

Diseño de prototipos de materiales BIOSINTÉTICOS para su uso como materiales de construcción

Este trabajo propone la manipulación de sistemas orgánicos no nocivos, y su hibridación con materiales inorgánicos, para producir dispositivos de iluminación y nuevos materiales de construcción susceptibles de ser usados en ingeniería y edificación. Se trata de una propuesta novedosa, ya que prácticamente no existe un enfoque que aborde la aplicación de la biotecnología en arquitectura para obtener productos sostenibles; dentro de una lógica de diseño y producción distinta del tradicional consumo de recursos naturales y producción de dispositivos artificiales que consumen energía y generan desechos.

Por **I. GONZÁLEZ DíEZ**. Doctora. Catedrática de Universidad. Universidad de Sevilla. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Q^a Agrícola. Facultad de Química. Universidad de Sevilla (igonza@us.es).
E. MAYORAL GONZÁLEZ. Doctor. Arquitecto.
M.A. VÁZQUEZ GONZÁLEZ. Doctora. Catedrática Escuela Universitaria. Universidad de Sevilla. **P. ORTIZ CALDERÓN**. Doctora. Universidad Pablo de Olavide.

Las demandas de infraestructura civil y arquitectónica, elevadas en todos los países desarrollados, llevan implícita una clara necesidad de desarrollar y poner en práctica tecnologías respetuosas con el medio ambiente. En este sentido, las biotecnologías abren un campo de acción extraordinariamente potente y todavía no lo suficientemente explorado.

En este artículo se presentan varios acercamientos en esta línea; en concreto, dos de ellos de forma detallada: la generación de componentes arquitectónicos orgánicos crecidos a partir de residuo agrícola y micelio de hongo, y la obtención de dispositivos que emiten luz sin consumo eléctrico usando para ello microorganismos bioluminiscentes.

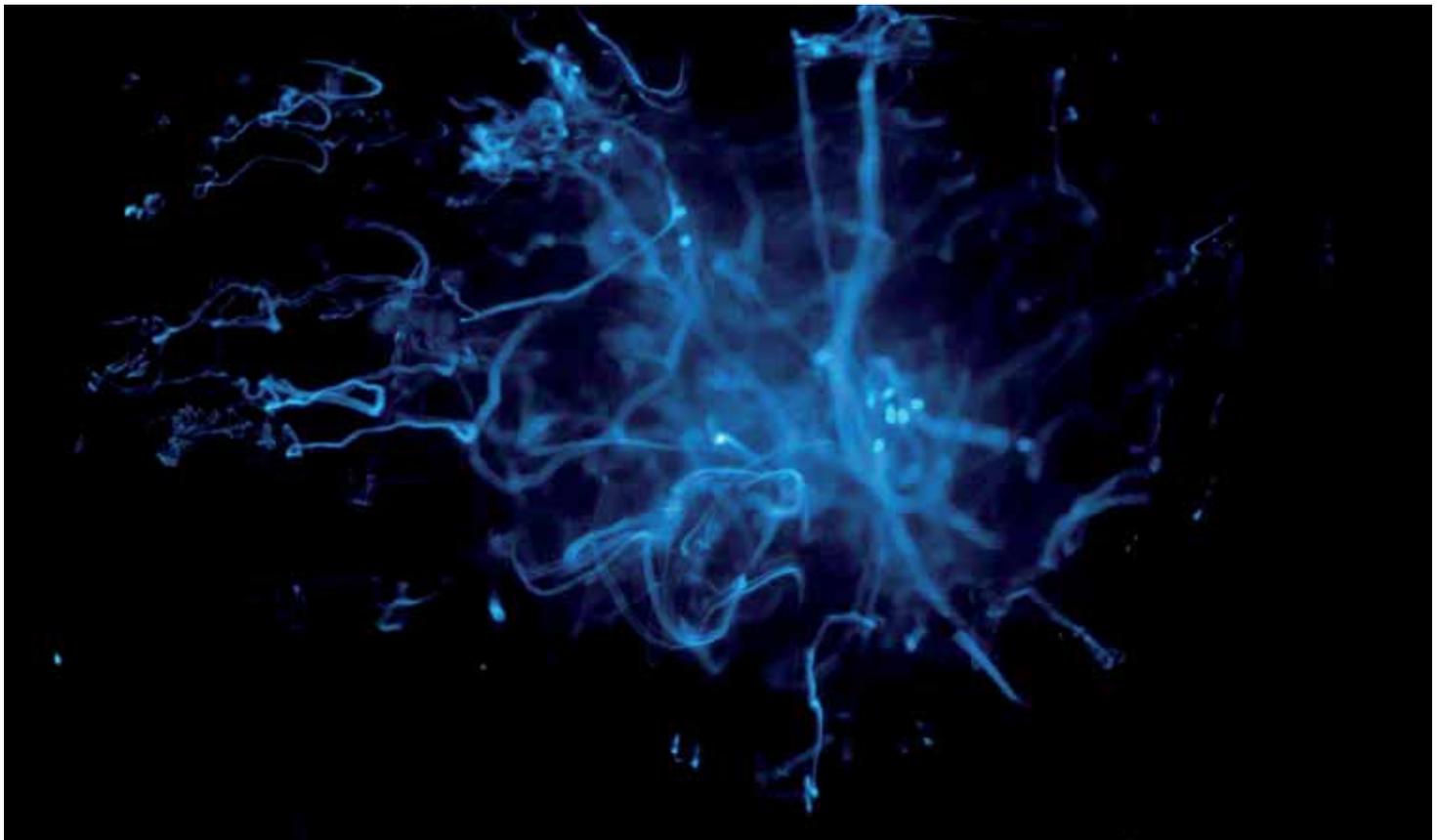
Tradicionalmente, el hombre no ha hecho un uso significativo de organismos bioluminiscentes^[1], por la dificultad que entraña la gestión y el control de los organismos vivos. Sin embargo, recientemente la ingeniería genética ha permitido aprovechar sus ventajas en campos como la medicina regenerativa. Gracias a la transgénesis, se han desvinculado proteínas bioluminiscentes como la GFP (*Green Fluorescent Protein*) de organismos vivos, y se han fusionado con el ADN de células o de otros organismos. De este modo, se han aprovechado las venta-

jas de la bioluminiscencia para identificar células o para favorecer la visualización en formación de imágenes^[2]. Más allá de este tipo de aplicaciones, la biotecnología abre muchas otras posibilidades para aprovechar la bioluminiscencia para iluminar y señalar espacios sin gasto energético^[3].

El uso de microorganismos bioluminiscentes con propósitos de diseño ha sido explorado por diferentes investigadores en distintas propuestas. Entre ellas encontramos BioMario, una proyecto que consiste en la reproducción de una imagen del personaje del famoso videojuego de Nintendo configurada a partir de bacterias bioluminiscentes. En este

proyecto, desarrollado por un equipo de la Universidad de Osaka liderado por Namba, Minamino y Morimoto para el concurso IGEN 2009, se utilizaron poblaciones de bacterias modificadas genéticamente para expresar colores rojos y verdes. Otras propuestas se centran en implementar poblaciones de bacterias en piezas de mobiliario. Este es el caso de los proyectos *Deep Green 1* y *Jellyfish Lounge*, ambos desarrolladas por el Symbiotic Bacterial Light Project de la Universidad de Canberra. El primer proyecto consiste en una lámpara tubular que contiene agua y bacterias que brillan al ser excitadas por el movimiento del agua, producido al inyectar aire en las estruc-

El objetivo es implementar el uso y la manipulación de sistemas orgánicos en el entorno construido, mediante el diseño y fabricación de materiales innovadores obtenidos a través de la hibridación de cualidades de sistemas orgánicos e inorgánicos



turas tubulares. El segundo proyecto consta de una silla que tiene una pantalla con bacterias en cuyo ADN se introdujo la proteína GFP (extraída del ADN de la especie de medusa *Aequorea victoria*), la cual confiere a las bacterias la propiedad de emitir luz.

En noviembre de 2011, Philips anunció el prototipo de lámpara Bio-Lamp, un dispositivo que emite luz gracias a una serie de poblaciones de bacterias bioluminiscentes que se alimentan de metano. La lógica de funcionamiento de este prototipo es muy similar a la que Adelson, Feldman, Krauss, Ligeski, Sturm y Theisz utilizaron en 2009 para su proyecto *Exposure* para *Smartsurfaces*. Durante este mismo año, se desarrolló la investigación sobre la manipulación de poblaciones de microorganismos bioluminiscentes que este trabajo presenta.

La manipulación del crecimiento de plantas y elementos vegetales para la generación de estructuras y formas arquitectónicas

En el primer proyecto, *Bioluminescent Devices for Zero Electricity Lighting*, se han generado dispositivos de iluminación y señalización sin consumo eléctrico configurados a partir del uso de poblaciones de microorganismos bioluminiscentes

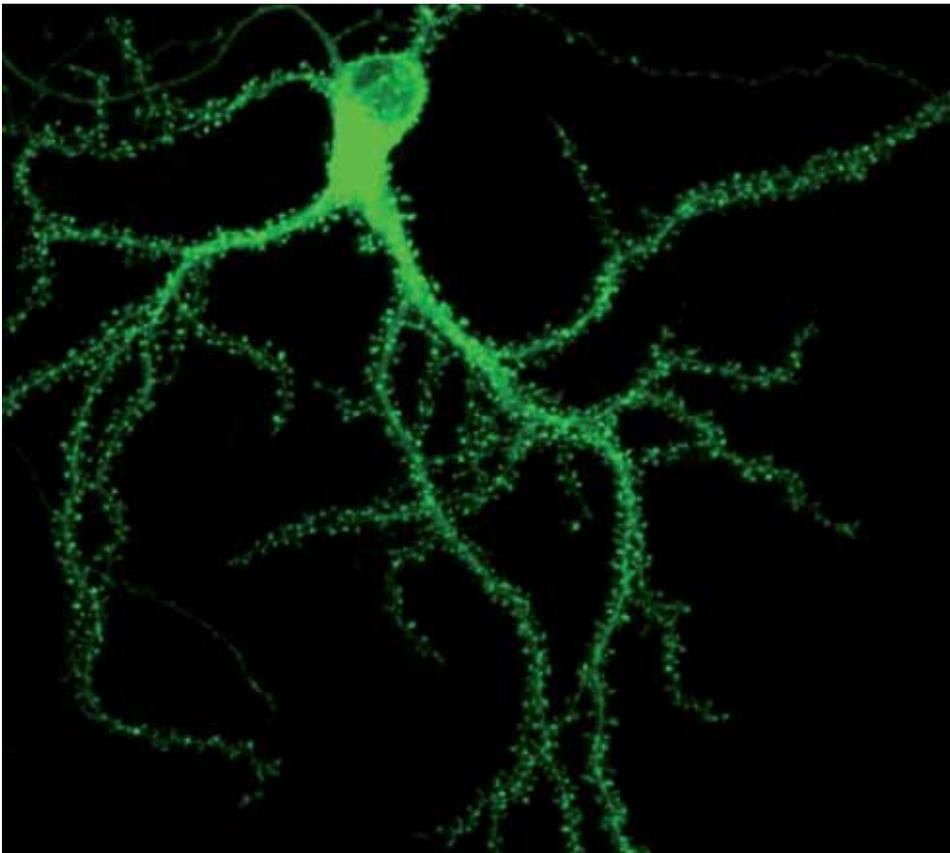
no es una nueva estrategia de diseño y construcción. En la arquitectura tradicional y en la arbo-escultura se pueden encontrar ejemplos muy interesantes al respecto. Sin embargo, existen formas más sofisticadas de programar la materia orgánica para crecer y cultivar dispositivos arquitectónicos biodegradables que no solo no generan un impacto negativo, sino que producen un impacto positivo en el medio.

Eben Bayer y Gavin McIntyre, fundadores de Ecovative Design, advirtieron estas ventajas y la posible aplicación industrial del crecimiento del micelio de hongo sobre sustrato agrícola, y desarrollaron *Greensulate*, un material alter-

nativo a las espumas derivadas del petróleo para producir aislantes térmicos en edificios y elementos protectores en embalajes. Según los datos que presenta Ecovative Design, un panel rígido de *Greensulate* aísla térmicamente igual que uno de EPS (poliestireno expandido), tan solo incrementando un 15% su sección en relación al de EPS. Para la misma cantidad de material producido, *Greensulate* consume diez veces menos energía y produce ocho veces menos emisiones de dióxido de carbono que el EPS (considerando también la fase de transporte del material). De hecho, si se reemplazaran los paneles de EPS por paneles de *Greensulate*, las emisiones de CO₂ se reducirían en 25.000.000 kg en dos años.

Si la proporción de materiales es la adecuada y el micelio crece sin contaminarse, *Greensulate* tiene un mejor comportamiento estructural que los paneles de *foam* porque es un 20% más resistente y su densidad es mayor. Además, es muy poco inflamable y no emite gases tóxicos cuando se quema.

Un tema de gran interés, que se elaborará en un futuro inmediato, es el desarrollo de metodologías sostenibles para obtener estructuras sólidas a partir de estructuras granulares que mejoren la estabilidad de distintos tipos de suelo y las aplicaciones que decanten de este proceso. Hasta el momento, para la estabilización de suelos se están utilizando técnicas tales como inyectar materiales sintéticos artificiales micro-fina de cemento, fenoplásticos, silicatos y poliuretano, que pueden causar problemas ambientales ya que las lechadas químicas (excepto cuando se usa silicato de sodio) son tóxicas y / o peligrosas ^[4, 5].



El desarrollo de técnicas donde se utilice la bioremediación para procesos de mejora de la estabilidad de los suelos arenosos y en la rehabilitación de monumentos (rocas ornamentales) es claramente ventajoso frente a las técnicas clásicas, ya que reduce costes, minimiza el impacto en el medio ambiente, mejora la uniformidad de tratamiento y se consigue una concentración óptima ya que puede ser controlada y monitorizada [6, 7, 8, 9, 10, 11].

Todo lo comentado hace que la investigación sobre tendencias constructivas que protejan el medio ambiente sea de gran interés científico y social y una de las líneas preferentes para desarrollar en un futuro inmediato.

Objetivos

El objeto fundamental de este trabajo ha sido producir biomateriales y diseñar prototipos que cubran necesidades de la vida cotidiana, como la iluminación ambiental para espacios naturales y urbanos, jardines, materiales aislantes, soportes de jardines verticales, etc., de forma que no se genere un impacto negativo en el medio ambiente, ya que todos estos materiales pueden ser reabsorbidos por éste (sin generar residuos) y/o incluso liberen nutrientes para el mismo.

Los objetivos específicos son el diseño de procesos y protocolos de manipulación de sistemas orgánicos no nocivos y su hibridación con materiales inorgánicos para producir nuevos materiales que tengan utilidad como materiales de construcción. Así, se han fijado como objetivos el crecimiento de micelio de hongo sobre residuos agrícolas para fabricar paneles orgánicos aislantes biodegradables, y la obtención de dispositivos que emitan luz sin consumo eléctrico usando poblaciones de microorganismos bioluminiscentes (en concreto, bacterias de la especie *Vibrio*

fischeri y microalgas de la especie *Pyrocystis fusiformis*). En lo que se refiere a los prototipos bioluminiscentes, se desarrolló el proyecto *Bioluminescent Devices for Zero Electricity Lighting*, el cual recibió el tercer premio Holcim Awards Next Generation 2011 por la región de Europa. Para llevarlo a cabo, se determinaron las condiciones en las que las poblaciones de microorganismos bioluminiscentes brillan más y sobreviven mejor, y se diseñaron distintas geometrías que contuviesen poblaciones de microorganismos bioluminiscentes y las mantuvieran vivas, con el fin de configurar dispositivos que emitan luz. Con respecto al cultivo de micelio sobre residuo agrícola en moldes, se desarrollaron los proyectos *3D Grown Usable Structures* y *Growing Architecture through Mycelium and Agricultural Waste*. Asimismo, se diseñó una serie de escenarios arquitectónicos en los que implementarlos. Los resultados han ido dirigidos a:

- Implementar el uso y la manipulación de sistemas orgánicos en el entorno construido, mediante el diseño y fabricación de materiales innovadores obtenidos a través de la hibridación de cualidades de sistemas orgánicos e inorgánicos.
- Reducir el impacto ambiental al usar este tipo de materiales, procurando alcanzar incluso un impacto positivo; es decir, la generación de valor añadido y plusvalías económicas y ecológicas sin causar daños al medio.
- Aumentar la eficiencia energética y eliminar la idea de desecho en el entorno construido mediante la aplicación de estrategias de diseño y producción innovadoras.
- Generar nuevos materiales a través de la biotecnología asociada con la arquitectura, y obtener productos útiles, innovadores y respetuosos con el medio, capaces de adaptarse a distintas solicitudes y de desplegar un amplio espectro de posibilidades de uso.

Materiales y métodos

Trabajos de laboratorio

Poblaciones de microorganismos bioluminiscentes

En este trabajo se han utilizado, para obtener los primeros resultados, dos especies de microorganismos con la intención de evaluar sus cualidades lumínicas para diseñar y fabricar dispositivos bioluminiscentes. El primero es una bacteria de la especie *Vibrio fischeri* y el segundo, un alga unicelular de la especie *Pyrocystis fusiformis*. Ambas formas de vida emiten luz de manera natural, por lo que no ha sido necesario manipularlas genéticamente para conseguir que brillaran.

Cultivo de organismos

Vibrio fischeri. Se encargaron unos tubos de ensayo que contenían estas bacterias y otros con agar (nutrientes). Se procedió al cultivo de poblaciones de bacterias rascando con una espátula (previamente desinfectada) los tubos que contenían microorganismos e introduciéndolos en los que contenían agar. Los tubos se cerraron para que no se contaminara el cultivo, pero no herméticamente para permitir la entrada de oxígeno. Seguidamente, se introdujeron en una cámara climática a 25° C, ya que estas bacterias crecen mejor en un entorno cuya temperatura oscile entre 18° C y 27° C.

Se dejó que las poblaciones siguieran creciendo durante ocho días, momento en el que se hizo necesario suministrar más nutrientes para mantenerlas vivas. Se subdividieron los cultivos utilizando nuevos tubos de ensayo con agar. La transferencia de bacterias se realizó en una cámara aislada con extracción de aire para evitar posibles contaminaciones. Parte de los cultivos producidos se mantuvo en un frigorífico a 4° C para preservarlos, y el resto murió a los diez días de interrumpir el suministro de agar a las poblaciones de bacterias.

Pyrocystis fusiformis. Se encargaron bolsas de 50 ml que contenían dinoflagelados de la especie, sales minerales y vitaminas. Se preparó agua salada (a partir de agua destilada y las sales minerales), a la que se añadieron las vitaminas y los dinoflagelados en una proporción aproximada de 1:3; es decir, 10 ml de sales minerales más 10 ml de vitaminas junto con 150 ml de dinoflagelados, para 500 ml de agua salada.

Los recipientes en los que se vertió la mezcla fueron previamente desinfectados con alcohol y, una vez llenos con la mezcla, se introdujeron en una cámara climática a 25° C. Dentro de la cámara se puso una luz con un controlador de tiempo para mantenerla encendida 12 horas y apagada otras 12 horas. De este modo, las algas unicelulares crecieron y se acostumbraron a su ciclo circadiano.

Micelio de hongo y residuo agrícola

En todos los casos, antes de crecer micelio en moldes de medianas y grandes dimensiones, se desarrollaron unos pequeños cultivos en placas Petri. De este modo, se pudo comprobar qué sustratos eran mejores para cada especie de hongo y cuáles eran las condiciones en las que crecían mejor. En general, todas estas especies de hongo crecen bien en unas condiciones cercanas a los 20° C de temperatura y al 80% de humedad. En concreto, los cultivos que se crecieron en las placas de Petri se introdujeron en una cámara climática durante diez días en estas condiciones.

Para crecer micelio de hongo sobre un sustrato agrícola en un molde con una forma determinada se siguió un protocolo que consiste en: desinfectar dicho molde con alcohol primero y con agua oxigenada después, llenarlo con residuo agrícola previamente hervido, y esparcir semillas de hongo sobre el molde relleno con el sustrato agrícola. Posteriormente se cubren los moldes rellenos con plásticos humedecidos y se deja crecer

el micelio durante una o dos semanas aproximadamente. Después se retiran los moldes y se seca la forma obtenida. En este momento, el micelio deja de crecer y el hongo muere.

Diseño de prototipos

Organismos bioluminiscentes. Las poblaciones que brillaron significativamente fueron introducidas en distintas geometrías para evaluar su comportamiento y especular sobre su posible uso.

Estructuras generadas con micelio de hongo y residuo agrícola. Se desarrollaron dos clases de prototipos constructivos con distintas geometrías. La primera consistió en componentes estructurales susceptibles de apilar tanto la geometría de los componentes como su topología. Dichos componentes fueron controlados algorítmicamente y paraméricamente a través de códigos de Rhinoscript y Grasshopper. Para comprobar el acceso solar y la luminosidad de las estructuras complejas conformadas por agregación de componentes, se simularon por ordenador varias de estas poblaciones. La segunda clase de prototipos es una serie de módulos para fabricar membranas superficiales, fachadas o paredes aislantes.

Todos ellos, se hicieron crecer en moldes previamente desinfectados con alcohol y agua oxigenada, del mismo modo que se desinfectaron las estructuras de madera que se introdujeron en los moldes. El residuo agrícola que se utilizó se hirvió durante 60 minutos y se dejó enfriar antes de disponerlo en los moldes desinfectados dentro de una cámara

con extracción de aire. Una vez hecho esto, se esparcieron las semillas de la especie de hongo correspondiente en función del tipo de sustrato agrícola con el que se hubiera rellenado el molde. Posteriormente, los moldes se introdujeron en bolsas de plástico humedecidas y se dejaron crecer durante aproximadamente dos semanas en un lugar oscuro. Finalmente, se retiraron los moldes y se dejó secar la forma resultante para evitar que el micelio siguiera creciendo. Los paneles más pequeños se introdujeron en un horno para secar el micelio más rápidamente.

Este experimento se llevó a cabo en el FabLab de la ETSA de Sevilla. Las estructuras de madera y los moldes también se desarrollaron con *software* algorítmico y paramétrico (Rhinoscript y Grasshopper), y se fabricaron con máquinas CNC para asegurar una mayor flexibilidad y precisión en el diseño y la fabricación. Para fabricar la estructura de madera se utilizó una cortadora láser y para fabricar el molde se empleó una fresadora digital.

Resultados y consideraciones

Poblaciones de microorganismos bioluminiscentes

El trabajo de investigación experimental y proyectual que se ha definido como *Bioluminescent Devices for Zero-Electricity Lighting* ha estudiado poblaciones de microorganismos bioluminiscentes,

La segunda propuesta ha consistido en crecer micelio de hongo sobre residuo agrícola dentro de moldes diferentes para obtener paneles constructivos aislantes 100% orgánicos. Se han desarrollado los proyectos 3D *Grown Usable Structures* y *Growing Architecture through Mycelium and Agricultural Waste*.



Figura 1. Ejemplo de bioiluminación ambiente de ciudades y carteles publicitarios.

determinando las condiciones en las que brillan más y sobreviven mejor, para diseñar, dar forma y fabricar dispositivos que emitan luz sin consumir electricidad y sin que supongan una amenaza para el medio ambiente.

La bioluminiscencia de la especie *Vibrio fischeri* está causada por transcripción inducida por una enzima autoinductora que hace que sean las mismas bacterias que brillan las que produzcan la emisión de una luz verde azulada. Esto sucede cuando la población de bacterias alcanza un número significativo, y recibe el nombre de *quórum sensing*. Gracias a este fenómeno, las poblaciones de esta especie de bacterias son capaces de limitar la producción de luciferasa a situaciones en las que el número de microorganismos es lo suficientemente elevado, evitando así un gasto innecesario de energía. De esta manera, la densidad de bacterias y el modo en que estas se comunican coordinando un comportamiento social complejo y descentralizado dan lugar a distintos comportamientos bioluminiscentes [12, 13, 14, y 15].

Se ha observado que la bioluminiscencia de las bacterias *Vibrio fischeri* sigue un ritmo circadiano, por lo que no

brillan con igual intensidad en todos los momentos del día. Generalmente emiten más luz por la noche. Esta clase de bacterias se ajusta a este ciclo vital en función del tiempo durante el que reciben luz y durante el que no. Tanto el fe-

nómeno de *quórum sensing* como el modo en que las poblaciones de bacterias se adaptan a su ciclo circadiano son formas de comportamiento inteligente colectivo que demuestran estas poblaciones de microorganismos. Ambas son exploradas en este trabajo con el objetivo de producir dispositivos bioluminiscentes más efectivos y eficientes.

Las poblaciones de la especie de bacteria *Vibrio fischeri* pueden emitir una cantidad significativa de luz si tienen nutrientes suficientes y la población alcanza una elevada densidad de individuos, pero mueren en ausencia de nutrientes [8]. Durante la investigación se ha constatado que brillan más si se disponen por capas, de 0,5 cm a 2 cm de espesor, en geometrías relativamente superficiales. Si el espesor es menor, la luz que emiten es casi imperceptible, y si es mayor, las bacterias de las capas inferiores mueren y se pierden especímenes (si bien, pueden servir de alimento a las bacterias de las capas superiores).



Figura 2. Ejemplo de bioiluminación y señalización de espacios naturales.



Figura 3. Prototipo de estructura para pantallas.

En estas condiciones pueden usarse para iluminación ambiental en ciudades (Figura 1) y en espacios naturales (Figura 2). En este último caso su uso es muy recomendable, ya que la luz tenue que emiten se percibe mejor en espacios sin tanta contaminación lumínica como existe en las ciudades. Además, como son organismos vivos no dañan al medio ni causan el impacto que una luminaria artificial produce en un espacio natural.

Es conveniente que la geometría que contenga a las poblaciones de bacterias esté hecha de materiales biodegradables como bioplásticos. Si esta geometría tiene distintos compartimentos, se pueden tratar las bacterias de forma diferente en cada uno de ellos para que brillen con distinta intensidad y se pueda reproducir una imagen. El resultado del experimento ha sido claramente satisfactorio, y solo quedará diseñar moldes de distintas geometrías en función de los usos que se pretendan (Figura 3).

La segunda clase de microorganismos con los que se trabajó pertenece a la es-

pecie de algas unicelulares *Pyrocystis fusiformis* ^[16]. Estos dinoflagelados viven en agua de mar y presentan un metabolismo heterotrófico y fotosintético. Necesitan sales minerales para crecer pero también hacen la fotosíntesis. Por ello, tienen cierta autonomía, ya que su supervivencia no depende únicamente de los nutrientes que consumen. Esta especie de algas microscópicas (al igual que la especie de bacterias *Vibrio fischeri*) produce bioluminiscencia en un ritmo circadiano, realiza la fotosíntesis durante el día y produce bioluminiscencia por la noche si se excita mecánicamente. Emite una luz azulada gracias a unas microestructuras que migran desde la periferia de la célula hacia una región cercana a su núcleo ^[16]. En este proceso, las microestructuras se reemplazan por cloroplastos, lo que se traduce en ausencia de bioluminiscencia. Sin embargo, durante la noche retornan a la periferia y se produce bioluminiscencia.

El primer cultivo de *Pyrocystis fusiformis* no emitió ningún tipo de luz. El segundo cultivo comenzó a brillar leve-



Figura 4. Cultivo de *Pyrocystis fusiformis* emitiendo luz al ser excitado por movimiento.

mente en dos días. Entonces se pudo percibir cómo los dinoflagelados emitían luz al agitar los recipientes que contenían el agua salada en que vivían. Al cabo de una semana, el brillo era muy intenso al repetir la misma operación (Figura 4). A las dos semanas se subdividieron los cultivos en otros contene-

Se trata de reducir el impacto ambiental al usar este tipo de materiales, procurando alcanzar plusvalías económicas y ecológicas sin causar daños al medio

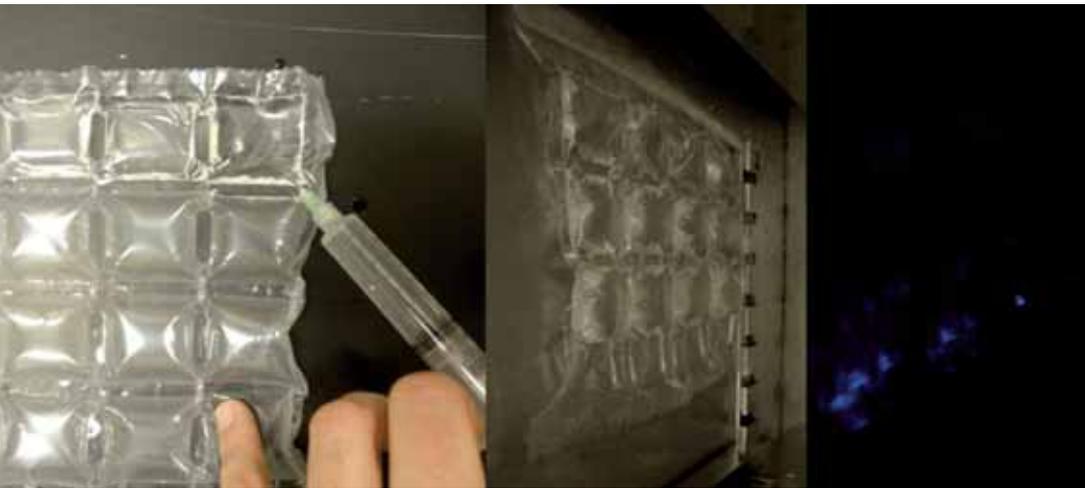


Figura 5. Prototipo de estructura pixelada para poblaciones de *Pyrocystis fusiformis* en incubadora.

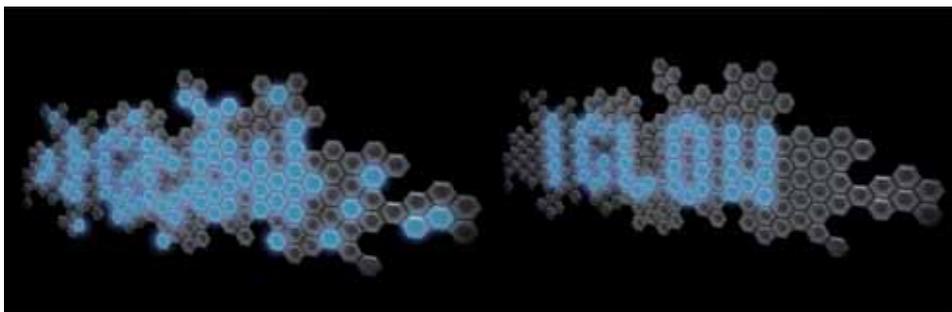


Figura 6. Pantallas bioluminiscentes de píxeles hexagonales.

dores con agua salada para aumentar la población de microorganismos bioluminiscentes. Para este segundo cultivo, se incrementó el tiempo de exposición a la luz artificial dentro de la cámara climática, pasando a 17 horas con luz y 7 horas sin ella. De esta forma, las poblaciones de microalgas crecieron más deprisa y se acostumbraron a un ciclo circadiano en el que brillaban más.

Una vez se obtuvieron poblaciones de *Pyrocystis fusiformis* estables y con un brillo intenso, se diseñaron distintas geometrías con diferentes capacidades en las que se introdujeron los cultivos de poblaciones de estos dinoflagelados.

La primera geometría que se probó fue una estructura pixelada con pequeños volúmenes de 10 ml en los que se inyectó agua salada con poblaciones de *Pyrocystis fusiformis*. Esta geometría (Fi-

gura 5) estaba pensada para poder excitar cada píxel por separado y hacerlo brillar de manera independiente, y funcionó bastante bien. Basado en este prototipo, podría pensarse en una estructura para una pantalla que, además de emitir luz, pudiera mostrar información o reproducir imágenes o texto (Figura 6). Este prototipo podría servir para fachadas, pantallas, carteles comerciales, señalética, o incluso para reproducir imágenes.

Se probó otra geometría cuyo volumen también era de 10 ml, pero con una distribución más superficial que la anterior. La intención era comprobar las propiedades lumínicas de las microalgas en elementos prácticamente planos para desarrollar superficies transparentes que divadiesen espacios y pudieran iluminarse al ser excitadas mecánicamente.

Los prototipos no brillaron porque, aparentemente, la especie *Pyrocystis fusiformis* necesita más volumen para emitir luz visible al ojo humano.

Se realizó otra prueba con hidrogel, un gel con una densidad superior a la del agua. El objetivo de este prototipo era comprobar si sería factible producir mobiliario relleno con gel, con una piel flexible y transparente, que se pudiera adaptar a la forma del cuerpo y que pudiera emitir luz al entrar en contacto con él. No brilló porque los dinoflagelados demostraron tener una movilidad insuficiente para emitir luz en un medio gelatinoso; de hecho, acabaron muriendo.

La última geometría que se probó, esta vez con éxito, fue un contenedor plástico flexible y transparente de 200 ml en el que se podía apreciar una calidad en el brillo muy similar a la de los contenedores de los cultivos originales (Figura 7). Los resultados obtenidos con este prototipo indican que sería posible pensar en dispositivos bioluminiscentes eficientes para iluminar y señalar carreteras, caminos o espacios públicos. Estos dispositivos podrían ser excitados por el viento o por mecanismos artificiales para hacer brillar a las poblaciones de microalgas.

Este tipo de geometrías condujo a pensar en otro escenario de diseño posible,



Figura 7. Prototipo de bolsa bioluminiscente de 200 ml.

Con estos materiales se puede aumentar la eficiencia energética y eliminar la idea de desecho en el entorno construido mediante la aplicación de estrategias de diseño y producción innovadoras

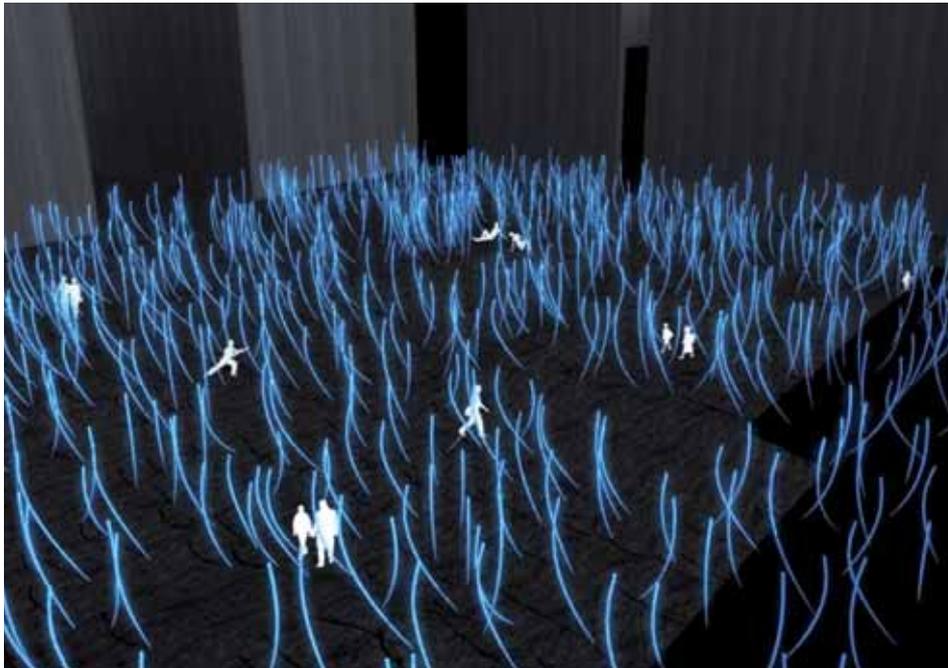


Figura 8. Campo de barras bioluminiscentes para espacios públicos.

un campo de barras hechas con material biodegradable que contuviesen agua salada con poblaciones de *Pyrocystis fusiformis* (Figura 8) El movimiento del viento excitaría los dinoflagelados contenidos en las barras transparentes, de modo que estas emitirían luz. En la base de cada barra podría situarse un dispositivo que transformase la energía cinética causada por el movimiento de las barras en otro tipo de energía. En el caso de que el prototipo se dispusiera en la fachada de un edificio o en su cubierta, la energía cinética causada por el movimiento de las barras podría ser utilizada para abastecerlo. Si el prototipo se instalase en un espacio público, la energía cinética podría utilizarse para calentar el pavimento o para dotarlo de una red eléctrica.

Tras haber estudiado el comportamiento y las características de poblaciones de *Vi-*

brio fischeri y de *Pyrocystis fusiformis* para diseñar dispositivos bioluminiscentes, podemos decir que las bacterias de la primera especie se pueden usar en espacios que no demanden mucha luz porque la que emiten es tenue. Por el contrario, las microalgas de la segunda especie emiten mucha más luz, pero solo cuando se excitan mecánicamente. Por ello, la especie *Pyrocystis fusiformis* se puede usar en espacios con mayor ruido lumínico, pero para iluminar de forma continuada y regular es mejor usar *Vibrio fischeri*. Para que las poblaciones de este tipo de bacterias brillen hace falta suministrarles nutrientes; si no, mueren y, evidentemente, dejan de emitir luz. Sin embargo, las microalgas son mucho más resistentes y requieren menos cuidados que las bacterias porque realizan la fotosíntesis. Por ello, a los dispositivos bioluminiscentes que usen *Vibrio fischeri* hay que «ali-

mentarlos» o plantearlos en simbiosis con otros organismos que puedan proveer de alimento a las bacterias. En cambio, para diseñar dispositivos bioluminiscentes con *Pyrocystis fusiformis*, la condición más restrictiva es que el dispositivo ha de contener cierto volumen de agua salada para que las microalgas puedan vivir.

Crecimiento de estructuras generadas con micelio de hongo y residuo agrícola y diseño de prototipos

Este proyecto comenzó con un trabajo de laboratorio centrado en mejorar las condiciones de crecimiento de diferentes especies de hongo sobre distintos sustratos agrícolas. Este trabajo permitió concluir que la especie *Pleurotus ostreatus*, o seta de ostra, y la especie *Pleurotus citrinopleatus*, o seta de ostra amarilla, crecen mejor sobre paja o paja triturrada pasteurizada (Figura 9), mientras que la especie *Lentinula edodes*, o Shiitake, y la especie *Ganoderma lucidum*, o



Figura 9. Micelio de semillas de *Pleurotus ostreatus*, o seta de ostra, creciendo sobre sustrato de paja triturrada.



Figura 10. Micelio de semillas de *Lentinula edodes*, o Shiitake, creciendo sobre sustrato de virutas de madera de roble.

Rehisi, crecen mejor sobre serrín o virutas de madera de roble, castaño, encina o alcornoque (Figura 10). En general, todas estas especies de hongo crecen bien en unas condiciones cercanas a los 20° C de temperatura y al 80% de humedad. En concreto, los cultivos que se crecieron en las placas de Petri se introdujeron en una cámara climática durante diez días exactamente a estas condiciones.

La primera clase de prototipos diseñados se presenta en la propuesta 3D

Grown Usable Structures, la cual plantea además la fabricación de una serie de componentes modulares cuya geometría y topología se pueden modificar en tiempo real en fase de diseño. Dichos componentes no se fabrican, sino que «crecen» en moldes a partir de residuo agrícola y semillas de hongo. Su forma está pensada para que puedan agregarse y conformar estructuras complejas con un mayor nivel organizacional, dando así lugar a espacios usables, habita-

bles, fachadas, soportes para jardines verticales... Estos componentes modulares tienen una estructura de ramas que parten de un punto central. Algunos de ellos presentan una segunda generación de ramas que nace del extremo de primera generación, de modo que puede haber módulos con una sola generación de ramas y otros con dos. Estas ramas pueden tener forma de prisma rectangular o estar conformadas por cubos distorsionados unidos entre sí y están controladas algorítmicamente. Esta estrategia de generación de forma permite re-informar los componentes modulares en tiempo real, de manera que se puede modificar su geometría y topología para configurar poblaciones personalizadas. Al tener control sobre las características formales de los componentes y el modo en que se agregan, se pueden ajustar las poblaciones de componentes a una serie de necesidades específicas. Por ello, puede decirse que la geometría y la topología determinan los diferentes comportamientos de las estructuras conformadas por agregación de los mismos, de manera que en función de cómo se diseñen y se agreguen, la estructura general será más o menos estable, más o menos porosa, dejará pa-

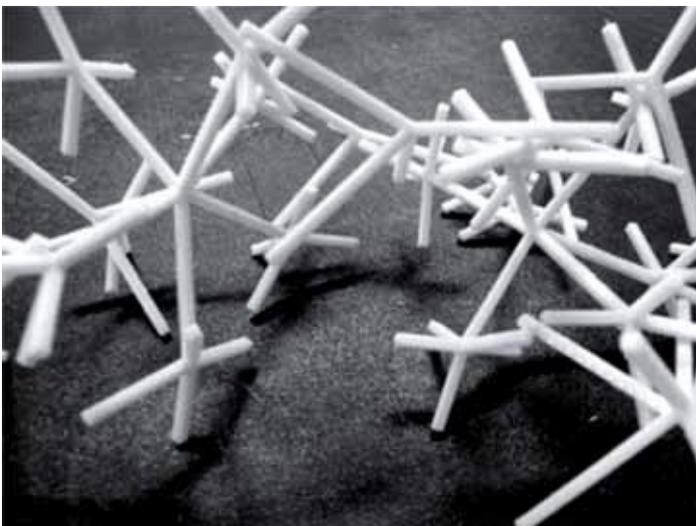


Figura 11. Maqueta de Población Prismática Regular Mixta.

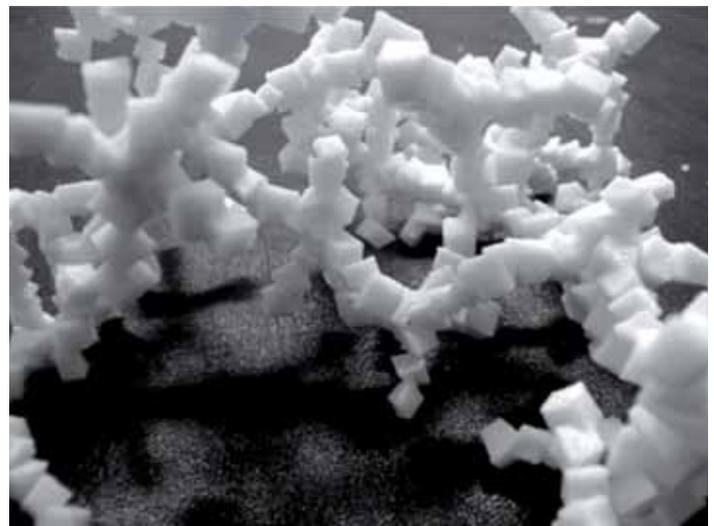


Figura 12. Maqueta de formación cúbica irregular mixta.

sar más o menos luz, aislará térmicamente mejor o peor, y será más o menos fácil acceder a ella (Figuras 11 y 12).

Los mapas de acceso solar nos ponen de manifiesto que la *Población Irregular Prismática de Una Generación* (Figura 13) se comporta muy bien en lo que se refiere a aislamiento solar, alcanzando valores de acceso solar muy bajos. Sin embargo, los vacíos en los que el aislamiento es más alto no son practicable porque son demasiado pequeños. Este tipo de población alcanza unos picos de acceso solar muy homogéneos. La *Población Prismática Irregular de Dos Generaciones* no alcanza unos valores muy bajos de acceso solar, pero tiene una distribución de aislamiento muy uniforme de valores medios. Muestra pocos picos bajos de acceso solar, y la diferencia entre ellos y los valores medios es bastante significativa.

La *Población Cúbica Irregular de Una Generación* alcanza los valores más bajos de acceso solar, los cuales se concentran en áreas muy específicas de la geometría. Asimismo, muestra un rango de valores medios de acceso solar alrededor de la estructura, unos picos muy bajos y una gran diferencia entre estos y los valores medios. La *Población Cúbica Irregular de Dos Generaciones* tiene unos valores realmente bajos de acceso solar y un patrón muy regular de distribución de aislamiento solar en toda su geometría. Por ello, resulta ser la mejor solución en términos de aislamiento solar. Además, presenta un área muy bien aislada, situada a bastante distancia de la estructura, y alcanza picos muy bajos, distribuidos de forma homogénea a lo largo de la misma.

Tanto la *Población Prismática Mixta* como la *Población Cúbica Mixta* muestran características intermedias de poblaciones prismáticas y cúbicas de una y dos generaciones respectivamente, en términos de acceso y aislamiento solar.

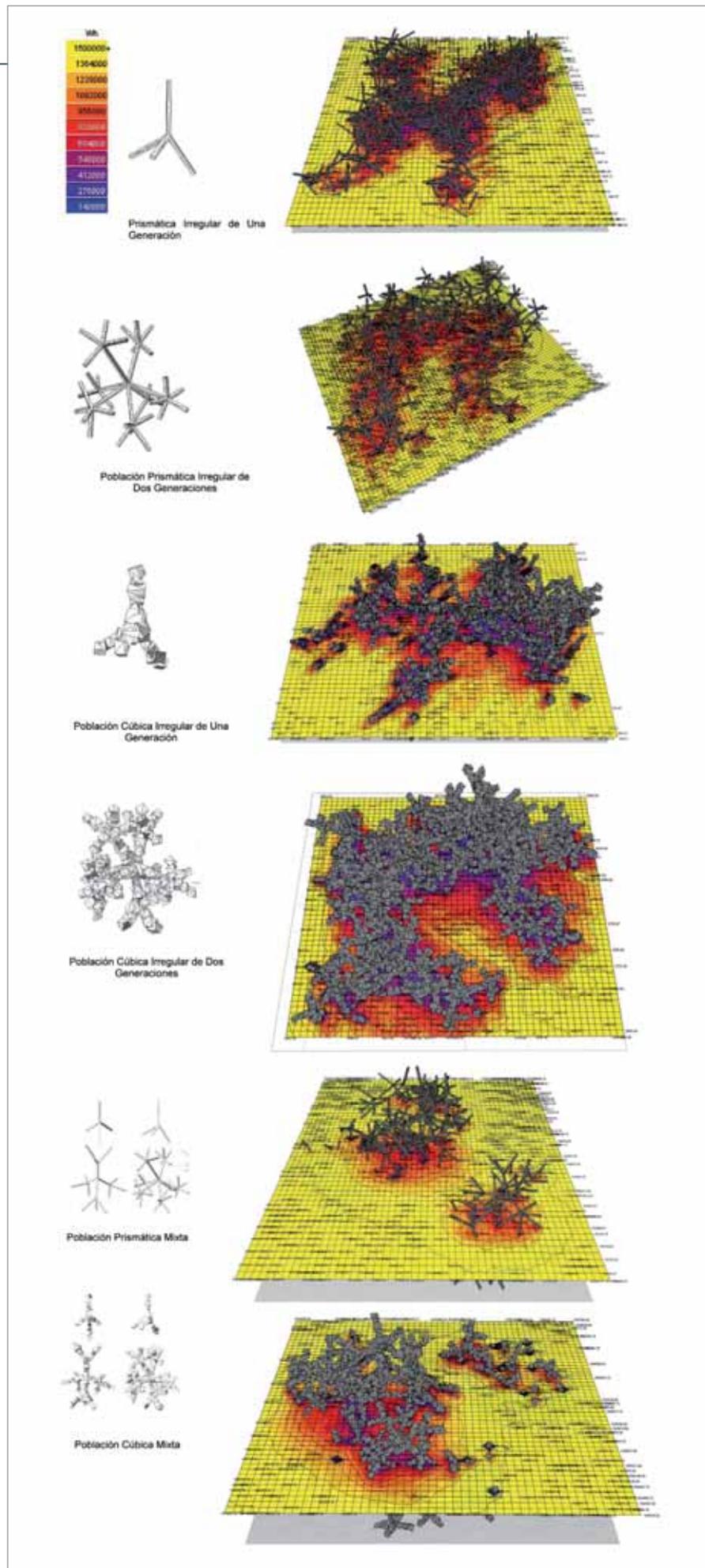


Figura 13. Mapas de acceso solar para distintos componentes modulares.

Sin embargo, curiosamente, muestran una distribución muy homogénea de picos bajos en su estructura. Con respecto al análisis de luminosidad, los valores máximos que muestran las distintas poblaciones son muy parecidos y oscilan entre 12943.5 cd/m² y 1357.4 cd/m², excepto en el caso de la *Población Prismática Mixta*, que alcanza un valor de 18271.3 cd/m². Los valores más altos de

luminosidad se corresponden con las áreas en las que el acceso solar es mayor, las cuales suelen localizarse en el perímetro de las estructuras. En general, las poblaciones prismáticas de dos generaciones muestran una luminosidad mayor que las de una, mientras que en el caso de las poblaciones cúbicas sucede al contrario. Además, cabe señalar que la *Población Prismática Mixta* tiene

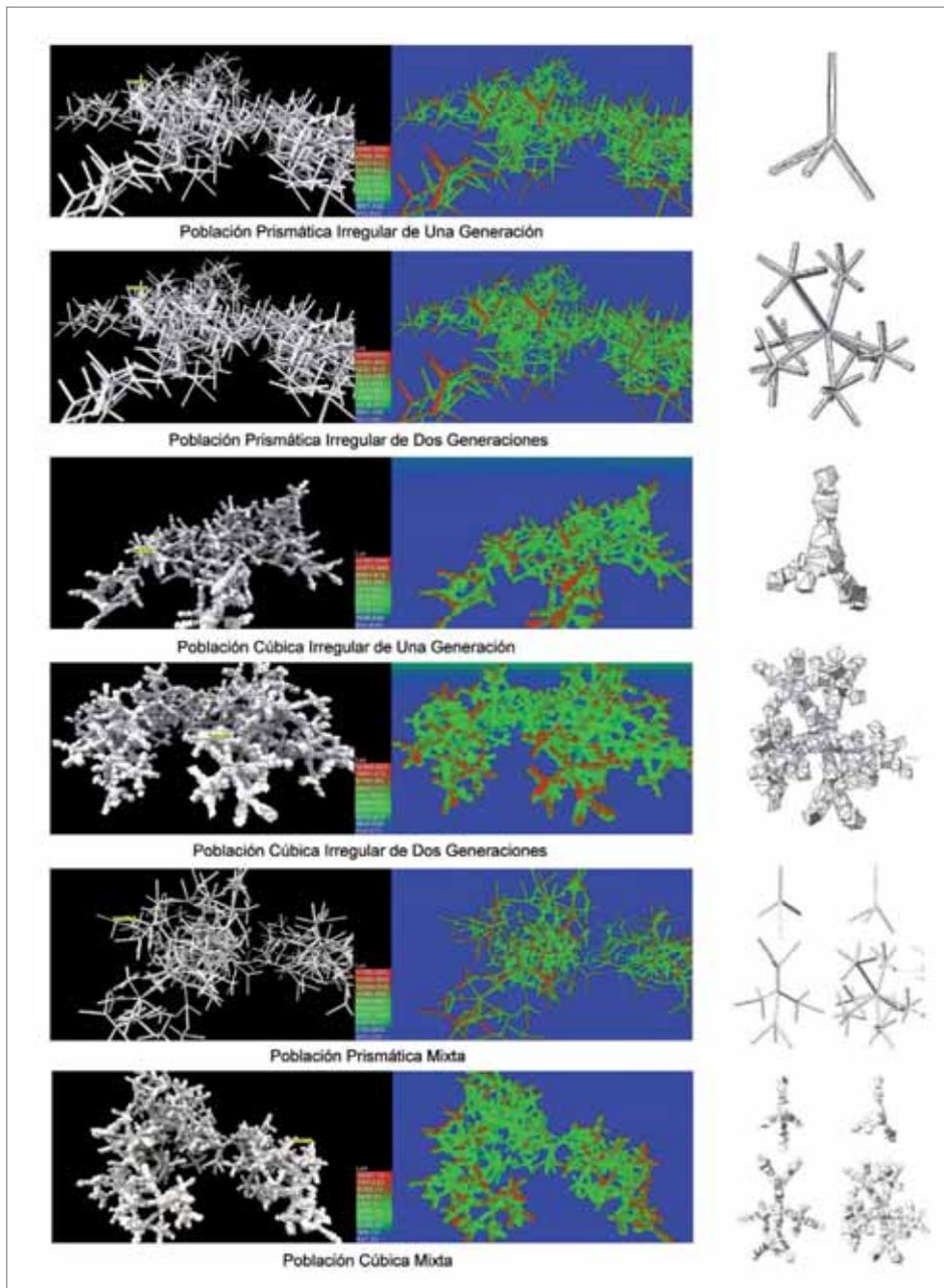


Figura 14. Mapa de luminosidad para las distintas poblaciones realizadas.



Figura 15. Moldes para módulos de topología prismática y cúbica. Parte central y brazos-ramas de molde de módulo prismático rellenas de residuo agrícola y semillas de hongo. Crecimiento de micelio en parte central y brazos-ramas de molde de módulo prismático.

más superficies con valores de luminosidad más altos que los de la *Población Cúbica Mixta* (Figura 14).

Después de realizar estas pruebas teóricas, se diseñaron en unos moldes un módulo de una generación de topología prismática y otro de topología cúbica a escala 1:1, a partir de residuo agrícola y semillas de hongo. La zona de los brazos de los moldes se fabricó con una fresadora digital y la zona central con una impresora 3D (Figuras 15 y 16 a). Una vez fabricados, los moldes se recubrieron con una película de plástico para evitar que el micelio lo colonizara. Posteriormente, fueron desinfectados con alcohol y agua oxigenada en una cámara con extracción de aire. Mientras tanto, se hirvió residuo agrícola (hojas

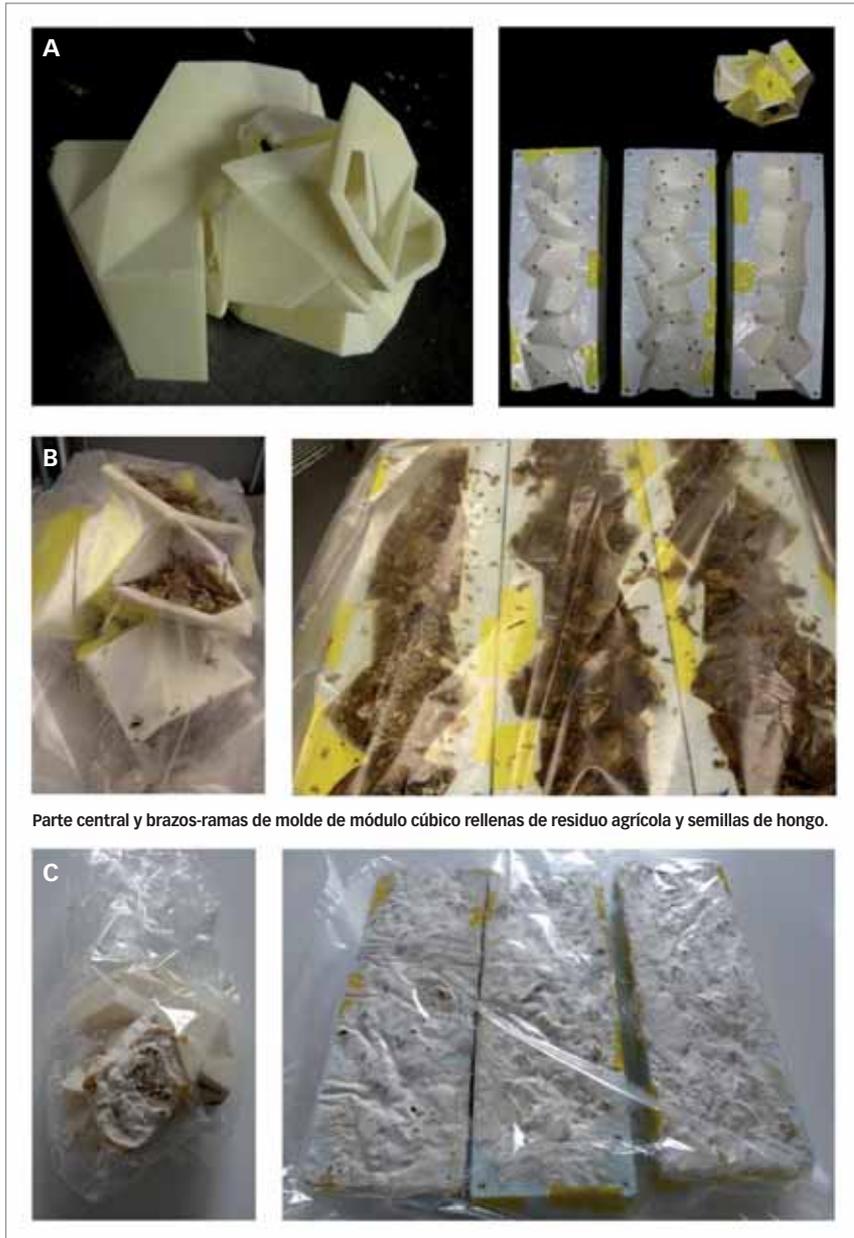


Figura 16. Crecimiento de micelio en parte central y brazos-ramas de molde de módulo cúbico.

y cáscaras de semillas) y se rellenaron los moldes con él. Seguidamente, se esparcieron semillas de la especie de hongo *Pleurotus ostreatus* y se introdujeron los moldes en bolsas de plástico humedecidas (Figuras 15 y 16 b). Se dejaron crecer en la oscuridad durante una semana (Figuras 15 y 16 c), se juntaron los moldes (Figura 17) y a las dos semanas se retiraron y se secó la forma resultante para que dejase de crecer el micelio (Figura 18).

Los prototipos fabricados mostraron una buena resistencia estructural, salvo

en las juntas de los brazos con la zona central, lugares en los que eran más débiles a tracción. En todo caso, la resistencia puede mejorarse introduciendo raíces y/o estructuras de madera, y diseñando los moldes de forma que el crecimiento del micelio sea homogéneo, especialmente en las zonas de unión. De esta manera, los módulos fabricados, o más bien «crecidos», pueden agregarse para configurar estructuras que podrían funcionar como elementos delimitadores de espacios, como soportes para jardines verticales y/o como mobiliario

público para espacios urbanos, parques o bosques (Figura 19).

Este tipo de estructuras orgánicas y biodegradables son las que se proponen en el proyecto *3D Grown Usable Structures*, utilizando residuo agrícola, semillas de hongo y elementos estructurales de madera. Se presenta una buena oportunidad para repensar la configuración de nuestro entorno construido a través de la programación digital de materia vegetal. Esta condición desvela un esce-

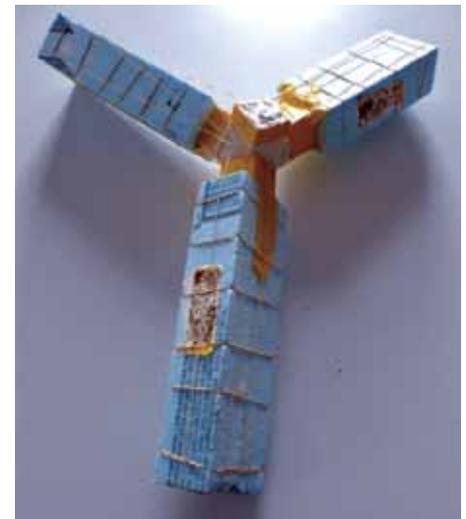


Figura 17. Micelio creciendo en moldes de módulos de topología prismática ensamblados.

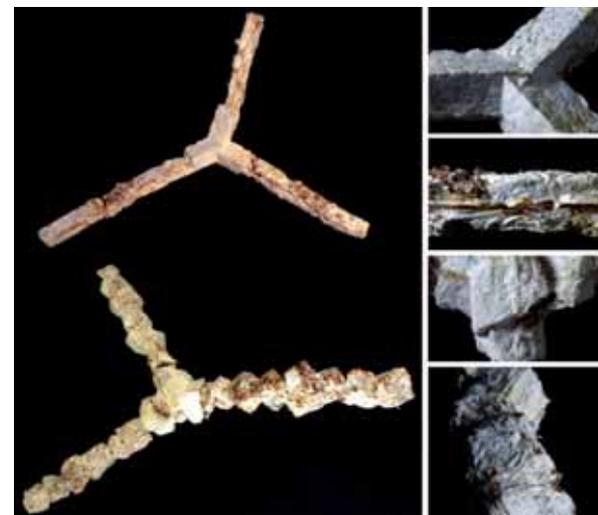


Figura 18. Prototipos de componente modular prismático y cúbico.



Figura 19. 3D Grown Usable Structure: Elemento divisorio vertical vegetal creciendo.



Figura 21. Llenado de molde con virutas de madera y semillas de *Lentinula edodes*.

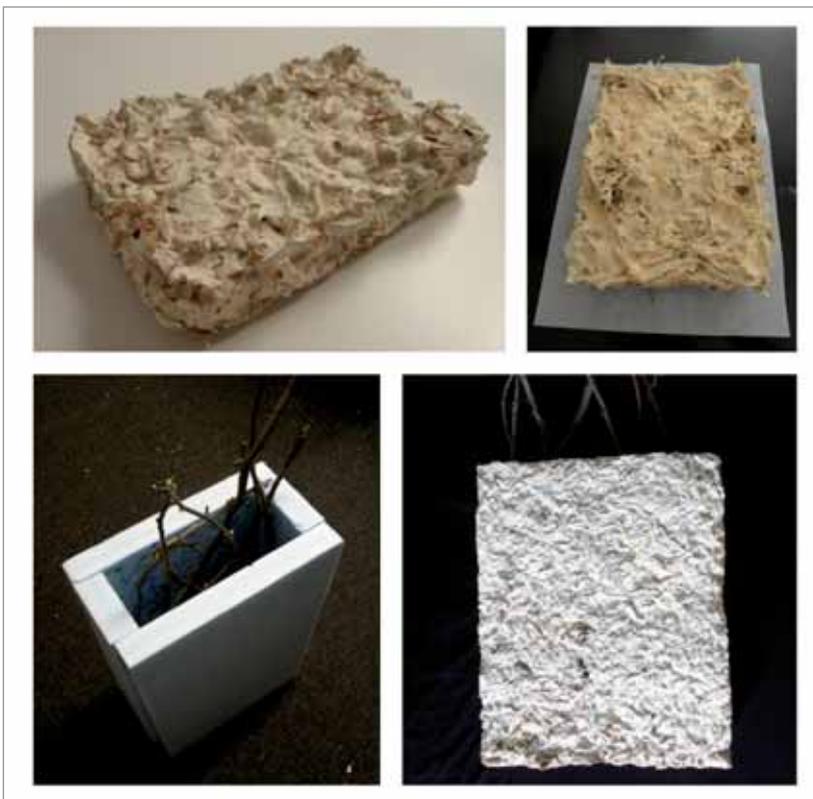


Figura 20. Prototipo de paneles y de paredes orgánicas aislantes.



Figura 22. Llenado de molde con virutas de madera y semillas de *Pleurotus ostreatus*.



Figura 23. Molde relleno con virutas de madera, paja y semillas de Reishi, cubierto con plástico humedecido.

nario en el que sería fácil pensar en crecer arquitectura en lugar de construirla, usando materiales orgánicos perfectamente susceptibles de ser reabsorbidos por el medio.

En esta línea de acción, se presenta la segunda clase de diseños y prototipos que se desarrollan en el proyecto *Growing Architecture through Mycelium and Agricultural Waste*. En este caso, los prototipos consisten en el crecimiento de paneles aislantes (Figura 20) para ser uti-

lizados en la industria de la construcción como alternativa a los actuales paneles de espumas derivadas del petróleo, y en el crecimiento de membranas superficiales en moldes de mayor tamaño para obtener prototipos de componentes para fachadas o paredes (Figura 20).

Para ello, se rellenaron moldes con diferentes clases de residuo agrícola y distintos tipos de semillas de hongo. En concreto, se probaron tres especies distintas de hongo – *Lentinula edodes* (Shiitake)

(Figura 21), *Pleurotus ostreatus* (Figura 22) y *Ganoderma lucidum* (Reishi) (Figura 23)– y tres tipos de residuo agrícola diferentes: paja, virutas de madera y hojas secas. Los moldes se rellenaron con distintas combinaciones de hongos y sustrato agrícola. En general, los primeros resultados no fueron buenos, ya que el micelio de hongo no creció porque no se tuvo especial cuidado en el proceso de desinfección inicial; y en otros casos creció contaminado con moho.

El objetivo es generar nuevos materiales a través de la biotecnología asociada con la arquitectura. Se pueden obtener productos útiles, innovadores y respetuosos con el medio, capaces de adaptarse a distintas solicitudes y de desplegar un amplio espectro de posibilidades de uso.

Por ello, se realizó otro experimento mejorando las condiciones higiénicas: el molde se protegió con un plástico aislante, la estructura de madera se desinfectó mejor y el proceso de llenado se efectuó en una cámara aislada con extracción de aire. En general, la mejora de las condiciones facilitó el crecimiento de raíces de hongo, pero no en todos los prototipos que se probaron se obtuvo un resultado satisfactorio.

Se probaron dos clases de prototipos con moldes y estructuras de madera idénticos, ambos crecidos con semillas de *Pleurotus ostreatus*. El primer molde se rellenó con sustrato agrícola compuesto por hojas secas y el segundo con paja. El primer molde se contaminó porque fue más difícil desinfectar las hojas que la paja y el micelio no creció en él de forma adecuada, ya que el sustrato no era el idóneo para la especie de hongo. Dicha especie crece mejor sobre paja, por lo que el crecimiento de micelio en el segundo molde se desarrolló con más

éxito. En todo caso, el segundo prototipo, aunque presentó más resistencia a la tracción que el primero, creció mostrando un color negrozco porque desarrolló moho. Debido a ello, se creció en un tercer molde un tercer prototipo de pared orgánica aislante, usando como sustrato agrícola paja triturada pasteurizada. Este último prototipo creció muy bien, pero no terminó de mostrar la rigidez deseada.

Por este motivo, se realizaron más pruebas en otros tipos de molde. Dos de ellos tenían la misma geometría: una caja cerrada con aperturas hexagonales para permitir que llegase oxígeno a las semillas de hongo. La única diferencia entre los dos era que uno estaba hecho de madera y el otro de metacrilato. El molde de madera (Figura 24) se llenó con virutas de roble y semillas de *Lentinula edodes*, pero el micelio de hongo creció muy poco y no llegó a formar una estructura coherente dentro de la geometría de madera (Figura 24). El molde de metacri-



Figura 25. Prototipo de módulo para pared orgánica aislante crecido a partir de paja, paja triturada pasteurizada y semillas de *Pleurotus ostreatus*.

to se llenó con paja triturada pasteurizada y semillas de *Pleurotus ostreatus*. En este último molde el micelio creció muy poco y además contaminado con moho.

En vista del fracaso obtenido con estos dos prototipos, se decidió volver a llenar moldes de poliestireno expandido con la combinación que mejor había funcionado hasta entonces, semillas de *Pleurotus ostreatus* y sustrato de paja triturada pasteurizada. Esta vez, además se añadieron fibras de paja sin triturar para evitar que el producto final se desbrozara y ganase en resistencia a tracción. El resultado fue que el micelio creció muy bien en ambos moldes y su resistencia a tracción incrementó. El segundo (Figura 25) se comportó mejor que el primero tan solo por una cuestión de geometría, porque no tenía zonas tan estrechas y eran más compactos.

Finalmente, se creció un último prototipo de componente hexagonal diseñado para ser fabricado en serie y cubrir paredes en interiores. Para ello, se utilizó un molde de poliestireno, sustrato de paja, paja triturada pasteurizada y semillas de *Pleurotus ostreatus*. El micelio creció perfectamente y tan solo en cuatro días, lo que permite pensar en poder obtener de una forma más rápida componentes aislantes para cubrir superficies interiores.



Figura 24. Molde de madera relleno con virutas de madera de roble y semillas de hongo de la especie *Lentinula edodes* y detalle de crecimiento de micelio de *Lentinula edodes* en molde relleno con virutas de madera de roble.

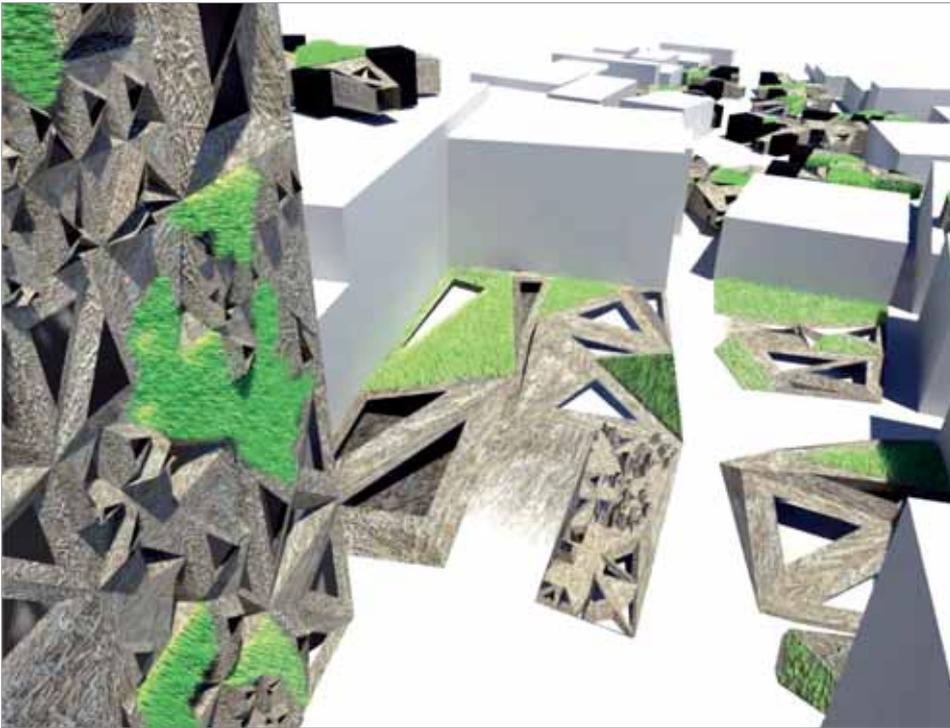


Figura 26. *Grown Cultivated Habitat*: sistema de colonización de espacios residuales.

Este modo de «crecer» el entorno construido programando materia orgánica y aprovechando las ventajas que estas especies de hongos aportan junto con elementos vegetales como paja y madera (coherencia, aislamiento, resistencia estructural y biodegradabilidad) permite pensar en constituir auténticos sistemas habitacionales que incorporen todas estas ventajas. De acuerdo con estas consideraciones, se propone el proyecto *Grown Cultivated Habitat* (Figura 26), el cual plantea un sistema de colonización del tejido urbano preexistente sin consumir suelo virgen. Para ello, se apuesta por ocupar las cubiertas de los edificios, solares abandonados, degradados o en desuso, y por reactivar espacios residuales, susceptibles de soportar cierta carga de uso, con materiales orgánicos y/o biodegradables.

La propuesta *Grown Cultivated Habitat* consiste en un sistema habitacional que fundamentalmente se constituye por tres tipos de elementos: núcleos húmedos y de instalaciones, envolventes que separan espacios interiores de ex-

teriores, y superficies públicas de conexión. En función de cómo se conjuguen estos elementos, se pueden diseñar distintas clases de espacios. Esta característica no solo hace alusión al uso o al programa que se necesite cubrir, sino que se extiende a la propia materialidad construida. Así, podría considerarse implementar exclusivamente núcleos de instalaciones para abastecer edificios, crecer volúmenes habitables para incrementar los espacios de estancia o superficies públicas de conexión para aumentar los espacios de encuentro, añadir o sustraer volúmenes y/o superficies habitables en función de las necesidades..., pero también crecer una fachada para aumentar el aislamiento en invierno, aumentar el volumen de huecos en verano para favorecer la circulación, introducir paisajes verdes sobre los elementos hechos con materia orgánica, o incluso cultivar alimentos sobre ellos.

En esta propuesta, los núcleos húmedos y de instalaciones se plantean como elementos prefabricados, hechos con materiales que puedan ser reabsorbidos

por el medio, tales como la cerámica, el bioplástico o el acero; mientras que la piel que separa el interior del exterior de las zonas habitables se propone como una membrana hecha con residuo agrícola, micelio de hongo y madera. De esta manera, se plantea la posibilidad de crecer y cultivar entornos habitacionales desechables y biodegradables.

Estos volúmenes podrían configurarse como extensiones de casas preexistentes u oficinas, o bien como complementos programáticos de estas. Podrían funcionar como estudios profesionales situados muy cerca de la vivienda, como ampliaciones de estancias de una casa que permitieran la independencia de hijos o familiares mayores, como espacios habitacionales en edificios de oficinas en propiedad o en alquiler, o incluso podrían servir como estancias temporales para poblaciones flotantes, degradándose y fundiéndose con el medio al tiempo de ser abandonadas.

Este sistema habitacional favorecería el ahorro energético y de tiempo porque evitaría desplazamientos innecesarios en la ciudad. Consumiría muy poca energía para su fabricación puesto que más bien crece en lugar de fabricarse, evitaría el consumo de suelo virgen, contribuiría a disminuir las emisiones de CO₂ y otras sustancias contaminantes, y sería reabsorbible por el medio casi al 100%.

Conclusiones

■ Las bacterias de la especie *Vibrio fischeri* emiten una luz tenue pero se pueden usar en espacios que no demanden mucha luz, y sirven para iluminar de forma continuada y regular. El inconveniente que presentan es que para que las poblaciones de este tipo de bacterias brillen, hace falta suministrarles nutrientes; si no, mueren y, evidentemente, dejan de emitir luz.

■ Las microalgas de la especie *Pyrocystis fusiformis* emiten mucha más luz, pero solo cuando se excitan mecánicamente. Se pueden usar en espacios con mayor ruido lumínico, pero son mucho más resistentes, y requieren menos cuidados que las bacterias porque realizan la fotosíntesis. La condición más restrictiva es que el dispositivo ha de contener cierto volumen de agua salada para que las microalgas puedan vivir.

■ Los dos pueden usarse para iluminación ambiental en ciudades y en espacios naturales. En este último caso, su uso es muy recomendable ya que la luz tenue que emiten se percibe mejor en espacios sin contaminación lumínica. Además, no dañan al medio ni causan el impacto que una luminaria artificial produce en un espacio natural.

■ *3D Grown Usable Structures* plantea la fabricación de una serie de componentes modulares cuya geometría y topología se pueden modificar en tiempo real en fase de diseño. Dichos componentes no se fabrican, sino que «crecen» en moldes a partir de residuo agrícola y semi-

El proyecto *Growing Architecture through Mycelium and Agricultural Waste* favorece el ahorro energético ya que consume muy poca energía para su fabricación y contribuye a disminuir las emisiones de CO₂

llas de hongo. Su forma está pensada para que puedan agregarse y conformar estructuras complejas con un mayor nivel organizacional, dando lugar así a espacios usables, habitables, fachadas y soportes para jardines verticales.

■ Los prototipos fabricados mostraron una buena resistencia estructural, salvo en las juntas de los brazos con la zona central, lugares en los que eran más débiles a tracción. En todo caso, la resistencia puede mejorarse introduciendo raíces y/o estructuras de madera, y diseñando los moldes de forma que el crecimiento del micelio sea homogéneo, especialmente en las zonas de unión.

■ *Growing Architecture through Mycelium and Agricultural Waste* plantea prototipos de paneles aislantes que pueden ser utilizados en la industria de la

construcción como alternativa a los actuales paneles de espumas derivadas del petróleo.

■ El prototipo que se realizó con sustrato de paja, paja triturada pasteurizada y semillas de *Pleurotus ostreatus* es el que permite obtener de una forma más rápida componentes aislantes para cubrir superficies interiores.

■ Estos volúmenes podrían configurarse como extensiones de casas preexistentes u oficinas, o bien como complementos programáticos de estas. Este sistema habitacional favorecería el ahorro energético ya que consumiría muy poca energía para su fabricación, puesto que más bien crece en lugar de fabricarse, contribuiría a disminuir las emisiones de CO₂ y otras sustancias contaminantes, y sería reabsorbible por el medio casi al 100%. ♦

PARA SABER MÁS

- [1] Wilson T, Hastings JW. Bioluminescence. Annual Review of Cell and Developmental Biology, (1998), 14, 197-230.
- [2] Zimmer M. *Glowing genes: A revolution in biotechnology*. Prometheus Books, Amherst New York. (2005). 196 pp.
- [3] Mayoral E. The use of bioluminescent microorganism for the design of architectural glowing devices. 2012, (in press)
- [4] Xanthakos PP, Abramson LW, Bruce DA. *Ground control and improvement*. John Wiley and Sons, Inc., New York, 1994. 240-243.
- [5] Karol RH, 2003. *Chemical grouting and soil stabilization*. Marcel Dekker, New York, NY, (2003). 558 pp.
- [6] DeJong JT, Fritzsche MB & Nüsslein K. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear, ASCE Journal of Geotech. Geoenviron. Eng. 2006, 132, 1381-1392.
- [7] DeJong JT, Mortensen BM, Martinez BC, Nelson DC. Bio-mediated soil improvement Ecological Engineering 36 (2010) 197-210
- [8] Jason T, DeJong JT, Soga K, Banwart S, Whalley WR, Ginn TR, Nelson DC, Mortensen BM, Martinez BC, Barkouki T. Soil engineering in vivo: harnessing natural biogeochemical systems for sustainable, multi-functional engineering solution J. R. Soc. Interface, 2010 doi: 10.1098/rsif.2010
- [9] Achal A, Mukherjee MS. Effect of calcifying bacteria on permeation properties of concrete structures J Ind Microbiol Biotechnol DOI 10.1007/s10295-010-0901-8
- [10] Achal V, Mukherjee A & Reddy MS. Microbial concrete: A way to enhance durability of building structures, Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Zachar, J & Claisse, P (ed), (2010). <http://www.claisse.info/Proceedings.htm>
- [11] Nelson DC. Bio-mediated soil improvement. Ecological Engineering 36 (2010) 197-210
- [12] Shimomura O. *Bioluminescence: Chemical principles and methods*, World Scientific Publishing Company, 2006.
- [13] Neelson KH & Hastings JW. Bacterial bioluminescence: Its control and ecological significance, Microbiological Reviews, 1979, 43, 496-518
- [14] Kaplan HB & Greenberg EP. Diffusion of autoinducer is involved in regulation of the *Vibrio Fischeri* luminescence system. The Journal of Bacteriology, (1985). 163, 1210-1214.
- [15] Estévez A. Genetic Barcelona Project: The genetic creation of bioluminescent plants for urban and domestic use, Leonardo, 4, MIT Press, Massachusetts, 2007.
- [16] Wider EA & Case JF. Two flash forms in the bioluminescent dinoflagellates, *Pyrocystis Fusiformis*, Journal of Comparative Physiology, 143 pp. 43-52, 1981.