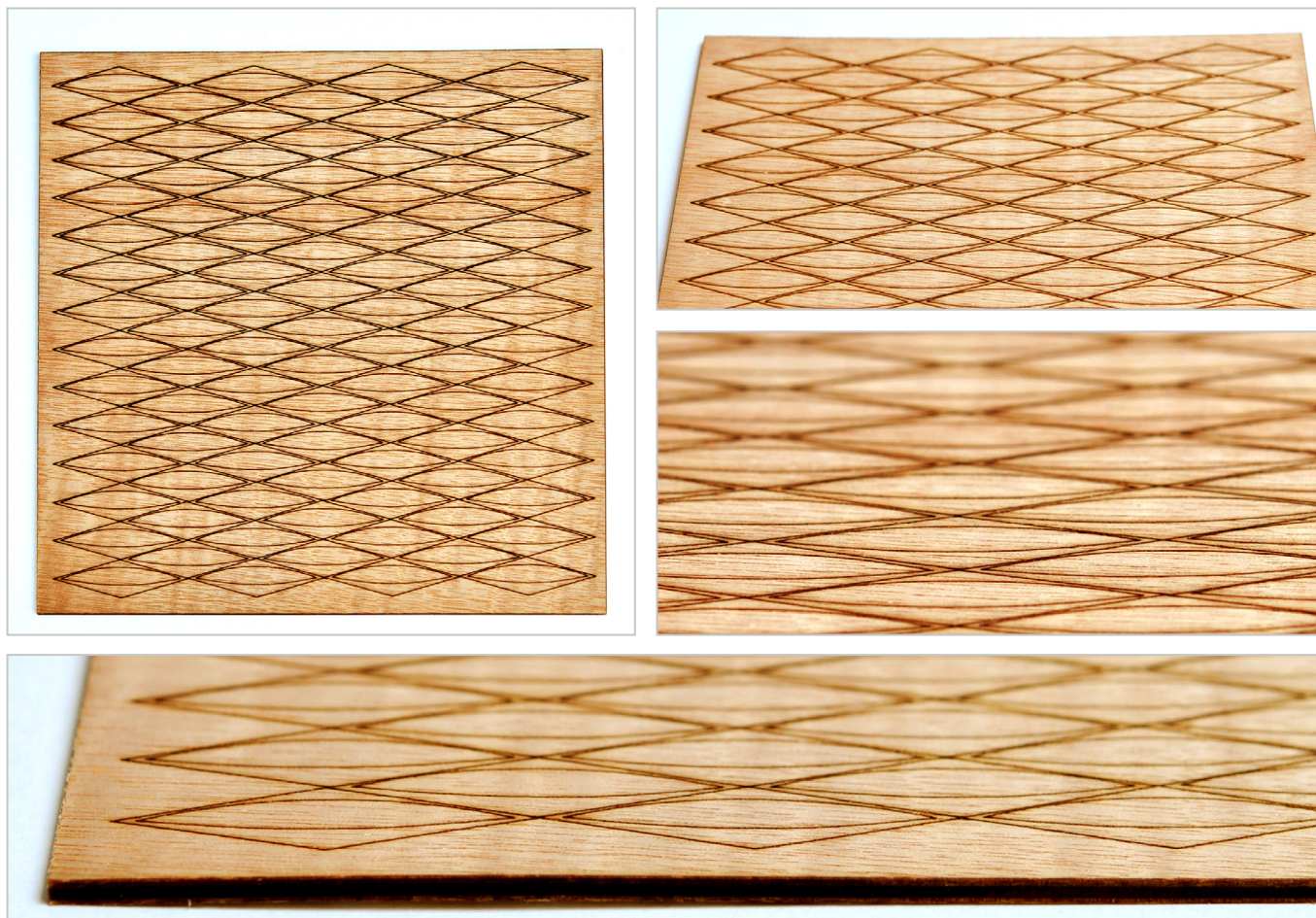
Especie: *Curcubita Pepo*
 Tipo de textura: estándar
 Material: madera contrachapada (plywood) o también conocido como Triplex, de 3.2 mm. de espesor
 Tecnología: marcado con láser
 Dimensiones: 200 x 200 x 3.2 mm

Figura 145. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.



Especie: *Artocarpus heterophyllus*
Tipo de textura: estándar
Material: madera contrachapada (plywood) o también conocido como Triplex, de 3.2 mm. de espesor
Tecnología: marcado con láser
Dimensiones: 200 x 200 x 3.2 mm

Figura 146. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.



Especie: *Phoenix canariensis*

Tipo de textura: estándar

Material: madera contrachapada (plywood) o también conocido como Triplex, de 3.2 mm. de espesor

Tecnología: marcado con láser

Dimensiones: 200 x 200 x 3.2 mm

Figura 147. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.



Especie: *Artocarpus heterophyllus*

Tipo de textura: estándar, versión exploratoria

Material: 2 capas de madera contrachapada (plywood) o también conocido como Triplex, de 3.2 mm. de espesor

Tecnología: corte con láser

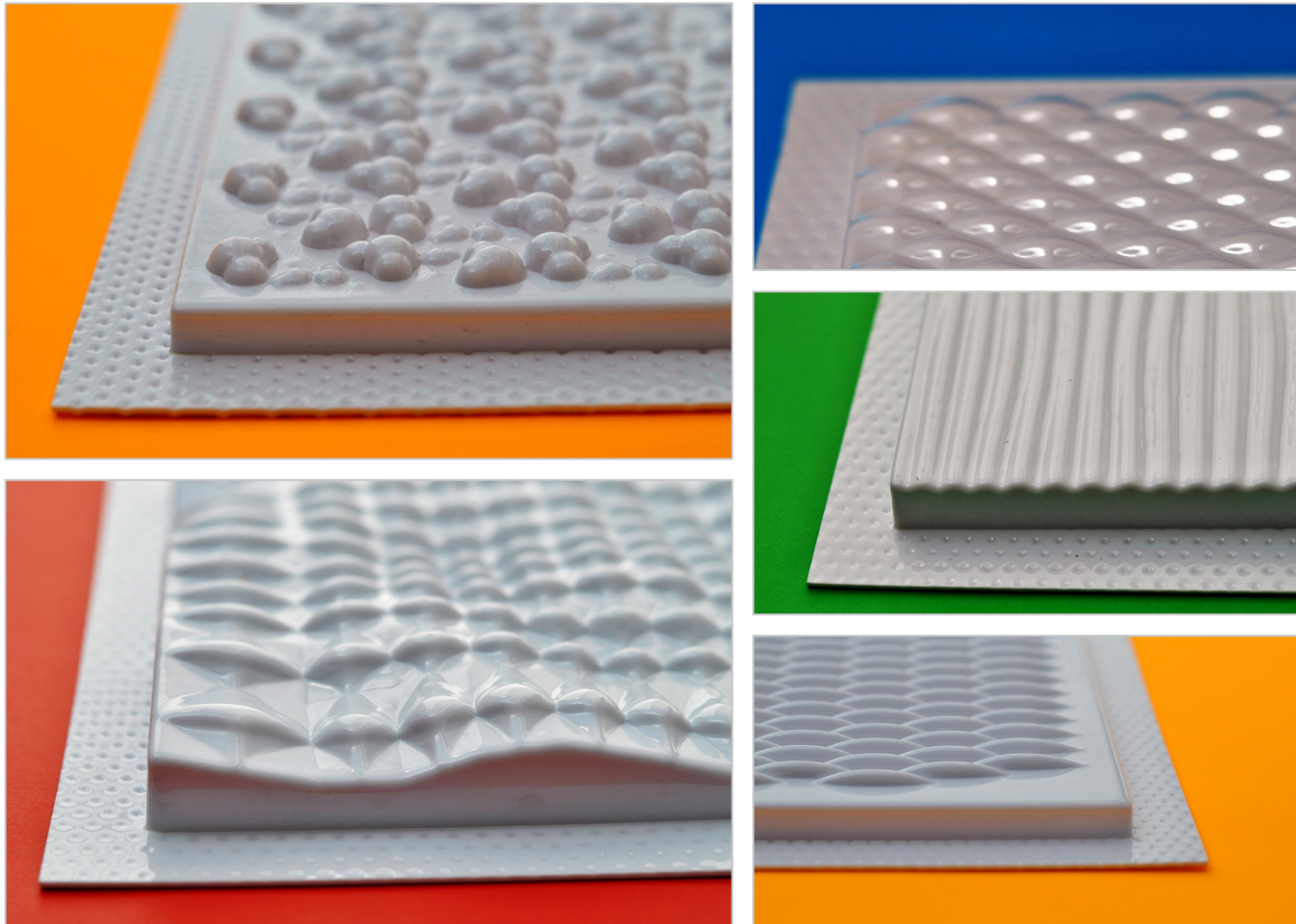
Dimensiones: 200 x 200 x 6.4 mm

Figura 148. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.

Muestras

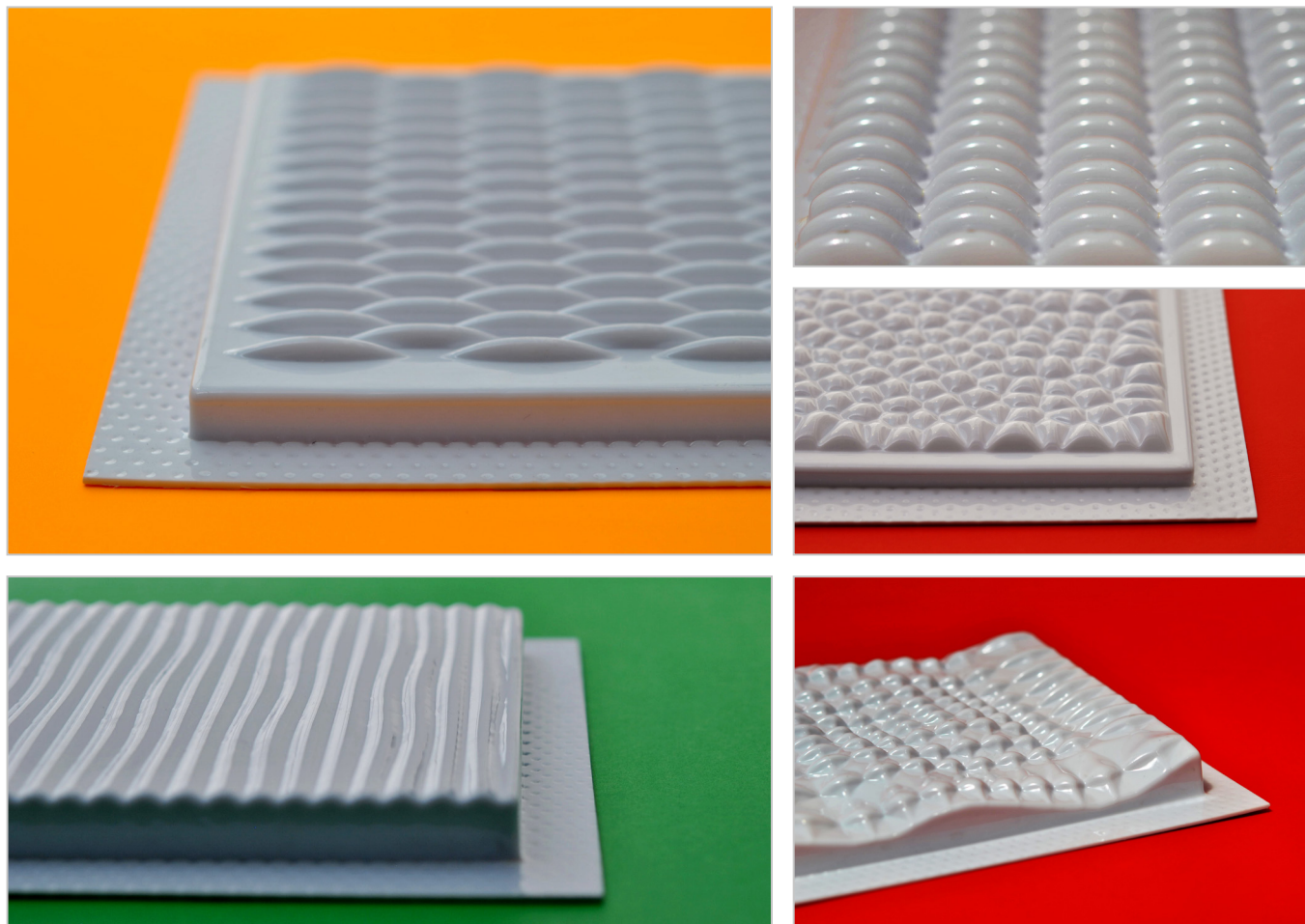
Técnicas analógicas





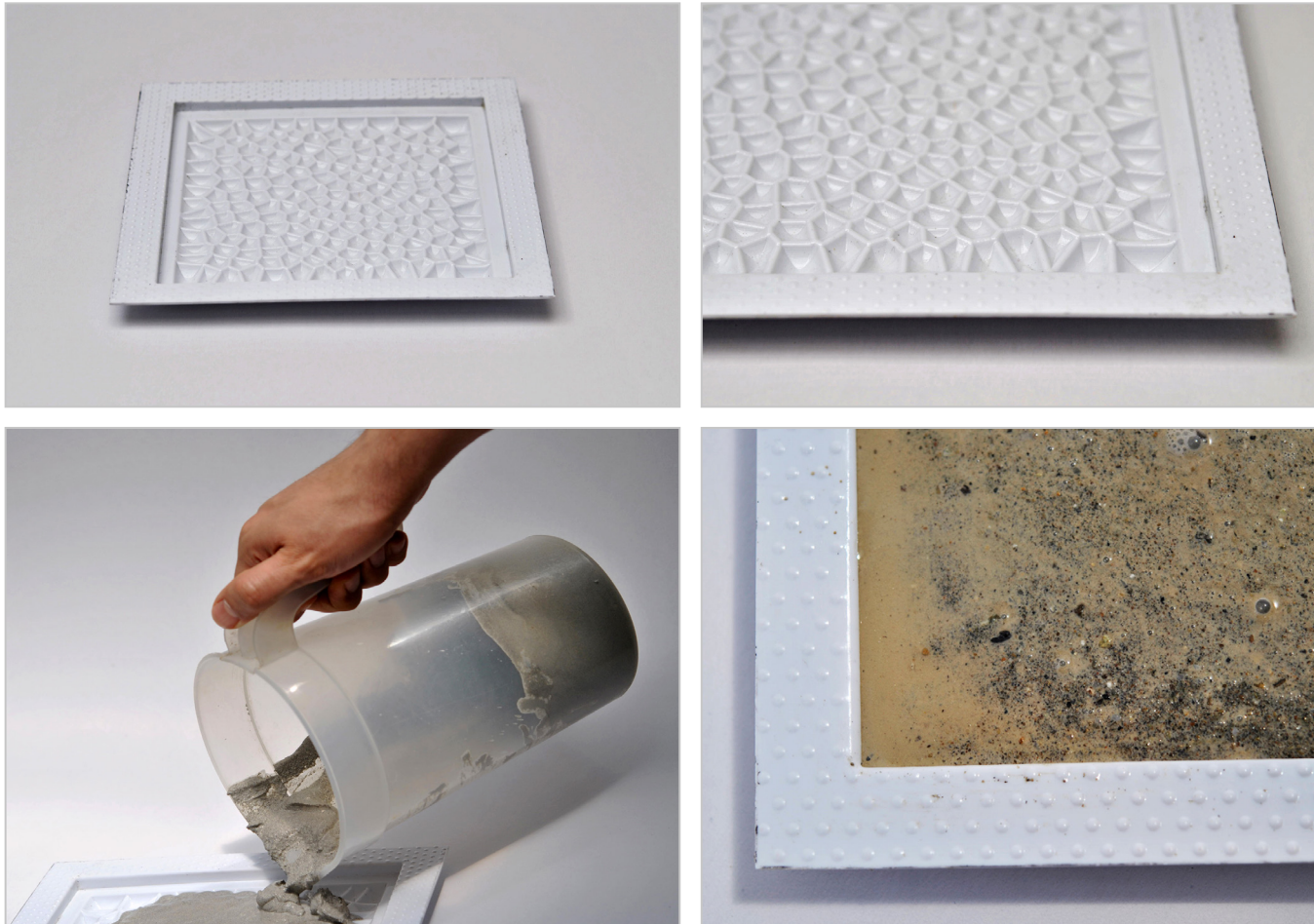
Muestras basadas en diferentes especies vegetales del Valle del Aburrá. Dimensiones 200 x 200 mm, construidas a través del proceso de termoformado, material P.A.I. (Poliestireno de Alto Impacto) de 2mm de espesor. Estas piezas además se utilizaron como moldes para vaciar coladas de concreto.

Figura 149. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.



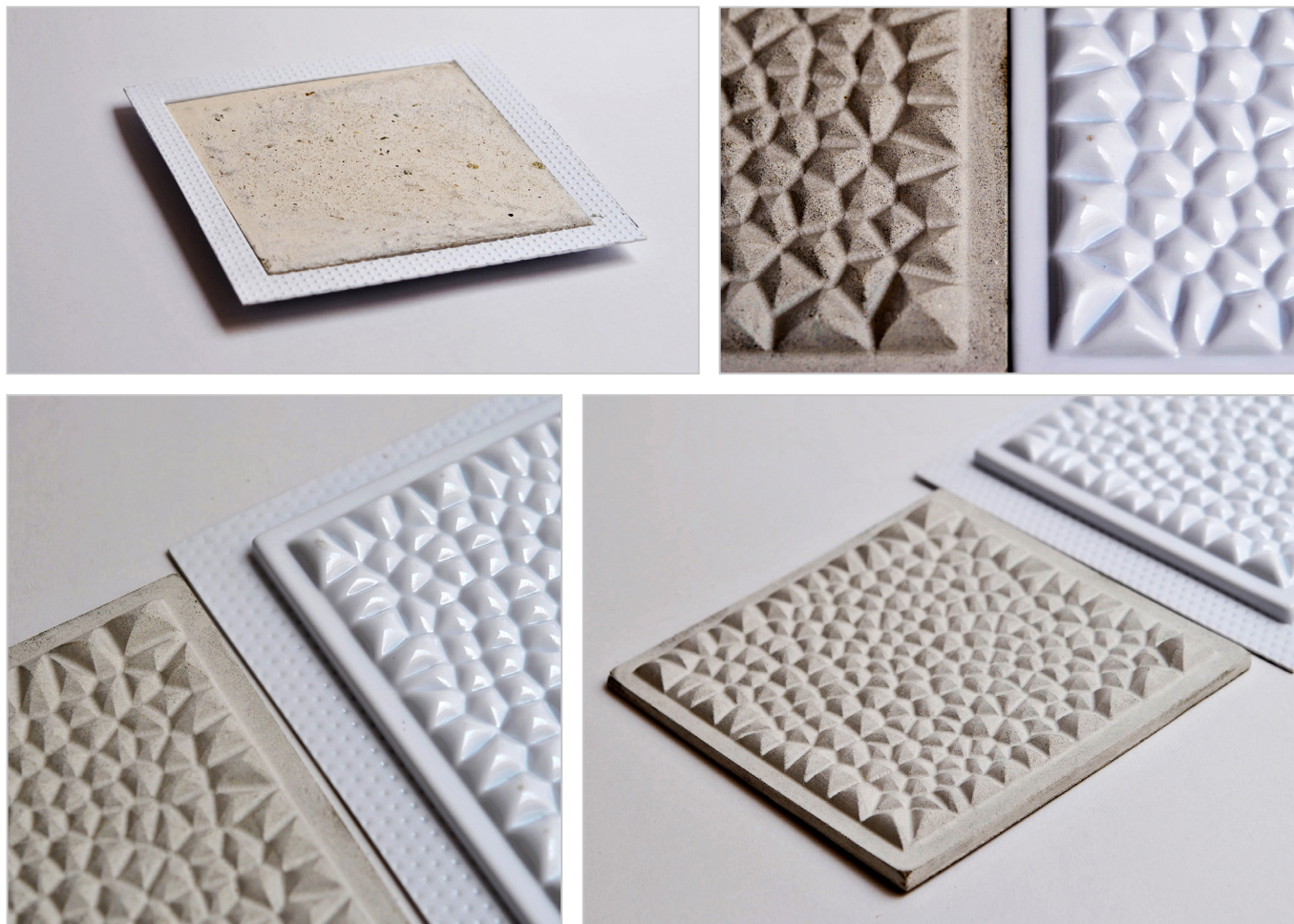
Muestras basadas en diferentes especies vegetales del Valle del Aburrá. Dimensiones 200 x 200 mm, construidas a través del proceso de termoformado, material P.A.I. (Poliestireno de Alto Impacto) de 2mm de espesor. Estas piezas además se utilizaron como moldes para vaciar coladas de concreto.

Figura 150. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.



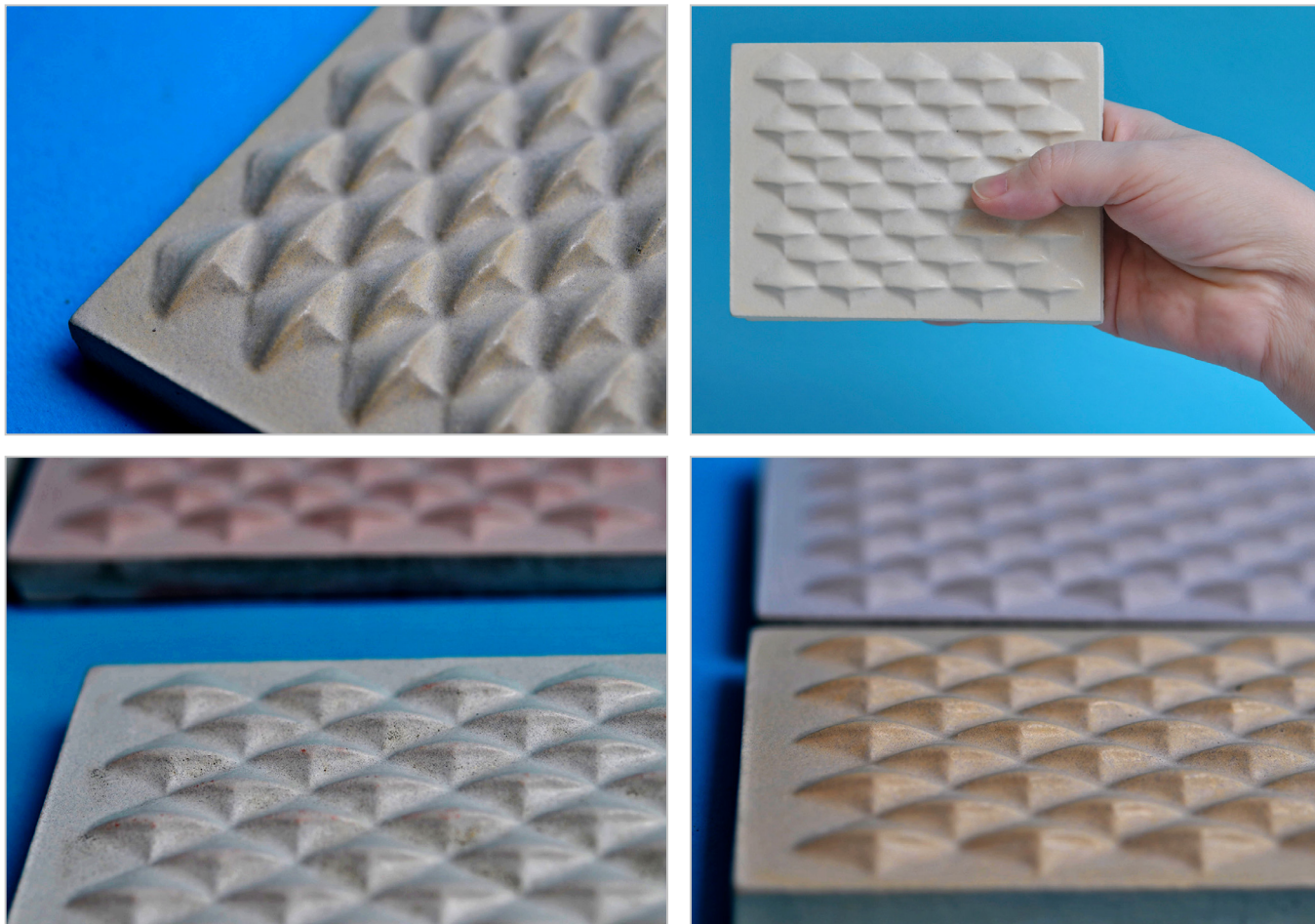
Vaciado de colada de concreto en molde de polímero termoformado de la especie *Artocarpus heterophyllus*, concreto de cemento Portland blanco.

Figura 151. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.



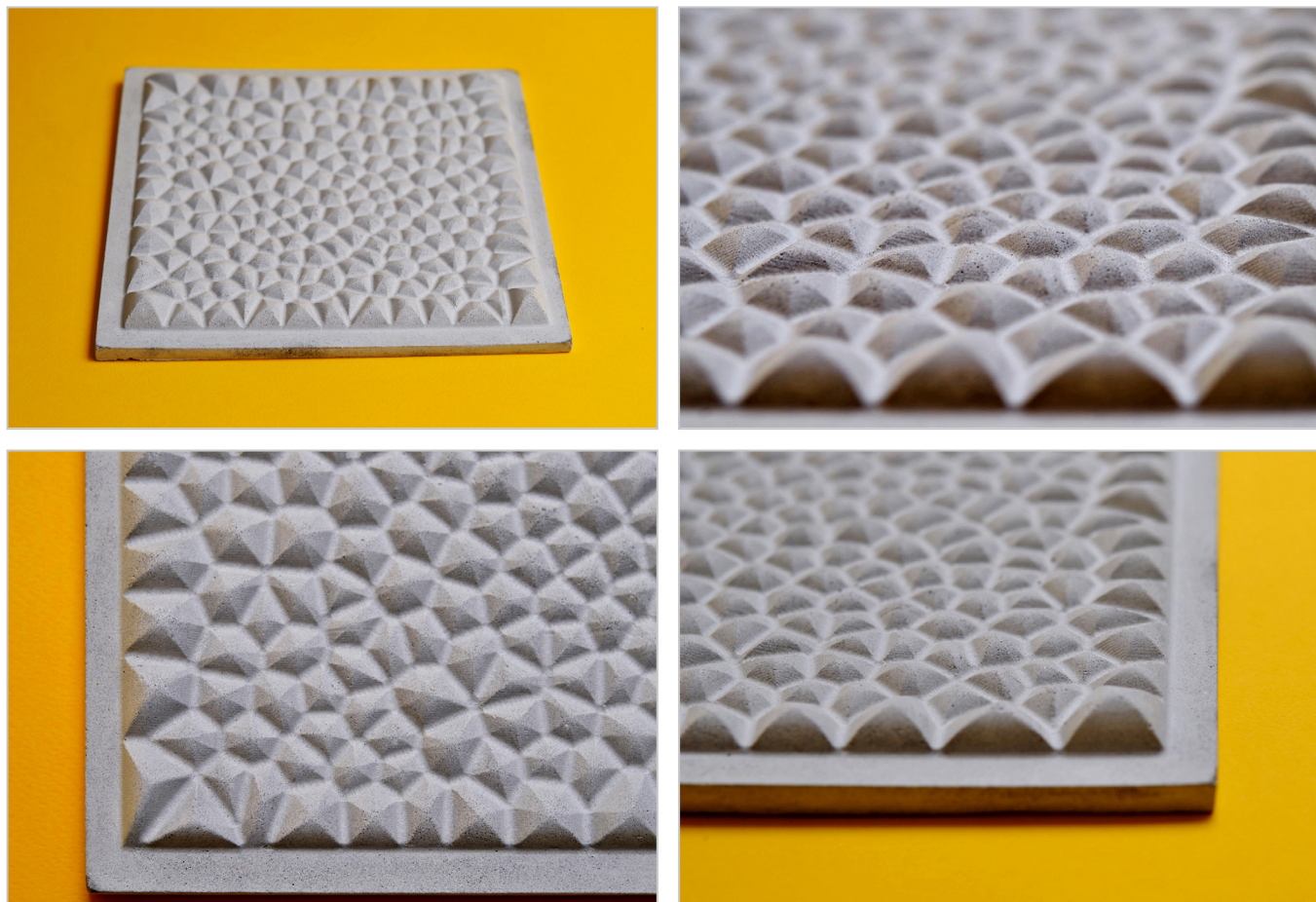
Vaciado de colada de concreto en molde de polímero termoformado de la especie *Artocarpus heterophyllus* y obtención de pieza, concreto de cemento Portland blanco.

Figura 152. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.



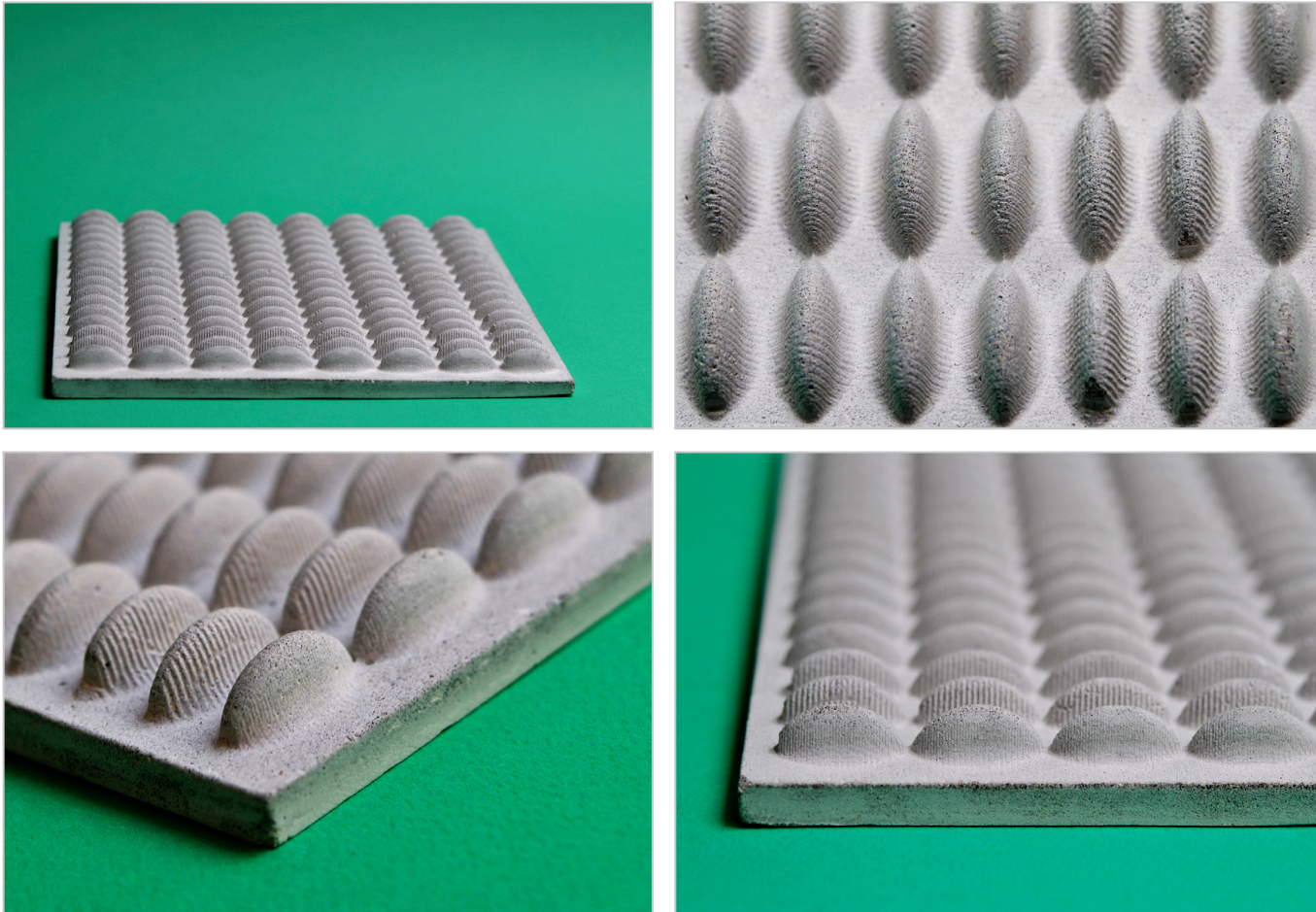
Especie: *Pinus pinea*
Tipo de textura: estándar
Material: concreto de cemento Portland blanco y pigmentos de óxido de hierro
Dimensiones: 100 x 120 x 10 mm

Figura 153. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.



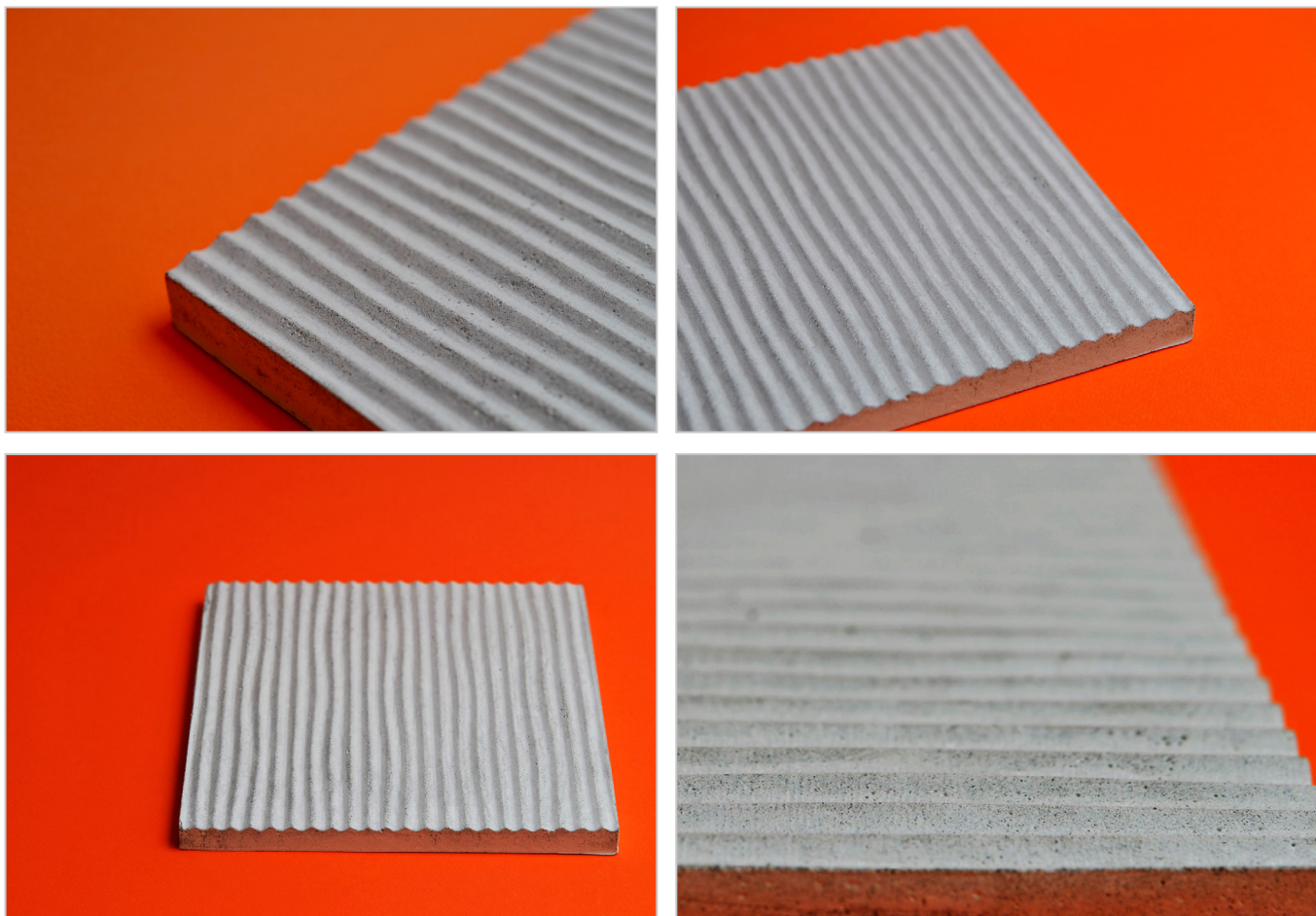
Especie: *Artocarpus heterophyllus*
Tipo de textura: estándar
Material: concreto de cemento Portland blanco
Dimensiones: 200 x 200 x 18 mm

Figura 154. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.



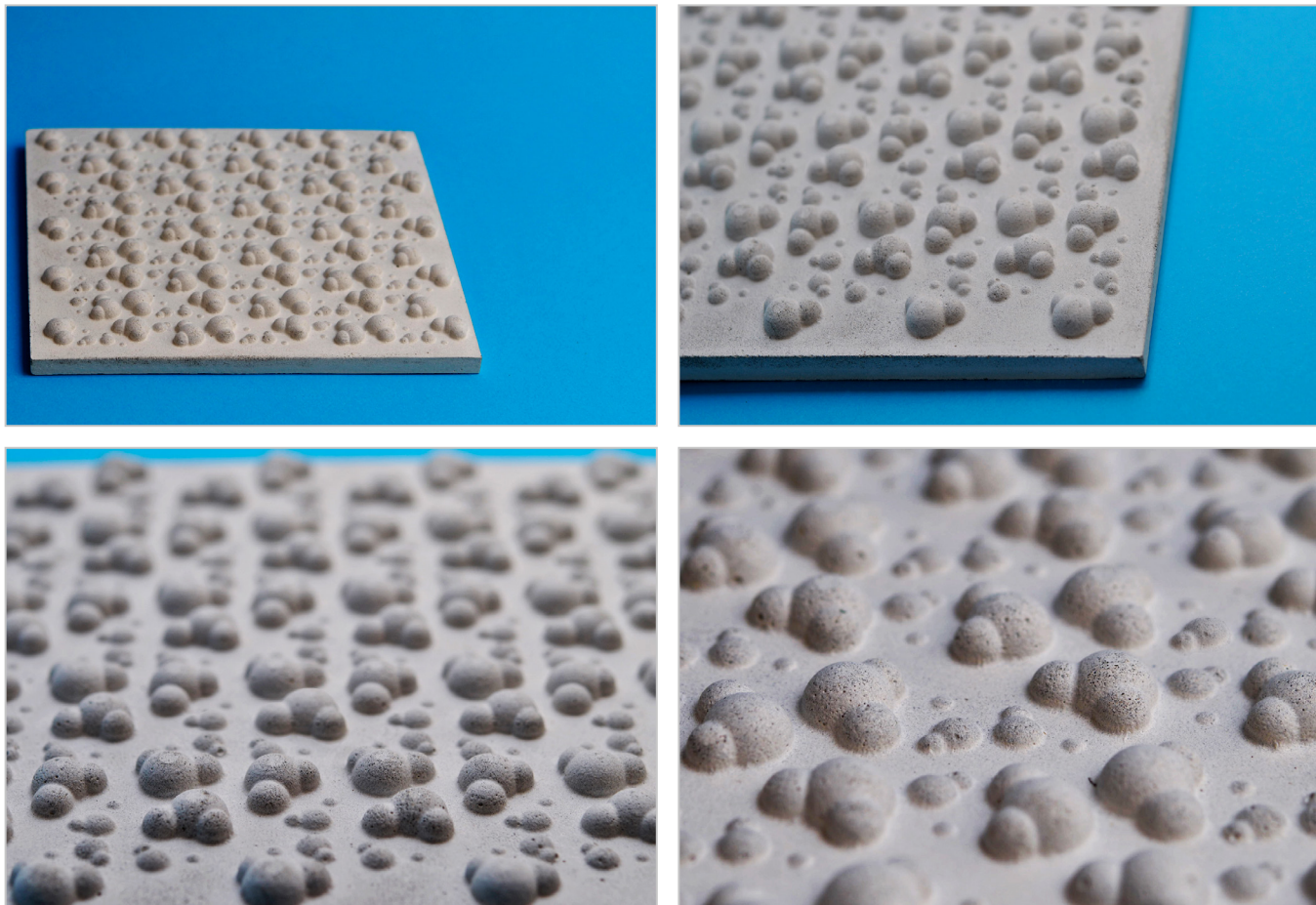
Especie: *Eugenia uniflora*
Tipo de textura: estándar
Material: concreto de cemento Portland blanco
Dimensiones: 200 x 200 x 18 mm

Figura 155. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.



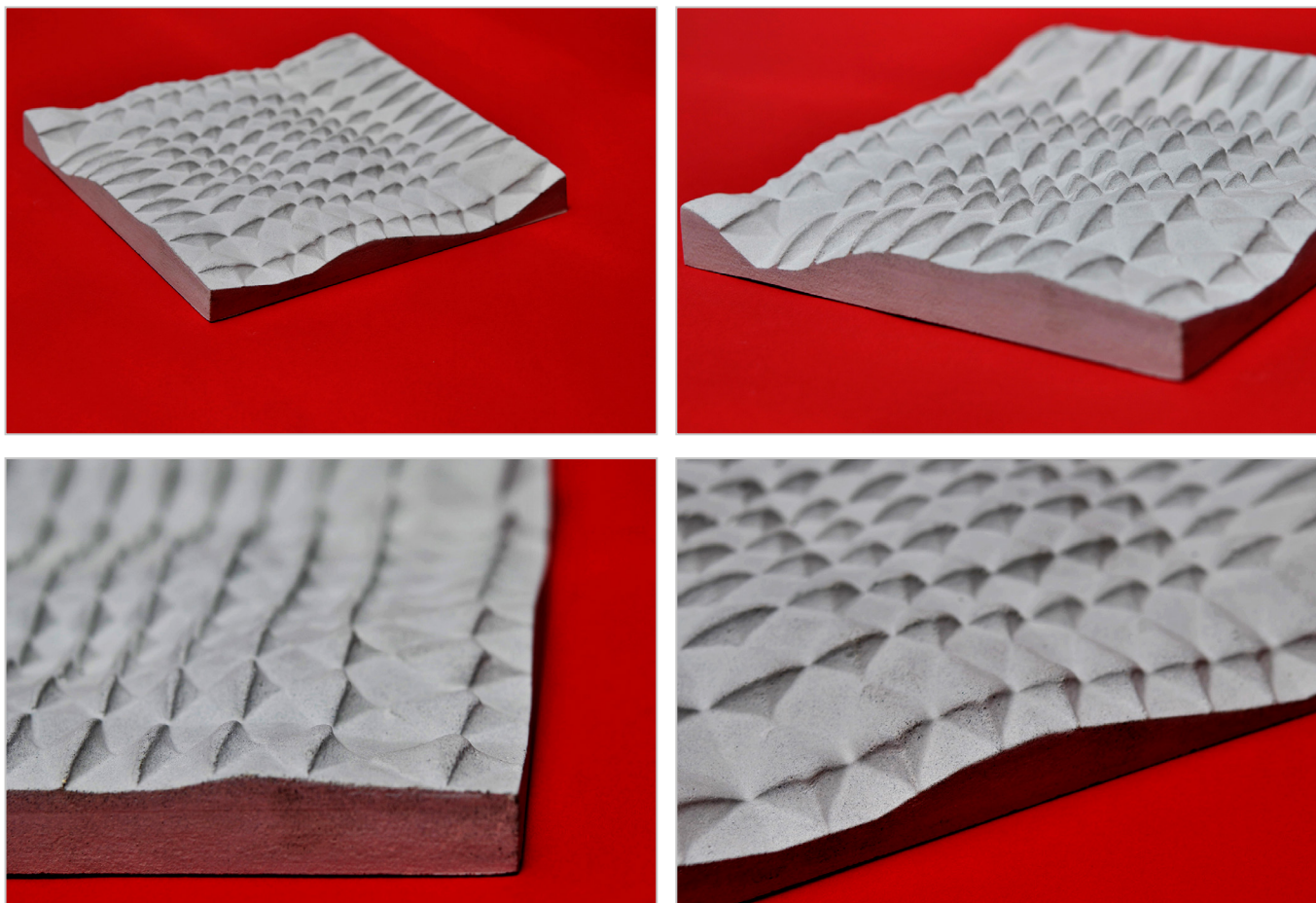
Especie: *Bismarchia nobilis*
Tipo de textura: estándar
Material: concreto de cemento Portland blanco
Dimensiones: 200 x 200 x 18 mm

Figura 156. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.



Especie: *Cucurbita pepo*
Tipo de textura: estándar
Material: concreto de cemento Portland blanco
Dimensiones: 200 x 200 x 18 mm

Figura 157. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.



Especie: *Pinus pinea*
Tipo de textura: con transformación / transformación compleja de crecimiento diferencial topológico,
versión exploratoria
Material: concreto de cemento Portland blanco
Dimensiones: 200 x 200 x 33 mm

Figura 158. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.

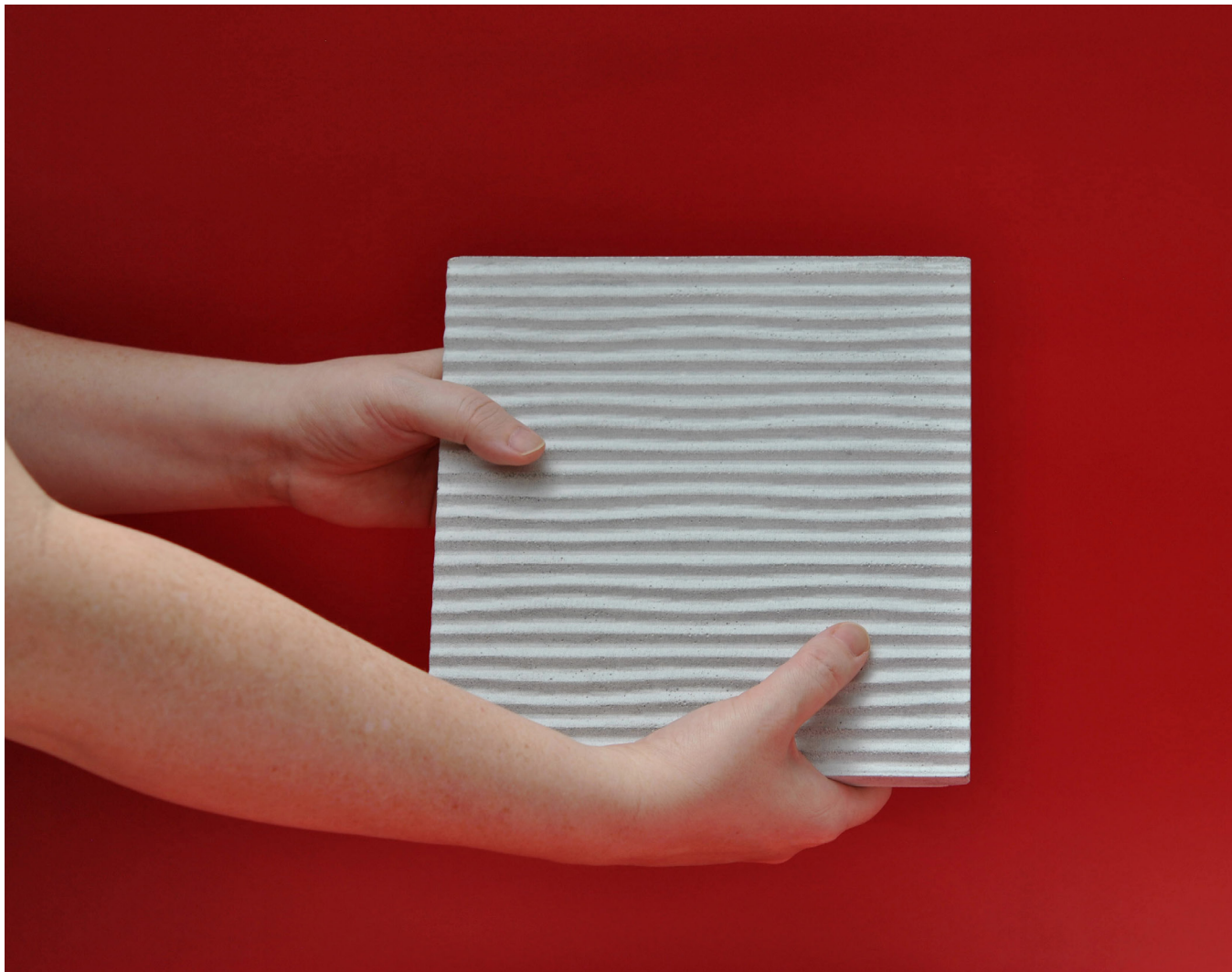


Figura 159. Muestra de concreto con cemento Portland blanco, especie *Bismarchia nobilis*, dimensiones 200 x 200 x 18 mm. Fotografía de David A. Torreblanca-Díaz.

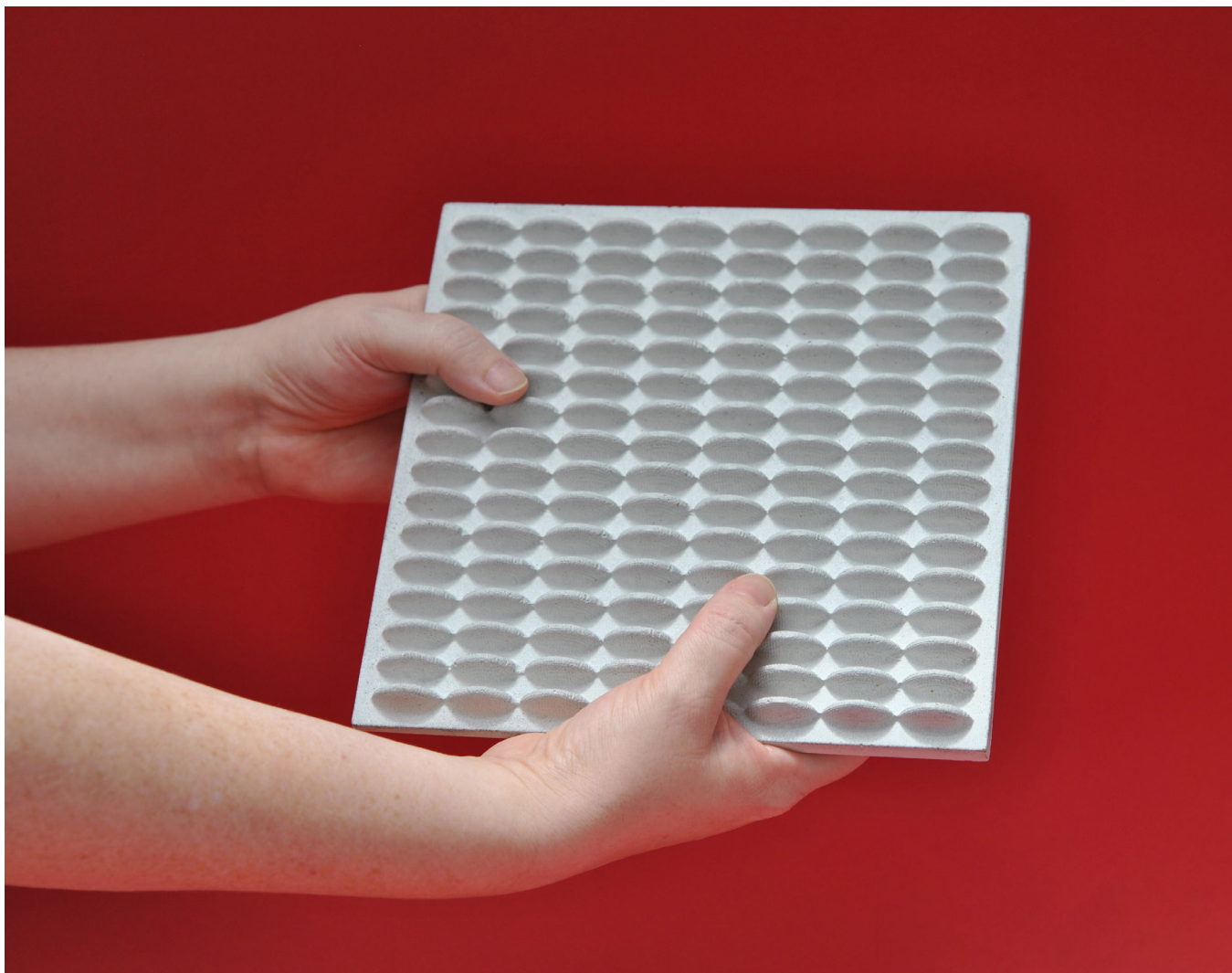


Figura 160. Muestra de concreto con cemento Portland blanco, especie *Eugenia uniflora*, dimensiones 200 x 200 x 18 mm. Fotografía de David A. Torreblanca-Díaz.

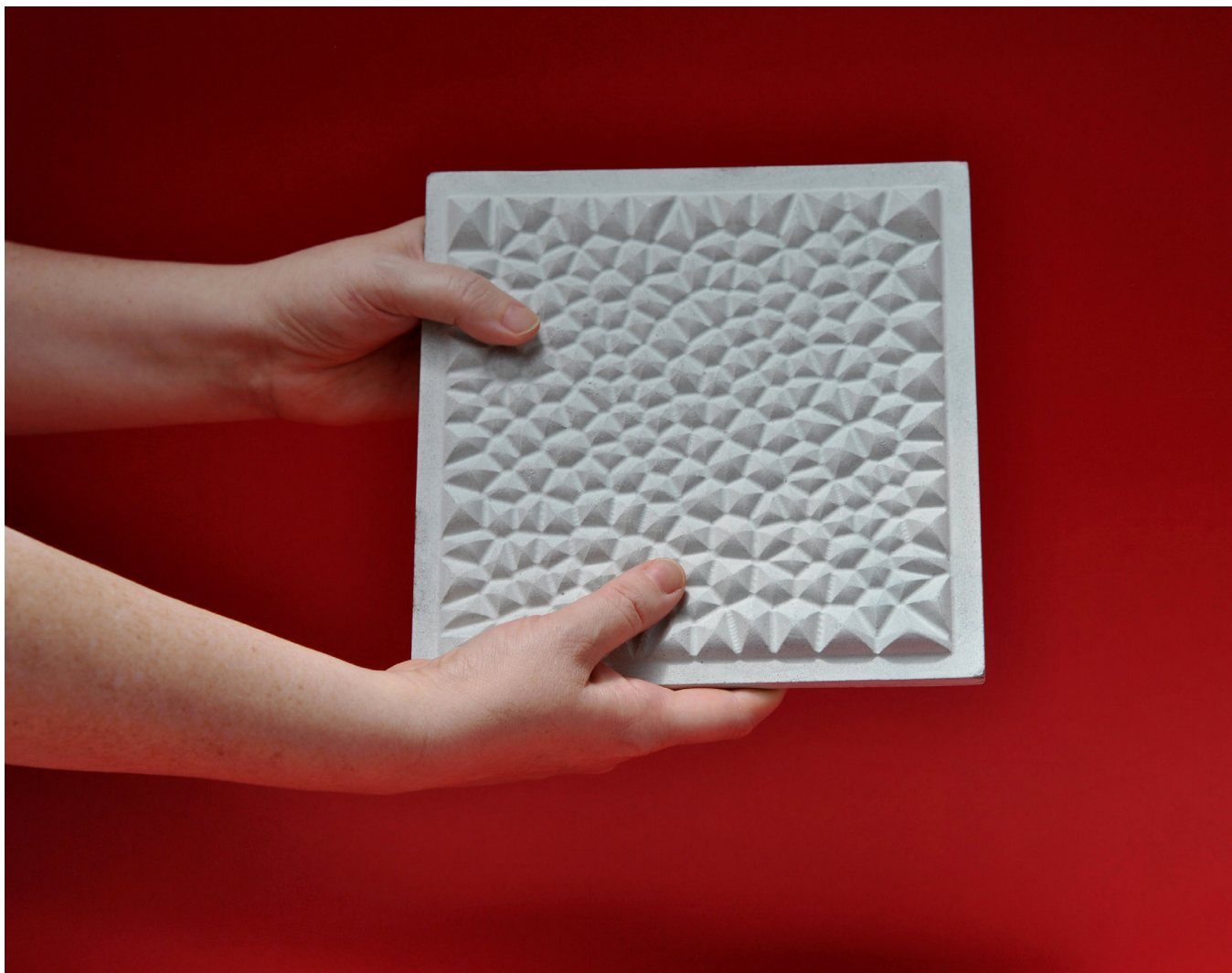


Figura 161. Muestra de concreto con cemento Portland blanco, especie *Artocarpus heterophyllus*, dimensiones 200 x 200 x 18 mm. Fotografía de David A. Torreblanca-Díaz.

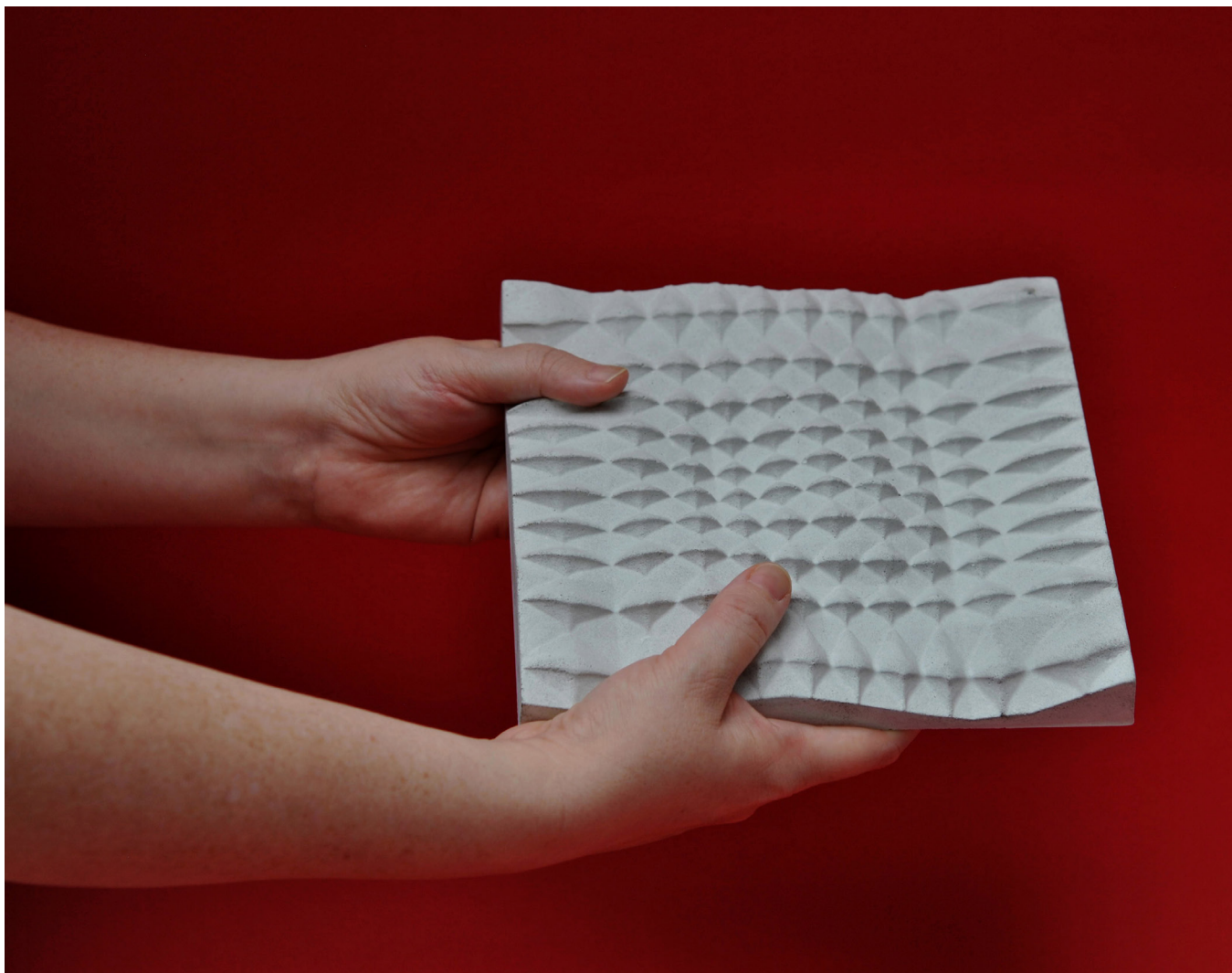


Figura 162. Muestra de concreto con cemento Portland blanco, especie *Pinus pinea*, textura con transformación compleja, dimensiones 200 x 200 x 33 mm. Fotografía de David A. Torreblanca-Díaz.

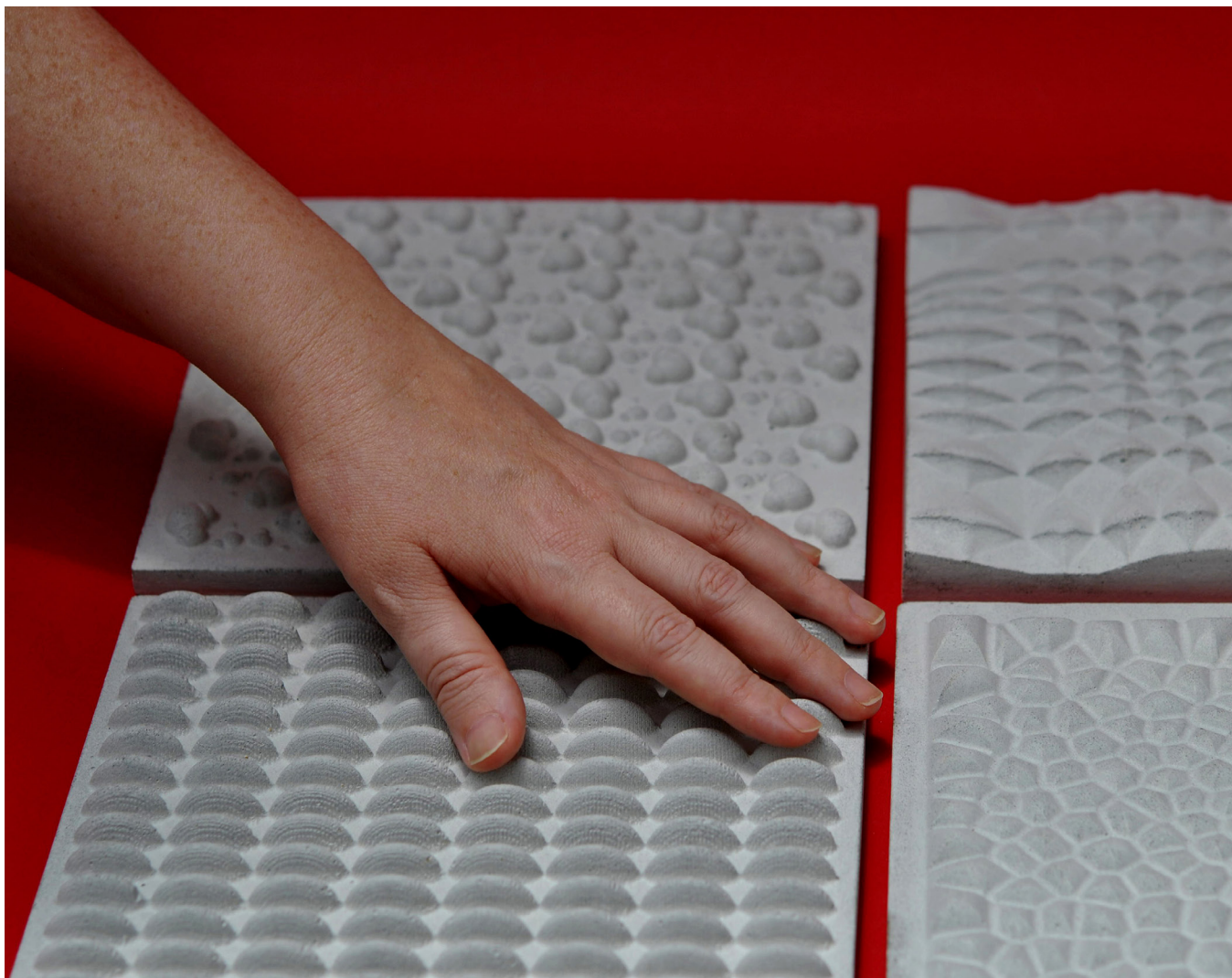


Figura 163. Interacción con muestras de concreto con cemento Portland blanco, texturas basadas en diferentes especies vegetales presentes en el Valle del Aburrá. Fotografía de David A. Torreblanca-Díaz.



Figura 164. *Interacción con muestras de concreto con cemento Portland blanco, texturas basadas en diferentes especies vegetales presentes en el Valle del Aburrá. Fotografía de David A. Torreblanca-Díaz.*

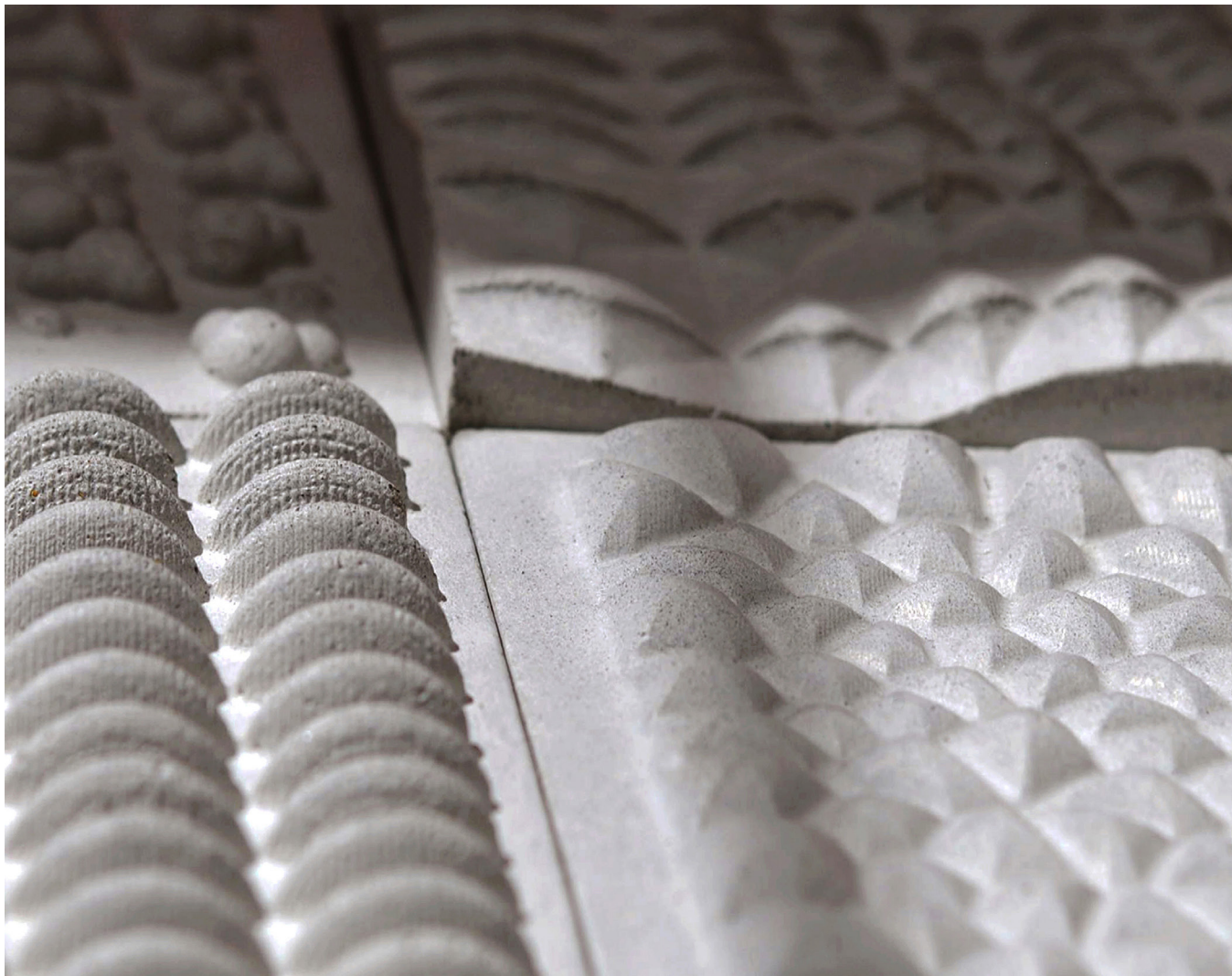


Figura 165. *Detalle de muestras construidas con concreto de cemento Portland blanco, texturas basadas en diferentes especies vegetales presentes en el Valle del Aburrá. Fotografía de David A. Torreblanca-Díaz.*

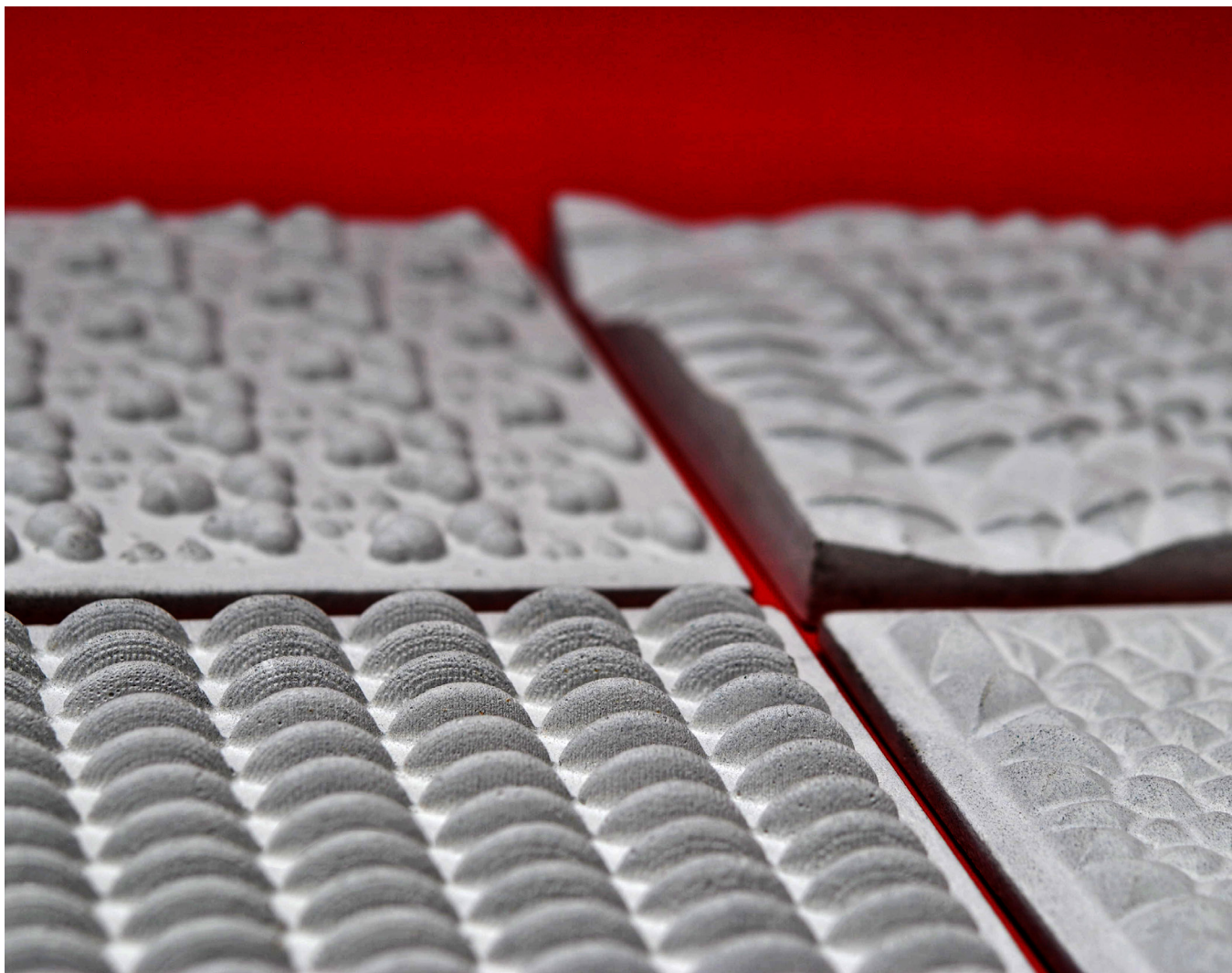


Figura 166. Detalle de muestras construidas con concreto de cemento Portland blanco, texturas basadas en diferentes especies vegetales presentes en el Valle del Aburrá. Fotografía de David A. Torreblanca-Díaz.

5.3 Análisis de muestras

La construcción de muestras fue el resultado de una experimentación activa realizada durante tres años, en los que hacer y rehacer fue muy importante, en un proceso constante de prueba-error y reconfiguración. Se hicieron más de 100 piezas, considerando pruebas y muestras finales: 25 a través de la tecnología láser, 18 con fresado por CNC, 9 por medio de FDM (Fused Deposition Modeling), 10 con DLP (Digital Light Processing), 7 con polímeros termoformados, además de innumerables experimentaciones. En la **Figura 167** y **168** se pueden ver diversas pruebas para la materialización de la textura basada en la especie *Pinus pinea*, usando tecnologías de fabricación digital aditiva, la impresión de estos módulos fue el paso previo a la construcción de la textura en su totalidad.

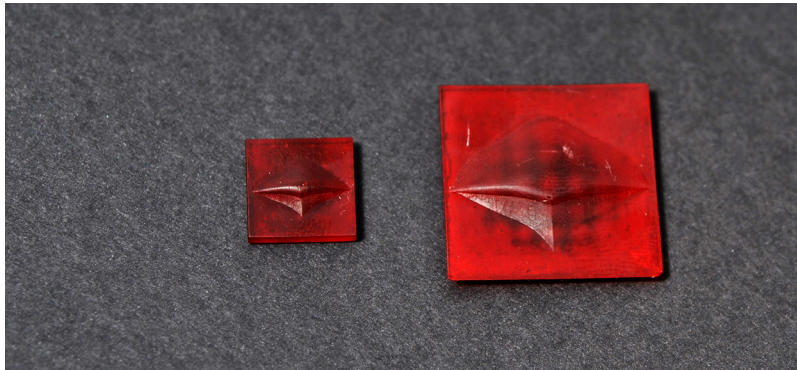


Figura 167. Impresión 3D de módulos de la textura basada en la especie *Pinus pinea*, tecnología DLP (Digital Light Processing) en la impresora Asiga PRO 50, con resina epóxica termocurable Fusion red. Dimensiones 12x12x3.5 mm y 25x25x5 mm. Fotografía de David A. Torreblanca-Díaz.



Figura 168. Impresión 3D de módulo de la textura basada en la especie *Pinus pinea*, a través de la tecnología FDM, impresora Zortrax M-200 y con el material polimérico ZABS plus. Dimensiones 50x50x9 mm. Fotografía de David A. Torreblanca-Díaz.

Al analizar los resultados obtenidos se puede inferir que hay texturas que tienen una alta afinidad con las tecnologías de fabricación digital, es decir, se pudieron fabricar sin mayores inconvenientes con una amplia variedad de tecnologías y con resultados de alta definición geométrica. Por el contrario, otras tuvieron opciones muy limitadas para su materialización y muchas veces

con resultados de baja definición, algunas solo fueron viables para ser fabricadas con tecnologías de fabricación aditiva y otras solamente con tecnologías sustractivas. Por ejemplo, las texturas clasificadas en la familia morfológica de texturas visuales,

debido a su condición bidimensional, son muy limitadas porque únicamente pueden ser materializadas a través de corte, grabado y marcado láser, es el caso de la textura referenciada en la especie *Blighia sávida*. (Ver **Figura 169**).

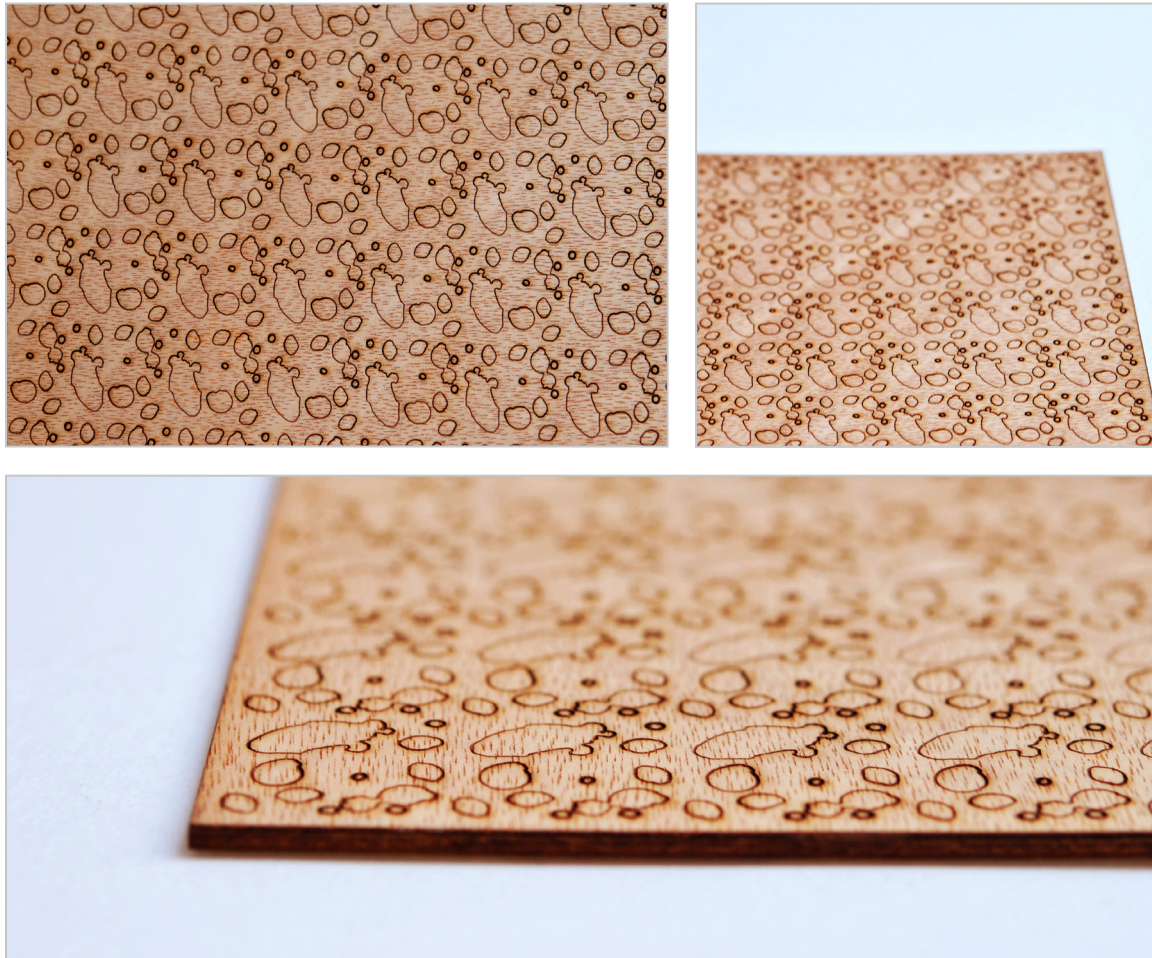


Figura 169. Textura basada en la especie *Blighia sávida*, muestras hechas con marcado láser en madera contrachapada de 3.2 mm de espesor. Fotografía de David A. Torreblanca-Díaz.

En la **Figura 170** se pueden ver las pruebas y experimentaciones hechas con fresado por CNC, de la textura referenciada en la especie *Fragaria ananassa*. Los resultados no lograron el nivel de

calidad esperado, aunque se hicieron varias pruebas con fresas muy finas, la definición obtenida es baja y con una geometría casi imperceptible por el reducido tamaño de sus módulos.

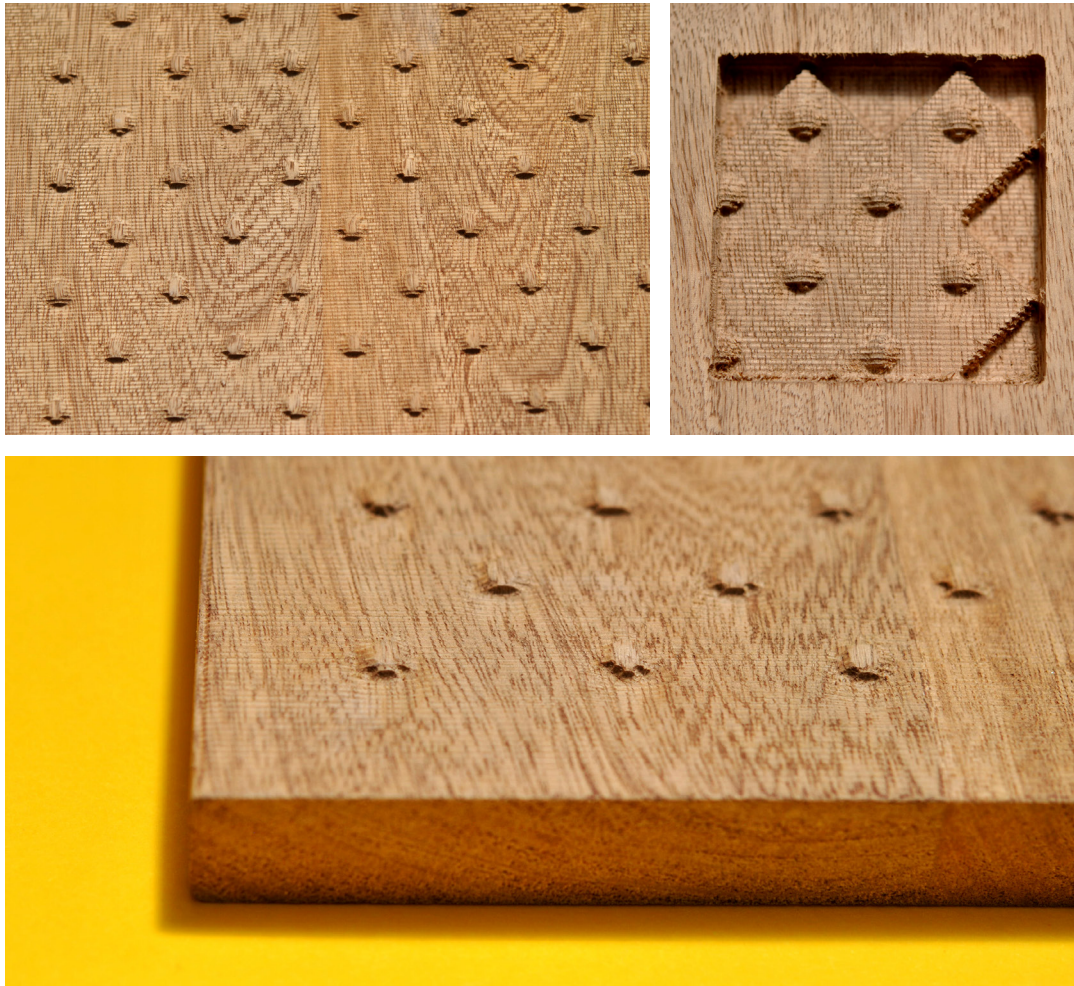


Figura 170. Pruebas y experimentaciones para la textura basada en la especie *Fragaria ananassa*. Material madera de roble colombiano, tecnología de fresado por CNC. Fotografía de David A. Torreblanca-Díaz.

En contraste con el caso especie *Blighia sávida* que sólo se pudo materializar con la tecnología láser, las muestras de texturas basadas en las especies *Pinus pinea* y *Artocarpus heterophyllus* tuvieron una alta afinidad tecnológica porque pudieron ser fa-

bricadas sin dificultades con tecnologías de fabricación aditiva y sustractiva, logrando piezas con alta definición en diferentes materiales. (Ver **Figura 171** y **172**).

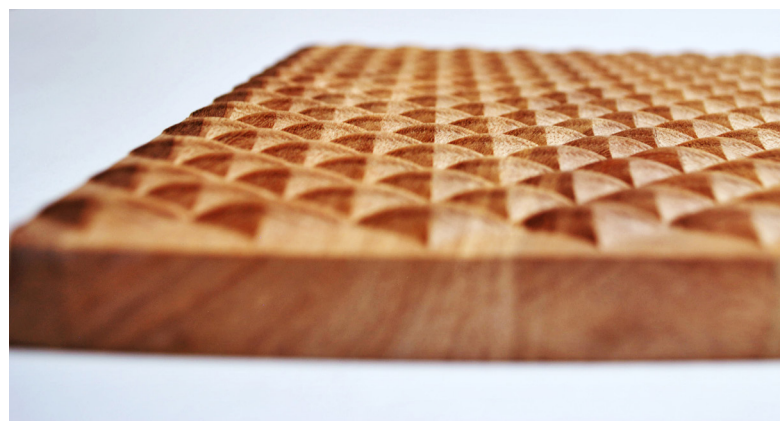
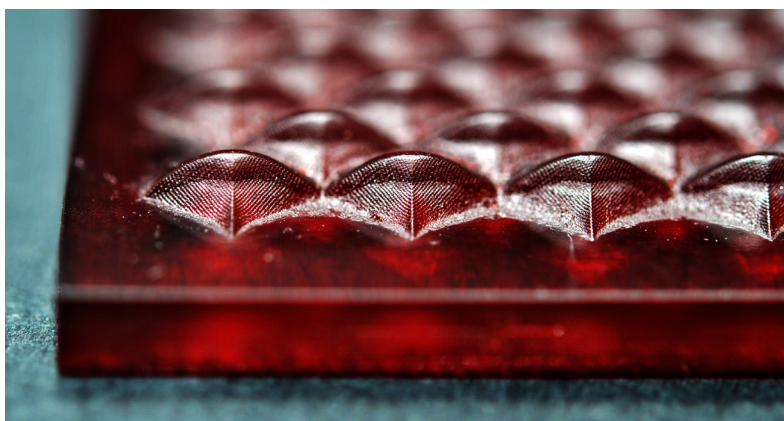


Figura 171. Texturas basadas en las especies *Pinus pinea* y *Artocarpus Heterophyllus* fabricadas con tecnologías de fabricación digital aditiva y sustractiva. Fotografía de David A. Torreblanca-Díaz.

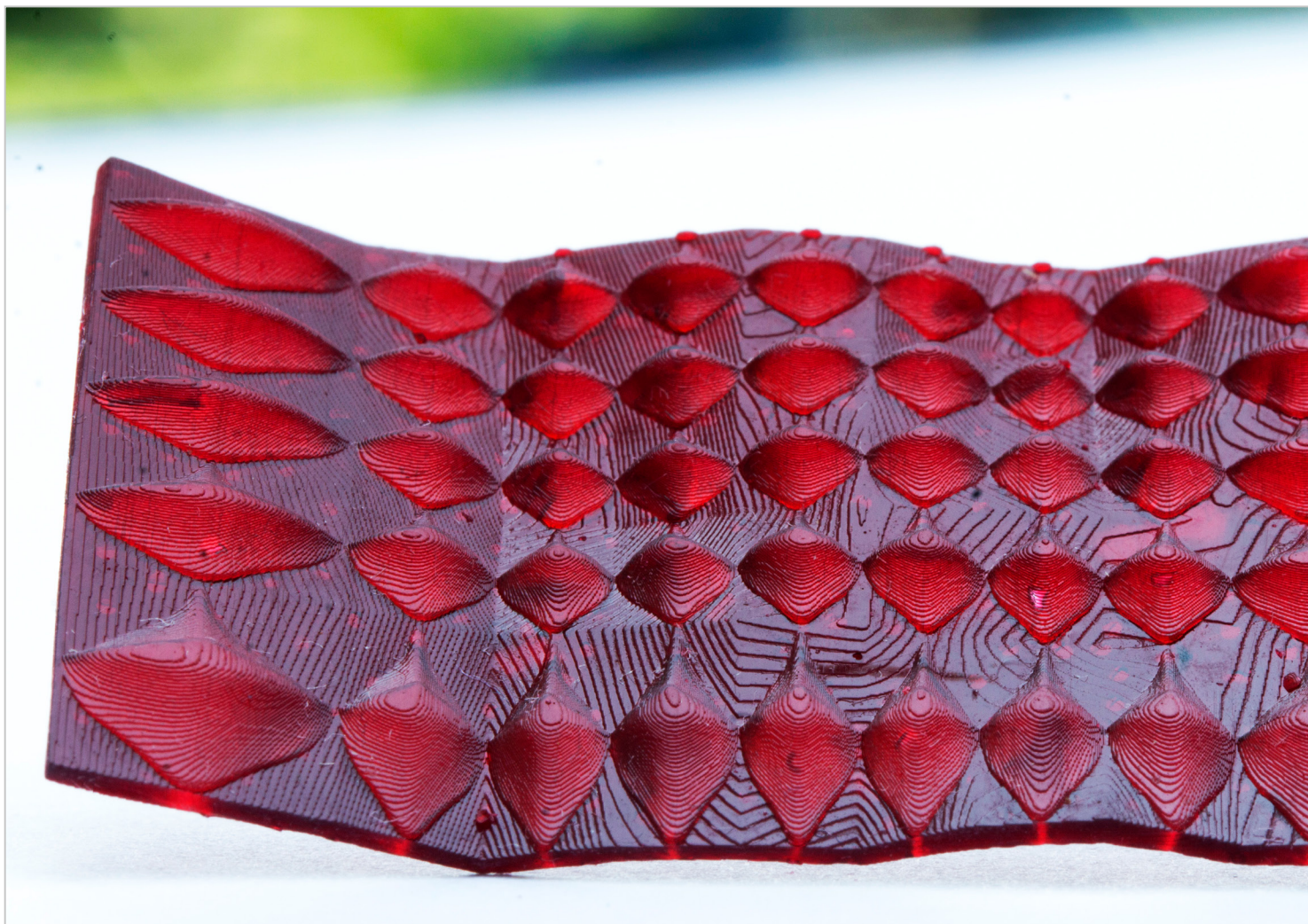


Figura 172. Muestra de textura basada en la especie *Pinus pinea*, con transformaciones complejas, tamaño de 25x50 mm, construida a través de la tecnología DLP (Digital Light Processing) en la impresora Asiga PRO 50, con la resina epóxica termocurable Fusion red. Fotografía de David A. Torreblanca-Díaz.

En la **Figura 173** se puede ver que las texturas referenciadas en las especies *Costus costaceae* y *Icmadophila adversa*, únicamente pudieron ser materializadas a través de tecnologías de fabricación digital aditiva debido a su complejidad morfológica y cavidades.

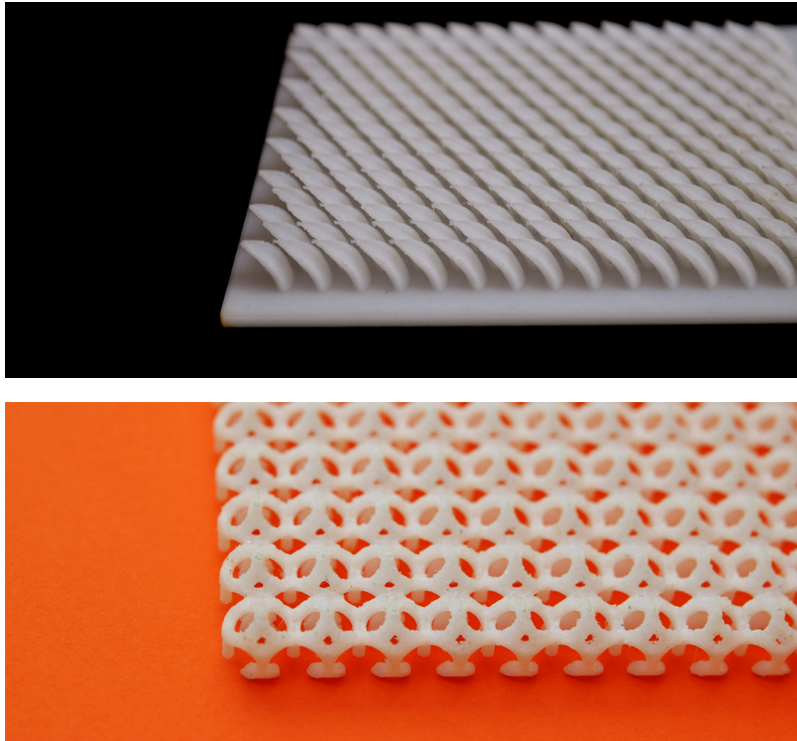


Figura 173. Texturas referenciadas en las especies *Costus costaceae* (foto de arriba) y *Icmadophila adversa* (foto de abajo) y, fabricadas con la tecnología de fabricación digital aditiva FDM, usando la impresora Zortrax M-200 y el material polimérico ZABS plus. Fotografía de David A. Torreblanca-Díaz.

Análisis de un caso

En el proceso de fabricación de muestras, uno de los casos más desafiantes y con una mayor cantidad de experimentaciones fue el de la especie *Nephelium lappaceum*. El proceso de materialización de esta textura fue especialmente retador porque se buscó lograr alta definición geométrica en espesores mínimos de una textura con formas orgánicas, poniendo a prueba la tecnología de fabricación aditiva. En la **Figura 174** (siguiente página), se puede apreciar la morfología esbelta y orgánica de esta textura.

Al analizar las características morfológicas de la textura se descartan los procesos de materialización por fabricación digital sustractiva porque se requeriría una fresadora de 5 ejes (los investigadores no tienen fácil acceso a esta maquinaria); además, sería necesario desbastar una gran cantidad de material e involucrar extensos tiempos para el mecanizado y las piezas se pueden romper fácilmente en el proceso constructivo. Como resultado de este análisis se opta por usar únicamente tecnologías de fabricación digital aditiva, se utilizan las tecnologías FDM (Fused Deposition Modeling) y DLP (Digital Light Processing), se definen los formatos de 100x100 mm y 50x50 mm. (Ver **Figura 175**).

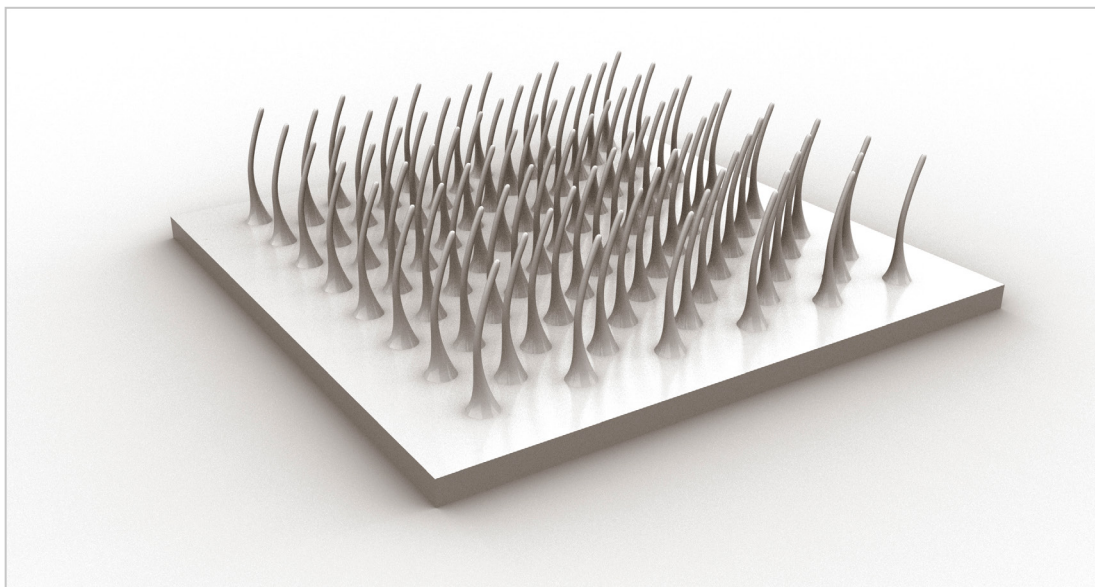


Figura 174. Foto y modelación digital de la textura de la especie *Nephelium lappaceum*. Fotografía de Silvia Gallego y Carolina Cardona, modelación digital de David A. Torreblanca-Díaz, parametrización de Andrés Obregón.

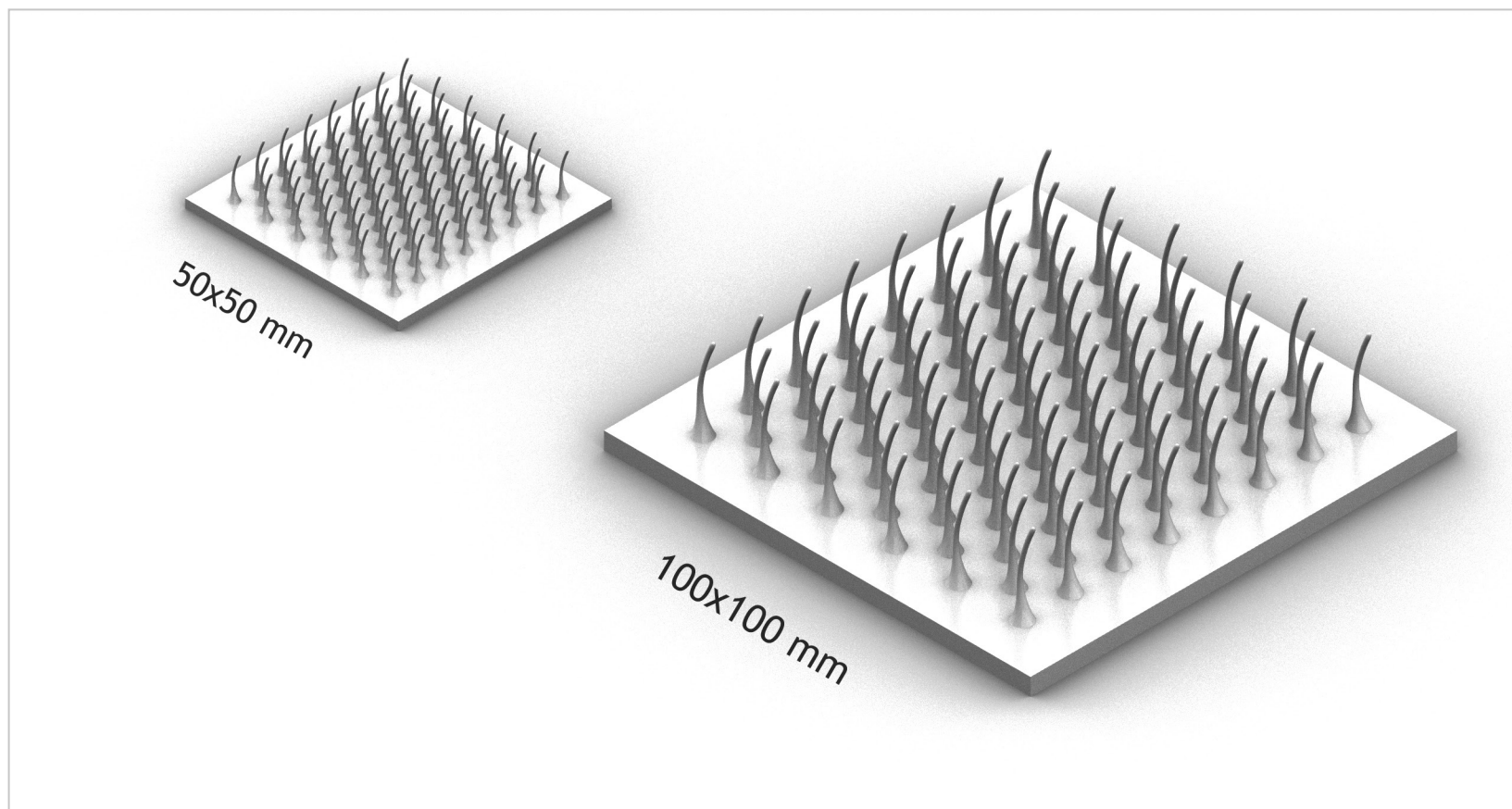


Figura 175. Formatos para fabricación digital aditiva, de 50x50mm para DLP y 100x100mm para FDM, especie *Nephelium lappaceum*. Modelación digital de David A. Torreblanca-Díaz, parametrización de Andrés Obregón.

Primero se planea fabricar una muestra de 100 x 100 mm con la tecnología Fused Deposition Modeling (FDM), a través de la impresora Zortrax M-200 y con el material polimérico ZABS plus, con esta máquina se puede obtener una resolución de capa de 90 a 400 μm (micrómetros). La primera impresión falló porque los filamentos (elementos alargados) tenían un diámetro inferior a un milímetro, por consecuencia, el software Z-Suite[®] de la impresora no los reconoció y solo imprimió la zona inferior que tenía más de un milímetro de diámetro. (Ver **Figura 176**).

Luego, se modifica la modelación digital, teniendo la precaución de no tener geometrías con dimensiones inferiores a un milímetro. Esta vez se hicieron impresiones de prueba de los módulos (filamentos) en forma independiente, antes de imprimir la textura completa para estar seguros de tener el resultado esperado y evitar imprimir toda la textura con errores. Como se puede ver en la **Figura 177** (siguiente página) se imprimen filamentos de 20 mm, 30 mm y 40 mm de altura.

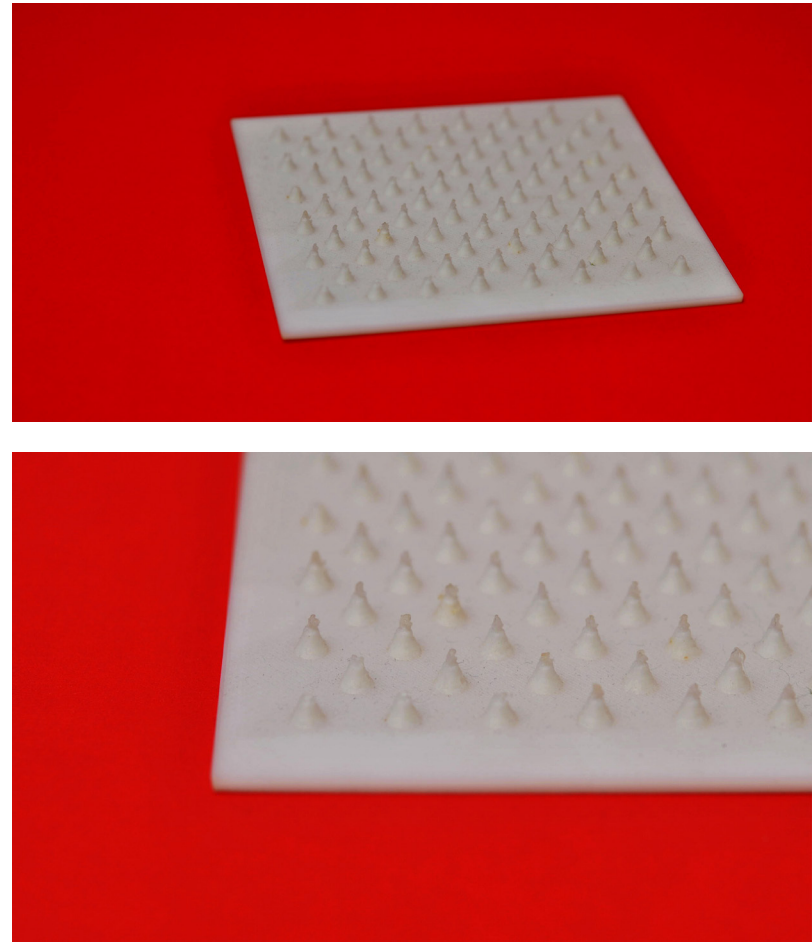


Figura 176. Impresión fallida de la textura referenciada en la especie *Nephelium lappaceum*, con la tecnología FDM, a través de la impresora Zortrax M-200 y con el material polimérico ZABS plus. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.

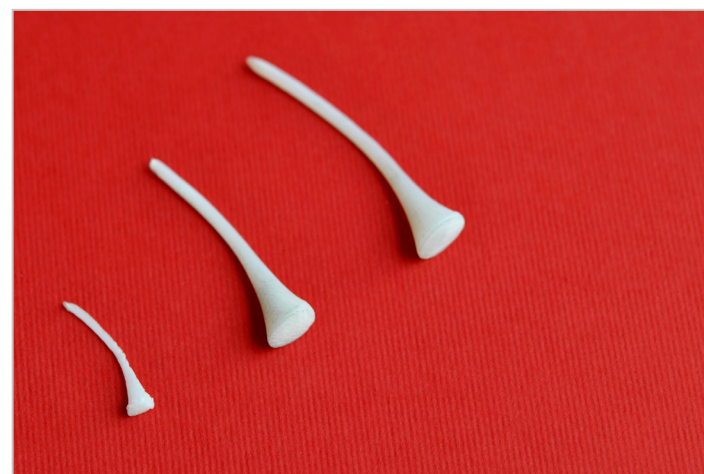
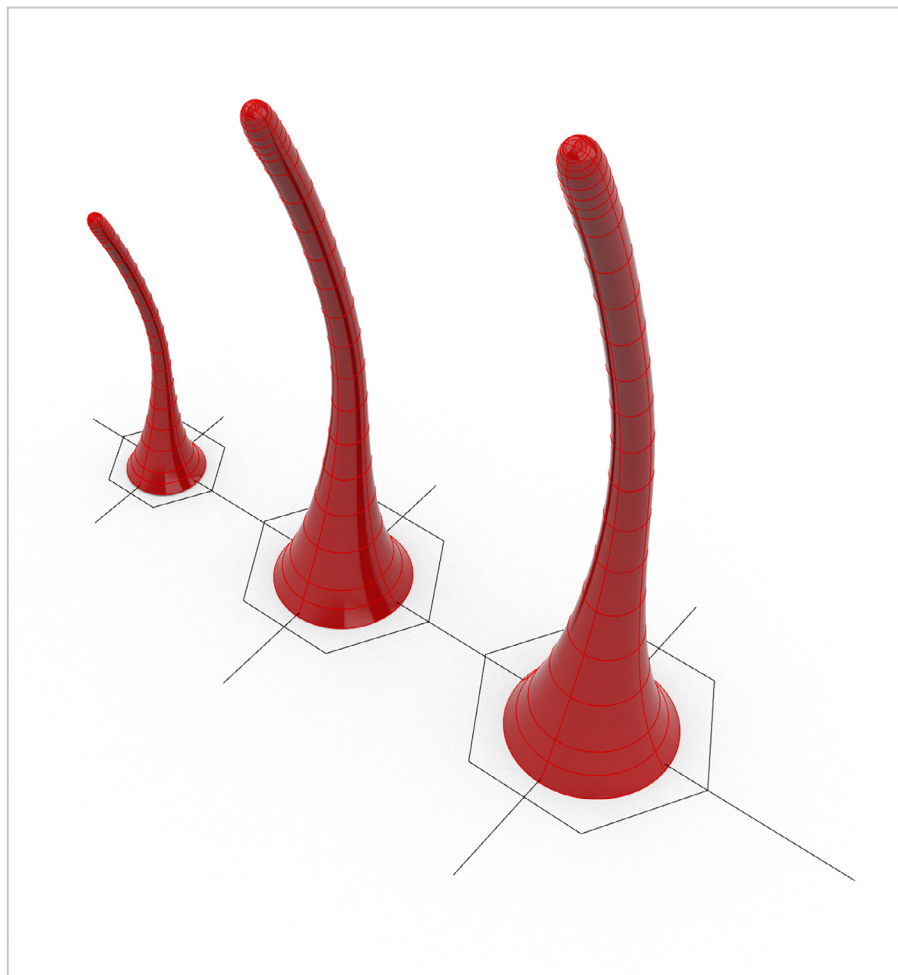


Figura 177. Pruebas del módulo independiente fabricados en FDM, especie *Nephelium lappaceum*. Modelación digital y fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.

Una vez verificada la factibilidad para la impresión de los filamentos (módulos alargados), se hace la impresión de la textura en su totalidad. Como se puede ver en la **Figura 178**, el resultado no es satisfactorio porque los filamentos se materializan, pero algunos de ellos se pegan unos a otros por su cercanía y por la temperatura que se origina en el proceso. Por último, varios filamentos se dañan en la extracción del material de soporte, este último además fue un procedimiento difícil de hacer debido a los espacios estrechos entre cada filamento y es fácil romper las delgadas piezas.

Después de los resultados obtenidos con la tecnología FDM, se hace una muestra de textura de 50x50 mm, esta vez a través de la tecnología Digital Light Processing (DLP) en la impresora Asiga PRO 50 con la resina epóxica termocurable Fusion red. Con esta tecnología es posible fabricar piezas de alta definición, hasta de 50 μm (micrómetros). Como se aprecia en la **Figura 179** (siguiente página) se obtiene el resultado esperado en la primera impresión sin dificultades, en este caso los filamentos tienen un diámetro de 0,5 mm en sus zonas más delgadas.

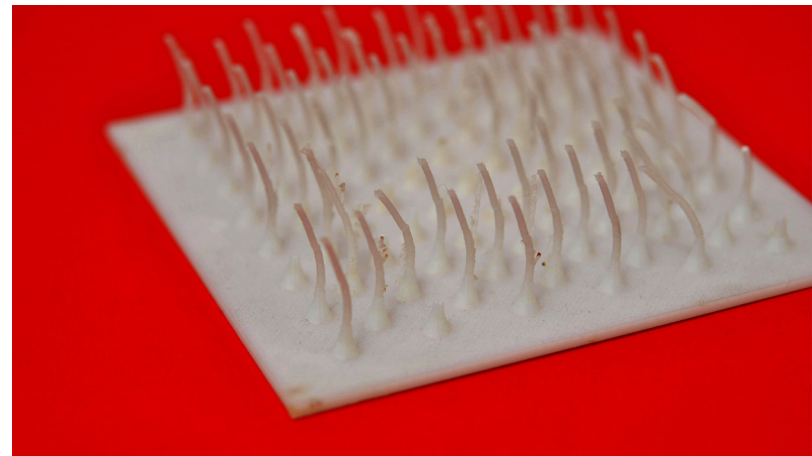
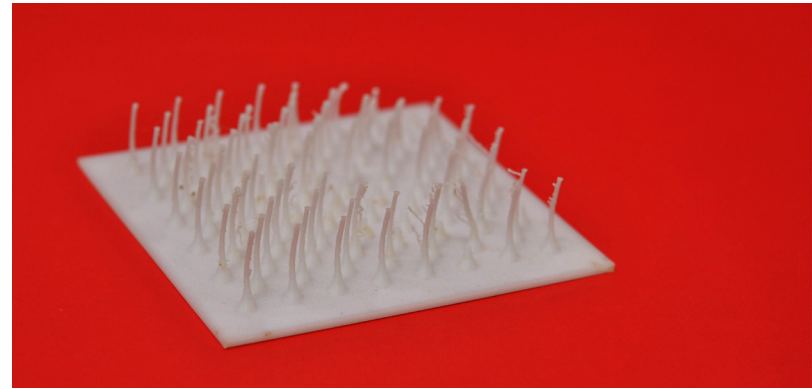


Figura 178. Segunda impresión fallida de la textura referenciada en la especie *Nephelium lappaceum*, con la tecnología FDM, a través de la impresora Zortrax M-200 y con el material polimérico ZABS plus. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.

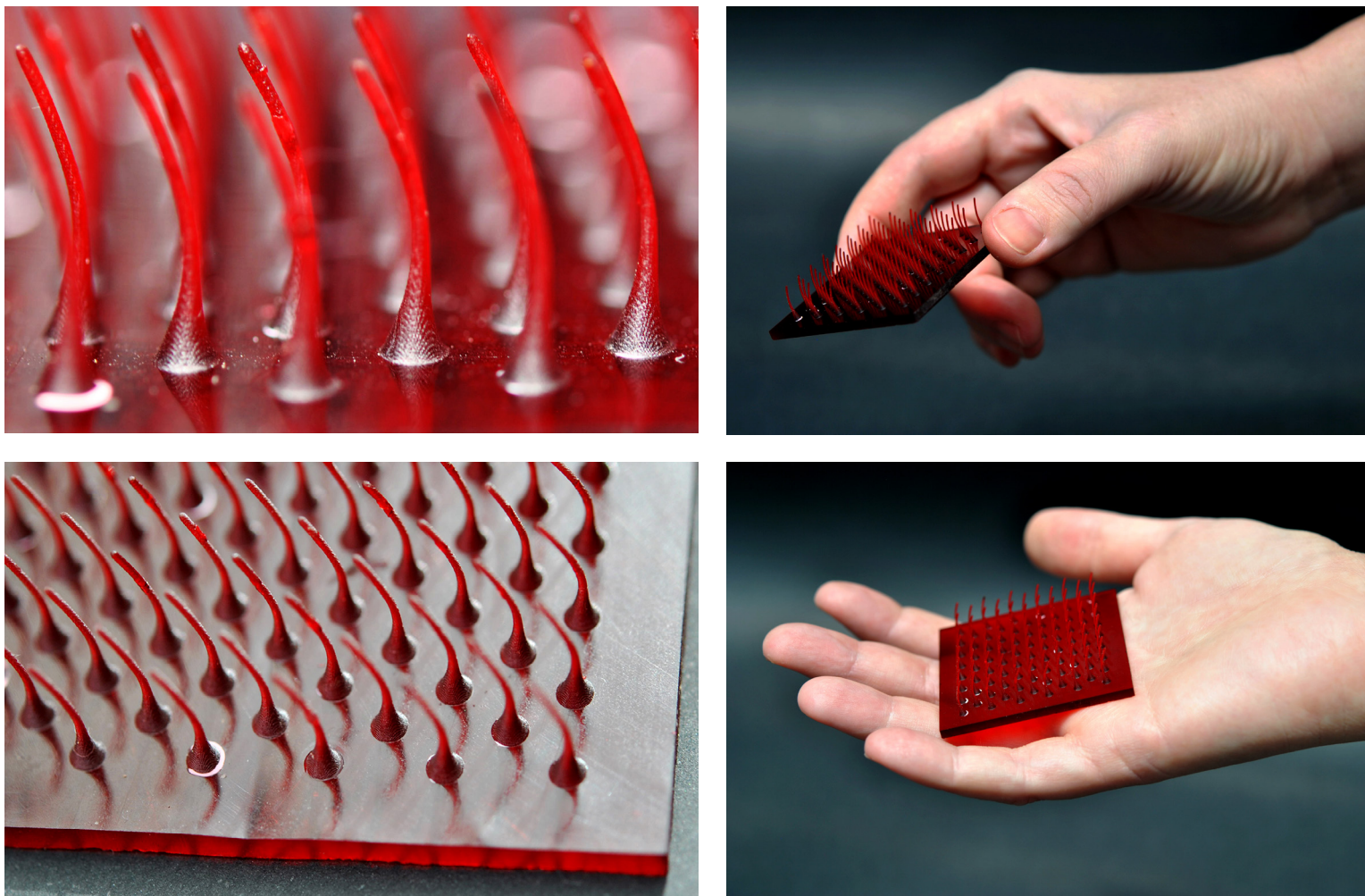


Figura 179. Muestra de textura referenciada en la especie *Nephelium lappaceum* de 50X50 mm, construida a través de la tecnología DLP (Digital Light Processing) en la impresora Asiga PRO 50, con resina epóxica termocurable Fusion red. Fotografía de David A. Torreblanca-Díaz.

Al considerar que las impresiones de las muestras de 100x100 mm con la tecnología FDM no funcionaron, se planea imprimir las texturas de ese tamaño a través de la tecnología DLP y teniendo en cuenta que la impresión con esta última tecnología fue exitosa. Las máquinas con la tecnología DLP disponibles para los investigadores no tienen un espacio de impresión de 100x100 mm, así que fue necesario imprimirla por partes y unirla con un pegamento.

En las **Figuras 180 y 181** se puede ver la muestra construida con la resina epóxica termocurable White base Zortrax, en la impresora Zortrax Inkspire, dividida en cuatro partes y pegadas en una base. Los resultados fueron positivos, las piezas obtenidas tienen alta definición con una superficie muy lisa, sin embargo, algunas de las bases se alabearon, entonces al unir las cuatro piezas la superficie de la textura no se ve totalmente continua.

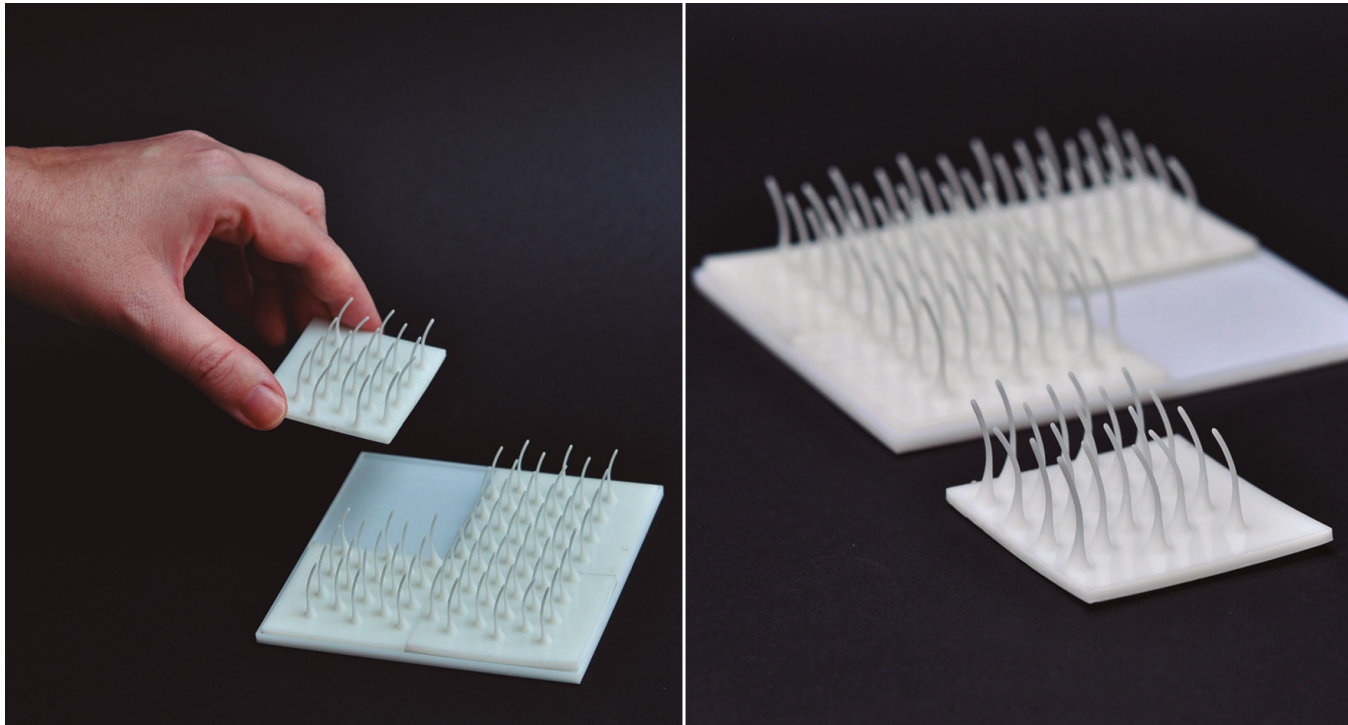


Figura 180. Muestra de textura referenciada en la especie *Nephelium lappaceum* de 100X100 mm, construida a través de la tecnología DLP (Digital Light Processing) con la impresora Zortrax Inkspire y con resina epóxica termocurable White base Zortrax. Fotografía de David A. Torreblanca-Díaz.

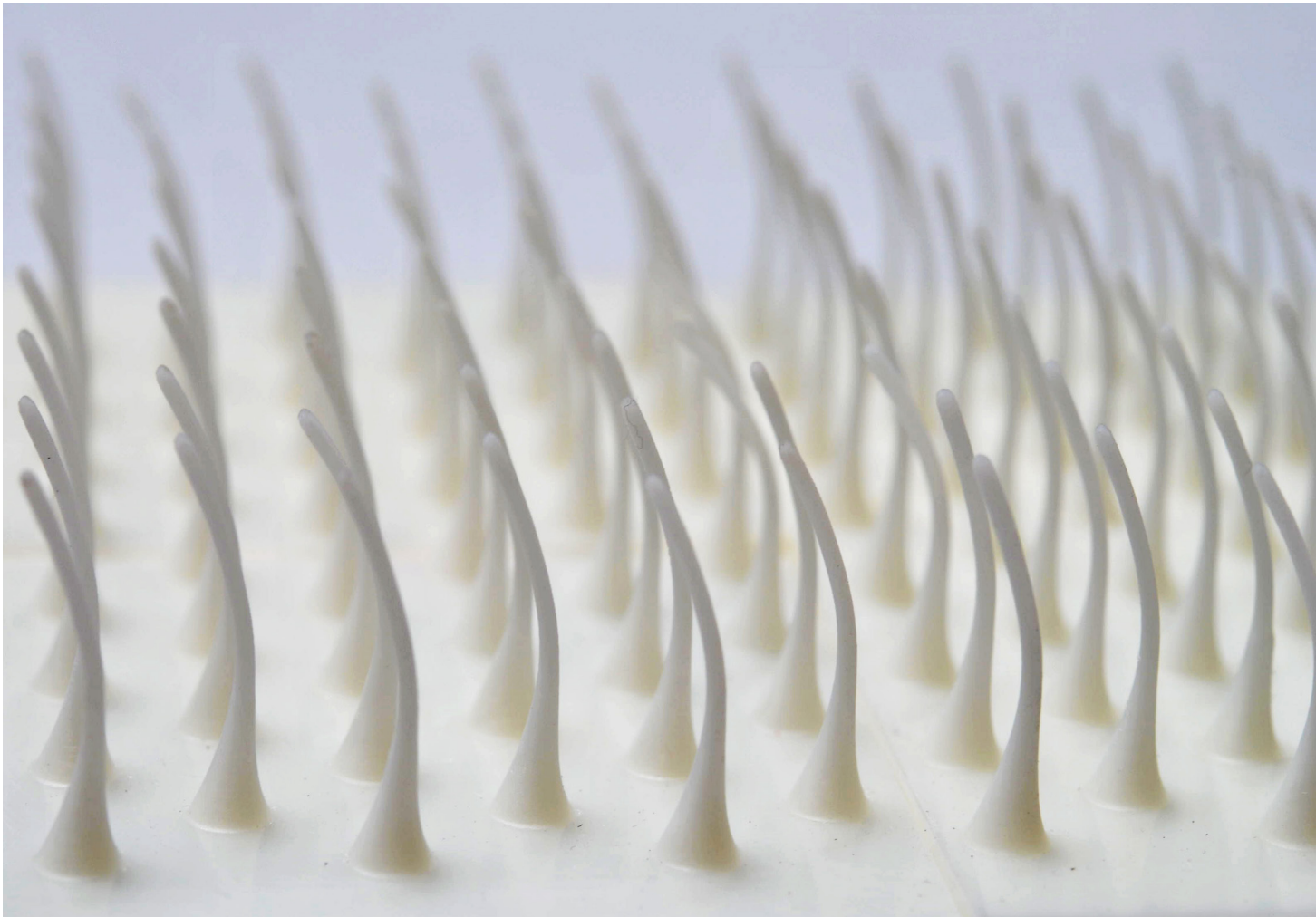


Figura181. Detalle de la textura referenciada en la especie *Nephelium lappaceum* de 100X100 mm, construida a través de la tecnología DLP (Digital Light Processing) con la impresora Zortrax Inkspire y con resina epóxica termocurable White base Zortrax. Fotografía de David A. Torreblanca-Díaz.

Finalmente, se hace una impresión con la resina Freeprint grey de Detax en la impresora Asiga PRO 50 en un formato de 90x90 mm, dividida en dos partes de 45 mm x 90 mm. Los resultados son excelentes, se logran texturas de alta definición y una superficie muy lisa. Las bases de las piezas se hicieron más delgadas, de 1mm de espesor y con una estructura reticular de tipo ortogonal, con esto se alabearon mucho menos. (Ver **Figuras 182** y **183** siguiente página).

Se puede concluir que la tecnología de fabricación aditiva DLP fue la mejor para la materialización de la especie *Nephelium lappaceum*, pues se obtuvieron resultados de alta definición geométrica, superficie lisa y dimensiones mínimas (espesores de hasta 0,5 mm), siendo una tecnología muy efectiva para este caso. Esta experiencia demuestra que es importante considerar la relación entre la morfología de las texturas y las variables implicadas en el proceso para obtener muestras que cumplan los requerimientos. En este caso, fue crítico el espesor de los filamentos de la textura, el proceso de extracción de soportes y cercanía de los elementos (en el proceso de FDM), fue crucial la selección adecuada de la tecnología de fabricación aditiva y materiales (tecnología DLP y resina epóxica termocurable), en un proceso iterativo de experimentación para lograr el objetivo propuesto. El método usado, los resultados y toda la experiencia vivida con esta muestra de textura pueden ser de gran utilidad para desarrollar proyectos similares en el futuro.

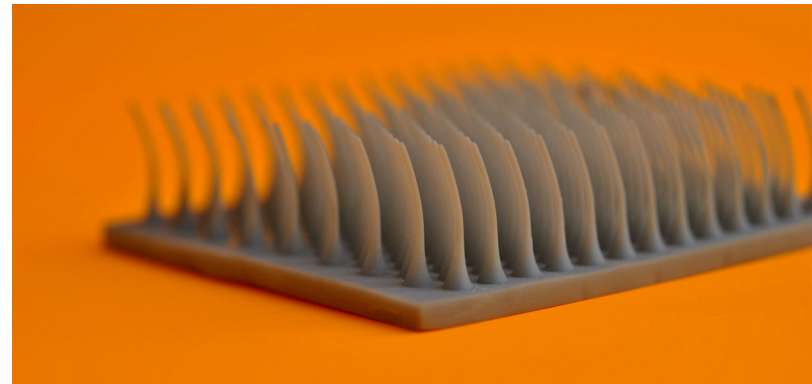
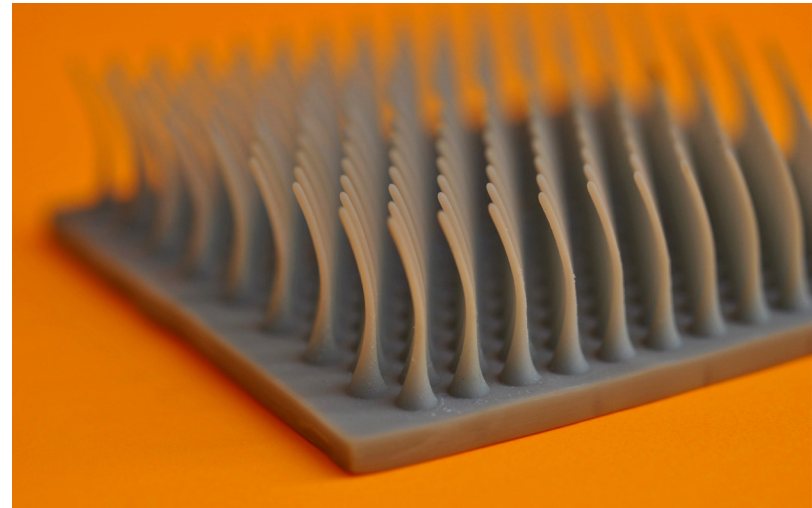


Figura 182. Muestra de textura referenciada en la especie *Nephelium lappaceum* de 90X90 mm, construida a través de la de la tecnología DLP (Digital Light Processing) en la impresora Asiga PRO 50, usando la resina epóxica termocurable Freeprint grey de Detax. Fotografía de David A. Torreblanca-Díaz.

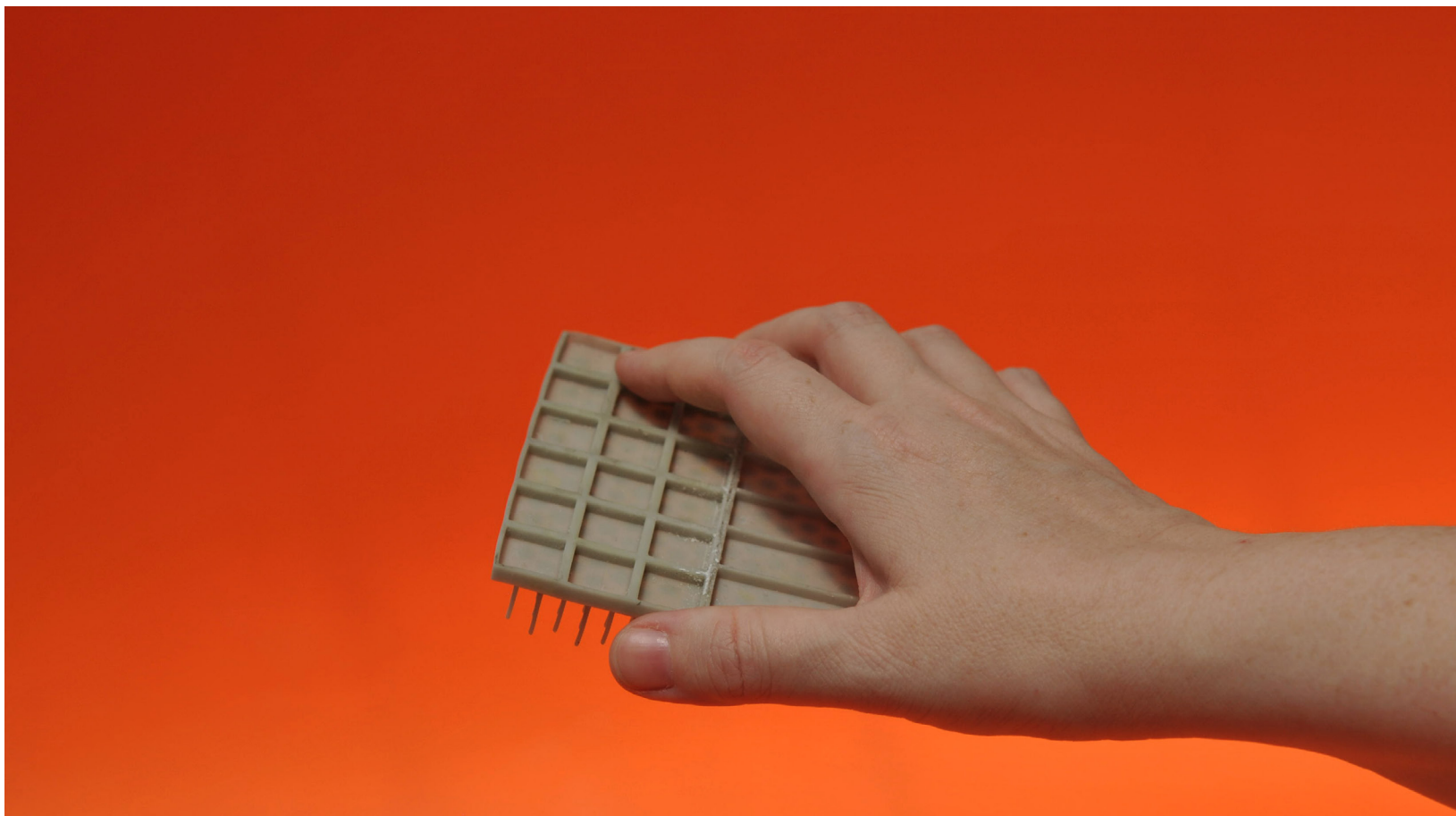


Figura 183. Estructura reticular de la muestra de textura referenciada en la especie *Nephelium lappaceum* de 90X90 mm, construida a través de la de la tecnología DLP (Digital Light Processing) en la impresora Asiga PRO 50, usando la resina epóxica termocurable Freeprint grey de Detax. Fotografía de David A. Torreblanca-Díaz.

6. Repertorio digital y casos de aplicación



La Real Academia Española define repertorio como: “Del lat. *repertorium*. Registro metódico de informaciones sobre una o diversas materias” (RAE, 2021). Para este proyecto de investigación el repertorio se define como: conjunto de superficies y texturas inspiradas en la naturaleza disponibles en formato digital, con la posibilidad de ser materializadas a través de software CAD y tecnologías de fabricación digital; el repertorio se propone para ser utilizado por diseñadores, arquitectos, ingenieros y profesionales afines de las Industrias Culturales y Creativas (ICC). El objetivo del repertorio es entregar una herramienta para mejorar aspectos de interacción-usabilidad, funcionalidad y estéticos, a través de la integración de texturas bioinspiradas en procesos de diseño de objetos, sistemas, vestuario, espacios, por mencionar algunos; se propone alojar el banco de texturas en un sitio web de uso gratuito, o también denominado *open source* para facilitar su accesibilidad. Se plantea un repertorio digital de crecimiento colectivo y colaborativo, en el que los usuarios pueden extraer texturas para los requerimientos de sus proyectos, además los diferentes profesionales pueden crear sus texturas e integrarlas a este catálogo abierto mediante la metodología planteada en este libro. La característica de crecimiento colectivo y colaborativo es relevante porque originará una amplia variedad morfológica de texturas de todo el mundo.

En esta primera etapa de investigación se diseña el repertorio digital como resultado del proceso desarrollado por los investigadores y el semillero de la línea de investigación -MORFOlab- con texturas referenciadas en especies del Valle de Aburrá, pero aún no se ha hecho el sitio web *open source*, tampoco se han ingresado al repertorio texturas bioinspiradas desarrolladas por actores externos a la Universidad Pontificia Bolivariana, pero se espera a futuro implementar este sitio web³.

Como se puede ver en la **Figura 184** (siguiente página), en el repertorio se organizaron los archivos en dos carpetas, la primera con las texturas digitales estándar, y en la otra carpeta las transformaciones morfológicas, luego hay subcarpetas, según el tipo de materialización con tecnologías de fabricación digital. Entonces, hay una carpeta de archivos en dos dimensiones (2D) para corte, grabado y marcado con láser y otra en tres dimensiones (3D) para la fabricación con fresado por CNC e impresión 3D. Por último, las transformaciones se dividen en básicas y complejas, tal como se explicó en el capítulo 3, experimentación morfológica digital.

3 Se pueden solicitar las texturas del repertorio digital al correo electrónico: david.torreblanca@upb.edu.co

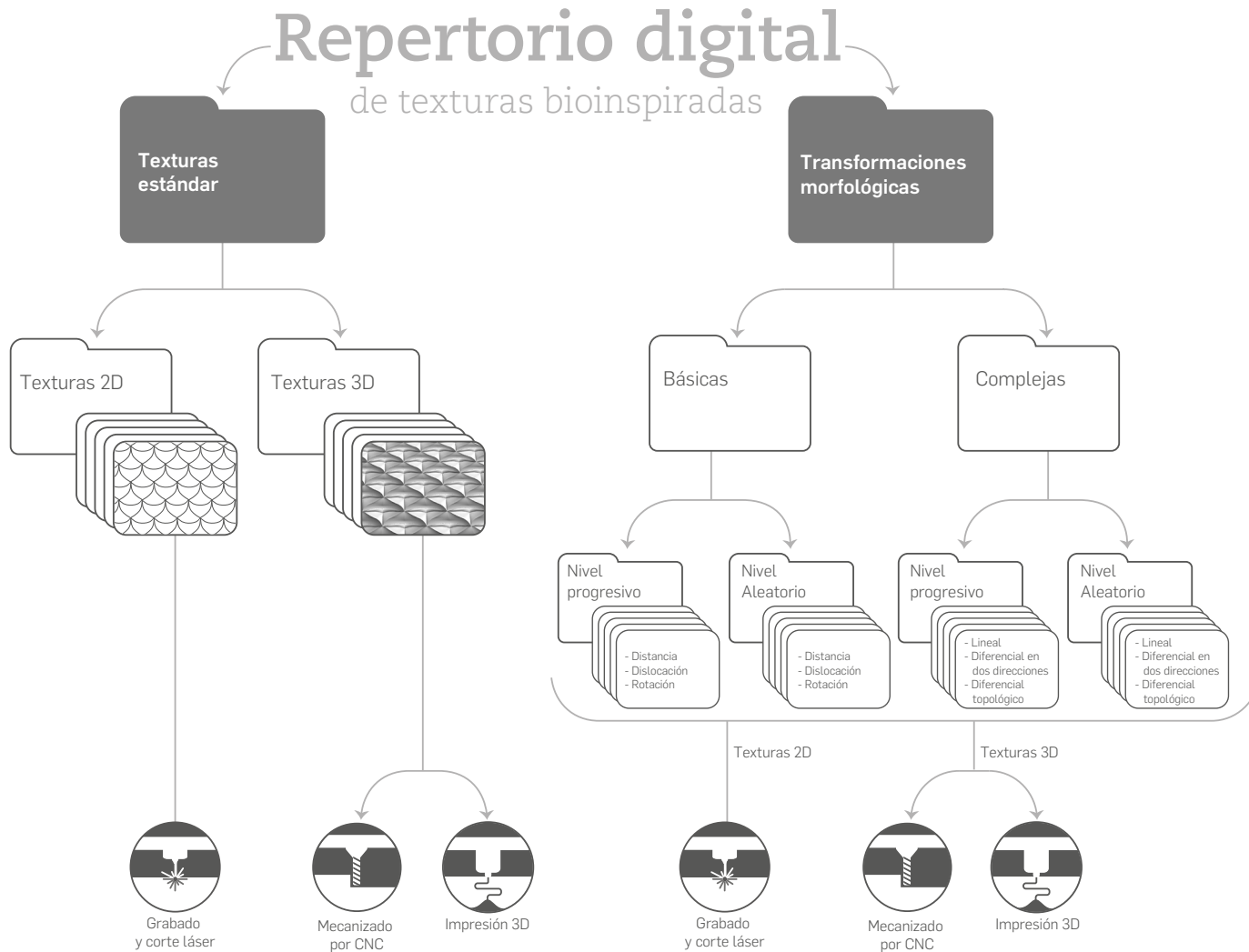


Figura 184. Esquema del repertorio de texturas digitales bioinspiradas. Esquema de los autores. Dibujo de Sara Restrepo Osorio y Ever Patiño Maza.

6.1. Metodología para la aplicación de texturas bioinspiradas

El desarrollo del repertorio de texturas bioinspiradas se planteó desde su inicio con un sentido práctico: ser utilizado por diseñadores, arquitectos y profesionales de las Industrias Culturales y Creativas -ICC-, pero la idea de repertorio de texturas bioinspiradas es inédita, nace entonces la necesidad de proponer una metodología para guiar a los profesionales creativos en el uso adecuado, coherente y pertinente del repertorio. La metodología pretende ser una herramienta orientadora para la selección y aplicación de las texturas bioinspiradas para diferentes escalas y tipologías de proyectos en función de los requerimientos estéticos, funcionales, de usabilidad, interacción y sensorialidad.

La propuesta metodológica es el resultado de un proceso empírico, colectivo y dinámico, en continua construcción: se origina desde los investigadores de la Línea de Investigación en Morfología Experimental -LIME-, luego se configuró en forma progresiva a través de las diversas experiencias académicas, con la participación de diferentes actores, como estudiantes del semillero MORFOlab, docentes-investigadores y asesores externos. La metodología planteada se ha utilizado en una primera etapa en el ámbito académico en el programa de Diseño Industrial de la Universidad Pontificia Bolivariana. Como se ve en la **Figura 185** (siguiente página) la metodología propone 6 pasos secuenciales para la aplicación de las texturas bioinspiradas: (i) identificación de problemas y oportunidades, (ii) selección de texturas, (iii) experimentación morfológica digital, (iv) fabricación digital, (v) evaluación, (vi) retroalimentación y mejora (Torreblanca Díaz, D. A., 2018).

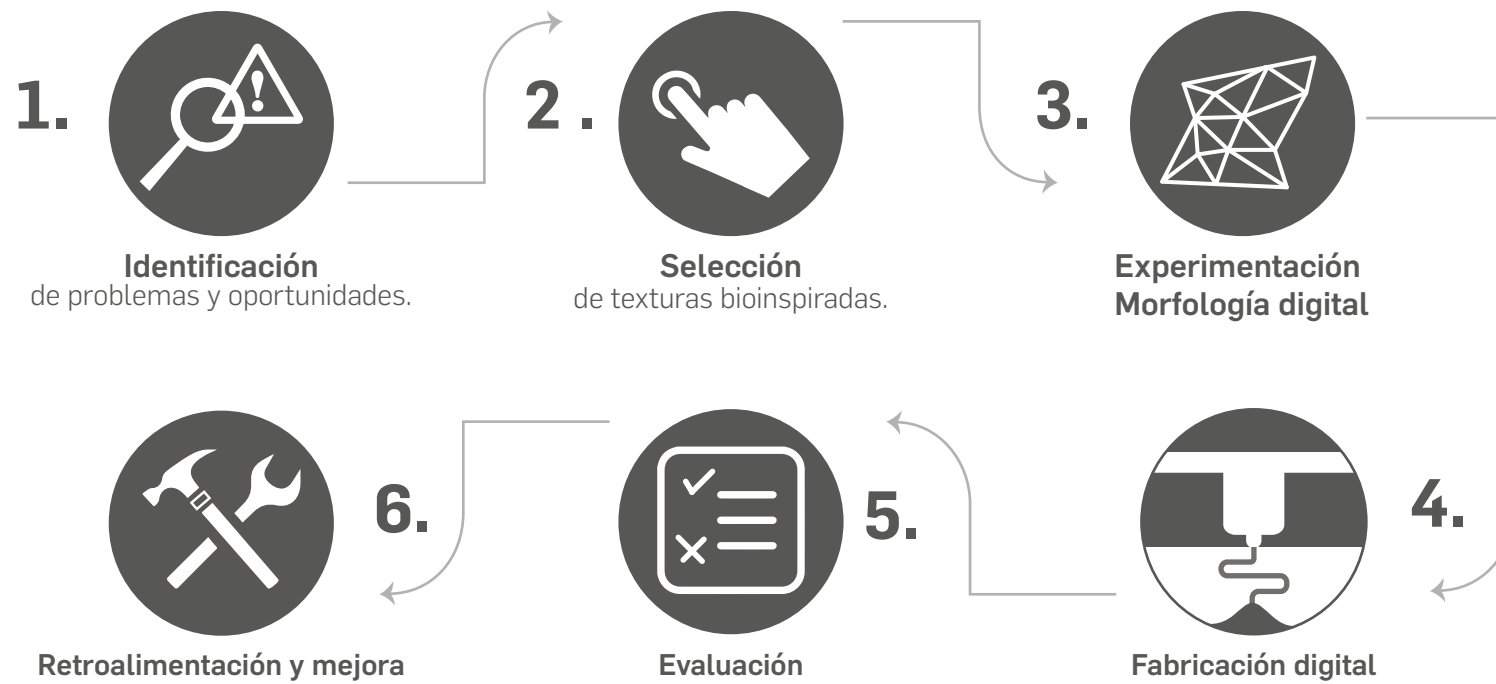


Figura 185. Esquema que sintetiza la secuencia de pasos de la propuesta metodológica para la aplicación de texturas bioinspiradas. Esquema de los autores. Dibujo de Sara Restrepo Osorio.

A continuación, se explican las etapas y procedimientos recomendados por los investigadores para el uso de la metodología (Torreblanca Díaz, D. A., 2018).

La primera etapa está orientada a identificar problemas y oportunidades del proyecto con factibilidad de ser resueltos a través de la integración de texturas. Es importante resaltar que el uso de texturas bioinspiradas facilita satisfacer algunas necesidades específicas del proyecto, pero no siempre da solución a todos los requerimientos, más bien debe ser parte de una estrategia integral de diseño. Como resultado de un análisis bibliográfico y entrevistas con expertos, los investigadores identifican diferentes áreas en el diseño de productos en los que es relevante la incorporación de superficies y texturas. En este proceso de exploración teórica emerge con fuerza el concepto de *affordances*, definidas como el conjunto de cualidades perceptivas, simbólicas y físicas de los objetos que informan, facilitan y estimulan la activación de una función (Gibson, 2000). Para este texto se consideran los *affordances* y otros aspectos para identificar problemas y oportunidades con alta recurrencia para ser abordados a través de la aplicación de texturas bioinspiradas, estos son hapticidad, función indicativa, identidad visual, persuasión o disuasión y propiedades mecánicas. Estos pueden ser usados como una referencia general, se explican a continuación:

Hapticidad: La palabra hapticidad proviene de la raíz griega *háp-tō*, relacionada con el tacto; hapticidad se puede definir como el proceso para percibir las características de los objetos median-

te el tacto activo, es parte de la percepción háptica que es una combinación de la percepción táctil estática y la kinestésica-táctil activa. Igualmente, es un sistema de percepción, integración y asimilación de sensaciones, a través del tacto intencionado y exploratorio, no sólo receptivo (Saddik, Orozco, & Cha, 2011). El tacto es una somato-sensación, es decir, está relacionado con las sensaciones del cuerpo, se puede clasificar en tres tipos de tacto: tacto activo, pasivo y tacto intra-activo, este último es una combinación de las anteriores; se destaca el tacto activo porque es más efectivo que los otros, tiene una alta incidencia, por ejemplo, en la decisión de compra (Karana, Pedgley, & Rognoli, 2013). La aplicación de texturas puede configurar atributos que mejoren y enriquezcan una experiencia táctil-activa para la realización de diferentes acciones tales como: asir, apretar o contener, solo por mencionar algunos. En suma, el tacto activo facilita la interacción sensorial y mejora la usabilidad, esto puede traer como consecuencia una experiencia significativa, una mejor recordación y la percepción positiva del producto.

Función indicativa: Bürdek (1994) asevera que la función indicativa es parte de los atributos estético-formales de la categoría del orden y complejidad para el diseño de productos que facilita la lectura de diferentes funciones y la interacción entre el usuario y el producto. Por ejemplo, se pueden destacar funciones a través de la delimitación de zonas, diferencias de altura, contraste de formas, colores y texturas. La integración de superficies y texturas en proyectos de diseño puede mejorar la relación hombre-objeto a través de la jerarquización y delimitación de zonas del pro-

ducto, sugerir o indicar formas de uso, facilitar la activación de funciones u otro tipo de interacción, teniendo como consecuencia una mejor comprensión y experiencia de uso.

Identidad visual: Se refiere a aquellas características y cualidades perceptuales que otorgan al objeto, sistema o espacio un carácter estético particular que lo identifica y diferencia del resto; la textura es una de estas manifestaciones tangibles de la identidad porque conforma la piel exterior de los objetos o espacios, por tanto, es el primer acercamiento sensorial con el usuario y en conjunto con otras características es posible asociarla con significados simbólicos más abstractos. Al ampliar el repertorio de texturas disponible, se facilita la construcción de identidad en propuestas de diseño de un modo más fácil y asequible.

Persuasión o disuasión: La percepción sensorial es un desencadenante clave en la aceptación o rechazo de un producto (Prada-Molina, 2013). Las diferentes superficies y texturas pueden contribuir a generar persuasión-interés, atracción o disuasión-rechazo, según la configuración del producto propuesto; este último

para casos en los que no sea deseable que la persona interactúe o manipule esa superficie por diferentes motivos, por ejemplo, por seguridad y prevención de riesgos.

Propiedades mecánicas: Se refiere a las propiedades físicas relacionadas con el comportamiento que tienen las estructuras y sus materiales frente a la aplicación de diferentes fuerzas y cómo estas responden o resisten sin colapsar. Las texturas, según su morfología y en combinación con las características geométricas de la estructura y del material utilizado, pueden contribuir a configurar el comportamiento mecánico del elemento diseñado y, de esta manera, se podría generar un cuerpo más rígido o flexible a través de la aplicación de texturas con sus diversas configuraciones, con esto se mejora el desempeño funcional del elemento diseñado en sus escenarios de uso, por ejemplo, para resistir impactos y otorgar protección. En la **Figura 186** (siguiente página) se pueden observar superficies y texturas de objetos que ejemplifican algunas de las funciones mencionadas, relacionadas con la interacción activa, funciones indicativas, identidad visual, entre otras.



Figura 186. Imágenes que ejemplifican diversas funciones de las superficies y texturas en diseño de productos. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.

Luego de identificar aquellos requerimientos del proyecto de diseño con viabilidad para ser abordados a través de las texturas bioinspiradas, se seleccionan las texturas del repertorio digital. En esta etapa se deben considerar las características morfológicas de las texturas y las posibilidades para dar solución a las problemáticas identificadas, en ámbitos de funcionalidad, usabilidad, interacción y sensorialidad, y estéticos. Primero, es necesario definir si la textura es bidimensional (2D) o tridimensional (3D), posteriormente, elegir la familia morfológica que mejor se ajuste al requerimiento y estas tipologías se mostraron en el capítulo 3. Caracterización de patrones morfológicos. Se selecciona una o más texturas que cumplan con los requerimientos, según las características morfológicas de las texturas elegidas y se aconseja sean materializadas con una o varias tecnologías de fabricación digital con mayor factibilidad técnica, esta afinidad entre texturas y TFD se analiza en el capítulo 5. Materialización de muestras. Tal como se puede ver en la **Figura 187** (siguiente página), son de gran utilidad las muestras físicas de texturas para la etapa de selección porque el profesional o estudiante puede interactuar sensorialmente con piezas ya construidas, analizar las diferentes alternativas y visualizar cómo podría ser el resultado esperado.

Una vez elegidas las texturas, se sugiere hacer transformaciones sobre las texturas seleccionadas, como se vio en el capítulo 4. Experimentación morfológica digital, esto en el caso de ser necesario. Las ventajas de hacer transformaciones morfológicas digitales tienen relación con la posibilidad de personalizar la geometría, ampliar las opciones formales y adaptarlas en función de las problemáticas y requerimientos del proyecto; esto evidencia el carácter asociativo y adaptativo de las texturas, una consecuencia y ventaja de haberlas hecho por medio de algoritmos con una herramienta paramétrica-asociativa. Las transformaciones digitales parametrizadas se pueden hacer con la herramienta paramétrica Grasshopper® en el entorno del software CAD Rhinoceros® y según el modelo propuesto de generación y transformación morfológica basado en principios de la naturaleza, expuesto en el Capítulo 4. Transformaciones.

Posteriormente las texturas seleccionadas y transformadas -esto último, en el caso de haberse hecho- se deben integrar a la piel del producto o espacio en un entorno digital, para luego ser materializadas a través de TFD, por ejemplo, corte y grabado láser, mecanizado por CNC, impresión 3D; también se puede usar en forma complementaria técnicas analógicas, como fabricación de piezas de un material cerámico, concreto, termoformados de láminas poliméricas, o coladas de resinas, en estos casos es necesario hacer los modelos (máster), moldes y usar todos los implementos necesarios.

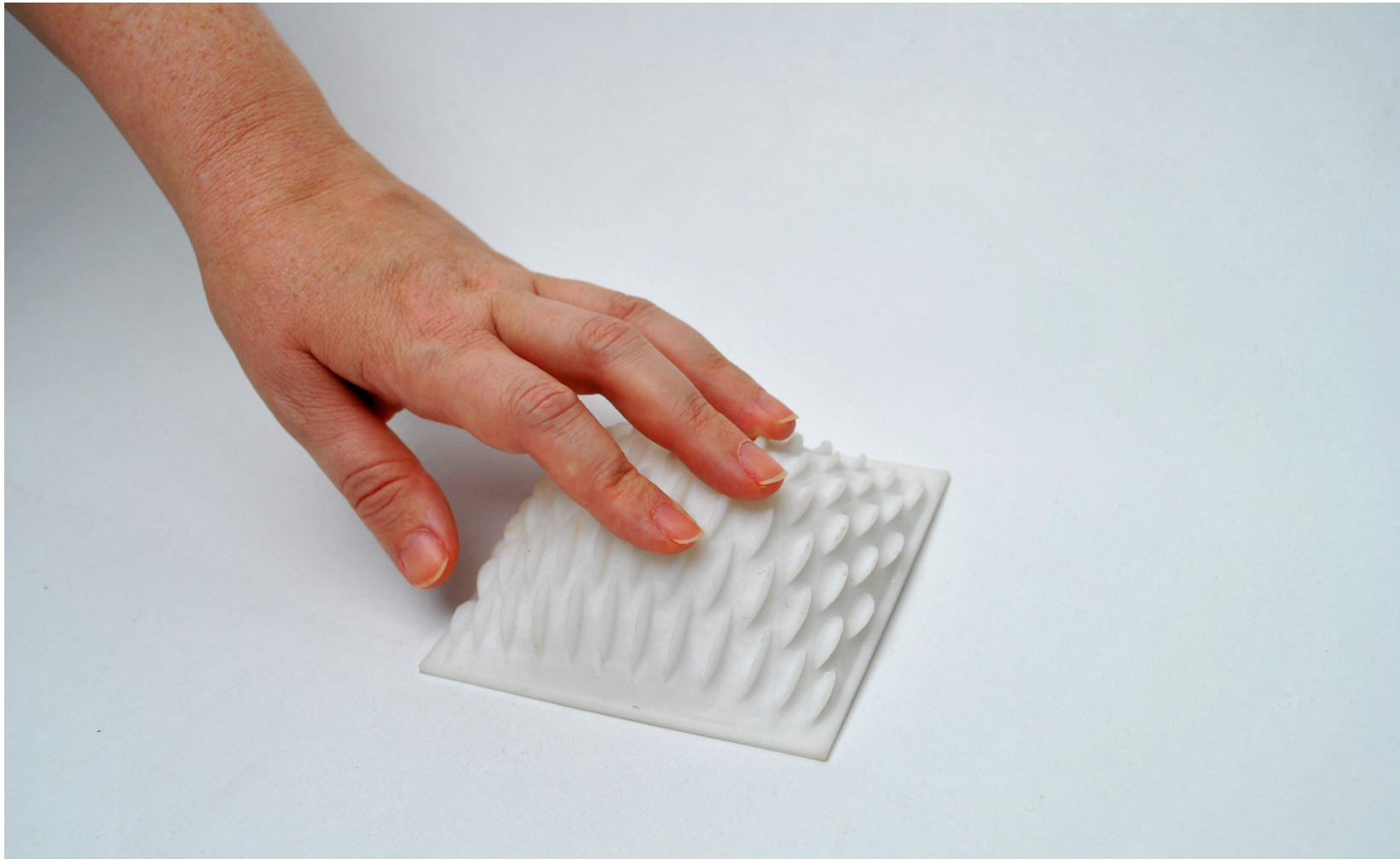


Figura 187. *Interacción táctil activa con muestras de texturas bioinspiradas.*
Fotografía de David A. Torreblanca-Díaz.

Las últimas etapas son de alta relevancia porque están orientadas a la validación de los prototipos con el usuario o los usuarios, para obtener una retroalimentación respecto a la experiencia de uso, funcionalidades y otros aspectos, con esto hacer un análisis de los resultados, evaluación y propuestas de mejora. Puede ocurrir que, en primera instancia, la aplicación de las texturas no produzca los resultados esperados y, por consiguiente, no resuelva el problema estudiado, es necesario entonces hacer ajustes morfológicos, replantear la selección de materiales y procesos o, incluso, seleccionar otra textura; este proceso es cíclico e iterativo, la prueba y error son parte de la experiencia y el aprendizaje.

6.2. Casos de aplicación: proyectos de grado de Diseño Industrial

El repertorio digital de texturas bioinspiradas y la metodología propuesta por los investigadores fue aplicado por primera vez en proyectos de grado de la Facultad de Diseño Industrial, en el contexto y dinámicas del semillero de investigación MORFOlab (Torreblanca Díaz, D. A., 2018). Se les solicitó a los estudiantes buscar problemáticas del contexto, en las que la integración de texturas fuese un factor relevante para el diseño del producto o sistema. En este sentido, y como se mencionó anteriormente, la aplicación de las texturas no resuelve la totalidad de las problemáticas, son más bien parte de una estrategia integral de diseño que articula diferentes acciones y herramientas para dar respuesta al problema de diseño. Acerca de la metodología proyectual

utilizada en los proyectos de grado, los fundamentos estuvieron dados por el modelo propuesto por Bonsiepe (1999), compuesto por tres ámbitos que se conectan, un usuario o agente social, una tarea o actividad realizada por el usuario y un utensilio o artefacto necesario para ejecutar la acción; por último, existe un ámbito central que se denomina interfaz, cuya función es integrar los tres anteriores, articular la interacción entre el cuerpo humano, la herramienta y la actividad, este es un dominio del diseño en el que el diseñador propone espacios de acción de los usuarios en ámbitos materiales e inmateriales.

A continuación, se presentan dos proyectos de grado, estos se han elegido para este libro porque han identificado una problemática relevante del contexto, plantean propuestas de diseño acertadas y coherentes con el modelo de Bonsiepe (1999), hacen una pertinente selección de texturas y podrían ser viables a futuro para ser implementados en los contextos observados (Torreblanca Díaz, D. A., 2018).

Caso de aplicación 1: Envase para adultos mayores

Se trabajó en torno a los diferentes problemas que se presentan en la utilización de envases de alimentos por personas de la tercera edad, con énfasis en el análisis de aspectos ergonómicos. Este proyecto se hace en colaboración entre la Línea de Investigación en Morfología Experimental -LIME- y la Línea de Investigación en Ergonomía, ambas forman parte del Grupo de Inves-

tigación de Estudios en Diseño -GED-, de la Facultad de Diseño Industrial, Escuela de Arquitectura y Diseño de la Universidad Pontificia Bolivariana. Los fundamentos teóricos y metodológicos se basan en el proyecto de investigación Guía para el diseño de envases alimenticios para usuarios de la tercera edad, liderado por Gustavo Adolfo Sevilla Cadavid, diseñador industrial, investigador y experto en ergonomía.

El uso de envases alimenticios usados por personas de la tercera edad presenta diferentes problemas funcionales como resultado del proceso de envejecimiento, que no han sido tratados en profundidad desde el diseño de productos. La disminución de fuerza en los miembros superiores dificulta la apertura de los envases, la pérdida de motricidad fina impide un agarre óptimo, las limitaciones visuales y pérdida de la memoria obstaculizan la lectura de las indicaciones y recordación de marca. Por otra parte, los adultos mayores constituyen un mercado potencial importante, porque la población está envejeciendo con rapidez y las empresas de empaques no han investigado en la comprensión de las necesidades de estos usuarios, por tanto, se hace necesario plantear nuevas estrategias para satisfacerlas (Sevilla Cadavid & Herrán Cuartas, 2015).

Los estudiantes de Diseño Industrial⁴ proponen rediseñar una línea de envases de suplementos dietarios para personas de

la tercera edad, con el objeto de resolver diversos problemas funcionales, relacionados con la interacción física y cognitiva con los empaques, a través de la integración de texturas bioinspiradas, con el propósito de aportar a mejorar la calidad de vida de este grupo de personas. Como se puede ver en la **Figura 188** los principales requerimientos identificados para este proyecto están relacionados principalmente con aspectos ergonómicos: mejorar el agarre, reducir el esfuerzo para abrir la tapa y la fácil visualización de la información.

Categoría	Dimensión	Requerimiento
Ergonomía	Funcional-operativa	Se debe ejercer la mínima fuerza para abrir las tapas y sistemas. Debe producir fricción en el agarre. Debe ser cómodo para manipular. Debe ser fácil de transportar.
Materiales y fabricación	Tecno-productiva	El material debe ser ligero, resistente y transparente. Debe posibilitar la fabricación de formas complejas.
Comunicación	Estético-comunicativa	Debe comunicar seguridad y facilidad en el uso. Se deben diferenciar claramente las partes del producto. Se deben evidenciar visualmente las funciones.

Figura 188. Resumen de la tabla de requerimientos generales del proyecto de la línea de envases de suplementos dietarios. Tabla realizada por las estudiantes Mariana Betancur Sánchez y Valentina Cardona Echeverri.

4 Las estudiantes Mariana Betancur Sánchez y Valentina Cardona Echeverri presentaron este proyecto como Trabajo de grado para optar al título de Diseñador Industrial en el año 2018.

La propuesta de diseño está orientada a resolver los requerimientos a través de modificación de la morfología global, aplicación de diferentes texturas locales (zonas específicas) y rediseño de la etiqueta. Se espera mejorar el agarre, utilizando menos fuerza y mayor adherencia para evitar que se resbale el objeto, una clara diferenciación de las partes (función indicativa), fácil lectura de la información en la etiqueta y potenciar el reconocimiento visual de la marca. En las **Figuras 189 y 190** (siguiente página) se puede

ver la propuesta conceptual hecha por las estudiantes Mariana Betancur Sánchez y Valentina Cardona Echeverri.

Respecto a la selección de texturas, se eligió la textura del tronco de la especie *Phoenix canariensis* para facilitar la apertura, mejorar el agarre y reducir el esfuerzo del usuario. Para mejorar la adherencia se seleccionó la textura del fruto de la especie *Fragaria ananassa*, comúnmente conocida como fresa o frutilla. (Ver **Figura 191**).

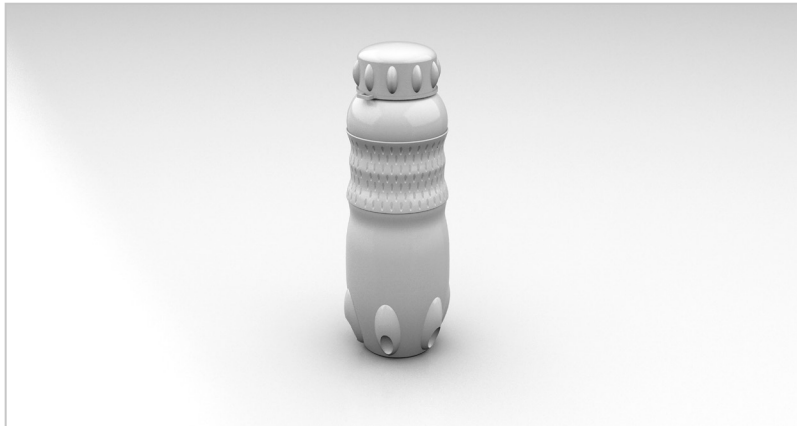


Figura 189. Propuesta conceptual de línea de envases de suplementos dietarios. Diseño y modelación digital de las estudiantes Mariana Betancur Sánchez y Valentina Cardona Echeverri, software CAD Rhinoceros.

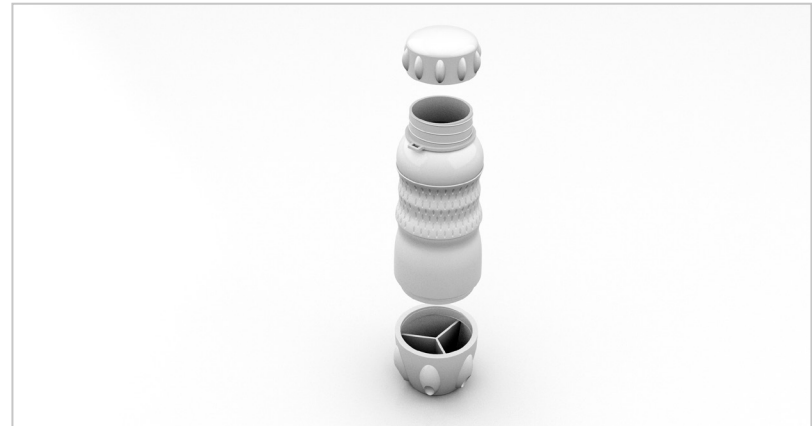




Figura 190. Propuesta de colores para la línea de envases de suplementos dietarios. Diseño y modelación digital de las estudiantes Mariana Betancur Sánchez y Valentina Cardona Echeverri, software CAD Rhinoceros.

El prototipo se materializa con la tecnología de fabricación aditiva FDM (abreviación de su nombre en inglés Fused Deposition Modeling), a través de la impresora Zortrax M-200 y con el material polimérico ZABS plus. En las **Figuras 192, 193 y 194** (páginas siguientes) se pueden ver el prototipo, detalles de las texturas y la secuencia de uso.

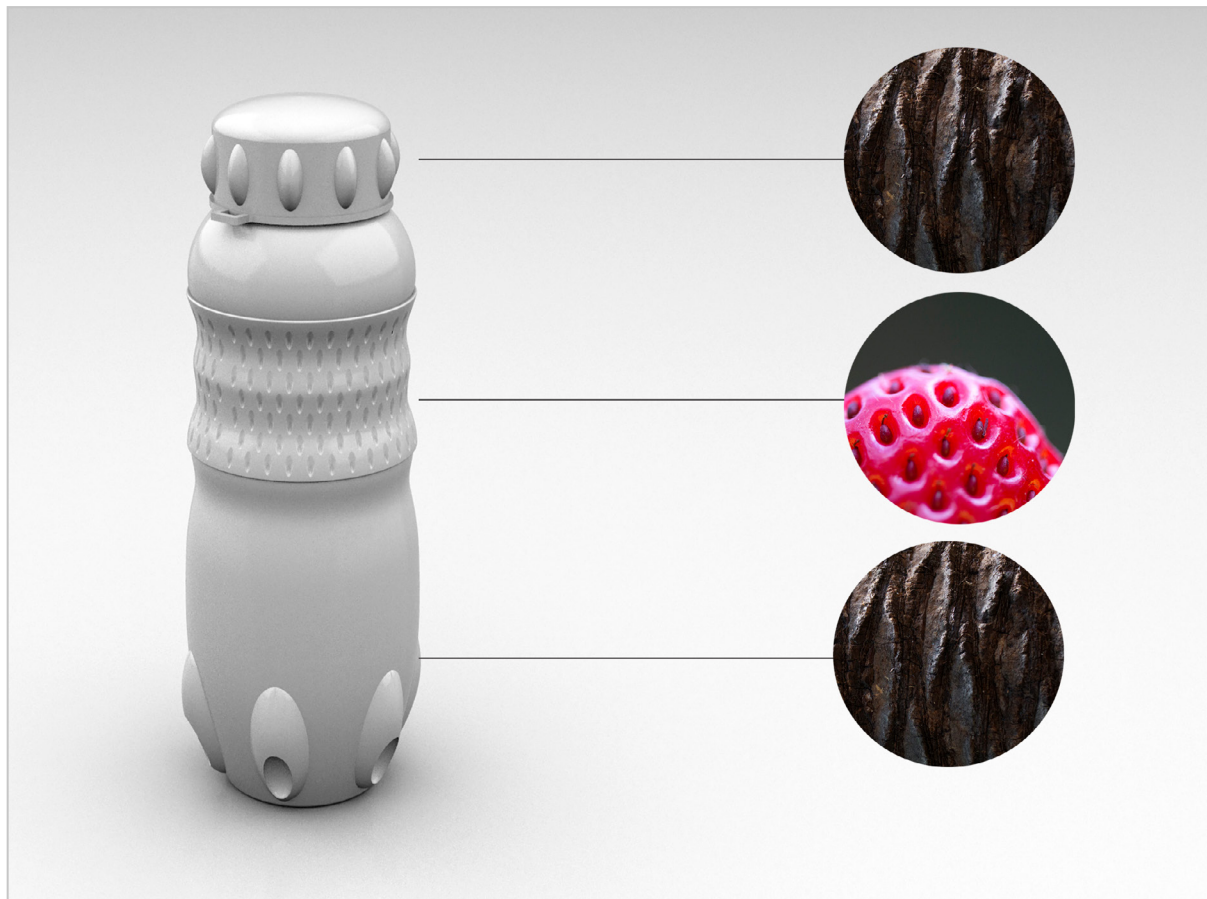


Figura 191. Selección de texturas para la propuesta de envase de suplementos dietarios, en la tapa y en la zona inferior la especie *Phoenix canariensis* y en el centro la textura del fruto de la especie *Fragaria ananassa*. Diseño y modelación digital de las estudiantes Mariana Betancur Sánchez y Valentina Cardona Echeverri, software CAD Rhinoceros. Fotografías de Silvia Gallego y Carolina Cardona.



Figura 192. Prototipo de envase para suplementos dietarios. Prototipo construido con la tecnología FDM, a través de la impresora Zortrax M-200 y con el material polimérico ZABS plus. Diseño y modelación digital de las estudiantes Mariana Betancur Sánchez y Valentina Cardona Echeverri. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.



Figura 193. Detalle de texturas del prototipo de envase para suplementos dietarios. Prototipo construido con la tecnología FDM, a través de la impresora Zortrax M-200 y con el material polimérico ZABS plus. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.



Figura 194. Secuencia de uso, envase para suplementos dietarios. Prototipo construido con la tecnología FDM, a través de la impresora Zortrax M-200 y con el material polimérico ZABS plus. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.

Caso de aplicación 2: Sistema de protección modular para motociclistas

Restrepo (2018) afirma en el diario El Colombiano que la ciudad de Medellín, junto al municipio de Bello en Colombia, están entre las 50 ciudades con mayor cantidad de muertos en accidentes de tránsito en Latinoamérica, ambas hacen parte del Ránking (sic) Latinoamericano de Ciudades Fatales; Bello ocupa la casilla número 9 con una tasa de 14,2 muertos por cada 100 mil habitantes y Medellín el puesto 29 con 10,9 muertos por cada 100 mil habitantes. De las 258 personas que murieron en accidentes de tránsito en Medellín durante el 2017 el 47,3 % de las víctimas estaba conformado por motociclistas.

Con estos antecedentes un estudiante de Diseño Industrial⁵ decide analizar la problemática de los accidentes en motocicleta en la ciudad de Medellín. Se identifican diferentes factores para las altas tasas de accidentabilidad, tales como un clima templado, húmedo lluvioso e impredecible, incremento progresivo en la movilidad en dos ruedas, exceso de velocidad, constantes imprudencias por parte de vehículos y peatones, desconocimiento del Código Nacional de Tránsito por parte de los conductores, poca regularidad en el mantenimiento de las calles, entre otros aspectos.

Se propone diseñar una chaqueta protectora para reducir las lesiones provocadas por los accidentes en motocicleta, a través de la integración de texturas bioinspiradas y usando tecnologías de fabricación digital. En un inicio se hizo un análisis del estado del arte de productos de protección para motociclistas, luego se hicieron observaciones no participativas en las calles de Medellín y entrevistas a usuarios de motocicletas. Con la información obtenida se hizo un levantamiento de requerimientos, ingresados por el estudiante en la tabla de la **Figura 195** (siguiente página). Los principales requerimientos identificados por el estudiante estuvieron relacionados con la función de proteger al motociclista a través de un sistema multifuncional, resistente a caídas y golpes, flexible, que permitiera la movilidad y respetara la biomecánica del usuario para bloquear cierto tipo de movimientos que pudieran provocar lesiones. Las partes deben posibilitar el desarmado para su recambio, por último, la unidad debe comunicar seguridad y protección.

5 El estudiante Juan Diego Buriticá presentó este proyecto como trabajo de grado para optar al título de Diseñador Industrial en el año 2018.

Categoría	Dimensión	Requerimiento
Seguridad y protección	Funcional-operativa	Proteger al usuario ante golpes y caídas.
		Ser resistente a esfuerzos mecánicos.
		Ser ligero. Las partes se deben desarmar para su recambio.
Ergonomía	Funcional-operativa	Tener dimensiones personalizadas.
		Adaptarse a la morfología de cada parte del cuerpo involucrada.
		Permitir flexibilidad en los movimientos, de acuerdo con la biomecánica del cuerpo. Bloquear movimientos que generen lesiones.
Materiales y fabricación	Tecno-productiva	El material debe ser ligero y resistente.
		Fabricación personalizada. Fabricación de formas complejas.
Comunicación	Estético-comunicativa	Comunicar seguridad y protección.

Figura 195. Resumen de la tabla de requerimientos generales del proyecto *Chaqueta protectora para motociclistas*. Tabla hecha por Juan Diego Buriticá.

La siguiente etapa estuvo orientada a seleccionar la o las texturas idóneas para dar la solución a los requerimientos. Se elige la

textura de la piña de la especie *Pinus pinea*, ubicada en la categoría de las geometrías recíprocas cerradas, según la clasificación morfológica de texturas propuesta en la investigación. (Ver **Figura 196**, siguiente página).

Como se ve en las **Figuras 197 y 198** se propone un sistema modular y personalizado, la textura seleccionada permite proteger ante caídas y golpes a través la integración de los módulos, a su vez facilita la realización de movimientos y flexibilidad en el miembro superior del cuerpo para bloquear cierto tipo de movimientos que le puedan producir lesiones al motociclista; a su vez, las partes del sistema se entrelazan para lograr un exoesqueleto rígido en el momento de una caída. El planteamiento de un sistema modular permite que las partes se desarmen para su recambio, sin la necesidad de reemplazar todo el sistema; la personalización se logra al escanear digitalmente el cuerpo del usuario y de esta manera diseñar un producto que se ajuste a su anatomía corporal y mejorar la comodidad en el uso.



Figura 196. Selección de textura según requerimientos para el sistema modular de protección, diseño y modelación digital del estudiante Juan Diego Buriticá. Fotografía de Silvia Gallego y Carolina Cardona.



Figura 197. Propuesta conceptual de chaleco de protección para motociclistas. Diseño y modelación digital del estudiante Juan Diego Buriticá, software CAD Rhinoceros.



Figura 198. Propuesta conceptual en contexto de chaleco de protección para motociclistas. Diseño y modelación digital del estudiante Juan Diego Buriticá, software CAD Rhinoceros.

En las **Figuras 199 y 200** se puede ver el prototipo focalizado, construido con la tecnología de fabricación digital aditiva FDM, de su sigla en inglés Fused Deposition Modeling, el material usado es material polimérico ZABS plus, Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS). Se selecciona esta tecnología porque permite ma-

terializar formas complejas, una definición geométrica adecuada para los fines del proyecto y se pueden utilizar materiales con una resistencia mecánica similar a los utilizados en procesos industriales, en este caso el polímero ABS. La impresión se hizo en una máquina marca Zortrax modelo M200.

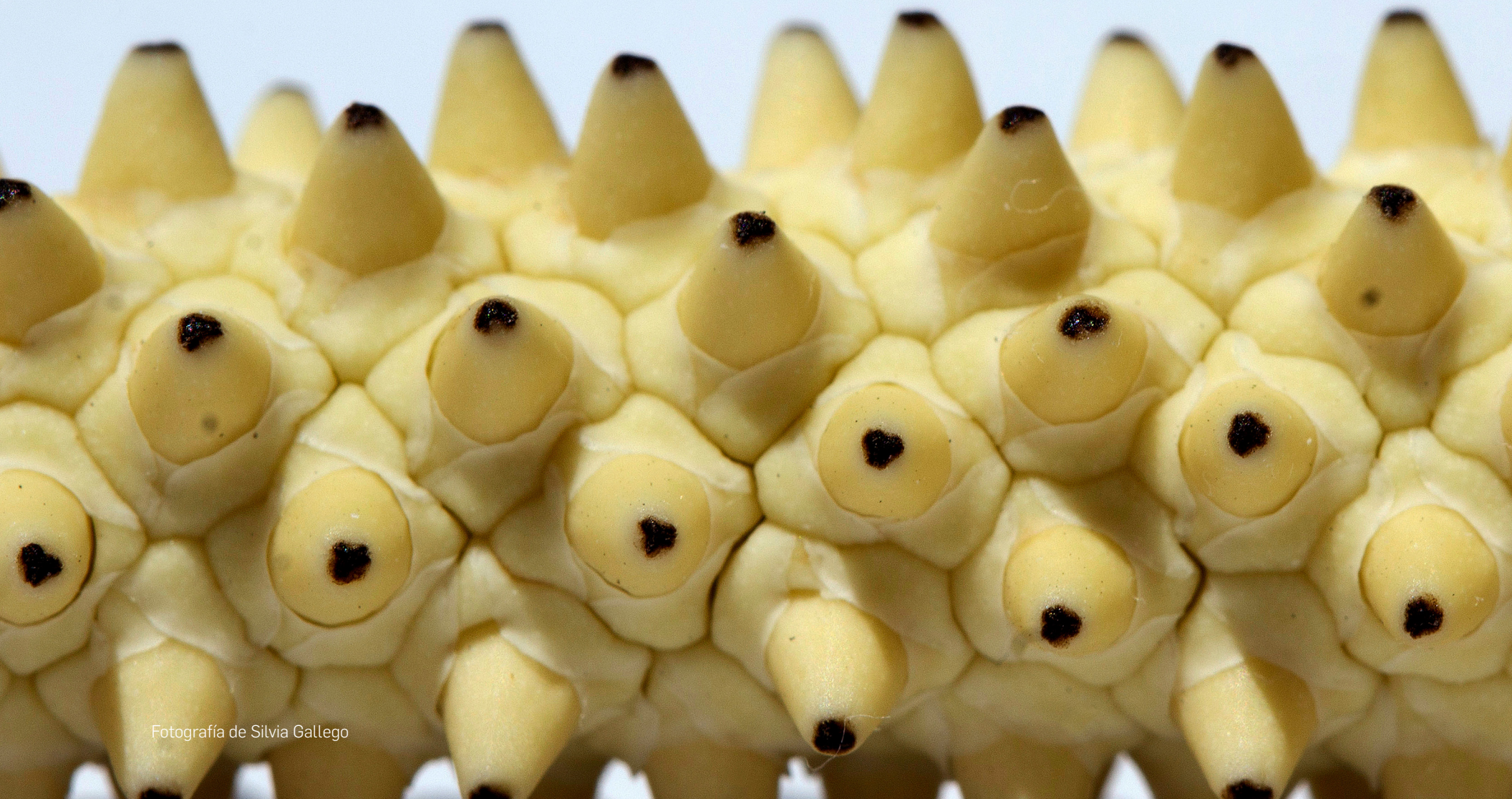


Figura 199. Prototipo focalizado, construido con la tecnología FDM, a través de la impresora Zortrax M-200 y con el material polimérico ZABS plus. Fotografías de David A. Torreblanca-Díaz.



Figura 200. Prototipo focalizado construido con la tecnología FDM. Diseño de Juan Diego Buriticá. Fotografía de David Torreblanca-Díaz.

7. Conclusiones



Para responder a la pregunta de investigación definida al inicio del texto: ¿Cómo transferir las características morfológicas de texturas biológicas a elementos artificiales a través de tecnologías digitales? Se hizo evidente que la observación del fenómeno, en este caso de las texturas naturales, es una herramienta de investigación que permite aumentar la profundidad de la caracterización en la medida en que se aumenta el acercamiento al fenómeno. Esto quiere decir que, al tocar, oler, fotografiar y medir las texturas, es posible, empíricamente, acercarse al conocimiento y así los investigadores pudieron aprender, a través de la experiencia y lograr la profundidad esperada en la caracterización. Así mismo, la clasificación de los patrones observados, a partir de las características geométricas, facilitó la transición a la abstracción y a la fabricación digital, ya que al determinar las características comunes se debían establecer simultáneamente los tipos de líneas, ángulos, superficies y en general las herramientas de variación geométrica como las simetrías, que posibilitan entender los patrones encontrados con base en la geometría euclidiana. A su vez, estas mismas características geométricas se retomaron y tradujeron en los componentes que hacían parte de los algoritmos desarrollados.

Por otra parte, fue muy útil aplicar los principios organizativos basados en la Gestalt en tanto se consideró que es insuficiente la documentación alrededor del proceso de abstracción, que le permita al diseñador establecer el nivel de abstracción, es decir, cuán abstracto o literal es el proceso y determinar cómo hacer paso a paso el proceso de síntesis morfológica. Aunque los princi-

pios organizativos como la ley de la buena continuidad, del cierre y las simetrías son básicos y su uso es común en la enseñanza del diseño, ayudaron a encontrar las características geométricas que identifican las texturas para equilibrar la literalidad y las formas abstractas.

En relación con la segunda pregunta propuesta en el proyecto: ¿De qué manera realizar transformaciones morfológicas basadas en principios de la naturaleza, a través de software CAD paramétrico-asociativos? La conceptualización del modelo paramétrico asociativo y la traducción en instrucciones matemáticas ayudó a la programación de los algoritmos en Grasshopper®. En otras palabras, definir con anterioridad la relación de modelo con los procesos biológicos y geométricos, el por qué y el cómo de las transformaciones básicas y complejas, permitió establecer los parámetros que debían contener los algoritmos, tanto en las entradas como en los procedimientos y las salidas. Igualmente, en algunas ocasiones, luego de programar los algoritmos, fue necesario hacer cambios en los parámetros y definiciones conceptuales y geométricas. La programación hizo las veces de procedimiento de validación.

Así mismo, en la materialización de las muestras se evidenció la pertinencia y efectividad para transferir las morfologías de texturas vegetales a superficies artificiales, a través de tecnologías de fabricación digital y software CAD paramétrico-asociativos y aprovechar sus múltiples ventajas, por ejemplo, un alto nivel de precisión, construcción de formas complejas, entre otros atribu-

tos. Estas ventajas no aseguran obtener los resultados planteados, se verifica entonces la importancia de hacer una experimentación constante y activa. Respecto a las muestras de texturas, se obtuvieron resultados diversos, texturas con una alta afinidad tecnológica, es decir, fue posible construirlas a través de una amplia gama de tecnologías y con resultados de alta definición; por el contrario, otras tuvieron opciones muy limitadas para su materialización y en ocasiones con resultados de baja definición, todo esto depende de diferentes factores, como son las características morfológicas de las texturas (complejidad, bidimensionalidad o tridimensionalidad, etc.), material usado y tipo de máquina utilizada.

Respecto a la pregunta: ¿Es viable integrar texturas bioinspiradas en procesos de diseño de productos para facilitar la solución de diferentes problemáticas? Los resultados en los proyectos de grado de Diseño Industrial desarrollados en el contexto del semillero de investigación MORFOlab, sugieren que la metodología planteada por los investigadores es una herramienta que efectivamente orienta en la selección y aplicación de las texturas bioinspiradas para diferentes escalas y tipologías de proyectos, en función de los requerimientos; esta metodología es complementada con el uso de la propuesta de Bonsiepe (1999) llamada esquema ontológico, que facilita la identificación de tensiones y problemáticas en aspectos estético-comunicativos, funcionales, de usabilidad, de interacción y sensorialidad. Pero, es importante aclarar que, dentro del alcance de la metodología para la aplica-

ción de texturas bioinspiradas, no se había considerado la categorización y validación de las texturas para dar respuesta a requerimientos perceptuales, semánticos, emocionales, funcionales y de usabilidad.

Por otra parte, se destaca la interacción entre diferentes actores en el proyecto en un trabajo transdisciplinario y colaborativo, estas sinergias fueron valiosas porque agilizaron las actividades, facilitaron la transferencia de información, y se pudo obtener mayor calidad en los resultados. Se tejieron dinámicas enriquecedoras y un aprendizaje continuo entre los estudiantes de Diseño Industrial del semillero de investigación MORFOlab, estudiantes de Diseño Gráfico, de Diseño de Vestuario, docentes-investigadores la Línea de Investigación en Morfología Experimental -LIME- y la Línea de Investigación en Ergonomía, todos ellos de la Universidad Pontificia Bolivariana sede Medellín, Colombia; además, de asesores técnicos externos, proveedores y un pasante de doctorado. Respecto al semillero de investigación se destaca el fortalecimiento de competencias axiológicas o actitudinales por parte de los estudiantes, quienes trabajaron durante tres semestres con un alto interés y motivación, con actividades autónomas y horarios flexibles, desarrollando el -aprender a aprender-, en un entorno de trabajo dinámico, en constante cambio y autoconstrucción, ya que en cada etapa se reconfiguraron objetivos, roles y responsabilidades de cada uno según fuese necesario.

7.1. Limitaciones

Con respecto a las limitaciones, aunque el proceso de abstracción arrojó geometrías que se pudieron utilizar en la experimentación morfológica digital, en este proceso de abstracción, por efectos de alcance del proyecto, y como se mencionó anteriormente, no se hicieron pruebas de valoración perceptual, semántica, funcional y de usabilidad. Pero esto no excluye la necesidad de realizar una validación en futuros proyectos de la abstracción resultante en relación con la percepción que tienen los usuarios: ¿Se aleja estéticamente del referente? ¿Es similar al referente? ¿Copia de manera literal al referente? ¿Cuál es el nivel de ajuste de la percepción del usuario y la problemática de diseño definida? Por ejemplo, todavía no es clara la relación de la función de una textura, en cuanto al uso que se le dará y el nivel de abstracción necesario. Así mismo, no hay certeza acerca de cómo utilizar las herramientas geométricas para aumentar o disminuir la abstracción, con el objetivo de controlar el proceso y, por tanto, el resultado.

En la experimentación morfológica digital, el desarrollo de los algoritmos permitió homologar los procesos de transformación mientras se determinaban los tipos de entrada y los tipos de procedimiento necesarios para generar la salida deseada, pero uno de los tipos de entrada presentó mayor dificultad en la programación de los algoritmos. En el momento de hacer las conexiones entre los componentes, en algunos casos la entrada del módulo resultante de la abstracción no se adaptó de una manera directa

al algoritmo, y fue necesario generar variaciones en las otras entradas y en el procedimiento, todo esto para generar una textura con las características definidas. Esto plantea varios inconvenientes, puesto que ya no era exactamente un mismo algoritmo al que se le conectaban diferentes módulos, que era el objetivo inicial, sino que, aunque se retomara la misma estructura del algoritmo, se tuvo que desarrollar un algoritmo diferente para cada módulo. A su vez, las transformaciones generadas se vieron influenciadas por el tiempo necesario para hacer un cambio en el parámetro. Idealmente, usando software paramétrico se recomienda que los cambios sean continuos para obtener el mayor beneficio a la parametrización de las entradas y los procedimientos. Pero, debido a la complejidad de varios algoritmos desarrollados, los archivos quedaron muy pesados y los cambios en los parámetros no eran continuos y fluidos e hizo evidente la necesidad de contar con un usuario con un nivel avanzado de Grasshopper® y Rhinoceros® y un computador de alto rendimiento.

Respecto a la materialización de las muestras, las principales limitantes estuvieron relacionadas con procesos y aspectos técnicos que implicó tiempos extensos, tales como la recurrente reparación de archivos, el procesamiento de archivos CAD (Computer Aided Design), en los software CAM (Computer Aided Design) y tiempos muy amplios en el proceso de materialización, especialmente con el fresado por CNC e impresión 3D; también es importante mencionar el difícil acceso y costos elevados de la tecnologías de impresión 3D de alta definición, tal es el caso de la tecnología DLP (Digital Light Processing).

La última limitación identificada en el proyecto está relacionada con responder la pregunta sobre la viabilidad de integrar las texturas bioinspiradas en proceso de diseño de productos. En el momento de hacer el proyecto del que se desprende este libro, se contó con un grupo de 15 estudiantes que desarrollaron diferentes actividades enmarcadas en la investigación. Hay pruebas de la utilidad de las metodologías propuestas y del repertorio, pero se sugiere en futuros proyectos aumentar el número de estudiantes de diseño y diseñadores con experiencia; así mismo, invitar estudiantes y profesionales de arquitectura e ingeniería, para conformar equipos interdisciplinarios y aumentar la variedad de aplicaciones en un mayor número de proyectos. Todo esto con el fin de mejorar la propuesta metodológica mientras que se analiza la viabilidad técnica y procedimental.

7.2. Trabajo futuro

Prospectivamente, el ejercicio de observación para emular características de un dominio a otro dominio se puede replicar a través de la observación del reino vegetal o *Fungi* en otras escalas diferentes a las observadas a simple vista y pasar de lo macro a lo micro. Por ejemplo, con ayuda de lupas o microscopios se pueden fotografiar las especies para pasar de dimensionarlos en milímetros a micras. Esto arrojaría, aunque se esté observando la misma especie, diferentes texturas y patrones a las que se les podría aplicar el mismo proceso propuesto en el texto. Igualmente, la observación de otras especies naturales, como el reino

animal y la protista abriría un panorama de nuevas texturas para ser aplicados al diseño.

Ahora bien, para futuros proyectos y aplicaciones, se sugiere adaptar la metodología propuesta por los investigadores basada en el esquema ontológico de Bonsiepe (1999), es posible que el diseñador no trabaje con un repertorio predeterminado, sino que desarrolle su propio repertorio. El proceso iniciaría con la identificación de problemáticas en el contexto de una actividad, la definición de requerimientos, la identificación y abstracción de referentes y la generación de texturas. Así, por ejemplo, si se requiere diseñar una manija para una puerta, las especies naturales se podrán seleccionar teniendo en cuenta aspectos como rugosidad, comodidad, factibilidad constructiva y novedad. Se espera seguir utilizando la metodología de manera iterativa para hacer validaciones, mejoras en proyectos académicos y ampliar su aplicación en otros contextos profesionales, empresariales y sociales.

Cabe destacar que en el alcance del proyecto se propuso un modelo asociativo basado en principios de transformación, pero que la experimentación con los patrones naturales puede migrar para utilizar fenómenos naturales de mayor complejidad, como los sistemas L, la gravedad, la presión ocasionada por fluidos, la capilaridad, la hidratación y deshidratación, los sistemas adaptativos y evolutivos, los algoritmos inspirados en el comportamiento animal, los sistemas dinámicos reactivos, entre otros.

En ese mismo orden de ideas, un proyecto posterior puede ser el diseño de un software o app soportada por Grasshopper® que tenga componentes de módulos, mallas o cuadrículas, transformaciones y aplicaciones en diferentes tipos de superficies: de una curvatura, de dos curvaturas positivas como esferas, de dos curvaturas negativas como hiperboloides o paraboloides hiperbólicos, y superficies irregulares. Sería posible generar o seleccionar un módulo, insertarlo en mallas o cuadrículas previamente diseñadas para materializar con tecnologías fabricación digital, transformarlo usando los principios naturales y facilitar la aplicación en las superficies que forman parte del producto diseñado.

Por otro lado, a partir de las limitaciones y problemas observados en el proceso de materialización de las muestras, se abre la oportunidad de integración entre las tecnologías digitales con las técnicas analógicas, este complemento puede reducir los costos,

aumentar la viabilidad para usar estas texturas en un contexto local y amplía las opciones de aplicación. Es factible proponer investigaciones que integren experimentaciones con técnicas analógicas de un modo amplio.

Por último, se evidencia la importancia de la interacción sensorial con las texturas, este contacto ocurre a través de todos los sentidos y activa diferentes percepciones, sensaciones y emociones; como consecuencia puede suscitar una experiencia significativa para la persona que interactúa e incide directamente en la percepción del producto, sistema o espacio. Con este análisis se fundan las bases para una nueva investigación orientada a establecer las propiedades sensoriales y cualidades expresivo-perceptuales de las texturas bioinspiradas para optimizar su integración y aporte de valor a los procesos de diseño de productos.

Agradecimientos

Fotografía de Silvia Gallego

Agradecemos al Centro de Investigación para el Desarrollo y la Innovación – CIDI – de la Universidad Pontificia Bolivariana, por el apoyo otorgado para el desarrollo del proyecto de investigación titulado Repertorio de superficies y texturas bio-inspiradas, a través de experimentaciones morfológicas con tecnologías de fabricación digital, financiado por UPB INNOVA, en tanto se recibieron ayudas para la construcción de muestras y prototipos, publicaciones, ponencias internacionales, la publicación de dos libros (incluido el presente), entre muchos otros productos. Junto con esto, expresamos nuestro profundo agradecimiento a la Facultad de Diseño Industrial y a la Escuela de Arquitectura y Diseño por el respaldo decidido e incondicional de sus directivos para esta investigación.

Hacemos un reconocimiento especial a los estudiantes de Diseño Industrial de la Universidad Pontificia Bolivariana, que formaron parte de Semillero de investigación MORFOlab: Julián David Villa Girón, Valentina Cardona Echeverri, Mariana Betancur Sánchez, Laura Vargas Álvarez, Juan Diego Buriticá Marín, Jorge Leonardo Posada Gaviria, Julio César Zuluaga y Carolina Cardona Betancur; gracias por su trabajo comprometido y constante en la investigación. Nuestra gratitud con los estudiantes de diseño gráfico Sara Restrepo Osorio, Mateo Arbeláez Patiño, Juan Camilo Muriel, quienes hicieron el diseño de manual de estilo de la colección de libros Morfología y diseño, dibujos de esquemas, fichas y a Andrea Orozco Rincón quien diseñó el video de la investigación para ser presentado en diferentes congresos internacionales.

Agradecemos a la profesora Silvia Gallego por sus hermosas fotografías y por guiar a estudiantes del semillero en el registro fotográfico de las texturas. Fue significativa la colaboración de nuestros compañeros de investigación de la Línea de Investigación en Morfología Experimental -LIME- Diana Urdinola, Alejandro Zuleta y Andrés Valencia, gracias por todos sus aportes. Un agradecimiento al arquitecto Andrés Obregón, por su apoyo en la realización de los algoritmos de las texturas parametrizadas y al pasante de doctorado Byron Villamil, quien hizo las primeras parametrizaciones de transformaciones complejas de texturas.

Damos las gracias a la empresa Rhino3D Colombia y al Rhino FabStudio de UPB, laboratorio de fabricación digital y centro de formación oficial de Robert McNeel & Associates, liderado por José Ovidio Cardona; gracias por las asesorías técnicas, fabricación de muestras y prototipos, en suma toda la colaboración brindada en el proceso investigativo. Agradecemos a las empresas Siltech Colombia, Robot y Carpintería digital por la paciencia y constante colaboración para resolver todos los problemas técnicos en la construcción de muestras, pruebas, experimentaciones y prototipos durante alrededor de tres años, en especial nuestra gratitud para Andrea Valenza (empresa Siltech Colombia) y para Andrés Vásquez (empresa Robot).

Por último, pero no menos importante, queremos dar gracias infinitas a nuestras familias que son nuestra razón de ser, gracias a su amor, paciencia y apoyo constante fue posible terminar esta investigación y todos sus productos, incluido este maravilloso libro.

Biografía

de los autores



Ever Patiño Mazo

Diseñador Industrial de la Universidad Pontificia Bolivariana (2002). Magíster en Ingeniería con énfasis en Form-finding de la Universidad Eafit (2019). Coautor del libro Generación y transformación de la forma (2009), autor del libro Introducción a la investigación formativa en Diseño (2015) y compilador del libro Por un Diseño crítico y social (2015). Así mismo, ha publicado artículos y dictado conferencias y talleres en contextos nacional e internacional sobre investigación y diseño, diseño para la artesanía, biomimética, bioinspiración, morfología estructural y generación de la forma analógica y computacional. Desde 2004 pertenece a la Línea de Investigación en Morfología Experimental del Grupo

de Investigación de Estudios en Diseño (GED), de la Escuela de Arquitectura y Diseño de la UPB. Se desempeñó como jefe de la Línea de Investigación en Morfología Experimental (2004-2007). Es socio-fundador del laboratorio de diseño Reforma (www.reformalab.com), en el que desarrolla proyectos de diseño independiente y experimental desde el 2008, y con el cual ha sido ganador de dos becas de creación de la Alcaldía de Medellín, y un Premio Lápiz de Acero (2014).

Sitio web de Reformalab
www.reformalab.com

Instagram
[@evermazo](https://www.instagram.com/evermazo)

Sitio web LIME (Línea de Investigación en Morfología Experimental)
<https://www.upb.edu.co/es/investigacion/nuestro-sistema/grupos/grupo-investigaciones-estudios-diseno-medellin/morfologia-experimental>

CV Lac (Currículo de investigación)
http://scienti.colciencias.gov.co:8081/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000992755



David A. Torreblanca-Díaz

Chileno, diseñador de productos, titulado con distinción de la Universidad de Valparaíso (Chile). Magíster en Tecnologías del Diseño de la Universidad Nacional Andrés Bello (Chile), con reconocimiento Cum laude y primer lugar en el ranking de su generación. Proyectos de investigación y experimentación en las áreas de biomimética, morfología, diseño paramétrico-asociativo y generativo, tecnologías de fabricación digital, técnicas de representación en proyectos de diseño, sensorialidad y diseño emocional. Investigador principal del proyecto Repertorio de superficies y texturas bioinspiradas, a través de experimentaciones morfológicas con tecnologías de fabricación digital, coautor del libro Biomimética y diseño, al igual que este texto resultado de investigación de dicho proyecto. Desde 2002 experiencia profesional en docencia universitaria, investigación y desarrollo curricular en diferentes instituciones de Educación Superior. Relator en conferencias, workshops y exposiciones en contextos nacionales e internacionales.

Actualmente es profesor Asociado e investigador del Grupo de Investigación de Estudios en Diseño (GED), en la Línea de Investigación en Morfología Experimental (LIME) en el programa de Diseño Industrial, Escuela de Arquitectura y Diseño en la Universidad Pontificia Bolivariana. Miembro del Comité Ejecutivo Internacional y del Comité Científico de SIGraDi (Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital); Chair del congreso internacional SIGraDi 2020 / Transformative Design, Online Conference, realizado del 16 al 20 de noviembre de 2020, en modalidad telepresencial en la Universidad Pontificia Bolivariana, EcoCampus en Medellín, Colombia.

Sitio web personal
<https://davidtorreblanca.com/>

Instagram
[@davidtorreblancad](https://www.instagram.com/davidtorreblancad)

Sitio web LIME (Línea de Investigación en Morfología Experimental)
<https://www.upb.edu.co/es/investigacion/nuestro-sistema/grupos/grupo-investigaciones-estudios-diseno-medellin/morfologia-experimental>

CV Lac (Currículo de investigación)
http://scienti.colciencias.gov.co:8081/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000033328

Referencias

- Abdelmohsen, S. (2015) An Inquiry into Designing in Context using Generative Systems. *International Journal of Architectural Computing*. Vol 12. N°4. 477-494.
- Aranda, B. & Lasch, C. (2006) *Tooling, Pamphlet Architecture 27*. Princeton Architectural Press: New York.
- Ayala, F. J. (2012). *Grandes cuestiones: Evolución*. Barcelona: Ariel.
- Battey, N., & Fellowes, M. (2016). *50 temas de biología y teorías sobre la vida*. Barcelona: Blume.
- Benyus, J. M. (2012). *Biomímesis: innovación inspirada por la naturaleza*. Barcelona: Tusquets.
- Bergen, James R., & Edward H. Adelson. 1988. «Early vision and texture perception. » *Nature* 636-364.
- Bonsiepe, G. (1999). *Del objeto a la interfase*. Buenos Aires: Ediciones Infinito.
- Bryden, D. (2014). *CAD y prototipado rápido en el diseño de producto*. Barcelona: Promopress.
- Bürdek, B. (1994). *Diseño. Historia, teoría y práctica del diseño industrial*. Barcelona: Gustavo Gili, S.A.
- Burry, J. & Maher, A. (2008). The Other Mathematical Bridge. *Nexus Network Journal of Architecture and Mathematics*. Vol. 10. N°1.179-194.
- Capra, F. (2002). *Las conexiones ocultas, implicaciones sociales, medioambientales, económicas y biológicas de una nueva visión del mundo*. Barcelona: Editorial Anagrama.
- Celani, G. (2008). Enseñando diseño generativo: una experiencia didáctica. *XII Congreso Sigradi*, Cuba. Diciembre, 1-4.
- Chase, S. C. (2005). Generative design tools for novice designers: Issues for selection. *Automation in Construction*, 14(6), 689-698.
- Coineau, Y. & Kresling, B. (1994) "Biónica y diseño: testimonios de la evolución de esta aproximación"; *Temas de Disney*. (10). 32-42.
- Comanns, P., Winands, K., Arntz, K., Klocke, F., & Baumgartner, W. (2014). Laser-based biomimetic functionalization of surfaces: from moisture harvesting lizards to specific fluid transport systems. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 9(3), 206-215.
- Fernández Vicente, M. (2012). Estudio e integración de sistemas de bajo coste para el diseño digital y el prototipado rápido. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia: Editorial Universidad Politécnica de Valencia.
- Fischer, S. F., Thielen, M., Loprang, R. R., Seidel, R., Fleck, C., Speck, T., & Bührig-Polaczek, A. (2010). Pummelos as Concept Generators for Biomimetically Inspired Low Weight Structures with Excellent Damping Properties. *Advanced Engineering Materials*, 12(12), B658-B663. <https://doi.org/10.1002/adem.201080065>
- Fu, K., Moreno, D., Yang, M., & Wood, K. L. (2014). Bio-inspired design: an overview investigating open questions from the broader field of design-by-analogy. *Journal of Mechanical Design*, 136(11), 111102.

- Galanter, P. (2012). Computational Aesthetic Evaluation: steps towards machine creativity. *SIGGRAPH 2012*, Los Angeles, California. Agosto, 1-16
- Gibson, E. J. (2000). Where is the information for affordances? *Ecological Psychology*, 12(1), 53-56.
- Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2014). Additive Manufacturing Technologies, 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing. Springer.
- Gorb, S. (2006). Functional Surfaces in Biology: Mechanisms and Applications. In Y. Bar-Cohen (Ed.), *Biomimetics: Biologically Inspired Technologies* (pp. 381–398). Boca Raton: CRC Press.
- Gordon, J. E. (1999). *Estructuras o por qué las cosas no se caen*. Madrid: Celeste.
- Groover, M. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna*. Naucalpan de Juárez. Estado de México: Prentice Hall.
- Gürsel, I. (2012). Creative design exploration by parametric generative systems in architecture. *METU Journal of Faculty of Architecture*, 29(1), 207-224.
- Hekkert, P. (2006). Design aesthetics: principles of pleasure in design. *Psychology science*, 48(2), 157.
- Hekkert, P., & Leder, H. (2008). Product aesthetics. In *Product experience* (pp. 259-285). Elsevier.
- Hensel, M., & Menges, A. (2008). Versatility and Vicissitude: An Introduction to Performance in Morpho-Ecological Design. *Architectural Design*, 78(2), 6-11.
- Hopf, A. (2009, September). Renaissance 2.0—Expanding the Morphologic Repertoire in Design. In *24th Cumulus Conference* (Vol. 24, No. 09, pp. 78-85).
- Iouguina, A., Dawson, J.W., Hallgrimsson, B., Smart, G. (2014). Biologically informed disciplines: a comparative analysis of bionics, biomimetics, biomimicry, and bio-inspiration among others. *Int. J. of Design & Nature and Ecodynamics*. Vol. 9, No. 3. 197–205
- Jirapong, K., Krawczyk, R. J., & Elneimeiri, M. (2002). Natural forms as virtual architectures. In *Proceedings of the 20th Conference on Education in Computer Aided Architectural Design in Europe, Warsaw* (pp. 1-4).
- Karana, E., Pedgley, O., & Rognoli, V. (2013). *Materials Experience. Fundamentals of Materials and Design* (Vol. 1). Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann (Elsevier).
- Krawczyk, R. J. (2002). Experiments in architectural form generation using cellular automata. 20th eCAADe Conference Proceedings. Warsaw, Poland, September. pp. 552-555.
- Laarman, J., Starr, A. (2021). Joris Laarman Lab. Obtenido de: <https://www.jorislkaarman.com/>
- Lefteri, C. (2008). Así se hace: Técnicas de Fabricación para Diseño de Producto. Blume.
- Lillywhite, H. B. (2006). Water relations of tetrapod integument. *Journal of Experimental Biology*, 209(2), 202–226. <https://doi.org/10.1242/jeb.02007>
- Maldonado, C. E. (2011). *Termodinámica y complejidad: una introducción para las ciencias sociales y humanas*. Difundir Ltda.
- Malshe, A. P., Bapat, S., Rajurkar, K. P., & Haitjema, H. (2018). Bio-inspired textures for functional applications. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*.
- Max Planck Society. (2006). Control Mechanism for Biological Pattern Formation Decoded. Science Daily. Obtenido de: <https://www.sciencedaily.com/releases/2006/11/061128093244.htm>
- McCormack, J., Dorin, A., & Innocent, T. (2004). Generative design: a paradigm for design research. *Proceedings of Futureground, Design Research Society*, Melbourne.
- Menges, A. (2005). Pluripotent Components and Polymorphous Systems: An Alternative Approach to Parametric Design. *AA Files*, (52), 63-74.

- Menges, A. (2021). Achim Menges. Obtenido de <http://www.achimmenges.net/>
- Moreno, D. Blessing, L. Yang, M. Wood, K. (2015). The potential of design-by-analogy methods to support product, service and product service systems idea generation. International Conference on Engineering Design, Iced15 27-30 July 2015, Politecnico Di Milano, Italy.
- Nachtigall, W (1994). "Creación de forma y biónica: diseño biológico"; *Temas de Disseny*. (10). 149-155.
- Otto, F. (1988). Form IL22, Institute for Lightweight Structures. University of Stuttgart: Federal Republic of Germany, 1988.
- Otto, F. & Rasch, B. (2001) Finding Form. Axel Menges.
- Oxman, R. (2006). Theory and design in the first digital age. *Design studies*, 27(3), 229-265.
- Oxman, R. (2017). Parametric design thinking. *Design Studies*, 52, 1-3.
- Oxman, N. (2021). Neri Oxman. Obtenido de <https://neri.media.mit.edu/>
- Patiño, E., Arbeláez, E. (2009). *Generación y transformación de la forma*. Editorial Universidad Pontificia Bolivariana: Medellín.
- Patiño, E., Valencia-Escobar, A., Torreblanca A., Díaz, D., & Gil, Zuleta, A.A. (2017) Proceso Generativo de Texturas Paramétricas Bioinspiradas: Modelo Metodológico de experimentación. SIGraDi 2017, XXI Congreso de la Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital 22 – 24 noviembre, 2017 – Concepción, Chile.
- Patiño, E. (2018). Geometrías y texturas en la naturaleza. En: Diana Urdinola (Ed.) *Biomimética y Diseño* (pp.33-41). Medellín: Editorial Universidad Pontificia Bolivariana.
- Patiño, E., Torreblanca-Díaz, D. A., Valencia-Escobar, A., & Zuleta, A. (2019). Classification, characterization and abstraction of vegetable surfaces for design. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 14(2), 131-146.
- Patiño, E. (2019). Construcción y exploración de un repertorio de técnicas analógicas de Form-Finding para su aplicación en el diseño de productos (Tesis de Maestría, Universidad EAFIT).
- Podborschi, V. y Vaculenco, M. (2004) "Study of natural forms – the source of inspiration in the product design"; En: *Proceedings of Product Engineering: Eco-design, Technologies and Green Energy Sources*. 61-67. Brasov, 2004.
- Prada Molina, M. S. (2013). *Diseño sensorial y emocional. Estudio comparativo de las respuestas del usuario en productos industriales*. Medellín: Editorial Universidad Pontificia Bolivariana.
- Ramachandran, V. S., & Hirstein, W. (1999). The science of art: A neurological theory of aesthetic experience. *Journal of consciousness Studies*, 6(6-7), 15-51.
- Real Academia Española. (2021). Real Academia Española. Obtenido de <https://www.rae.es/>
- Restrepo, V. (16 de enero de 2018). Medellín, una de las ciudades más letales para manejar. *El Colombiano*. Obtenido de <https://www.elcolombiano.com/antioquia/movilidad/bajan-accidentes-pero-medellin-sigue-entre-ciudades-mas-letales-HC8015081>
- Saddik, A. E., Orozco, M., & Cha, M. E. (2011). *Haptics Technologies. Bringing touch to media*. Ottawa: Springer.
- Schifferstein, H. N., & Hekkert, P. (2007). *Product Experience* (Vol. 1). Oxford, U.K.: Elsevier Science
- Schumacher, P. (2008). Preface: Autopoietic Elegance. En: Research Institute for Experimental Architecture (Ed.), *MORPHE MRGD* (pp. 6-8). New York, E.E.U.U: Springer Wien New York.
- Schwab, K. (2016). *La Cuarta Revolución Industrial*. Bogotá: El Tiempo Casa Editorial.

- Sevilla Cadavid, G. A., & Herrán Cuartas, C. (2015). Diseño de envases para usuarios de la tercera edad. *Iconofacto*, 11(16), 56-85.
- Shea, K., Aish, R., & Gourtovaia, M. (2005). Towards integrated performance-driven generative design tools. *Automation in Construction*, 14(2), 253-264.
- Sierra, F., & Patiño, E. (2005). Objetos a partir de la rigidización de estructuras de membrana. *Iconofacto*, 1(2).
- Singh, V., & Gu, N. (2012). Towards an integrated generative design framework. *Design Studies*, 33(2), 185-207.
- Stevens, P. (1987) *Patrones y pautas en la naturaleza*. Salvat Editores: Barcelona, 1987.
- Steward, I., & Golubitsky, M. (1995). *¿Es Dios geómetra?: las simetrías de la naturaleza*. Barcelona: Crítica.
- Szalapaj, P. (2014). *Contemporary architecture and the digital design process*. Routledge.
- Tedeschi, A. (2014). *AAD, Algorithms-aided design: parametric strategies using Grasshopper*. Le Penseur Publisher
- Tharp, B. M & Tharp, S. M. (2014). Tools for Thinking: Discursive Design. *Innovation*. Vol. 33 No. 1, p. 44.
- Thompson, D. (2000). *Sobre el crecimiento y la forma*. Madrid, España: Cambridge University Press
- Torreblanca, D. A. (2016). Tecnologías de Fabricación Digital Aditiva, ventajas para la construcción de modelos, prototipos y series cortas en el proceso de diseño de productos. *Iconofacto*, 12(18), 118-143.
- Torreblanca Díaz, D. A. (2018). Bio-inspired parametric textures applications in academic design projects. *Sigradi2018* (págs. p. 997-1003). São Paulo: Blucher. doi:10.5151/sigradi2018-1370
- Trujillo, N., & Valencia, A. (2012). Explorando la forma: procesos de búsqueda formal para objetos industriales. *Sistemas y Telemática*, 10(22), 103-110.
- Tsipenyuk, A., & Varenberg, M. (2014). Use of biomimetic hexagonal surface texture in friction against lubricated skin. *Journal of the Royal Society Interface*, 11(94), 20140113.
- Valencia-Escobar, A. (2009). Morfología experimental: esquema de formación en diseño industrial. En Ferrero L. (Ed), Libro de resúmenes Forma & Contexto VII Congreso Nacional y IV Internacional. (pp. 82). Buenos Aires: Sema Ars Noa.
- Valencia, A. (2018). Biomimética y métodos para el diseño (Ed.) Biomimética y Diseño (pp.33-41). Medellín: Editorial Universidad Pontificia Bolivariana.
- Valencia-Escobar, a., Urdinola, d. (2019). La morfología natural y su potencial como referente para el diseño. En: Marcelo Fraile Narváez (Ed.), Biomimesis: El camino hacia un diseño eficiente (pp. 19-32). Buenos Aires, Argentina: TRP21.
- Verein Deutscher Ingenieure (2011). Handbuch Bionik, VDI 6220. www.vdi.eu/uploads/tx_vdirili/pdf/1751320.pdf. Accessed on: 12 Jun. 2011.
- Vincent, J. F. V. et al (2006) "Biomimetics: its practice and theory"; *Journal of Royal Society Interface*. 3(9). 471-482.
- Vogel, S. (2000). *Ancas y palancas: mecánica natural y mecánica humana*. 1 ed. Barcelona: Tusquets editores.
- Wagensberg, J. (2005). *La rebelión de las formas*. Barcelona: Editorial Matemáticas.
- Williams, C. T. (1984). Los orígenes de la forma. Gustavo Gili.
- Witkin, A., & Kass, M. (1991, July). Reaction-diffusion textures. In Proceedings of the 18th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (pp. 299-308).
- Wen, H-I, et al. (2008) "An innovative methodology of product design from nature". *Journal of bionic engineering*. 5(1). 75-84.

Sitios web de interés

- **Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.**
<https://www.upb.edu.co/es/home>
- **Facultad de Diseño Industrial de la Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.**
<https://www.upb.edu.co/es/pregrados/disenio-industrial-medellin>
- **Grupo de Investigación de Estudios en Diseño (GED).**
<https://www.upb.edu.co/es/investigacion/nuestro-sistema/grupos/grupo-investigaciones-estudios-diseno-medellin>
- **Línea de Investigación en Morfología Experimental (LIME).**
<https://www.upb.edu.co/es/investigacion/nuestro-sistema/grupos/grupo-investigaciones-estudios-diseno-medellin/morfologia-experimental>
- **Investigación sobre texturas bioinspiradas y fabricación digital.**
<https://www.upb.edu.co/es/investigacion/proyectos/superficies-y-texturas-bioinspiradas>
- **Libro Biomimética y diseño, primera publicación de la colección Morfología y Diseño.** Autores: Diana Urdinola Serna(compiladora), Andrea Bustamante, Alejandro Zuleta, Andres Valencia, Ever Patiño Mazo y David Andrés Torreblanca Díaz.
<https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/4263>
- **Libro Generación y transformación de la forma “Morfología, geometría, naturaleza y experimentación”.** Autores: Ever Patiño Mazo y Elsie María Arbeláez Ochoa.
https://www.researchgate.net/publication/339509974_Generacion_y_transformacion_de_la_forma_Morfologia_geometria_naturaleza_biometrica_y_experimentacion
- **Paper: Classification, characterization and abstraction of vegetable surfaces for design. International Journal of Design & Nature and Eco-dynamics.**
<https://www.witpress.com/elibrary/dne-volumes/14/2/2461>
- **Sitio web de Reformalab, oficina de diseño liderada por Ever Patiño Mazo.**
www.reformalab.com
- **Sitio web personal de David A. Torreblanca-Díaz.**
<https://davidtorreblanca.com/>



SU OPINIÓN



Para la Editorial UPB es muy importante ofrecerle un excelente producto. La información que nos suministre acerca de la calidad de nuestras publicaciones será muy valiosa en el proceso de mejoramiento que realizamos.

Para darnos su opinión, comuníquese a través de la línea (57)(4) 354 4565 o vía correo electrónico a editorial@upb.edu.co

Por favor adjunte datos como el título y la fecha de publicación, su nombre, correo electrónico y número telefónico.

Esta obra se publicó en archivo digital en el mes de agosto de 2021.

En los sistemas biológicos han actuado tres mil ochocientos millones de años de evolución, generando formas que se han adaptado a un complejo ecosistema de condiciones físicas y químicas. A partir de lo anterior, la Bioinspiración utiliza esa información biológica para facilitar el diseño de formas y estructuras. Dentro de este campo, el libro presenta los resultados del proyecto de investigación Repertorio de texturas bioinspiradas, a través de experimentaciones morfológicas con tecnologías de fabricación digital. El texto comienza con el marco de referencia del proyecto, vinculando diversos ámbitos, como la bioinspiración y la biomimética, las superficies biológicas, la morfología experimental, y las tecnologías de fabricación digital en el contexto de la Cuarta revolución industrial; para luego presentar los resultados vinculados a la ruta metodológica que se siguió: (i) caracterización de texturas en la naturaleza, (ii) abstracción de los patrones en el software CAD, (iii) experimentación morfológica con el software paramétrico-asociativo Grasshopper, (iv) materialización de las muestras de las texturas bioinspiradas, (v) construcción de repertorio de texturas, (vi) propuesta metodológica de aplicación y (vii) conclusiones.

Se espera con este libro motivar a investigadores, estudiantes y futuras generaciones a estudiar este tipo de proyectos colaborativos y transdisciplinarios, que destacan la referenciación de formas, materiales, sistemas y estrategias de la naturaleza para resolver problemas del ser humano a través del diseño.

