

Texturas invisibles: Estructuras microscópicas como poros de la imaginación y mapas de dispersión en la creación de joyería

Viviane Tavares de Moraes⁽¹⁾, Agda Regina Carvalho⁽²⁾ y
Grace Kishimoto⁽³⁾

Resumen: Este artículo investiga las estructuras microscópicas de la piña, obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido y microscopía tridimensional. La morfología obtenida a escala microscópica sirve de inspiración para el diseño de joyería que articula lo micro y lo macro, lo sensible y lo cognitivo, de lo visible y lo invisible. A partir del análisis de texturas y ramificaciones internas de diferentes áreas de la piña, se propone interpretarlas como aportes visuales y sensoriales de significados ambientales, así como mapas de dispersión que simbolizan procesos de liberación, expansión y transformación relacionados con la joyería de inspiración biomimética. La idea del proyecto «PINNUS» se basa en la investigación sobre el pino. Este enfoque revela el potencial del biodiseño para crear objetos que fomenten un diálogo sensible entre lo invisible, lo visible y la búsqueda de conocimiento innovador, ampliando la comprensión y estimulando nuevas formas de imaginar el mundo natural, inspiradas en la biomimética.

Palabras clave: Joyería - Texturas invisibles - Estructuras microscópicas - Microscopía tridimensional - Procesos de transformación - Biodiseño - Biomimética - Ambiente - Ramificaciones

[Resúmenes en inglés y en portugués en las páginas 254-255]

⁽¹⁾ **Viviane Tavares de Moraes** es Profesora de tiempo completo en el Centro Universitario del Instituto Mauá de Tecnología-(CEUN-IMT), Cursos de Diseño y Ingeniería Mecánica. Posdoctorado en Ingeniería Química y en Ingeniería Metalúrgica y de Materiales de la Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo (POLI-USP). Tiene dos grados, el primero en Tecnología Ambiental y el segundo en Ingeniería Ambiental. Desarrolló un proyecto de investigación para su maestría y doctorado en el Departamento de Ingeniería Metalúrgica (USP). Tiene experiencia en el área de química, medioambiente y metalurgia extractiva, tratamiento de residuos, efluentes y emisiones atmosféricas, trabajando principalmente en las siguientes líneas de investigación: residuos electrónicos, reciclaje, recuperación de metales, tratamiento de efluentes, análisis de ciclo de vida de productos y nanomateriales. Tiene experiencia en la gestión de un grupo de investigación con estudiantes de maestría, doctorado e iniciación científica, actuando en el área de desarrollo de proyectos de investigación para obtener financiamiento de Capes, CNPq, Fapesp y Finep. Participa activamente en la adquisición de nuevos equipos, infraestructura de laboratorios

y Centros Multiusuario, así como en el desarrollo de nuevos proyectos, rendición de cuentas e informes técnicos. Trabaja en el Grupo de Investigación en Ciencia e Ingeniería de Materiales (CEUN-IMT), donde desarrolla investigaciones sobre nanomateriales. viviane.moraes@maua.br.

⁽²⁾ **Agda Regina Carvalho** es Artista visual. Posdoctorado en Artes por el Instituto de Arte-UNESP. Posdoctorado en Humanidades Digitales por el Media Lab - UFG. Doctorado en Ciencias de la Comunicación-ECA-USP. Maestría en Artes Visuales por el Instituto de Arte-UNESP. Profesora titular e investigadora de Diseño en el Centro Universitario del Instituto Mauá de Tecnología (CEUNIMT). Líder del Grupo de Investigación LabDesign: Procesos Creativos, Experiencia e Innovación (CEUN-IMT). Participa en el curso de posgrado Arquitectura y Ciudad - Universidad de Vila Velha-ES. Y la Línea de Creación en Arte y Ciencia del Grupo de Investigación Internacional e Interinstitucional entre Arte, Ciencia y Tecnología (GIIP-UNESP). Representante regional del Asociación Nacional de Investigadores en Artes (ANPAP) (2019-2021) Integró la Junta Directiva de ANPAP (2017-2018). Actuó en el PPG - Maestría y Doctorado en Diseño en la Universidad Anhembi Morumbi (2011-2019) y en el PPG en Moda, Cultura y Arte en el SENAC (2002-2009). Coordinó el proyecto de Reconstitución del Ballet Triádico de la Bauhaus-Centro Universitario SENAC (2007-2009). Integró el Jurado del Premio Museu da Casa Brasileira (2019 y 2021). Integra las publicaciones: *Diseño Contemporáneo* (2005), *Formas de ver la moda* (2010), *Sintonía de la moda* (2010), *Cuerpo y ropa* (2015), *Dimensiones: Arte_Diseño_Tecnología* (2020), *Conectar la cultura* (2021), *Dimensiones del arte y la tecnología* (2022). Participa en exposiciones nacionales como EmMeio# 16, 17, 18, 19, 20 (Brasília, Brasil) y internacionales como *Ars Electrónica-Áustria* (2017/2023), *AIFA AI and the future of arts-Luxemburgo* (2021), *PIKSEL Festival, Begem/Norwav* (2021). Desarrolla investigaciones y proyectos que abordan la articulación entre Diseño, Arte y Tecnología y la experiencia del cuerpo/espacio. agdacarvalho@maua.br.

⁽³⁾ **Grace Kishimoto** es Docente e investigadora en la Universidad Presbiteriana Mackenzie, desempeñándose en la carrera de Diseño. Actualmente, soy candidata a doctora en Educación, Arte e Historia de la Cultura en esta misma institución. Tengo una maestría en Diseño, becaria de CAPES, por la Universidad Anhembi Morumbi (2015). Mi formación académica comenzó con la licenciatura en Diseño Industrial, con especialización en Producto, por la Universidad Presbiteriana Mackenzie (1999). Formo parte del grupo de investigación "Diseño, Teoría y Proyecto" de la FAU-Mackenzie (Facultad de Arquitectura y Urbanismo), donde desarrollo estudios enfocados en las áreas de diseño, teoría y proyecto, con énfasis en la innovación y la investigación aplicada. La investigación se centra especialmente en la creación y desarrollo de joyas, buscando la integración de materiales, procesos y conceptos estéticos que promuevan la valorización del diseño contemporáneo y su relación con aspectos simbólicos y culturales. Imparto disciplinas relacionadas con el Diseño de Producto y Comunicación, promoviendo una formación académica que valora la investigación, la creatividad y la reflexión crítica. Mi objetivo es contribuir al avance del conocimiento en el área, con especial énfasis en la valorización del diseño de joyas, con miras a formar profesionales capacitados para actuar de manera innovadora, ética y acor-

de a las demandas del mercado y de la cultura contemporánea. Siempre alineada con los desafíos académicos y profesionales actuales, participo activamente en eventos, actividades de actualización y establezco alianzas con instituciones del sector joyero. Estas actividades fomentan el perfeccionamiento técnico y teórico constante, además de fortalecer mi desempeño profesional y académico. Busco estimular en los estudiantes la comprensión de que el diseño de joyas trasciende la estética, integrando aspectos históricos, culturales y tecnológicos, en busca de un impacto significativo en la sociedad. grace.kishimoto@mackenzie.br.

Introducción

El diseño de joyería contemporánea atraviesa distintas capas conceptuales en la búsqueda de texturas y formas que materialicen significados y relaciones. Este enfoque observa las estructuras microscópicas presentes en la naturaleza, las cuales se relacionan con las narrativas elaboradas en el proceso creativo colaborativo para el desarrollo de proyectos de diseño de joyería. Esta trayectoria busca desvelar las relaciones entre el contexto macro y sus mapas subjetivos y abiertos –que se modifican y reorganizan continuamente con la percepción de los acontecimientos– y la escala microscópica, captada mediante procedimientos y experimentos tecnológicos, como la microscopía electrónica de barrido y la microscopía tridimensional.

Las escalas integran el contexto de la creación y nos permiten visualizar lo aparentemente invisible, y de esta manera, desencadenan dispersiones con las conexiones subjetivas establecidas en el proceso creativo colaborativo, lejos de la linealidad, con posibilidades perceptivas provenientes de los poros de la imaginación. Como señalan Deleuze y Guattari (1995: 21), se trata de un sistema complejo. Forma parte del rizoma. El mapa es abierto, conectable en todas sus dimensiones, desmontable, reversible, susceptible de modificaciones constantes.

En este sentido, la interpretación explora la naturaleza de la biomímesis y encuentra aspectos formales esenciales en los resultados prácticos y simbólicos. En este caso, se apropia de la piña, ya que este árbol está presente en los territorios de los investigadores, e integra las características de cada autor y de diferentes campos de conocimiento en el proceso creativo. Así, reconoce los significados ambientales de los autores durante el proceso creativo, que absorbe aspectos morfológicos de la piña, aspectos conceptuales y tecnológicos de los territorios, y simultáneamente elimina las fronteras entre los campos del diseño, el arte y la ingeniería. Para Myers (2012: 8), el biodiseño va más allá que otros enfoques de diseño y fabricación inspirados en la biología.

Este enfoque reposiciona el diseño de joyería como objeto de investigación y mediación perceptual. Al trasladar estructuras naturales, como las microtexturas de una piña, a la escala del cuerpo humano, el diseñador provoca un encuentro entre la lógica interna del mundo natural y la experiencia sensorial del individuo. La creación colaborativa en el diseño de joyería, en esta propuesta, trabaja a múltiples escalas, adaptándose a diferentes

situaciones, descifrando así mapas subjetivos y rutas técnicas, reconociendo las complejidades de los sistemas naturales y optimizando estructuras y estrategias de adaptación metodológica que actúan colaborativamente en la creación basada en la biomímesis.

Joyería contemporánea: la forma como narrativa

La joyería, una de las expresiones artísticas más antiguas de la humanidad, vive un período de profunda reinención, en el que la investigación formal trasciende la tradición ornamental para consolidarse como un campo de investigación material y conceptual. Como observa Gola (2008: 10), en movimientos como el Art Nouveau, la piedra dejó de utilizarse por su valor intrínseco o para la ostentación; en ese momento, prevaleció la sabia labor de la orfebrería, presagio de la valorización del concepto sobre la materia que marca la contemporaneidad. En este escenario, la biomímesis surge no principalmente como respuesta a las exigencias ambientales, sino como una herramienta sofisticada para la investigación morfológica y la generación de lenguajes visuales sin precedentes. Según Benyus (2016), la biomímesis es la ciencia que estudia los modelos de la naturaleza para imitarlos o inspirarse en ellos para resolver problemas humanos. En el contexto de la joyería contemporánea, este “problema” puede reinterpretarse como la búsqueda de una gramática formal renovada, que encuentra en la complejidad de los sistemas naturales caminos hacia desafíos compositivos, texturales y estructurales.

Este movimiento integra una tendencia central en la joyería contemporánea: su transición de un paradigma centrado en el valor intrínseco de los materiales a un enfoque en la autoría, el concepto y el poder narrativo de la forma. Soares (2003: 9) afirma: las joyas se perciben como formas simbólicas de un lenguaje visual no verbal, uno de los medios más antiguos de la humanidad, y se analizan como instrumentos de expresión, conocimiento e información. Hoy en día, esta expresión se materializa a través de piezas que funcionan como artefactos discursivos, en los que el diseño articula significados complejos. La joyería se convierte así en un vehículo de pensamiento y sensibilidad, en el que el valor simbólico y la intención del diseño priman sobre la mera ostentación, según Gola (2008). El autor añade que, en ciertos contextos, la bisutería, en virtud de su originalidad y valor ornamental, a veces se analiza como un producto artístico (Gola, 2008: 121), lo que señala una ruptura con las jerarquías materiales y una apertura a la apreciación de la idea.

En este nuevo panorama, la biomímesis se apropia como un método de diseño riguroso de decodificación y transposición formal. Es un proceso que parte de la observación analítica –a veces potenciada por tecnologías como la microscopía– hasta la abstracción y reinterpretación de patrones naturales en composiciones originales. Para Ferreira (2021), este enfoque permite comprender soluciones de la naturaleza y aplicarlas a productos con una alta carga simbólica. Por lo tanto, el énfasis recae en la capacidad de la forma para generar narrativa y compromiso sensorial, corroborando el argumento de que decodificar los secretos de la naturaleza permite la creación de piezas que establecen un diálogo rico y complejo con el observador. Esta práctica evoca lo que Gola (2008: 33) identifica en la

historia de la joyería: su función de interactuar con la apariencia y la comunicación, al ser objetos creados para ser vistos y transmitir mensajes complejos.

La pieza resultante ocupa una intrigante intersección entre lo familiar y lo desconocido, invitando a una interpretación que trasciende lo meramente decorativo. Moura (2010: 2-4) destaca que:

[...] Los objetos de joyería contemporánea nos permiten establecer un retrato de nuestro tiempo, implicando diversas relaciones y significados, asociando y valorando lo artesanal en diálogo con lo tecnológico, estando llenos de simbolismo y expresiones semánticas, y exponiendo aspectos y actitudes de la vida en el tiempo presente.

De esta manera, la joyería contemporánea se consolida, como observa Gola (2008: 33), en un campo donde las joyas son productos visuales con un valor simbólico complejo y plural. Este territorio de experimentación permite que la forma, emancipada de su función representativa tradicional, se convierta en el principal agente en la construcción de significados, ampliando el repertorio expresivo del diseño y transformando la percepción de lo que puede ser una joya.

Biomimetismo multiescala en la joyería contemporánea: de lo invisible revelado a lo visible tangible

La aplicación de la biomímesis en el diseño de joyas alcanza un poder creativo y conceptual al trascender la inspiración de las formas aparentes de la naturaleza y emprender una investigación profunda y multiescalar. Este enfoque constituye una metodología de investigación de diseño que busca comprender los principios organizativos, las estructuras internas y las funcionalidades de los sistemas biológicos. Basada en el concepto de biomímesis –un campo científico que estudia modelos de la naturaleza como fuente de inspiración para la resolución de problemas de diseño (Benyus, 2016)–, esta práctica reconoce la naturaleza no solo como un repertorio formal, sino también como modelo, medida y mentor (Benyus, 2016). En este sentido, funciona como criterio de evaluación ética, permitiendo el análisis de las creaciones humanas a la luz de los estándares cambiantes de eficiencia y sostenibilidad, y como fuente continua de aprendizaje (Gerola; Robaey; Blok, 2023). Por ello, tecnologías como la microscopía electrónica de barrido y la microscopía tridimensional se convierten en extensiones indispensables del proceso creativo, funcionando como lentes que revelan un repertorio morfológico oculto, lleno de patrones complejos y eficientes y una belleza intrínseca que desafía la escala humana.

Investigar microestructuras naturales específicas va mucho más allá de la apropiación de una estética abstracta; implica descifrar mapas funcionales, sistemas de protección, optimizaciones estructurales y estrategias de adaptación forjadas por la evolución. Esta investigación ejemplifica la esencia del enfoque biomimético, que busca transferir los principios de funcionamiento, no solo las formas, de los sistemas biológicos a la tecnología (Barthe-

lat, 2007). Interpretar estas estructuras como insumos para el diseño implica, por lo tanto, traducir profundos significados ambientales –como la resiliencia, la eficiencia, la transformación y la interconexión– a un lenguaje material. Esta práctica encarna el precepto de usar la naturaleza como modelo (Benyus, 2016). Sin embargo, como argumentan Detanico *et al.* (2010: 34), dicha práctica debería aspirar a una participación ética en la naturaleza, honrando su inteligencia en lugar de simplemente extraerla, estableciendo un diálogo respetuoso y reflexivo con la lógica biológica que propone la biomímesis.

En la joyería contemporánea, un campo que prioriza la experimentación y el concepto (Mercaldi, 2016), la incorporación de estas capas de conocimiento científico eleva la pieza a un nuevo nivel de complejidad narrativa. La joya deja de ser un mero adorno para convertirse en un vehículo de reflexión, un artefacto que materializa y transmite la memoria de procesos naturales invisibles. Esta práctica se encuentra en la esencia del biodiseño, donde el objeto resultante es un dispositivo de mediación cognitiva y sensorial. Una pieza que encapsula una microestructura natural promueve así un diálogo sensible entre lo invisible revelado por la ciencia y lo tangible visible, entre la cognición y la percepción táctil. Actúa como catalizador de la percepción, invitando al usuario a una interacción más profunda y ampliando sus formas de imaginar y conectar con el mundo natural (Antonelli, 2020), en una relación que la biomímesis busca fomentar.

De esta manera, la biomímesis aplicada expande la creación de joyas. La transforma en un campo para construir narrativas sobre la complejidad de la vida, desafiando a los creadores y a la industria a innovar no solo en la estética, sino también en las dimensiones éticas y epistemológicas de su trabajo. Al integrar la observación tecnológica, los principios ecológicos y la expresión artística, se consolida un diálogo esencial entre el arte, la ciencia y la conciencia ambiental (Manzini, 2016). La joyería biomimética, por lo tanto, se posiciona como un campo poderoso para la expresión de un futuro más reflexivo y armonioso, donde adornar el cuerpo es también un acto de llevar y celebrar la intrincada inteligencia del mundo natural, en todas sus escalas.

Una inspiración para proyectos de extensión en asociación entre instituciones de enseñanza vinculadas al diseño de joyas, conectando el Instituto Tecnológico Mauá y el Instituto Mackenzie, ambos ubicados en el Estado de São Paulo, es el pino, como objeto biomimético. La relación entre las instituciones y el pino se asocia metafóricamente con la adaptación de la especie a diversos entornos, así como las instituciones se adaptan al desarrollo del diseño de joyas en diferentes segmentos. La experiencia del evento perceptual, como propone Bachelard (1994), permite que el espacio se convierta en un lugar de imaginación y memoria sensible. Al someterse a estímulos inestables e imprevistos, el cuerpo se ve obligado a reorganizar su relación con el entorno. Como describe Saramago (2008: 50) “la ruptura del significado habitual de algo o alguien lo hace visible, nos obliga a detenernos para percibirlo”. En ese momento, el mundo se distancia de la obviedad cotidiana, volviéndose extraño, intenso y abierto a la reflexión.

Las experiencias en estos espacios generaron sinergias y desencadenaron procesos que dieron lugar a experiencias en el laboratorio de la Universidad Presbiteriana Mackenzie, centrado en el diseño de joyería de sobremesa, más orientado a actividades manuales y artesanales. Y en los espacios del Instituto Tecnológico Mauá, con laboratorios de diseño de joyería organizados a escala de producción, que utilizan software de dibujo técnico, impre-

sión 3D, mecanizado de cera y fundición a la cera perdida. Además, en este proyecto también se utilizaron microscopía electrónica de barrido y microscopía tridimensional digital. El pino, presente en ambas instituciones, se identificó como el medio biomimético que se relaciona con la resiliencia y la adaptación de las instituciones. Así como la distribución equilibrada y la fluidez de la estructura organizativa son similares al pino, con ramas dispuestas en niveles, con un tronco recto y bien definido, cuya función principal es la difusión de semillas o, metafóricamente, de los conocimientos, habilidades y competencias que ambas instituciones promueven mediante el intercambio de experiencia en las áreas de diseño (Facca *et al.*, 2023 y 2024). La piña representa el resultado de la dispersión, la apertura de posibilidades.

Dispersiones en formas y texturas biomiméticas

El diseño de joyería con un enfoque biomimético estudia la piña y la relaciona con el diseño centrado en el ser humano, considerando futuras estrategias para la difusión del conocimiento y el desarrollo de habilidades (Hesse, 2019; Facca *et al.*, 2023). Las propuestas basadas en la naturaleza presentan adaptación y reorganización. En este contexto, la creación colaborativa interactúa con estímulos no lineales y captura las dispersiones en los mapas de posibilidades conceptuales. La adaptación de formas y texturas de la naturaleza se combina como mecanismo de referencia para el diseño de joyería, aportando un repertorio exclusivo, característico de las obras de arte que representan una conexión entre lo emocional y lo material.

La idea del proyecto PINNUS surge de la investigación sobre el pino, una especie que puede alcanzar entre 18 y 30 m de altura y que no produce frutos, sino órganos reproductivos que transportan las semillas para asegurar la supervivencia de la especie; estos se llaman piñas (Olmedo *et al.*, 2023; Nunes *et al.*, 2016). Esta observación de la naturaleza estudia la piña del género *Pinus*, que no es una planta nativa de Brasil, y que representa la adaptación del organismo a las adversidades ambientales, ya que se reorganizó al ser introducida en el país para la reforestación y la producción de madera, papel y celulosa. Y ahora Brasil se destaca en la producción mundial de piñas, en la calidad de los materiales procesados y en la eficiencia productiva (Olmedo *et al.*, 2023). Como la resina o goma se separa en dos fracciones, una es la trementina y la otra una fracción sólida llamada colofonia o brea, se utiliza en la fabricación de colas, pinturas, barnices, adhesivos, detergentes, cosméticos, alimentos, cauchos sintéticos y suministros para instrumentos musicales (colofonia para la fricción entre las cuerdas y el arco del violín) (Olmedo *et al.*, 2023; Nunes *et al.*, 2016).

La piña sirve de referencia para diseñar piezas inspiradas en la naturaleza, empleando estrategias flexibles y adaptables. Su significado y forma estimulan la imaginación, explorando caminos creativos que se alejan de la obviedad de la joyería de alta producción. Las piñas son los órganos reproductivos de las plantas que no dan fruto (gimnospermas), cuya función es proteger las semillas, visibles en las especies de *Pinus* (Olmedo *et al.*, 2023; Nunes *et al.*, 2016).

Metafóricamente, la adaptación a los procesos y a la imprevisibilidad es importante para la creación. En este sentido, la piña es un elemento fundamental de la naturaleza para el diseño, ya que tiene la capacidad de adaptarse a los cambios climáticos, principalmente gracias a su mecanismo de cerrar las escamas (brácteas) con humedad para proteger las semillas, que se abren cuando el clima se vuelve seco para la dispersión de las semillas que se encuentran entre las escamas.

Las principales características biomiméticas de la piña se manifiestan en sus formas escamosas y cónicas, con capacidad de adaptarse a la humedad ambiental para la autodefensa y la dispersión de semillas. Las estructuras cónicas tienen forma de ramas y hojas. Las hojas masculinas producen polen y las femeninas producen óvulos que, al ser fecundados, dan lugar a semillas (Olmedo *et al.*, 2023; Nunes *et al.*, 2016).

Las semillas son aladas con hojas delgadas similares al ala de una termita, cuya finalidad es dispersar las semillas en el aire seco y asegurar la reproducción de la planta, lo que es complejo, ya que esta especie no es endémica de Brasil, sino una planta exótica introducida en las regiones sur y sureste del país alrededor de las décadas de 1960 y 1970 para la producción de madera, papel, celulosa y resina (Olmedo *et al.*, 2023; Nunes *et al.*, 2016).

Estos aspectos formales, al observarse al microscopio, revelan otras posibilidades de texturas y morfologías con la visualización de escamas o brácteas superpuestas, que constituyen la estructura protectora de las semillas contra el clima y los depredadores. Es decir, cuando hay humedad, las escamas se cierran y protegen las semillas, y cuando el clima es seco, las alas adheridas a la semilla permiten que el viento la disperse, lo que constituye un mecanismo de higromorfismo (Olmedo *et al.*, 2023; Nunes *et al.*, 2016).

La percepción de la textura rústica e irregular, compuesta por escamas leñosas y rígidas intercaladas con alas y semillas, unidas por un tronco cónico que hace única a cada piña, influye en el diseño de joyería contemporánea mediante el proceso de cera perdida y fundición de precisión.

Materiales y métodos

El proceso de creación colaborativa implicó que los autores combinaran consideraciones subjetivas con experimentos de laboratorio. Inicialmente, se utilizó documentación fotográfica del árbol y su gimnosperma, la piña. Mediante inteligencia artificial (Meta AI), fue posible identificar las especies para realizar un estudio biomimético para el diseño de joyas. Posteriormente, la piña colectada fue limpiada con ayuda de un cepillo plástico, para luego ser secada en estufa a 105°C +/- 2°C por aproximadamente 1 hora, hasta no presentar variación en masa durante los pesajes cada 15 minutos, asegurando así que la muestra de piña tuviera menos de 4% de humedad, que es la humedad máxima permitida para análisis en microscopía electrónica de barrido (MEB), con el fin de preservar la integridad y resolución de las imágenes generadas.

Dado que las muestras que se analizarán mediante microscopía electrónica de barrido deben ser conductoras para el paso de electrones, es necesario metalizar su superficie.

Por lo tanto, el escaneo y el análisis se realizaron inicialmente con un microscopio 3D, y posteriormente se metalizó para el análisis por SEM.

El escaneo 3D se realizó con un equipo GOM de alta resolución para metrología e ingeniería inversa de Vtech. El equipo construye una malla ligera sobre la superficie de la piña, donde se mapean puntos específicos (puntos donde se aplican pegatinas para facilitar el mapeo) y genera una imagen 3D con extensión STL. Esto permite procesar la imagen en software CAD (Diseño Asistido por Computadora) para su posterior impresión 3D o mecanizado en cera de la pieza.

Para el prototipo que se validará, se adoptará la técnica manual de goteo de cera para la fabricación de joyas personalizadas.

En los análisis de microscopía avanzada, se utilizaron microscopía 3D y electrónica de barrido para definir la textura superficial para la fabricación de joyas.

En la microscopía 3D, se utilizó un filtro de luz polarizada para mejorar el contraste de los componentes de la piña analizados. Estos componentes fueron principalmente la escama de la piña y las alas de la semilla alada.

Las mismas muestras analizadas con microscopio 3D se analizaron mediante microscopio electrónico de barrido (MEB), previamente metalizadas en la década de 1990 con una aleación de oro y paladio al vacío.

En el MEB, se utilizó el módulo de alto vacío y el sistema de detección de electrones secundarios para obtener una mejor resolución de la imagen.

Las morfologías encontradas sirvieron de inspiración para la forma del anillo de cera perdida, producido mediante el goteo manual de cera con la ayuda de un pirógrafo.

El anillo de cera se montó en un árbol para fundición a la cera perdida, con un molde provisional de yeso. La fundición se realizó con un sustrato de latón, fundido a 980 °C. Tras la fundición, se retiró el molde provisional y el prototipo se sometió a desbarbado, acabado, pulido y plateado.

La *Figura 1* presenta un diagrama de flujo de los experimentos.

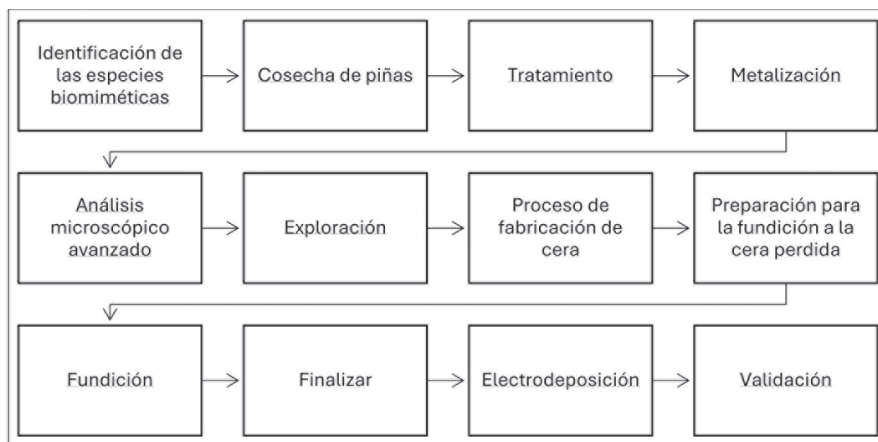


Figura 1. Diagrama de flujo resumen de las etapas de desarrollo del diseño biomimético para joyería (Fuente propia).

Cada paso del diagrama de flujo genera conocimiento y el desarrollo de habilidades relacionadas con el diseño y la producción de joyería biomimética. Entre estos procesos técnicos, se encuentra la percepción de los significados de la piña en el contexto de cada autor, junto con las experiencias con la naturaleza, el pino y el tacto y la textura de la piña. Cada experiencia influyó en las decisiones y acciones en diferentes momentos. Al finalizar el proyecto, el cuerpo valida el prototipo y percibe el peso, la comodidad y el significado de la pieza en su cuerpo.

Resultados y discusiones

El proceso creativo colaborativo resultó en el desarrollo de diseños de joyería inspirados en la piña como medio biomimético. Cabe destacar que el proyecto fusiona lo sensorial y lo conceptual, integrando una secuencia de procesos de laboratorio para el contacto con el universo microscópico. Texturas invisibles emergen de la secuencia presentada en el diagrama de flujo descrito en la Figura 1, donde los pasos de identificación de la especie biomimética y recolección de la piña se destacan en la *Figura 2*.

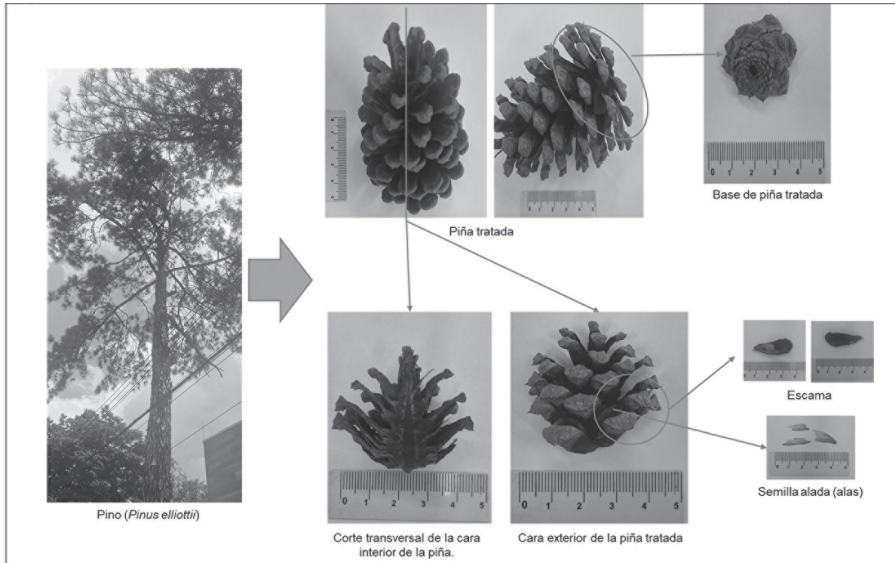
La especie seleccionada para el estudio biomimético fue el pino *Elliottii*, una especie exótica en Brasil, ampliamente utilizada en la producción de papel, celulosa y resina. Su gimnosperma (piña) se desecha como residuo durante el proceso de extracción de madera in situ como medida de gestión ambiental.

La piña se analizó para su estudio morfológico en el desarrollo de piezas de diseño de joyería. El estudio abordó la segregación de sus componentes para investigar texturas y formas, que se utilizarán como referencia en el diseño de un prototipo de anillo. Cabe destacar la coexistencia con la piña.

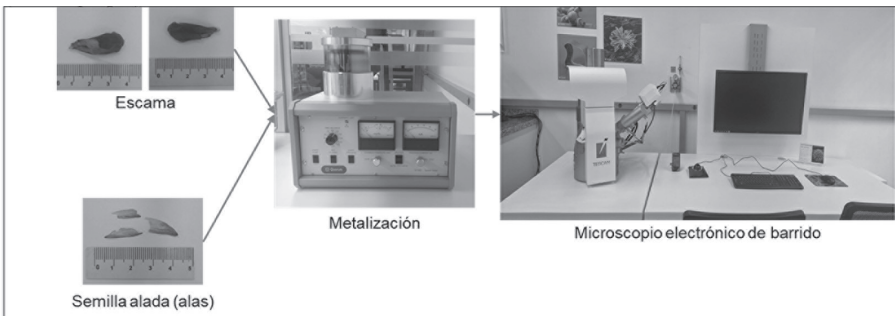
La piña se cortó por la mitad, donde se pudo visualizar la forma triangular jerárquica formada por sus escamas. Entre las escamas, se pudieron apreciar las semillas aladas, lo que permite su dispersión cuando el clima es cálido y las escamas se abren.

Durante el tratamiento con calor para eliminar la humedad, se pudo visualizar este comportamiento higromorfista, ya que al recolectar la muestra después de un día lluvioso, la piña tenía sus escamas cerradas para proteger las semillas. Tras el secado, las escamas se abrieron y las semillas se prepararon para su dispersión a través de las alas adheridas a ellas. Para el estudio morfológico, se analizaron principalmente las escamas y alas de las semillas, así como la macrografía de la propia piña.

El proceso de metalización, como preparación de la muestra de escamas y alas para microscopía avanzada, se puede observar en la *Figura 3*.



2

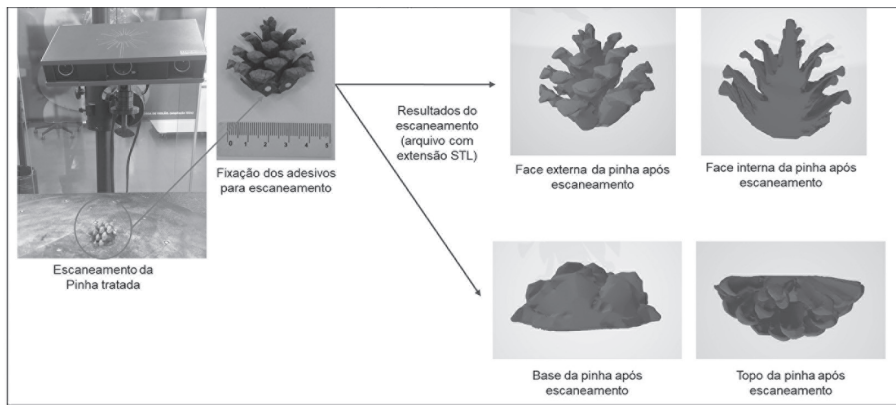


3

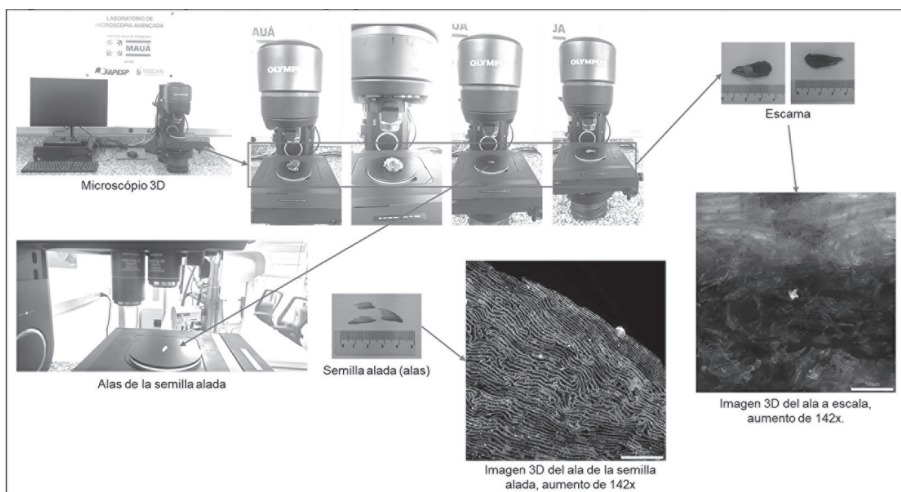
Figura 2. Identificación de la especie biomimética y recolección de la piña (Fuente propia). **Figura 3.** Tratamiento y metalización de la piña para análisis mediante microscopía avanzada (Fuente propia).

El paso de metalización fue necesario para el análisis mediante microscopía electrónica de barrido; para el análisis mediante microscopía 3D, esta preparación no es necesaria. Por lo tanto, la muestra, secada únicamente en horno, se analizó mediante microscopía de barrido y 3D, como se puede observar en las *Figuras 4 y 5*.

El escaneo se realizó con la muestra de la piña cortada por la mitad tras su secado en horno. El escaneo permite crear un dibujo técnico en 3D de la piña con extensión STL, lo que facilita la manipulación de la imagen para adaptar formas y texturas para la impresión 3D o el mecanizado en cera para la fabricación de joyería a gran escala mediante el proceso de fundición a la cera perdida.



4



5

Figura 4. Escaneo 3D de la piña (Fuente propia). **Figura 5.** Microscopía 3D (Fuente propia).

Las imágenes 3D obtenidas con el microscopio 3D muestran estructuras irregulares y sinuosas. En cuanto a la escala, con un aumento de 142x, se observan valles y relieves circulares, que prácticamente representan la forma macroscópica de la piña a escala microscópica.

En la semilla alada, se observaron formas planas con un diseño sinuoso, similar a una huella dactilar.

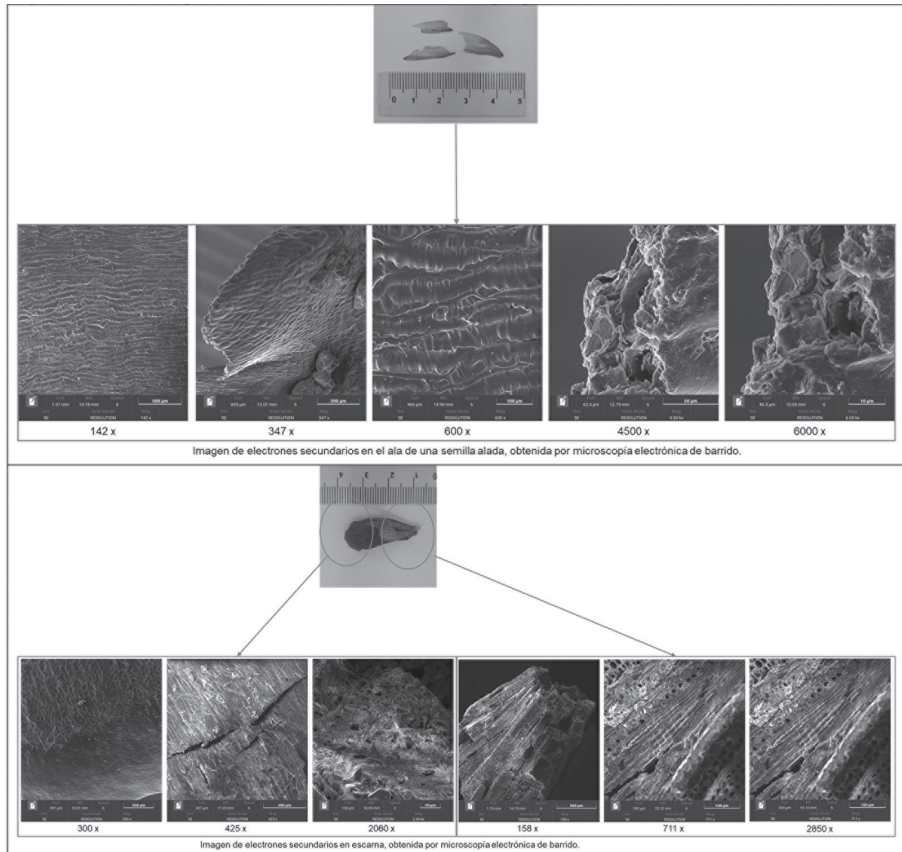
Para complementar el análisis morfológico, se realizó una investigación con un microscopio electrónico de barrido, como se muestra en la *Figura 6*.

Con este proceso, surgen texturas invisibles, como escamas, valles y relieves circulares, visibles también con un microscopio 3D. En la muestra del ala, se identificó una superficie plana con un diseño sinuoso, formando una textura similar a la de una tela o una huella dactilar.

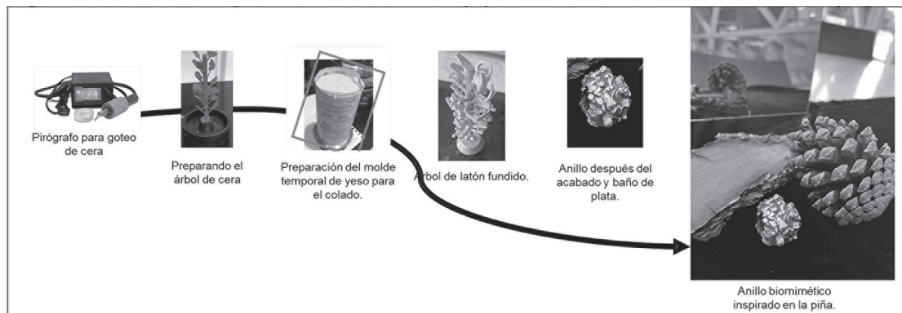
Las morfologías de la piña han impulsado la creación de diseños de joyería mediante la biomimética de la piña.

El proceso adoptado para la fabricación de joyería biomimética fue una combinación de fabricación en banco y fundición industrial a la cera perdida.

Un resumen de los resultados obtenidos se presenta en la *Figura 7*.



6



7

Figura 6. Microscopía electrónica de barrido (Fuente propia). **Figura 7.** Resultados del proceso de fabricación de joyería de sobremesa e industrial (Fuente propia).

La creación del modelo en cera del anillo, inspirado en la biomimética de la piña, se logró mediante formas extraídas mediante microscopía avanzada y esculpidas con pirograbado. Posteriormente, se preparó el árbol en cera y se creó un molde provisional de yeso para su fundición. El proceso de fundición se realizó con un sustrato de latón, seguido de un baño electrolítico de plata. En la imagen de la derecha se pueden ver imágenes comparativas de la piña y el anillo.

Esta comparación muestra la representación de la textura macrográfica de la piña, representada por el goteo de cera en forma de relieves y valles sobre la superficie del metal, como se muestra en la *Figura 8*.



Figura 8. Anillo PINUS de la serie PINUS, 2025 (Fuente propia).

La pieza, acabada con un baño de plata, fue envejecida químicamente para aportar más profundidad a los valles, y los relieves fueron pulidos para resaltar el aspecto escamoso de la pieza, haciendo referencia al objeto biomimético: la piña.

Consideraciones finales

La joyería contemporánea se considera un símbolo de la relación entre el ser humano y la vida, los objetos y la materia. En esta obra, la conexión con la naturaleza posibilita la concepción del proyecto PINNUS, diseñado y construido colaborativamente, que, al tomar forma, forma un cuerpo y expresa el poder del mapa sensorial, la no linealidad, la adaptabilidad y las preguntas y experiencias de los territorios que atraviesan el proceso creativo. En este contexto, emergen en la joyería contemporánea las llamadas texturas invisibles, entendidas como morfologías y materiales que no solo son visualmente aparentes, sino que

se perciben y capturan mediante procedimientos tecnológicos emergentes. Estas texturas se relacionan con respuestas sensoriales, variaciones estructurales, movimientos, interacciones con el entorno y transformaciones durante la experiencia. De este modo, es posible articular el espacio de producción a gran escala con procedimientos de diseño de joyería de sobremesa, integrando conocimientos artesanales y tecnologías avanzadas. Estas articulaciones comunican significados que trascienden la forma y la estructura físicas, incorporando el propio proceso constructivo como parte del lenguaje de diseño, especialmente en propuestas basadas en la biomimesis.

La piña, a su vez, ejemplifica emblemáticamente estos principios al adaptarse a los cambios ambientales y reaccionar ante las inclemencias del tiempo. Desde una perspectiva de diseño y prospectiva, la piña se entiende como un elemento natural que resalta el funcionamiento del mecanismo de sus escamas (brácteas): se cierran en condiciones húmedas, protegiendo las semillas, y se abren en épocas secas, permitiendo su dispersión. Metafóricamente, este comportamiento natural subraya la importancia de la adaptación continua, la capacidad de respuesta y la incorporación de la imprevisibilidad como valores fundamentales en el desarrollo del proceso creativo en el diseño y la joyería contemporáneos.

Expresiones de gratitud: Al Instituto de Tecnología Mauá y al Instituto Mackenzie. Proyecto FAPESP (MEV) n.º 2020/09163-3 y (DSX): n.º 2023/14365-2.

Referencias bibliográficas

- Antonelli, P. (2020). *The natural evolution of architecture*. In P. Antonelli & A. Burckhardt (Eds.), *The Neri Oxman material ecology catalogue* (pp. xx–xx). Museum of Modern Art; Artbook.
- Bachelard, G. (1994). *A poética do espaço*. Martins Fontes.
- Barthlott, F. (2007). Biomimetics for next generation materials. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1861), 2907–2919. <https://doi.org/10.1098/rsta.2007.0004>
- Benyus, J. M. (2016). *Biomimética: Inovação inspirada pela natureza* (1ª ed.). Editora Cultrix.
- Detanico, F. B., Teixeira, F. G., & Silva, T. L. K. (2010). A biomimética como método criativo para o projeto de produto. *Design & Tecnologia*, 1(2), 101–113. <https://www.ufrgs.br>
- Facca, C. A., Carvalho, A. R., Orefice, M. M., Tavares de Moraes, V., & Rocha, C. (2024). Biodiseño y bioaprendizaje: Perspectivas identitarias para un territorio urbano. *Cuadernos del Centro de Estudios de Diseño y Comunicación*, 1, 243–266.
- Facca, C. A., Carvalho, A. R., Tavares, V., & Rocha, C. (2023). Biodiseño y bioaprendizaje: Diálogo con sistemas naturales y complejos. *Cuadernos del Centro de Estudios de Diseño y Comunicación*, 1, 169–185. <https://doi.org/10.18682/cdc.vi178.8643>
- Ferreira, H. F. (2021). *Coleção pau-brasil: A biomimética e o reaproveitamento de resíduos de madeira no design de joias* (Trabalho de conclusão de curso, Bacharelado em Design). Universidade Federal do Maranhão. <https://monografias.ufma.br/jspui/handle/123456789/6443>

- Gerola, A., Robaey, Z., & Blok, V. (2023). What does it mean to mimic nature? A typology for biomimetic design. *Philosophy & Technology*, 36(4), Article 65. <https://doi.org/10.1007/s13347-023-00605-4>
- Deleuze, G., & Guattari, F. (1995). *Mil platôs: Capitalismo e esquizofrenia* (Vol. 1, A. Guerra Neto & C. P. Costa, Trans.). Editora 34.
- Gola, E. (2008). *A joia: História e design* (2ª ed.). Editora Senac São Paulo.
- Hesse, L., Leupold, J., Poppinga, S., Wick, M., Strobel, K., Masselter, T., & Speck, T. (2019). Resolving form–structure–function relationships in plants with MRI for biomimetic transfer. *Integrative and Comparative Biology*, 59(6), 1713–1726. <https://doi.org/10.1093/icb/icz051>
- Manzini, E., & Vezzoli, C. (2016). *O desenvolvimento de produtos sustentáveis: Os requisitos ambientais dos produtos industriais*. Editora da Universidade de São Paulo.
- Mercaldi, M. A., & Moura, M. (2016). Definições da joia contemporânea. In *Anais do 12º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design (Blucher Design Proceedings, Vol. 9, No. 2)*. Blucher. <https://doi.org/10.5151/despro-ped2016-0414>
- Myers, W. (2012). *Biodesign: Nature, science, creativity* (1st ed.). Thames & Hudson.
- Moura, M. (2010). Poéticas do design contemporâneo: A reinvenção do objeto. In *Anais do III Seminário Nacional de Pesquisa em Cultura Visual*. Editora da UFG.
- Nunes, S., Santos, C., Moutinho-Pereira, J., Correia, C., Oliveira, H., Oliveira, J. M. F., Pereira, V. T., Almeida, T., Marum, L., & Dias, M. C. (2016). Physiological characterization and true-to-typeness evaluation of in vitro and ex vitro seedlings of *Pinus elliottii*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 107, 222–227. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.05.039>
- Olmedo, G. M., Hornink, B., Arenhardt, B. B., Nunes, A. J., Oliveira, C., Amaral, I. S., Santos, M. R., Fontana, C., & Oliveira, J. M. (2023). Growth dynamic and climate signals on abandoned plantation of *Pinus elliottii* in Southern Brazil. *Dendrochronologia*, 82, Article 126136. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2023.126136>
- Soares, M. R. M. (2003). *A narrativa das joias e o processo de sua comunicação* (Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro). <https://www.livrosgratis.com.br/ler-livro-online-3728/a-narrativa-das-joias-e-o-processo-de-sua-comunicacao>

Abstract: This article investigates the microscopic structures of the pine cone, obtained through scanning electron microscopy and three-dimensional microscopy. The morphology observed at the microscopic scale serves as inspiration for jewellery design that articulates the micro and the macro, the sensory and the cognitive, and the visible and the invisible. Through the analysis of textures and internal branching patterns from different areas of the pine cone, these structures are interpreted as visual and sensory contributions of environmental meanings, as well as dispersion maps that symbolise processes of release, expansion and transformation associated with biomimetic jewellery design. The idea behind the *PINNUS* project is based on research on the pine tree. This approach reveals the potential of biodesign to create objects that foster a sensitive dialogue between the invisible and the visible while supporting the search for innovative knowledge, broaden-

ing understanding and stimulating new ways of imagining the natural world inspired by biomimicry.

Keywords: Jewellery - Invisible textures - Microscopic structures - Three-dimensional microscopy - Transformation processes - Biodesign - Biomimicry - Environment - Branching structures

Resumo: Este artigo investiga as estruturas microscópicas da pinha, obtidas por meio de microscopia eletrônica de varredura e microscopia tridimensional. A morfologia observada em escala microscópica serve de inspiração para o design de joias que articula o micro e o macro, o sensível e o cognitivo, o visível e o invisível. A partir da análise de texturas e ramificações internas de diferentes áreas da pinha, propõe-se interpretá-las como contribuições visuais e sensoriais de significados ambientais, bem como mapas de dispersão que simbolizam processos de liberação, expansão e transformação associados à joalheria de inspiração biomimética. A ideia do projeto *PINNUS* baseia-se na investigação sobre o pinheiro. Essa abordagem revela o potencial do biodesign para criar objetos que promovam um diálogo sensível entre o invisível e o visível, ao mesmo tempo em que estimulam a busca por conhecimento inovador, ampliando a compreensão e incentivando novas formas de imaginar o mundo natural inspiradas na biomimética.

Palavras-chave: Joalheria - Texturas invisíveis - Estruturas microscópicas - Microscopia tridimensional - Processos de transformação - Biodesign - Biomimética - Ambiente - Ramificações
