

# Sistemas bioaprendidos y bioreceptivos de materiales biocompuestos en Arquitectura

Yomna K. Abdallah <sup>(1)</sup>, Alberto T. Estévez <sup>(2)</sup> y Secil Afsar <sup>(3)</sup>

---

**Resumen:** El bioaprendizaje define un enfoque de diseño que amplía los límites del diseño bioinspirado, más allá de la mera imitación. Este capítulo trata sobre un estudio de caso sobre las fases de investigación llevadas a cabo en el Grupo de Investigación Arquitecturas Genéticas y en el Instituto de Arquitectura Biodigital y Genética (iBAG-UIC Barcelona) sobre el desarrollo de bioactivos: biomateriales y biosistemas. Y se trata también de cómo integrar el bioaprendizaje en la arquitectura, no sólo en la complejidad del diseño formal, sino también para lograr funciones y comportamientos bioactivos complejos, para lograr una sostenibilidad referenciada en los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas. Comportamientos bioactivos que califican una verdadera arquitectura viva.

**Palabras clave:** Bioreceptivo - Materiales Biocompuestos - Bioremediación - Cultivo de Algas - Impresión 3D - Baldosas impresas en 3D - Arquitectura Biodigital - Sostenibilidad

[Resúmenes en inglés y en portugués en las páginas 68-69]

---

<sup>(1)</sup> **Yomna K. Abdallah** es originaria de Egipto, es Subdirectora del iBAG-UIC Barcelona (Institute for Biodigital Architecture & Genetics), del GENARQ (Grupo de Investigación Consolidado y Competitivo Genetic Architectures) y del Máster en Arquitectura Biodigital. Doctora en Arquitectura (2020), Máster en Ciencia Ingenieril y Tecnología (2016), Máster en Artes Aplicadas-Diseño Paramétrico (2016), Graduada en Artes Aplicadas (2012). Es también profesora en la Facultad de Artes Aplicadas de la Universidad de Helwan, Egipto. Ha dirigido proyectos de investigación multidisciplinarios en numerosas universidades. Y ha recibido múltiples subvenciones, fondos y becas, y tiene numerosos artículos publicados en revistas científicas y editoriales de prestigio.

<sup>(2)</sup> **Alberto T. Estévez** es originario de España, Arquitecto (UPC, 1983), Doctor en Ciencias (Arquitectura, UPC, 1990), Historiador del Arte (UB, 1994), Doctor en Letras (Historia del Arte, UB, 2008), con oficina de arquitectura y diseño en Barcelona (1983-hoy). Cuenta con 40 años de docencia e investigación en diversas universidades. Fundador y primer Director de la ESARQ (School of Architecture - UIC Barcelona, 1996), donde ejerce como Catedrático de Arquitectura. Creador del grupo de investigación, máster y doctorado "Historia, Arquitectura y Diseño" (UIC, 1998-hoy), y luego del grupo de investigación, máster y doctorado "Arquitecturas Genéticas" (UIC, 2000-hoy), actualmente Máster de Arquitectura Biodigital. Así como impulsor del Máster de Cooperación Internacional con

Alex Levi y Amanda Schachter (UIC, 2004-hoy). Con más de dos centenares de publicaciones, decenas de exposiciones, congresos y comités, e invitado a impartir más de 100 conferencias internacionales sobre sus ideas y trabajos. Ha sido Director de 25 tesis doctorales, y de más de cien tesis de máster y grado. Con 6 sexenios de investigación oficialmente reconocidos. Fundador-Director del iBAG-UIC Barcelona (Institute for Biodigital Architecture & Genetics), y Fundador del Doctorado en Arquitectura de la UIC Barcelona, del que ha sido su primer Director. Últimamente fue también Vicerrector-Gerente de la UIC Barcelona (Universitat Internacional de Catalunya).

<sup>(3)</sup> Secil Afsar es originaria de Turquía, es miembro del iBAG-UIC Barcelona (Institute for Biodigital Architecture & Genetics), miembro del GENARQ (Grupo de Investigación Consolidado y Competitivo Genetic Architectures), y fue profesora del Máster en Arquitectura Biodigital de la ESARQ-UIC Barcelona, la School of Architecture de la Universitat Internacional de Catalunya. Dirigida ahí por Alberto T. Estévez y Yomna K. Abdallah, actualmente está cursando el Doctorado en Arquitectura, graduándose antes como Máster en Arquitectura Biodigital (2019). Anteriormente también, se graduó en el Departamento de Ingeniería Química y Biológica de la Universidad de Koc con una media beca (2016). Después de graduarse, trabajó como ingeniera de desarrollo de procesos en una empresa de biotecnología financiada por H2020 durante dos años. Y al final de su maestría en 2019 comenzó una pasantía en el Fab Lab Barcelona, donde aprendió a construir nuevas herramientas y a mejorar sus habilidades en tecnologías de fabricación integradas de diseño computacional. Con ello tuvo la oportunidad de contribuir a los proyectos europeos Foodshift y Siscode como desarrolladora de productos durante ese período de prácticas. Hasta el momento, ha sido coautora de diferentes capítulos de libros y artículos académicos. Y ahora está trabajando como asistente de fabricación en IAAC Barcelona.

## 1. Introducción (resumen de la arquitectura bioreceptiva)

Este capítulo informa sobre los resultados de un proceso de bioaprendizaje para diseñar e imprimir en 3D sistemas bioactivos de materiales biocompuestos, planificados para albergar varias cepas de algas con fines de sostenibilidad en la arquitectura. Esta combinación de biomateriales y agentes bioactivos para producir biosistemas puede lograr un cambio a prácticas sostenibles en la producción de energía renovable, a través de biocatálisis, bioluminiscencia y bioremediación, para mitigar la huella de CO<sub>2</sub>. Además, proporciona una metodología de integración de tecnología de fabricación avanzada, optimizada, con ingeniería de materiales y prácticas de cultivo microbiano, que, en conjunto, representa los tres ejes principales del sistema propuesto.

Aunque la integración de superficies bioreceptoras en la aplicación arquitectónica ha comenzado a activarse recientemente durante las últimas dos décadas, no podemos asumir que las superficies bioreceptoras son una invención, ya que han existido desde siempre, desde el comienzo de la vida en este planeta. Las superficies bioreceptoras son las super-

ficies que ofrecen un anfitrión para los organismos vivos, a las que pueden adherirse, proliferar sobre o dentro de ellas, y hacer crecer sus comunidades. Estas superficies en la naturaleza varían entre no tener vida, vivir por sí mismas, o necesitarse mutuamente, anfitrión y huésped. Como los árboles que sustentan el crecimiento de líquenes, musgos, hongos, y otras especies vegetales o animales, sobre sus texturados troncos, raíces, hojas, o en su interior. O como animales, como esponjas marinas y anémonas que albergan microbios, plantas o animales más pequeños. Y seres no vivos, como rocas, que dentro de su textura rugosa proporcionan un nicho para que varios micro-seres vivan y prosperen, sobre o dentro de ellas. Sin embargo, para evitar confundir la bioreceptividad con la simbiosis, el estudio aquí presentado se centra en huéspedes bioreceptores no vivos, o superficies bioreceptoras pasivas. Estas superficies aprovechan sus características geométricas o su composición química para poder proporcionar un microambiente adecuado para los agentes bioactivos vivos que albergan.

Recientemente han aparecido múltiples ejemplos de integración de superficies bioreceptoras en la arquitectura, como fachadas arquitectónicas, o productos y elementos arquitectónicos. Algunos de estos ejemplos emplean sólo las características geométricas de la superficie para proporcionar nichos en los que habiten los organismos, como las fachadas de hormigón bioreceptivo de Cruz (2017), y los paneles bioreceptivos de Mustafa (*et al.*, 2021) que experimentaron diferentes geometrías para probar su capacidad de albergar musgo. Otra práctica de la investigación recogida en estas líneas se ha dedicado a controlar las características químicas del hospedante. Como el estudio realizado por Veeger (*et al.*, 2021), que diseñó una composición química de un hormigón bioreceptivo para hospedar musgo y diferentes plantas. Pero, dado que la mejor práctica es optimizar tanto la composición química como la geométrica de un material, para crear una superficie bioreceptiva optimizada, así, la presente investigación se centra en optimizar tanto el material biocompuesto como la capacidad de recepción de la composición geométrica de la superficie bioreceptora. Por lo tanto, la cuestión en este estudio es diseñar una geometría que pueda emplearse con éxito como una superficie bioreceptora para la inmovilización celular pasiva, así como optimizar la composición del biocompuesto para una máxima adhesión y promoción del crecimiento.

### 1.1. Bioreceptividad pasiva

Las superficies bioreceptoras pasivas se utilizan para sistemas de inmovilización celular pasiva que se emplean en diversas aplicaciones industriales y biotecnológicas. Un sistema de inmovilización celular pasiva aprovecha la tendencia natural de muchos microorganismos (como las microalgas) de adherirse a las superficies y crecer sobre ellas (Robinson *et al.*, 1986). Esto sirve para inmovilizar células en varios tipos de transportadores (Codd, 1987). Este tipo de inmovilización es fácilmente reversible, sin embargo aún necesita más investigación y optimización debido a desafíos como el mantenimiento, la circulación de nutrientes y de oxígeno, para mantener vivas a las células, y la gestión no contaminante de los efluentes. Los materiales bioreceptores para la inmovilización pasiva pueden ser naturales o sintéticos. Por ejemplo, las esponjas de luffa, que son soportes fibrosos, del fruto de diferentes especies

del género *luffa*. No son tóxicas ni reactivas, son baratas, mecánicamente fuertes, y estables en cultivos a largo plazo. Así, Akhtar (*et al.*, 2004) utilizaron una esponja de *luffa* para inmovilizar células de *Chlorella*, para la eliminación de níquel (II) de soluciones acuosas. Aunque alguna literatura mencionó el uso de materiales sintéticos o procesados como poliuretano u otros plásticos, vidrio y otros materiales para la inmovilización pasiva, como en Danilov & Ekelund, (2001) o en Ghosh & Gaur (1998), y en otros lugares, estos experimentos no se centraron en el efecto del diseño geométrico sobre la unión de las células de algas y la eficiencia de la superficie bioreceptora para la técnica de inmovilización celular. Por lo tanto, el estudio aquí presentado se enfoca en desarrollar un sistema bioreceptivo basado en materiales biocompuestos, que pueden lograr la inmovilización pasiva de varias cepas de algas, que varían en escala, morfología y función, mientras emplean patrones biocomportamentales sofisticados, bioaprendidos, para lograr el máximo rendimiento celular, apego e inmovilización.

## 2. Materiales y métodos (estudio de caso)

El estudio experimental se diseñó para desarrollar superficies bioreceptoras en forma de baldosas que se pueden integrar en el entorno construido, ya sea en el exterior o en el interior. Esto se llevó a cabo a través de múltiples pasos que incluyen un proceso de bioaprendizaje, el desarrollo funcional de patrones de comportamiento biológico, la preparación de material biocompuesto, y la impresión 3D.

### (a) Proceso de bioaprendizaje

El proceso de bioaprendizaje del trabajo aquí relatado tuvo un doble objetivo: la práctica de enseñar a estudiantes de posgrado y nivel de maestría sobre cómo diseñar un sistema bioactivo/bioreceptivo para lograr la sostenibilidad en el entorno construido, y cómo aprender de los agentes bioactivos sus lógicas biocomportamentales para extraer sus patrones fisiológicos que relacionan sus formas con sus funciones. Para lograr esto, se propuso como objetivo crear baldosas bioreceptivas para diversas funciones de bioremediación o bioproducción, de cara a lograr la sostenibilidad del entorno construido, a un grupo de 12 estudiantes internacionales, 6 mujeres y 6 hombres, de diversas procedencias culturales y con distintos antecedentes educativos.

#### *I. Teoría*

Posteriormente, los participantes fueron introducidos a un esquema de trabajo equilibrado teórico/práctico donde se les introdujo en las prácticas biotecnológicas y emergentes de diseño, hacia una arquitectura bioactiva que integra organismos vivos reales, o microorganismos, en sus sistemas para lograr diversas funciones como bioremediación (mitigación de CO<sub>2</sub>, descomposición de contaminantes, biosensores) y bioproducción (O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, alimentos, subproductos, materiales, etc.), con varios ejemplos actualizados y estudios de vanguardia. Luego, se presentó a los estudiantes una descripción general de la práctica actual de bioarte y bioarquitectura, y sus subdivisiones y clases, así

como una introducción a las prácticas de cultivo de microbiología y los procedimientos de composición de materiales biocompuestos.

### *II. Trabajo de laboratorio digital*

Esta introducción teórica fue seguida por un trabajo de laboratorio para desarrollar los algoritmos biocomportamentales y generar las formas de las baldosas. La biosimulación y los patrones biogenerativos se desarrollaron con Rinoceros 3D + Grasshopper, y complementos de apoyo (Kangaroo, Rabbit, Culebra, Anemone, Dendro), y se prepararon para impresión 3D con Rinoceros 3D + Grasshopper.

#### **(b) Composición de material biocompuesto**

Se desarrollaron dos recetas principales de materiales biocompuestos en función de la sostenibilidad, disponibilidad y asequibilidad de sus ingredientes, ya que debían extraerse principalmente de los desechos de alimentos, conchas marinas y cáscaras de huevo, así como de su efecto potencial para impulsar el crecimiento de las cepas de algas escogidas, que se inocularían en las baldosas bioreceptoras en un paso posterior. La primera receta contenía 100 g de agua, 24 g de goma de xantio, 100 g de polvo de cáscara de huevo, 1,2 g de ácido cítrico, 3 g de glicerol y 10 g de azúcar en polvo. Mientras que la segunda receta contenía 100 g de vinagre (ácido acético (1% (v/v)), 4 g de quitosano, 100 g de concha en polvo, 3 g de glicerol, 10 g de azúcar en polvo. Cada receta se preparó en sala, a una temperatura de 25°C, y totalmente mezclado para evitar la presencia de bolsas de aire que pudieran complicar el siguiente proceso de impresión 3D.

#### **(c) Bioimpresión**

Cada receta alimentó una jeringa de 5 mm de diámetro, conectada a una impresora 3D Ender-3 Creality (impresora FDM reconvertida para biocompuestos), con unas dimensiones de 220 x 220 x 250 mm, y conectada a un compresor de aire de 6 bar para empujar el material a través del tanque (jeringa) y fuera de la boquilla (la punta de la jeringa). Cada diseño digital fue examinado por un algoritmo de corte, para simular el proceso de impresión y asegurarse de que no hubiese puntos flotantes, ni ángulos colgantes, ya que el proceso de impresión del biocompuesto se pensó para no usar ningún soporte, a fin de no desperdiciar material y mantener todo el proceso lo más sostenible posible. Después de examinar los diversos diseños digitales con el algoritmo de corte, los diseños se optimizaron para la impresión 3D mediante la optimización del código G de impresión, para seguir una ruta continua desde el inicio de la impresión 3D hasta el final, sin retracción ni rutas entrecruzadas. Este paso también se realizó para reducir el tiempo de impresión de cada diseño, y reducir así la energía y la carga de trabajo necesarias en la impresora 3D, manteniendo de nuevo la máxima sostenibilidad en el proceso de producción. Luego, las impresiones se dejaron secar durante dos días a temperatura ambiente.

#### **(d) Prueba de fidelidad de forma**

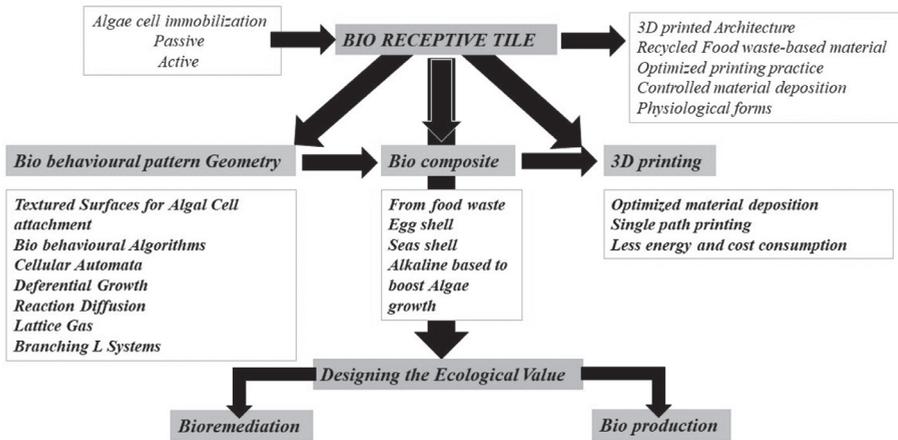
Después de completar el proceso de impresión de todos los diseños con ambas recetas de biocompuestos (a base de cáscaras de huevo y a base de conchas marinas), todas las

impresiones se compararon con sus modelos digitales, para verificar su fidelidad de forma después de la impresión y el secado. Entonces se seleccionaron las impresiones idénticas óptimas para el siguiente paso de inoculación con algas, etapa que se presentará en una próxima publicación.

### 3. Resultados y discusión

#### (a) Proceso de bioaprendizaje

La introducción ampliada sobre el objetivo del estudio que se les dio a los participantes fue un desafío para ellos, el comprender la interconectividad y la interdisciplinariedad de los parámetros de estudio, y cómo lograr o decidir sobre la función ecológica que se basa en la bioremediación en términos de mitigación de dióxido de carbono, o biodegradación de contaminantes orgánicos y químicos, como metales pesados y productos farmacéuticos (Abdallah & Estévez, 2023), o la bioproducción de oxígeno, hidrógeno, alimentos, nutrientes, etc. Otro aspecto desafiante fue comprender la relación entre el diseño geométrico y la bioreceptividad, y su papel en la inmovilización celular y en la fijación de cultivos de algas. Además, el método de diseño generativo basado en el comportamiento fisiológico de los propios agentes bioactivos (algas) que deben fijarse en las baldosas biorreceptoras fue otro aspecto que requirió una extensa investigación, para comprender la relación de la fisiología de las algas con su morfología y fases de desarrollo. Si bien se presentaron ejemplos de estudios experimentales similares, previos y publicados (Abdallah *et al.*, 2019; Castillo *et al.*, 2021; Jafaari *et al.*, 2021). Finalmente, las interacciones químicas y biocompatibles entre los materiales biocompuestos desarrollados en este estudio y la cepa de algas eran otra cuestión que necesitaba investigación (Este estudio interdisciplinar y sus parámetros interconectados e interdependientes se presentan en la *Figura 1*).



**Figura 1.** Los parámetros multidisciplinares interconectados que controlan el diseño y la fabricación de la baldosa bio-receptiva.

Por lo tanto, esta fase de bioaprendizaje tuvo como objetivo crear un enfoque de innovación libre basado en la investigación, y basado en la creación de una red de parámetros interdependientes y su metodología, herramientas y criterios de eficiencia. Para ello, a los participantes se les dio a conocer el estado del arte, la metodología y las herramientas en la siguiente fase que identificó la teoría.

### *I. Teoría (estado del arte, criterios científicos, metodología, herramientas, flujo de trabajo)*

Después de estimular la curiosidad y el interés de los participantes sobre el objetivo del estudio, que trata de crear baldosas bio-receptoras para la inmovilización de cultivos de algas, de cara a la bioremediación o bioproducción, se les presentó el estado del arte de esta práctica (Abdallah, 2020) que incluye: i1) Procesos biológicos en la práctica del diseño (Abdallah, 2020), y que implicó la introducción al bioarte y al biodiseño que integra organismos vivos y prácticas biotecnológicas como en Vasquez y Vega (2019), y en Castle (2009), así como una introducción básica al cultivo microbiano centrado en el cultivo de algas.

i2) Procesos biológicos en la construcción (Abdallah *et al.*, 2020; Vesely, 2006; Rosano & Ceccarelli, 2014), que implica la introducción a biomateriales y sus distintas clases, basadas en el nivel de integración y en la bioactividad del agente bioactivo (biobasado, bioactivo, biocompuesto, biodiseñado, y biosintetizado) (Mayoral, 2012; Architectmagazine.com, 2022), así como bioprocesos

que incluyen ingeniería y síntesis con numerosos ejemplos del estado del arte actual (Sample, 2020).

Luego, se presentó a los estudiantes una introducción de histofisiología (Abdallah, 2020), que muestra la relación entre las células microbianas y la lógica formal de los tejidos con su función, dando varias escalas de relatividad y compatibilidad, como intracelular y extracelular (comunicación de célula a célula, o de célula a entorno, como por ejemplo, la quimiotaxis o la detección de quórum), a partir de las cuales pueden explotarse funciones biológicas y ecológicas, como la biocatálisis y la bioremediación (Skotheim & Mahadevan, 2005; Brand & Gow, 2009; Wu *et al.*, 2006; Abisado *et al.*, 2018). Seguido todo de una introducción a los métodos de bioimagen, con varios tipos de microscopios, y cómo identificar el tipo de microscopio, el nivel de aumento, y el nivel de invasión en la preparación de la muestra, el campo y el objetivo, para ver varias escalas de interacciones bioquímicas que ocurren dentro o fuera de un organismo (Lee *et al.* 2017; Kikuta & Ishii, 2012; Chen *et al.*, 2017), y la posibilidad de tener estudios microscópicos estáticos o dinámicos, y sus diversos métodos como *time-lapse*, cryo-imágenes, etc. Ejemplos de microscopios que incluyen estereó, fluorescencia confocal, hoja de luz, TEM, SEM, CT y MRI (Abdallah, 2020). Después de esta fase de bioaprendizaje vino la fase más importante, de biomodelado, que involucró una amplia introducción a los algoritmos de biocomportamiento, biogeneración y biosimulación, comenzando con la categorización de los procesos biológicos como intracelulares y extracelulares, y luego pasando al modelado biomatemático básico universal de Cellular Automata, con sus tipos, que incluyen Von Neuman y Moore grid CA, y su forma desarrollada de Conway Game of life, y clases estocásticas que incluyen reacción-difusión, crecimiento deferente, modelos de gas de celosía, y modelos de solidificación (Krawczyk *et al.*, 2003; Wei *et al.*, 2016; Lundh, 2007; Giannopoulou *et al.*, 2019), pasando por Random Walk, con sus subclases, movimiento browniano, swarming, branching, con sus subclases, y modelos basados en agentes (Ratliff, 2006; Lundh, 2007).

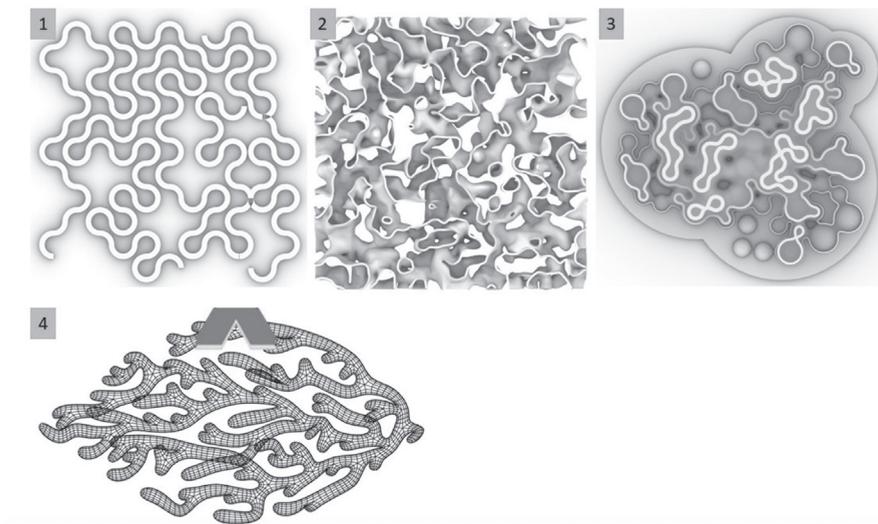
Después de esto a los participantes se les presentó la composición de materiales biocompuestos y recetas de variantes, y los fundamentos químicos de la composición de un material biocompuesto y sus propiedades mecánicas y químicas, antes de iniciar el proceso de diseño generativo biodigital.

## II. Laboratorio digital: diseño y personalización biodigital

Por fin, cada participante comenzó a desarrollar un diseño biodigital basado en la investigación que realizó, y siguiendo sus objetivos específicos designados de bioremediación y bioproducción a través de la inmovilización de algas en las superficies bioceptoras. La mayoría de las funciones ecológicas elegidas por los participantes fueron la bioremediación (mitigación de dióxido de carbono, y biodegradación de metales pesados y contaminantes químicos) y la producción de biomasa de algas como fuente alternativa de proteínas y vitamina B12 para usos dietéticos. Mientras, las lógicas bioconductuales y sus

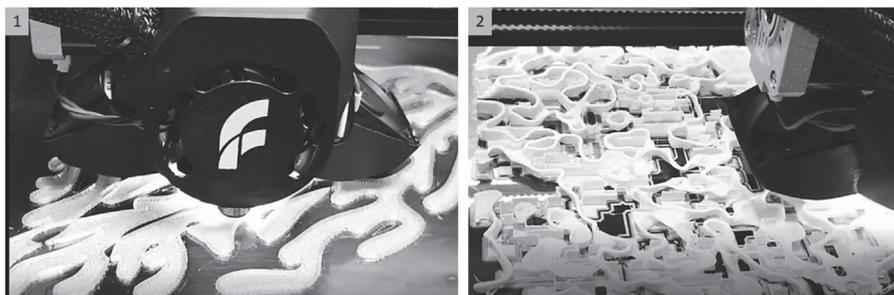
consecuentes patrones iban desde sistemas L ramificados y autómatas celulares del juego de la vida de Conway, hasta crecimiento diferencial, gas de celosía, y patrones de Voronoi. Para estas lógicas los participantes utilizaron Rhinoceros 3D + Grasshopper + Kangaroo / Dendro / Rabbit / Anemone. Después de eso cada estudiante personalizó los patrones generados biológicamente en las dimensiones de una caja de baldosas bioreceptivas (máximo de 15 x 15 x 2 cm y mínimo de 5 x 5 x 2 cm). Además de estudiar las iteraciones y variaciones formales de las baldosas, en función del nivel de personalización y de los procesos del patrón biogenerado, y resolver los métodos de teselado de tales baldosas. La Figura 2 muestra algunos de los modelos digitales generados de los mosaicos bioreceptivos desarrollados por los estudiantes del mencionado Máster en Arquitectura Biodigital (curso 2021-2022).

La *Figura 2* exhibe los modelos digitales resultantes de la fase de diseño digital biogenerativo. (1) Diseño de Niktasadat Tavakolimahramnezhad siguiendo una lógica del juego de la vida CA de Conway. (2) Diseño de Iliya Mela siguiendo un patrón giroide resultante del modelo de reacción-difusión de CA. (3) Diseño de Maria Luz Schiaffi siguiendo igualmente el juego de Conway de autómatas celulares con modelo de crecimiento diferencial. (4) Diseño de Natalia Correa siguiendo una lógica de sistema L ramificado.



**Figura 2.** Modelos digitales resultantes de la fase de diseño digital biogenerativo.

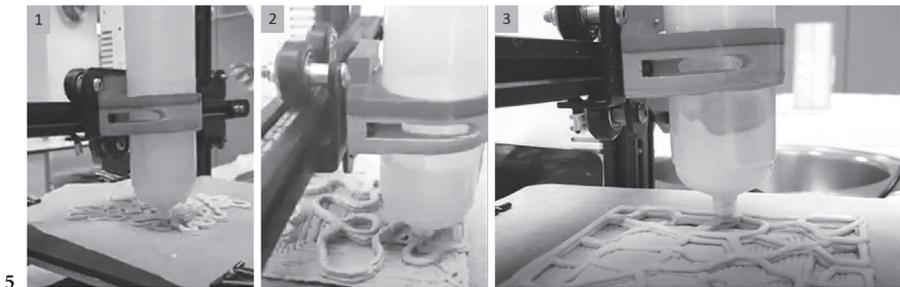
Después de llegar a los diversos diseños digitales de la baldosa biorreceptiva, cada diseño se probó con un algoritmo de corte específico, para asegurarse de que no haya ángulos colgantes o voladores que requieran configuraciones de impresión especiales, como soportes, para mantener el proceso de impresión 3D más sostenible, con menor consumo de material y deposición controlada de material. Luego se utilizó otro algoritmo, para personalizar el código G e imprimir una ruta continua sin retracción, o ruta de cruce automático, y así preparar los diseños para su impresión. Entonces, los modelos físicos de PLA se imprimieron en 3D con la impresora 3D de escritorio Felix Pro, para verificar la capacidad de impresión de los diseños y la eficiencia de los códigos G personalizados. La *Figura 3* muestra el proceso de impresión 3D de algunos de los modelos de las baldosas biorreceptoras impresas en PLA.



**Figura 3.** El proceso de impresión 3D en PLA de algunos de los modelos de baldosas biorreceptivas generativas biodigitales. 1. Diseño de Natalia Correa siguiendo una lógica ramificada del sistema L. 2. Diseño de Iliya Mela siguiendo un patrón giroide resultante del modelo CA de reacción-difusión.

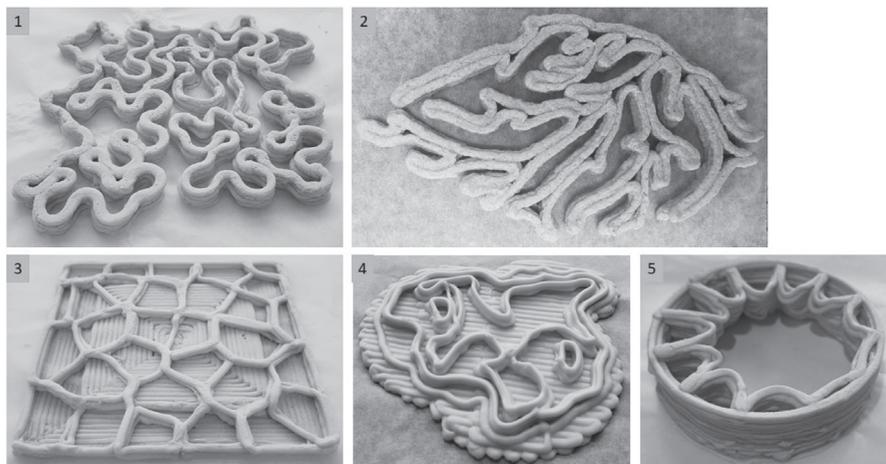
### (b) Composición de materiales biocompuestos y bioimpresión

Después de llegar a la consecución del código G de cada uno de los diseños digitales de los participantes, y preparar las dos recetas de los materiales biocompuestos (basado en cáscara de huevo y basado en concha marina), a cada uno se le presentó el flujo de trabajo del proceso de impresión 3D de biocompuestos. La *Figura 4*, muestra la preparación del material biocompuesto para su impresión 3D, y la *Figura 5* muestra el proceso de impresión 3D de los diseños de las baldosas biorreceptivas con las dos recetas de materiales biocompuestos. Mientras que la *Figura 6* muestra algunos de los resultados alcanzados en los diseños de las baldosas biorreceptivas impresas en 3D.



**Figura 4.** Flujo de trabajo del proceso de impresión 3D de biocompuestos. (1) Preparación del material biocompuesto siguiendo las dos recetas, a base de cáscara de huevo y a base de concha marina (en la fotografía, de izquierda a derecha, Nicholas Bonne, Maria Luz Schiaffi y Cristóbal Becker). (2) Calibración de la impresión 3D con la receta biocompuesta basada en conchas marinas (examinando la capacidad de impresión, la impresión posterior de retención de forma y el efecto de hinchazón). (3) Preparación de la impresora 3D para comenzar un nuevo trabajo de impresión ajustando el sellado y el nivel de la cama de impresión (en la foto Maria Luz Schiaffi). (4) Proceso de impresión 3D del diseño de baldosa biorreceptiva de Nicholas Bonne, desde la prueba del código G en el software de impresión Repetier Host hasta el inicio de la impresión con la impresora 3D Ender-Creality.

**Figura 5.** El proceso de impresión 3D de biocompuestos de algunos de los diseños de los participantes para una baldosa bioreceptiva. (1) Diseño de Niktasadat Tavakolimahramnezhad, siguiendo la lógica del juego de vida CA de Conway. (2) Diseño de Iliya Mela, siguiendo un patrón giroide resultante del modelo de CA reacción-difusión. (3) Diseño de Harish Daruari, siguiendo una lógica Voronoi. La figura muestra las dos recetas: la de cáscara de huevo en el número 2, y la de conchas marinas en los números 1 y 3. Las dos recetas tienen diferente tamaño de partícula y homogeneidad de la mezcla, ya que la receta a base de cáscara de huevo tiene más textura que la de conchas marinas. Esta textura desempeñará un papel importante en la hidrofiliidad y en la unión de las células de las algas, en la inmovilización del cultivo de algas escogido para alojarse en las baldosas biorreceptoras, algo que se expondrá en detalle en una publicación siguiente, ya que está fuera del alcance del presente trabajo que tiene como objetivo informar del proceso de bioaprendizaje de diseño e impresión de una baldosa bioreceptiva a partir de un material biocompuesto para una función ecológica y sostenible concreta.



**Figura 6.** Baldosas biorreceptivas de biocompuestos impresos en 3D. (1) La de Niktasadat Tavakolimahramnezhad, impresa con una receta de biocompuesto a base de cáscara de huevo. (2) La de Natalia Correa, impresa con un biocompuesto de cáscara de huevo. (3) La baldosa biorreceptiva de Harish Daruari, impresa con biocompuesto de conchas marinas. (4) La de María Luz Schiaffi, igualmente impresa con biocompuesto de conchas marinas. (5) El de Milad Mehdizadeh, impreso con biocompuesto también a base de conchas marinas. El proceso de impresión 3D fue realizado por una impresora 3D FDM Ender-Creality modificada.

### (c) Fidelidad de forma

Como se muestra en la *Figura 6*, hubo diferencias significativas en la fidelidad de la forma entre los diferentes diseños, de acuerdo principalmente con la geometría y los procedimientos de personalización que se llevaron a cabo para optimizar su impresión en modo de una sola pasada. Este efecto es muy evidente al comparar las baldosas impresas en 3D con sus diseños digitales. Por ejemplo, el diseño de María Luz Schiaffi (el número 4 de la *Figura 6*, y el número 3 de la *Figura 2*), perdió el 80% de sus detalles en el proceso de impresión por dos razones: el primer motivo es el hinchamiento de la pasta, posterior a la impresión (con una base de conchas marinas), y la mala adherencia capa a capa, a pesar de la coherencia de la imprimibilidad de esta pasta, y el segundo motivo es el proceso de personalización de un trazado en el que no encajaba la escala de los detalles de este diseño en particular. Otro ejemplo es el diseño de Niktasadat Tavakolimahramnezhad (el número 1 de la *Figura 6*, y el número 1 de la *Figura 2*), y el diseño de Natalia Correa (el número 2 de la *Figura 6*, y el número 4 de la *Figura 2*): ambos lograron un 95% de fidelidad de forma y de similitud con sus diseños digitales, debido al hecho de que estos dos modelos ya se generaron como modelos lineales (basados en trayectorias), y no como modelos basados en superficies, cuyo nivel de complejidad no tiene detalles en una escala menor. Esto ha

facilitado su impresión y la retención de su forma después de la impresión. Mientras que los modelos basados en una superficie, como el modelo de Maria Luz Schiaffi, o como el modelo de Harish Daruari (el número 3 de la *Figura 6*), resultaron con una menor fidelidad de forma y un menor nivel de precisión.

Si bien las superficies con detalles multiescalares y submilimétricos son favorables para actuar como superficies bioreceptoras, la práctica actual de la impresión 3D con pastas no permite el detalle a menor escala, debido al tamaño de la boquilla de la impresora, que también está relacionado con la viscosidad de la pasta. Durante el proceso de impresión ambas pastas (recetas) obstruían la boquilla de impresión de vez en cuando, debido a su alta viscosidad, que es una característica importante para permitir la retención de la forma posterior a la impresión. Sin embargo, la capacidad de retención de la forma no fue igual entre las dos pastas, ya que la pasta con un tamaño de partícula más grande (cáscara de huevo) logró una mejor retención de la forma y no se hinchó, como se muestra en la *Figura 6* (1 y 2). A diferencia de la pasta a base de conchas marinas, que era más homogénea y coherente, pero que sin embargo sufría por ello de hinchazón y de una fidelidad de forma deficiente después de la impresión, como se muestra en la *Figura 6* (3, 4 y 5). Además, la pasta de textura rugosa pero con un tamaño de partícula menor proporciona microporos como nichos para facilitar el anclaje y la unión de las células de algas. Estas observaciones corresponden a la eficiencia del diseño geométrico y las propiedades físicas de la pasta, que facilitan la inmovilización pasiva de las células de algas (*Las propiedades mecánicas y químicas detalladas de cada pasta se examinarán y publicarán en una publicación siguiente*).

## Conclusión

En definitiva, este capítulo ha presentado un estudio de caso completo, desde el bioaprendizaje, el biomodelado, y hasta la bioimpresión y el análisis de los resultados. Este proceso ha logrado múltiples objetivos: dominar el proceso de bioaprendizaje desde el diseño hasta la producción:

- dominar el proceso de bioaprendizaje desde el diseño hasta la producción;
- dominar casos interdisciplinarios de diseño/investigación con parámetros múltiples;
- ampliar los límites de la práctica arquitectónica para abarcar procesos biotecnológicos, como cultivo de microalgas, bioensayos, biodegradación, producción de biomasa, y relacionar con éxito el diseño geométrico y arquitectónico con estos criterios biotecnológicos;
- lograr la generación de lógicas biomatemáticas y biocomportamentales basadas en la fisiología formal y el acoplamiento de forma y función;
- lograr la personalización del diseño digital para la impresión 3D con deposición controlada de material y consumo de energía minimizado;
- lograr la preparación, calibración e impresión 3D de materiales biocompuestos.

Los resultados logrados por cada uno de los participantes han demostrado el éxito del enfoque de enseñanza y práctica del bioaprendizaje, para utilizar el bioaprendizaje, para

desarrollar una baldosa bioreceptiva a partir de biocompuestos, para la inmovilización de cultivos de algas con diversas funciones ecológicas. Por lo tanto, se recomienda integrar las prácticas biotecnológicas y de bioingeniería en los programas de estudio de (por lo menos) posgrado en arquitectura (maestría y doctorado), para establecer un enfoque factible de cara a lograr una mayor sostenibilidad y un diseño más ecológico en el entorno construido, ya que hoy en día es una necesidad esencial para mitigar la escalada del efecto de calentamiento global y sus consecuentes cambios climáticos.

### **Agradecimientos**

*Este trabajo no hubiera sido posible sin el entusiasmo y el trabajo dedicado de los estudiantes de posgrado del Máster en Arquitectura Biodigital del curso 2021-2022. Ellos han demostrado que los nuevos métodos y enfoques en la enseñanza de la arquitectura pueden ser muy agradables, interesantes y fructíferos, por lo que dedicamos este trabajo a todos ellos: Natalia Correa, Niktasadat Tavakolimahramnezhad, Maria Luz Schiaffi, Ozge Gonlugur, Harleen Kaur, Iliya Mela, Harish Daruari, Nicholas Bonne, Milad Mehedizadah, Cristobal Becker, Frank Henderson y Patrick Kircher. Y hay también que expresar gratitud a la ESARQ-UIC Barcelona, la School of Architecture de la Universitat Internacional de Catalunya, por su apoyo y por facilitar la práctica experimental.*

## **Referencias**

### **Referencias**

- Abdallah, Y. K., & Estévez, A. T. (2023). Integrating *Chlorella vulgaris* and *Monoraphidium contortum* in Architectural Systems for the Biodegradation of Sulfamethoxazole from Wastewater. En D. S.-K. Ting & J. A. Stagner (Eds.), *Nourishing Tomorrow: Clean Engineering and Nature-friendly Living*. World Scientific.
- Abdallah, Y. K. (2020). Bio Lab: Biosystems and Bioprocesses Workshop. Master of Biodigital Architecture and Genetics, 2020, ESARQ\_UIC Barcelona, Universitat Internacional de Catalunya. Lectures on Biological Processes in Design, Construction; Histophysiology; Bioimaging and Mathematical Modelling.
- Abdallah, Y. K., Estévez, A. T., Tantawy, D. E. D. M., Ibraheem, A. M., & Khalil, N. M. (2019). Employing Laccase-Producing *Aspergillus sydowii* NYKA 510 as a Cathodic Biocatalyst in Self-Sufficient Lighting Microbial Fuel Cell. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 29(12), 1861-1872.
- Abisado, R. G., Benomar, S., Klaus, J. R., Dandekar, A. A., & Chandler, J. R. (2018). Bacterial Quorum Sensing and Microbial Community Interactions. *mBio*, 9(5).
- Akhtar, N. (2004). Removal and recovery of nickel (II) from aqueous solution by loofa sponge-immobilized biomass of *Chlorella sorokiniana*: characterization studies. *Journal of Hazardous Materials*, 108(1-2), 85-94.

- Architectmagazine.com. (2022). <http://www.architectmagazine.com/practice/bacteria-activated-wallpaper-that-generates-electricity> [Recuperado 31 Agosto, 2022].
- Birkhäuser, 2005. *Genetic Programming and Evolvable Machines*, 8(1), pp. 105-106.
- Brand, A., & Gow, N. A. (2009). Mechanisms of hypha orientation of fungi. *Current Opinion in Microbiology*, 12(4), 350-357.
- Castillo, J., Gennett, A., Estévez, A. T., & Abdallah, Y. K. (2021). Employing *Columba livia* Swarmal Patterns in Designing Self-Sufficient Photo Bioreactor of *Chlorella spp* Cultivation in Plaça de Catalunya. En J. A. Stagner & D. S-K. Ting (Eds.), *Renewable Energy for Mitigating Climate Change*. CRC Press, p. 16.
- Castle, D. (2009). *Miscellaneous Tactical Biopolitics: Art, Activism, and Technoscience*. Leonardo Book Series. B. Costa & K. Philip (Eds.). MIT Press. *The Quarterly Review of Biology*, 84(3), pp. 321-322.
- Chen, B., Ma, G., Zhu, Y., & Xia, Y. (2017). Metal-organic-frameworks derived cobalt embedded in various carbon structures as bifunctional electrocatalysts for oxygen reduction and evolution reactions. *Scientific Reports*, 7(1).
- Codd, G. A. (1987). Immobilized micro-algae and cyanobacteria. *Br. Phycol. Soc. Newslett.* 24, 1-5.
- Cruz, M., <http://marcoscruzarchitect.blogspot.com/2017/10/bioreceptive-concrete-facades-design.html>
- Danilov, R. A., & Ekelund, N. G. A. (2001). Comparison of usefulness of threetypes of artificial substrata (glass, wood and plastic) when studyingsettlement patterns of periphyton in lakes of diferent trophic status. *J. Microbiol. Methods*, 45, 167-170.
- Giannopoulou, E., Baquero, P., Warang, A., Orciuoli, A., Estévez, A. T., & Brun-Usan, M. A. (2019). Biological Pattern Based on Reaction-Diffusion Mechanism Employed as Fabrication Strategy for a Shell Structure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 471, p. 102053.
- Ghosh, M., & Gaur, J. P. (1998). Current velocity and the establishment of stream algal periphyton communities. *Aquat. Bot.* 60, 1-10.
- Jaafari, A. A. Q., Roznowski, V., Estévez, A. T., & Abdullah, Y. K. (2021). Self-Sufficient Bioelectricity Systems in Architecture: Employing *Spirulina Platensis* in Photosynthetic Microbial Fuel Cells for the Generation of Domestic and Urban Bioelectricity through a Diffusion-Limited Aggregation Pattern. *Sustainable Engineering Technologies and Architectures*, pp. 1-18.
- Kikuta, J., & Ishii, M. (2012). Recent Advances in Intravital Imaging of Dynamic Biological Systems. *Journal of Pharmacological Sciences*, advpub, p.12R03CP.
- Krawczyk, K., Dzwiniel, W., & Yuen, D. A. (2003). Nonlinear development of bacterial colony modeled with cellular automata and agent objects. *International Journal of Modern Physics C*, 14(10), 1385-1404.
- Lee, M. H., Wiedman, G., Park, S., Mustaev, A., Zhao, Y., & Perlin, D. S. (2017). A novel, tomographic imaging probe for rapid diagnosis of fungal keratitis. *Medical Mycology*, 56(7), 796-802.
- Lundh, T. (2007). Cellular Automaton Modeling of Biological Pattern Formation: Characterization, Applications, and Analysis Authors: Andreas Deutsch and Sabine Dormann.

- Mayoral, E. (2012). Growing Architecture through Mycelium and Agricultural Waste. *The International Journal of the Constructed Environment*, 1(4), 87-132.
- Microalgae immobilization: Current techniques and uses. [https://www.researchgate.net/publication/6222376\\_Microalgae\\_immobilization\\_Current\\_techniques\\_and\\_uses](https://www.researchgate.net/publication/6222376_Microalgae_immobilization_Current_techniques_and_uses) [Recuperado 28 Junio, 2022].
- Mustafa, K. F., Prieto, A., & Ottele, M. (2021). The Role of Geometry on a Self-Sustaining Bio-Receptive Concrete Panel for Facade Application. *Sustainability*, 13(13), 7453.
- Moreno-Garrido, I. (2008). Microalgae immobilization: Current techniques and uses. *Bioresource Technology*, 99(10), 3949-3964.
- Ratliff, S. T. (2006). The Feynman Lectures on Physics - The Complete Audio Collection Richard P. Feynman, Perseus Books, 1998-2006. *American Journal of Physics*, 74(9), 846-847.
- Robinson, P. K., Mak, A. L., & Trevan, M. D. (1986). Immobilized algae: a review. *Process Biochemistry*, 21, 122-127.
- Rosano, G. L., & Ceccarelli, E. A. (2014). Recombinant protein expression in *Escherichia coli*: Advances and challenges. *Frontiers in Microbiology*, 5(172).
- Sample, I. (2020). Scientists use stem cells from frogs to build first living robots. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/science/2020/jan/13/scientists-use-stem-cells-fromfrogs-to-build-first-living-robots> [Recuperado 2 Febrero, 2020].
- Skotheim, J. M., & Mahadevan, L. (2005). Physical Limits and Design Principles for Plant and Fungal Movements. *Science*, 308(5726), 1308-1310.
- Vasquez, E. S. L. & Vega, K. (2019). From plastic to biomaterials. *Adjunct Proceedings of the 2019 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2019 ACM International Symposium on Wearable Computers*.
- Veeger, M., Ottelé, M., & Prieto, A. (2021). Making bio receptive concrete: Formulation and testing of bio receptive concrete mixtures. *Journal of Building Engineering*, 44, 102545.
- Vesely, P. (2006). *Molecular biology of the cell*. Garland Science Inc. (2002). *Scanning*, 26(3), pp.153-153.
- Wei, L., Lin, X., Wang, M., & Huang, W. (2016). Low artificial anisotropy cellular automaton model and its applications to the cell-to-dendrite transition in directional solidification. *Materials Discovery*, 3, 17-28.
- Wu, M., Roberts, J. W., Kim, S., Koch, D. L., & DeLisa, M.P. (2006). Collective Bacterial Dynamics Revealed Using a Three-Dimensional Population-Scale Defocused Particle Tracking Technique. *Applied and Environmental Microbiology*, 72(7), 4987-4994.

---

**Abstract:** Biolearning defines a design approach that pushes the boundaries of bio-inspired design beyond mere imitation. This chapter is a case study of the research phases carried out at the Genetic Architectures Research Group and the Institute for Biodigital and Genetic Architecture (iBAG-UIC Barcelona) on the development of bioassets: biomaterials and biosystems. And it is also about how to integrate biolearning in architecture, not only in the complexity of formal design, but also to achieve complex bioactive functions and behaviours, to achieve sustainability referenced in the 17 Sustainable Development

Goals of the United Nations. Bioactive behaviours that qualify a true living architecture.

**Keywords:** Bioreceptive - Biocomposite Materials - Bioremediation - Algae Culture - 3D Printing - 3D Printed Tiles - Biodigital Architecture - Sustainability

**Resumo:** Biolearning define uma abordagem de design que ultrapassa as fronteiras do design de inspiração biológica para além da mera imitação. Este capítulo é um estudo de caso das fases de investigação realizadas no Grupo de Investigação de Arquitecturas Genéticas e no Instituto de Arquitectura Biodigital e Genética (iBAG-UIC Barcelona) sobre o desenvolvimento de bioassetes: biomateriais e biosistemas. E trata-se também de como integrar a bio-aprendizagem na arquitectura, não só na complexidade da concepção formal, mas também para alcançar funções e comportamentos bioactivos complexos, para alcançar a sustentabilidade referenciada nos 17 Objectivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas. Comportamentos bioactivos que qualificam uma verdadeira arquitectura viva.

**Palavras chave:** Bioreceptive - Materiais Biocompostos - Biorremediação - Cultura de Algas - Impressão 3D - Azulejos Impressos 3D - Arquitectura Biodigital - Sustentabilidade

---