

---

**Diseño de prototipos de  
materiales biosintéticos  
para su uso como  
materiales de construcción**

---

**Isabel González Díez**  
Coordinadora

**Ayudas a la investigación 2011**

## **Coordinadora:**

**Dra. Isabel González Díez**  
Catedrática de Cristalografía y Mineralogía  
Universidad de Sevilla

## **Equipo de trabajo:**

**Dra. Auxiliadora Vázquez González**  
Universidad de Sevilla

**Dra. Pilar Ortiz Calderón**  
Universidad Pablo de Olavide. Sevilla

**Dr. Eduardo Mayoral González**  
Arquitecto

**Dr. Carlos Tapia**  
Universidad de Sevilla

# Índice

Página

INTRODUCCIÓN	
AUTORES	
OBJETO Y ALCANCE	
1. INTRODUCCIÓN	8
2. OBJETIVOS	11
3. MATERIALES Y METODOS	11
3.1. Trabajos de laboratorio	11
3.1.1. Poblaciones de micro-organismos bioluminiscentes	11
3.1.2. Micelio de hongo y residuo agrícola	12
3.2. Diseño de prototipos	13
3.3. Materiales obtenidos mediante la cementación de estructuras granulares inducida por poblaciones de bacterias	14
3.3.1. Materias primas inorgánicas	14
3.3.2. Materia primas orgánicas (bacterias)	15
4. RESULTADOS Y CONSIDERACIONES	16
4.1. Dispositivos que emiten luz sin consumo de electricidad a través del uso de poblaciones de micro-organismos bioluminiscentes	16
4.2. Crecimiento de estructuras generadas con micelio de hongo y residuo agrícola	23
4.3. Materiales obtenidos mediante la cementación de estructuras granulares inducida por poblaciones de bacterias	43
4.3.1. Caracterización de las materias primas	43
4.3.2. Porosidad, densidad y superficie específica de las calizas	47
4.3.3. Comportamiento hídrico de las muestras calcáreas	48
4.3.4. Caracterización de las muestras silíceas (diatomitas)	49
5. DISCUSIÓN	52
5.1. Diseño de prototipos	52
5.2. Conceptualizaciones derivadas de la investigación	53
5.2.1. El sentido de una conceptualización	53
5.2.2. La pregunta por la naturaleza	54
5.2.3. La pregunta por la procesualidad, la articulación de lo vivo y lo inerte	54
5.2.4. ¿Quién necesita entonces una diferenciación entre natural y artificial? ¿Qué es la vida sino una definición para unos supuestos acordables y puede ser invocada sin historias? ¿Qué es lo ecológico sino unos ojos vueltos a estas sensibilidades, especialmente susceptibles de reconocer incluso derechos cívicos a las cosas, a las máquinas?	54
5.2.5. Cómo lo haría la naturaleza	55
6. CONCLUSIONES	56
7. BIBLIOGRAFÍA	57
8. ANEXO	58
9. MEMORIA ECONÓMICA	62

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer sinceramente a las personas y entidades que han contribuido, directa o indirectamente, en el desarrollo de ésta investigación. En concreto a los miembros del equipo por su dedicación, y a las instituciones que la han sufragado parcialmente. Tal es el caso del Grupo de Investigación de Mineralogía Aplicada RNM 135 y el Proyecto de Excelencia (P09-RNM-5163) de la Junta de Andalucía, y por supuesto a la Fundación MAPFRE, la cual concedió una subvención que permitió la realización de este proyecto, ya que gracias a dicha ayuda, destinada fundamentalmente a recursos humanos, se ha podido realizar el proyecto. Pero sobre todo lo que queremos agradecer a la Fundación MAPFRE, lo que ha permitido mantener la ilusión de jóvenes investigadores a la hora de realizar su trabajo diario. Sin este apoyo, no se hubieran podido desarrollar líneas de investigación tan novedosas a nivel europeo.

## AUTORES

### **Dra. Isabel González.**

Catedrática de Universidad. Coordinadora del Proyecto.

La Memoria presentada como Tesis Doctoral obtuvo el Premio de Investigación “Ciudad de Sevilla” en 1986. La actividad investigadora que ha desarrollado, se ha centrado en tres líneas prioritarias: a) Mineralogía de arcillas en cuencas sedimentarias, b) Arcillas cerámicas y c) Mineralogía aplicada a problemas medioambientales. La producción científica a que ha dado lugar dicha investigación se puede resumir en veinticinco libros y/o capítulos de libro; treinta publicaciones en revistas SCI cuyo número ha ido aumentando exponencialmente en los últimos años; diecisiete en revistas no indexadas pero referenciadas; asistencia y participación, presentando trabajos científicos, a 75 congresos, treinta de ellos de carácter internacional; y 11 Conferencias impartidas. La participación en proyectos subvencionados por la Unión Europea, Ministerio, Comunidades Autónomas, Empresas Privadas, también es elevada con un total de 60, de los cuales ocho como investigadora responsable. Es importante destacar: a) la transferencia tecnológica a Empresas en temas relacionados con arcillas cerámicas que ha dado lugar a más de veinte informes y al desarrollo de una patente y b) la apertura y liderazgo de líneas de trabajo punteras. Por último destacar también las estancias en centros de investigación que han contribuido a la formación personal y a fomentar relaciones de colaboración con grupos nacionales e internacionales.

En cuanto a la docencia, ha impartido: 15 asignaturas en docencia reglada; 5 de libre configuración curricular; 9 cursos de doctorado dentro de los programas de doctorado nacionales, el último de ellos recibió la Mención de Calidad en 2004. Ha participado en dos Másteres, dos cursos de experto y ocho de Cursos de Formación com-

plementaria (en ocasiones siendo responsable de la organización). Ha dirigido 2 Tesis de Máster; 5 Proyectos de Investigación para la obtención del Diploma de Estudios avanzados, 1 Tesis de Licenciatura, 3 Tesis Doctorales.

En las tareas de gestión también se han cubierto distintas etapas, ha participado en gestión académica como miembro de distintas comisiones del Departamento y del Centro, desde 1984. Desde 2005 a 2010 fue coordinadora del área de Cristalografía y Mineralogía del Departamento. Miembro de la Comisión Académica del Máster de Medio Ambiente, impartido por la Universidad de Sevilla desde 1995-1999, Presidenta de la Comisión Académica del programa de Doctorado Recursos Naturales y Medioambiente y coordinadora del mismo desde 2012.

En las Sociedades Científicas a las que pertenece, también ha desarrollado una labor de Gestión, siendo Miembro de la Junta Directiva de la Sociedad Española de Mineralogía (tesorera 2006-2011) y de la Sociedad Española de Arcillas (secretaria de 1991 a 1994, y vocal de 1994-2004). Miembro del Comité Editorial de la Revista Macla editada por la Sociedad Española de Mineralogía desde el año 2004 a 2010. Representante, nombrada por la Sociedad Española de Mineralogía, en el Grupo de trabajo de Mineralogía Aplicada de la International Mineralogical Association desde 2007-2012.

La labor de gestión también ha puesto de manifiesto con la elaboración y dirección de proyectos de I+D+I, y de la Unión Europea. Además es Revisora de Proyectos de la Agencia Nacional de Evaluación del M.E.C. (área de Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente) desde 1995, Evaluadora de Proyectos de Investigación de la Universidad Jaume I desde 2002, y del VI Programa Marco de la Unión Europea, propuesta por la Universidad de Sevilla desde 2003-2012, y d) Invitada por el “Nobel Committee for Chemistry”, constituido por L. Thelander (Chairman), S. Lidin, M. Ehrenberg, J. Backvall, A. Graslund para nominar los candidatos del Premio Nobel de Química 2011.

La madurez que se ha conseguido en estos treinta años ha permitido que desde 2007 sea Investigadora Principal del Grupo de Excelencia RNM 135 Mineralogía Aplicada de la Junta de Andalucía. Como resumen de esta labor investigadora, docente y de gestión la solicitante tiene reconocidos seis Tramos de Docencia (Quinquenios), cuatro Tramos de Investigación (Sexenios), y el máximo de cinco tramos, Evaluación Docente (2), Investigadora (2) y de Gestión (1), por la Comisión Andaluza de Evaluación de Complementos Autonómicos.

*Su participación en el informe que se presenta ha sido: salidas al campo para la toma de muestras, caracterización materias primas, coordinación y elaboración de informe. Mail: [igonza@us.es](mailto:igonza@us.es)*

**Dr. Eduardo Mayoral.** Se gradúa en la ETSAS (Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla) en 2004, donde también finaliza los *Cursos de Doctorado en Ciudad y Arquitectura Sostenibles para un Futuro Europeo* en 2006 y obtiene el título oficial de *Máster en Ciudad y Arquitectura Sostenibles* en 2007, ambos en el iuacc (Ins-

tituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción). En 2008 finaliza con éxito el *Master in Advanced Architecture* en el IaaC (Instituto de Arquitectura Avanzada de Cataluña) de la UPC de Barcelona con una beca de la Caixa, y en 2010 obtiene el título del *Master in Advanced Architectural Design* (cursado en 2009) y el certificado del programa *Advanced Architectural Research* (cursado en 2010), ambos en la GSAPP (Graduate School of Architecture, Planning and Preservation) de la Universidad de Columbia en Nueva York, disfrutando de una beca Talentia. Eduardo lee su tesis doctoral *Arquitecturas Biosintéticas* dentro del Departamento de Historia, Teoría y Composición Arquitectónicas de la ETSAS, como miembro del grupo de investigación Out\_Arquías HUM-853, el 24 de mayo de 2012 y obtiene el título de **Doctor Internacional (cum laude)** el 8 de junio del mismo año.

Adquiere su experiencia profesional en distintos estudios de arquitectura desarrollando proyectos de arquitectura, tales como encargos hasta nivel de ejecución y varios concursos premiados. Durante este período, realiza una estancia como estudiante colaborador en *MGM Arquitectos* (2003-2004) para después trabajar como arquitecto asociado en *Sicilia & Asociados* (2005), y *SV60 Arquitectura* (2006-2007), y *Bordallo y Carrasco Arquitectos* (2013-2014). Durante su estancia en Nueva York, Eduardo es contratado como Profesor Colaborador en el *Barnard College* de la Universidad de Columbia durante el curso académico 2008-2009. En 2010 funda *e-Mg Architecture* y ejerce desde entonces su actividad como profesional libre, realizando concursos y encargos y desarrollando su propia línea de investigación sobre biotecnología aplicada al diseño arquitectónico. Por ello, es contratado por el FIUS de la Universidad de Sevilla durante 2010-2011 y 2011-2012 para trabajar en dos proyectos de investigación diferentes.

Consigue el **Segundo Premio Dragados** por su Proyecto Final de Carrera (2005), obtiene una mención en el **Concurso Internacional de Ideas para la Plaza de la Encarnación de Sevilla** (2004) como miembro del grupo Composite, gana el cuarto premio en el **Concurso para el Monumento del Bicentenario de las Cortes de Cádiz** (2010) junto con Ciriaco Castro, el tercer premio en los **Holcim Awards Next Generation** por la región de Europa (2011), es nominado para los **TR35 Spain Awards** (2011) por su investigación, y seleccionado junto al equipo de recolectores urbanos por su propuesta cOOltiva (un escritorio web orientado a la Investigación 2.0) para el foro de inversores del EmTech Spain 2012, MIT's Technology Review.

*Su participación en el informe que se presenta ha sido: realización de la parte experimental, elaboración de prototipos y elaboración del informe. Mail: [emg\\_owe@hotmail.com](mailto:emg_owe@hotmail.com)*

**Dra Pilar Ortíz Calderón.** Doctora en Ciencias Químicas. Universidad de Sevilla, 1999. Sobresaliente Cum Laude. Máster en gestión integral del medioambiente. Universidad de Sevilla, 2002. Vicedacana de la Facultad de Ciencias Experimentales de la Universidad Pablo Ola-

vide desde 2011. Profesor colaborador- invitado de la Universidad de Amberes (Bélgica) desde 2010. Responsable de Calidad y Medioambiente de la empresa Tratamientos Guadalquivir, S.L.(1998-2007). Fundadora y Miembro del grupo de investigación de la Junta de Andalucía Tecnología y Medioambiente. Desde 2007 responsable del grupo de investigación. <http://www.upo.es/tym/>

Colaboración en diez contratos y/o Proyectos de investigación relacionados con temas de Patrimonio artístico, en colaboración con equipos de la Universidad de Sevilla, Universidad de Jerusalén, Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico, Ministerio de Defensa. Todo ello ha dado lugar a más de 40 trabajos publicados en revistas, capítulos de libros, libros y congresos.

*Su participación en el informe que se presenta ha sido: determinación de las propiedades tecnológicas de las materias primas (calizas).mail:*

**Dr. Carlos Tapia Martín,** Arquitecto (1996) por la Escuela Técnica Superior de arquitectura, Universidad de Sevilla, España. Doctor (2005) en arquitectura por la Universidad de Sevilla con la tesis "Capturar forma con artes prohibidas" (SOB Cum Laude), por la que recibió el premio extraordinario de doctorado de la USE 2006. Es miembro de la Comisión académica del Master Universitario 'Ciudad y Arquitectura Sostenibles'. En la actualidad desempeña la figura de Contratado Doctor, con acreditación para titular de universidad.

Es responsable del grupo de investigación OUT-Arquías, *investigación para los límites en arquitectura*. Como investigador ha desarrollado proyectos competitivos con financiación pública o privada nacionales e internacionales. Es investigador del Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC). Se puede resumir la trayectoria seguida desde su inicio hasta el presente como una preocupación por los "síntomas de contemporaneidad" y las condiciones de frontera de la arquitectura, y se ha buscado relación con los mejores especialistas en distintos "modos de hacer en la cultura", con los que ha editado una veintena de libros, en distinto grado de colaboración, o como autor individual. Quizá el más relevante para entender esa trayectoria sea "Arquitecturas del Lapso y Cronocartografías del Revés", ensayo que recoge las reflexiones del premiado matemático y filósofo Fernando Zalamea precisamente sobre los 15 años de docencia y profesión. Además, 7 artículos con calidad medible por alguno de los estándares de indexación, 10 artículos no indexados y ha participado como ponente en 20 congresos, la mayoría de carácter internacional. El Congreso McLuhan Galaxy y la edición 54 del Congreso Internacional de Americanistas, son ejemplos de calidad, con publicaciones de las ponencias en libros de referencia internacional.

Trabaja en dos redes de estudios internacionales: red PUC 'Problemáticas Urbanas Contemporáneas', con sede en Argentina, y red RESE 'Estudios Socioespaciales' con sede en Colombia, siendo de ambas miembro fundador. Dirige en este momento 8 tesis doctorales y otras 3 ya

leídas, y ha dirigido más de 20 DEAs/TfMs. Esta producción y la de su grupo de investigación ha sido la que ha posibilitado que haya sido seleccionado como profesor para el nuevo Programa de Doctorado en arquitectura de la ETSAS.

Ha sido profesor invitado en distintas Universidades europeas y latinoamericanas. Fue arquitecto de la Agencia Española de Cooperación internacional en Nicaragua (1997), Responsable del Área de Bienes Inmuebles del Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico (hasta 2000), Subdirector de Innovación Docente (hasta 2007) y posteriormente Subdirector de Proyección Exterior y Actividades Culturales (hasta 2009) de la Escuela de Arquitectura de Sevilla.

En los últimos años se ha incrementado el número de proyectos como Investigador Principal en convocatorias competitivas, es responsable del convenio docente e investigador entre la USE y la Universidad de São Paulo en São Carlos, Brasil (Instituto de Arquitectura y Urbanismo). Este convenio ha generado una dinámica de colaboraciones al más alto nivel, desde proyectos ganados en convocatorias internacionales de una cuantía por encima de la media en nuestra área de conocimiento, hasta premios de cooperación. Ha llevado a cabo 6 proyectos de Innovación Docente, 5 de ellos como responsable, aunque en el desempeño del cargo de Subdirector de Innovación docente de la ETSAS se pusieron en marcha muchos otros. Ha generado material docente de todas las asignaturas en la que ha impartido docencia, en forma de libros de resultados o material de clase.

*Su participación en el informe que se presenta ha sido: la conceptualización de la investigación realizada.*  
Mail [tava@us.es](mailto:tava@us.es)

**Dra. Auxiliadora Vázquez.** Catedrática de Escuela Universitaria, Doctora en Ciencias Geológicas. Premio Tesis Doctoral de la Universidad de Sevilla por la Tesis Doctoral: "Análisis de Imagen como Metodología de Trabajo en la Conservación de Obras Monumentales". Investigadora en temas de Patrimonio desde 1986 hasta la actualidad. La actividad investigadora más relevante se resume en: Participación en 25 proyectos de I+D+i financiados en convocatorias competitivas de Administraciones o entidades públicas y privadas. Participación en 43 Publicaciones, Documentos Científicos y Técnicos. Trabajos presentados en congresos: 22 internacionales o 10 nacionales. Los monumentos más relevantes en los que ha trabajado como investigadora: La Alhambra de Granada, Catedral de Granada, Catedral de Málaga, Catedral de Cádiz, Catedral de Guadix, Cartuja de Sevilla, Ayuntamiento de Sevilla

*Su participación en el informe que se presenta ha sido: salidas al campo y determinación de las propiedades tecnológicas de las materias primas (calizas).* Mail: [yoyivazquez@us.es](mailto:yoyivazquez@us.es)

## OBJETO Y ALCANCE

El objeto fundamental de este proyecto consiste en producir biomateriales para su uso en el ámbito de la construcción, y en el diseño de prototipos que puedan ser utilizados para iluminación ambiental, estructuras aislantes, soportes para jardines verticales, etc. Todo ello, sin generar un impacto negativo en el medio, ya que todos estos prototipos pueden ser reabsorbidos por éste sin generar residuos. De hecho, incluso algunos generan un impacto positivo, ya que liberan nutrientes después de su vida útil. En este sentido, se han desarrollado tres líneas de investigación:

**a) Dispositivos de iluminación y señalización sin consumo eléctrico configurados a partir del uso de poblaciones de micro-organismos bioluminiscentes.** Se ha trabajado con dos especies distintas de micro-organismos, las bacterias *Vibrio fischeri* y las algas unicelulares *Pyrocystis fusiformis*. Se han cultivado poblaciones de ambas especies y manipulado sus condiciones de crecimiento con el objetivo de obtener más individuos en cada población y la mayor luminosidad posible. Asimismo se han explorado las condiciones que permiten mantener a estas poblaciones de micro-organismos vivas la mayor cantidad de tiempo posible. En función de los resultados obtenidos en el laboratorio, se han fabricado distintas geometrías para albergar de la mejor manera a estas poblaciones de micro-organismos, con el objeto de diseñar prototipos de dispositivos que emitan luz, aprovechando sus propiedades bioluminiscentes de forma óptima.

**b) Estructuras biodegradables aislantes, crecidas a partir de miceliomicelio de hongo y residuo agrícola.**

La segunda propuesta ha consistido en crecer micelio de hongo sobre residuo agrícola dentro de moldes de diferente forma, para obtener paneles aislantes térmicos 100% orgánicos. Para conformar estas estructuras se ha inducido el crecimiento de distintas especies de hongo sobre diferentes sustratos agrícolas, con la intención de obtener una gama variada y versátil de prototipos que respondan a solicitudes específicas. Este trabajo, no sólo propone la elaboración de prototipos, sino también la configuración de escenarios arquitectónicos y de diseño en los que implementarlos. El primero de los prototipos diseñados, está constituido por geometrías complejas con distintas cualidades estructurales, aislantes y de accesibilidad, que se conforman mediante la agregación de componentes modulares sencillos crecidos a partir de residuo agrícola y raíces de hongo. La segunda clase de prototipos consiste en paredes estructurales orgánicas biodegradables que aíslan térmicamente, fabricadas también a partir de residuo agrícola y micelio

Las estrategias para la generación de prototipos constructivos que este documento presenta, suponen una alternativa real al modelo constructivo basado en la transformación de recursos naturales y la producción de

materiales manufacturados artificiales que generan residuos y dañan al medio. En este sentido, se propone “crecer” elementos arquitectónicos a partir de la programación de materia orgánica, en lugar de “construirlos” o “fabricarlos” consumiendo energía, emitiendo CO<sub>2</sub> y generando desechos. De este modo, no solo se evita producir un impacto negativo en el medio, sino que se consigue generar uno positivo, ya que se puede lograr incluso que se liberen nutrientes al mismo cuando acaba la vida útil del producto.

**c) Materiales obtenidos mediante la cementación de estructuras granulares, inducida por poblaciones de bacterias.**

Para desarrollar esta línea de trabajo, se hubiese necesitado más tiempo y en esta etapa no ha podido completarse. En la actualidad se han efectuado salidas al campo para recoger muestras que son utilizadas en la construcción de algunos monumentos andaluces (calcarenitas y calizas), y se ha realizado la caracterización mineralógica y propiedades tecnológicas de las materias primas. Los ensayos de laboratorio están previstos para los próximos seis meses en 2013, el desarrollo de prototipos y su aplicación en la restauración de monumentos y/o estabilización de materiales arenosos, se realizará en un futuro si se consigue subvención para ello. Estos ensayos consistirán en realizar mezclas con distintas proporciones de materias primas (arena, cloruro cálcico y bacterias de la especie *Sporosarcina pasteurii*) para estabilizar suelos arenosos, generar ladrillos y estructuras sólidas a partir de otras de grano suelto, y por otro lado preparar y tratar calizas y calcarenitas con soluciones de las bacterias antes citadas, para ver su comportamiento y aplicar los resultados que se obtengan, si son positivos, en la rehabilitación de monumentos alterados, reparar de grietas en el hormigón, etc.

En definitiva, trabajar con estos materiales no sólo articula alternativas y renovaciones en los métodos constructivos, sino que esta claridad de miras que podemos desde esas líneas providenciar, también se presenta como una innovación importante de cara al futuro.

## 1. INTRODUCCIÓN

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 medioambiente. 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.



### Dispositivos Bioluminiscentes

La bioluminiscencia consiste en la producción y emisión de luz por un organismo vivo, que es visible para otros organismos. Es un fenómeno natural que algunos seres vivos han desarrollado para atraer presas o compañeros sexuales, repeler depredadores, autodefensa, contrailuminación, localizar comida, camuflaje, o emitir señales para comunicarse. Generalmente, la bioluminiscencia se observa en animales, aunque también se aprecia en algunas especies de hongos y corales.

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 ventajas 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).

En esta línea, se propone manipular poblaciones de microorganismos bioluminiscentes que transforman energía química en energía lumínica. La emisión de luz que este tipo de microorganismos quimio-bio-luminiscentes presenta, está basada en una reacción química; por ello, no hace falta que dichos microorganismos reciban luz previamente para poder emitirla después (como sucede con los organismos fotoluminiscentes o fluorescentes). Esta característica supone una ventaja para diseñar dispositivos bioluminiscentes porque elimina la necesidad de recibir luz para poder emitirla, y porque permite controlar la emisión de luz inhibiendo o favoreciendo las condiciones en que se produce la reacción química. Dicha reacción, sucede gracias a una encima de luciferasa que estos microorganismos poseen, la cual, en un sustrato con  $O_2$  y en presencia de luciferina, cataliza un proceso del que resulta oxiluciferina y luz (Kaplan y Greenberg 1985).

El uso de microorganismos bioluminiscentes con propósitos de diseño ha sido explorado por diferentes investigadores en distintas propuestas. Entre ellas, encontramos *BioMario*, 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 las propuestas *Deep Green 1* y *Jellyfish Lounge*, ambas 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 estructuras tubulares. El segundo, se trata 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 *Aquorea victoria*), la cual confiere a las bacterias la propiedad de emitir luz. Además de estas propuestas, en noviembre de 2011, Philips anunció el prototipo de lámpara *Bio-Lamp*, la cual 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.

## Estructuras Orgánicas Aislantes

La manipulación del crecimiento de plantas y elementos vegetales para la generación de estructuras y formas arquitectónicas no es una nueva estrategia de diseño y construcción. En la arquitectura tradicional y en la arboescultura 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 sólo no generan un impacto negativo, sino que producen un impacto positivo en el medio.



Figura. 4.1. Panel de *Greensulate* (Ecovative Design).



Figura. 4.2. Protectores de embalaje de *Greensulate* (Ecovative Design).

En este sentido, la empresa *Ecovative Design*, ha desarrollado un material denominado *Greensulate*, creciendo *micelio* de hongo en grano sobre residuos agrícolas. *Greensulate* fue pensado originalmente para fabricar paneles aislantes térmicos y protectores para embalaje (Figuras 4.1 y 4.2), como sustituto de las espumas derivadas del petróleo.

*Greensulate* es un material compostable y biodegradable hecho a partir de residuos agrícolas como hojas, cáscaras de semilla, paja o virutas de madera, y semillas de hongo. En la oscuridad y con niveles altos de humedad, las semillas de hongo se desarrollan sobre el sustrato agrícola produciendo el crecimiento de micelio, que es la masa de hifas que constituye el cuerpo vegetativo de un hongo. El micelio actúa como conglomerante del residuo agrícola del que se alimenta, aportando cohesión, resistencia y rigidez. Por ello, es adecuado para crecer estructuras orgánicas sólidas y coherentes. Este tipo de estructuras no requiere de un suministro de energía suplementario para su fabricación porque crecen de forma natural. Además, como la disponibilidad de residuo agrícola y semillas de hongo es muy alta en la mayor parte del globo, se pueden fabricar de manera local evitando así el consumo de energía que requeriría su transporte. Todo ello, evita la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Estas estructuras son biodegradables y no producen desechos ni contaminan; de hecho, se pueden desbrozar al final de su vida útil y servir como nutrientes para favorecer el crecimiento de elementos vegetales.

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 alternativo a las espumas derivadas del petróleo para producir aislantes térmicos en edificios y elementos protectores en embalajes. Según los datos que presenta *Ecovative Design*, (Tabla 1 y 2) un panel rígido de *Greensulate* aísla térmicamente igual que uno de EPS (poliestireno expandido), tan sólo 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 CO<sub>2</sub> 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.

Material	EPS	Greensulate
Densidad	0,53 g/cm <sup>3</sup>	0,86 g/cm <sup>3</sup>
Coefficiente R	0.63 m <sup>2</sup> K/W	0.53 m <sup>2</sup> K/W
Inflamabilidad	Alta	Muy baja
Resistencia	2.32 kg/cm <sub>2</sub>	3.79 kg/cm <sup>2</sup>
Huella Ecológica	Grande	Pequeña
Coste	3-4 \$/m <sup>3</sup>	2-3 \$/m <sup>3</sup>

Tabla 4.1. Características y propiedades físicas entre EPS y Greensulate

Material	1 m <sup>3</sup> EPS	1 m <sup>3</sup> Greensulate
CO <sub>2</sub> emitido	462 Kg	31 Kg
Energía Consumida	500 MJ	625 MJ

Tabla 4.2. Consumo energético y emisiones entre EPS y Greensulate.

Además de la investigación realizada sobre bioluminiscencia y sobre la generación de estructuras de micelio, actualmente estamos desarrollando otra línea que consiste en la cementación de estructuras granulares inducida por micro-organismos. Esta técnica puede usarse para restauración patrimonial, generación de componentes estructurales, de caminos y carreteras, o bien para estabilizar suelos. Hasta el momento, para la estabilización de suelos se están utilizando técnicas, como inyectar materiales sintéticos artificiales micro-fina de cemento, fenoplásticos, silicatos, y poliuretano, que pueden causar problemas ambientales ya que las lechadas químicas (excepto silicato de sodio) son tóxicas y / o peligrosas (4) y (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 reducen costes, minimiza el impacto en el medio ambiente, mejora de la uniformidad de tratamiento, se consigue una concentración óptima ya que puede ser controlada y monitoreada (6, 7, 8, 9, 10, 11).

Por todo ello, la aplicación de biotecnologías de bajo coste y fácil acceso para generar nuestro entorno construido, se antoja como una estrategia sostenible con un potencial asombroso. Consecuentemente, resulta de gran interés científico y social, y se constituye como una de las líneas de investigación preferentes para ser desarrollada en un futuro inmediato.

Las posibilidades de estas prácticas híbridas, están aún poco exploradas en nuestro entorno más cercano. Sin embargo, a nivel internacional, ya existen unos pocos centros tecnológicos y universidades en los que han comenzado a investigar sobre la aplicación de biotecnologías con estos propósitos.

Por ello, es imprescindible continuar desarrollando líneas de investigación en este sentido, aquellas que fomenten la generación de nuestro entorno construido a

través de la ingeniería de lo vivo y lo no-vivo, sacando partido de las formas de inteligencia que presentan ambas categorías para obtener formas de inteligencia amplificadas que faciliten nuestro estar en el mundo y cubran nuestras necesidades pero sin causarle daño; más bien, contribuyendo a maximizar las redes de vida que lo configuran.

## 2. OBJETIVOS

El objeto fundamental de este trabajo ha sido el de diseñar y producir prototipos de biomateriales que cubriesen necesidades básicas sin causar daño al medio ambiente, a través de la implementación de biotecnologías de fácil acceso y bajo coste.

Los objetivos específicos que se fijaron fueron tres. El primero consiste en 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*). El segundo se centra en crecer micelio de hongo sobre residuos agrícolas para fabricar paneles orgánicos aislantes biodegradables. El tercero se encuentra actualmente en vías de desarrollo, y tiene que ver con la cementación de estructuras granulares (arenas, arcillas, limos, calcarenitas...) inducida por microorganismos.

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. En lo que respecta al crecimiento de estructuras de micelio, se desarrollaron dos proyectos diferentes: 3D Grown Usable Structures y Growing Architecture through Mycelium and Agricultural Waste. El primero consiste en una serie de componentes modulares que conforman estructuras complejas por agregación, y el segundo en prototipos de paneles y paredes aislantes biodegradables.

Los resultados han ido dirigidos:

- 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.

## 3. MATERIALES Y METODOS

### 3.1. PROTOCOLOS DE CULTIVO Y CRECIMIENTO DE ORGANISMOS

#### 3.1.1. Cultivo de poblaciones de micro-organismos bioluminiscentes

En este trabajo se han utilizado dos especies de microorganismos con la intención de evaluar sus cualidades lumínicas para diseñar y fabricar dispositivos bioluminiscentes. La primera de ellas es una bacteria de la especie *Vibrio fischeri*; y la segunda, 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 microorganismos:

*Vibrio fischeri*. Se encargaron unos tubos de ensayo que contenían estas bacterias y otros con agar (nutrientes) (Foto 3.1). 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, el resto murió a los diez días de interrumpir el suministro de agar a las poblaciones de bacterias.



Foto 3.1. Cultivos de *Vibrio fischeri*.

*Pyrocystis fusiformis*. Se encargaron bolsas de 50ml 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, 10ml de sales minerales más 10ml de vitaminas junto con 150ml de dinoflagelados, para 500ml 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 (Foto 3.2). Dentro de la cámara se puso una luz con un controlador de tiempo para mantenerla encendida 12h y apagada otras 12h. De este modo, las algas unicelulares crecieron y se acostumbraron a su ciclo circadiano.



Foto 3.2. Cultivos y subcultivos de *Pyrocystis fusiformis* en la cámara climática.

### 3.1.2. Crecimiento de estructuras de micelio sobre 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 (Foto 3.3). 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 a estas condiciones (Foto 3.4).

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.

## 3.2. DISEÑO DE PROTOTIPOS

### 3.2.1. Dispositivos bioluminiscentes

Se han diseñado y fabricado varias series diferentes de prototipos de dispositivos que emiten luz sin consumo eléctrico, gracias al empleo de poblaciones de microorganismos bioluminiscentes.

La primera serie de prototipos de dispositivos bioluminiscentes han sido aquellos en los que se han utilizado bacterias de la especie *Vibrio fischeri*. En concreto, se han desarrollado dos prototipos para este tipo de bacterias: unos tubos flexibles de bioplástico transparente rellenos de agar y poblaciones de bacterias para iluminar espacios naturales, y unas placas superficiales con compartimentos en los que alojar las poblaciones de bacterias con agar, como dispositivos de iluminación y señalización en ciudades y espacios verdes.

La segunda serie de prototipos bioluminiscentes ha sido desarrollada para las algas unicelulares de la especie *Pyrocystis fusiformis*. En este caso, se han diseñado cuatro clases de prototipos: estructuras pixeladas rellenas de agua salada y poblaciones de esta especie de microalgas, para fachadas y pantallas, elementos superficiales transparentes para dividir espacios interiores, contenedores con hidrogel para piezas de mobiliario, y barras rellenas también de agua salada y poblaciones de *Pyrocystis fusiformis* para señalización en carreteras y diseño de espacios públicos.

### 3.2.2. Estructuras de micelio

Se han desarrollado dos clases de prototipos constructivos con distintas geometrías. La primera ha consistido en componentes estructurales susceptibles de apilarse para conformar estructuras más complejas. Tanto su geometría como su topología, han sido diseñadas con software paramétrico y algorítmico; en concreto, Rhinoscript y Grasshopper. Para comprobar el acceso solar y la luminosidad de las estructuras complejas conformadas por agregación de componentes, se simuló por ordenador varias de estas poblaciones. La segunda clase de prototipos en 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. El residuo agrícola que se utilizó se hirvió durante sesenta 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 más rápido el micelio.

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 la fabricación de la estructura de madera se utilizó una cortadora láser y para fabricar el molde una fresadora digital.



Foto 3.3.

Placas Petri rellenas con diferentes tipos de semillas de hongo y residuo agrícola.



Foto 3.4. Cultivos de distintas especies de hongos sobre diferentes sustratos agrícolas dentro de cámara climática a 20°C de temperatura y a una humedad del 80%.



### 3.3. ANÁLISIS DE MATERIALES UTILIZADOS EN PROCESOS DE CEMENTACIÓN INDUCIDA POR MICROORGANISMOS

#### 3.3.1. Materias primas inorgánicas

**Trabajos de campo** para el muestreo de materias primas inorgánicas que se usarán en la cementación inducida por poblaciones de bacterias (calizas, calcarenitas).

Se han realizado dos salidas al campo, la *primera* de ellas a Estepa, Pedrera, Alcalá de Guadaira (Sevilla) y Arcos de la Frontera (Cádiz), para la toma de tres muestras de calizas (PA-PB-PC) y tres de calcarenitas (A1-A2-A3) que son las rocas más comunes utilizadas en el patrimonio monumental de Andalucía (Fotos 6.5 y 6.6).



Foto 3.5. Cantera de calizas Pedrera (Sevilla).



Foto 3.6. Cantera de calcarenitas de Alcalá de Guadaira (Sevilla).

La segunda a Mengíbar y Porcuna (Jaén) para la toma de tres muestras de diatomitas (D2-D6 y D10) (Foto 3.7)



Foto 3.4. Afloramiento de diatomitas de Mengibar (Jaén).

#### Trabajos de laboratorio

##### a) Caracterización mineralógica de las materias primas

El análisis mineralógico se ha efectuado mediante difracción de rayos-X (DRX), con un equipo Bruker D8 Advance de polvo con anticátodo de Cu y condiciones estándar de velocidad  $2^\circ 2\theta/\text{min}$  entre  $3$  y  $70^\circ$  a  $30 \text{ mA}$  y  $40 \text{ KV}$ . El estudio de la muestra total se ha efectuado por el método de polvo cristalino (polvo desorientado) sobre portamuestras de carga lateral. La caracterización detallada de los minerales de la arcilla (filosilicatos) se realizó por el método del agregado orientado (AO), con tratamientos de etilenglicol (EG), y calentamiento a  $550^\circ\text{C}$ . En todos ellos el intervalo estudiado ha sido de  $3$  a  $30^\circ$  de  $2\theta$ . Para estimar los porcentajes minerales identificados en la muestra total y en la menor de  $2\mu\text{m}$ , se han usado los poderes reflectantes propuestos por diversos autores y corregidos para las condiciones de trabajo usadas. La caracterización microtextural y morfológica se realizó por microscopía electrónica de barrido (MEB) efectuando análisis químicos mediante un detector de energía dispersiva de rayos-X (EDX) e imágenes de electrones retrodispersados. El estudio petrográfico, se han realizado tres láminas delgadas de las muestras de calcarenitas y dos de calizas. Las rocas fueron teñidas con rojo de alizarina que reacciona con el Ca de la calcita, para descartar la posible presencia de dolomita. Posteriormente, se realizó su estudio mineralógico y textural utilizando un microscopio óptico de polarización Nikon Optiphot-Pol.

##### b) Determinación de propiedades tecnológicas de las materias primas que se utilizarán en la elaboración de prototipos

Las características físicas de las rocas naturales, derivadas de las relaciones texturales y estructurales van a determinar el comportamiento del material.

La cuantificación del sistema poroso se ha realizado de acuerdo con las normas RILEM (1.980) e ISRM (1.979).

Se ha determinado la porosidad total (relación entre la densidad de la roca seca y la densidad real) y la porosidad abierta, tanto la porosidad accesible al agua como al mercurio).

Se ha utilizado preferentemente la porosimetría de mercurio, aunque es un método indirecto, basado en la inyección de mercurio a presión y registro del volumen de mercurio intruído en función del nivel de presión. Esta técnica permite evaluar el tamaño de los accesos a los poros, cuyos radios estén comprendidos entre  $0.001 \mu\text{m}$  y  $100 \mu\text{m}$ . En el estudio realizado se ha utilizado un equipo marca Carlo Erba, modelo 2000 con unidad de macroporo. Los datos registrados se han tratado con el paquete de software MILESTONE. Para materiales de elevada microporosidad (calcarenitas) se ha usado la adsorción superficial de nitrógeno (BET), que permite evaluar la superficie específica y en función de ésta determinar el tamaño de los poros. Siendo su rango de aplicación de  $3.5 \text{ \AA}$  a  $0.5 \mu\text{m}$ .

### **Densidad real y aparente**

La densidad real de una roca define la relación entre la masa de la muestra seca y su volumen impermeable. La densidad aparente se expresa como el cociente entre la masa de la muestra seca y su volumen aparente. La densidad aparente se ha calculado en probetas de forma prismática de  $10 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ . Las probetas han sido desecadas a  $105^\circ\text{C}$  hasta peso constante y el volumen se ha determinado a partir de tres medidas realizadas por cada dimensión con un calibre de precisión  $0.05 \text{ mm}$ .

### **Comportamiento hídrico.**

#### **Cinética de absorción de agua**

De acuerdo con los objetivos de este trabajo, se han determinado las siguientes propiedades hídricas que en conjunto definen el comportamiento frente al agua.

- Absorción libre de agua por inmersión total.
- Absorción de agua por inmersión bajo vacío: Saturación.
- Succión de agua por capilaridad.
- Succión de agua por capilaridad bajo vacío: Saturación.
- Absorción de vapor de agua.

El estudio completo se ha realizado sobre probetas de forma prismática, cuyas dimensiones son  $10 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ , correspondientes a las tres variedades de calizas: PA, PB y PC.

Previamente, las probetas se desecaron en estufa a  $60 \pm 5^\circ \text{C}$  durante 24 horas, con esta temperatura se evitan alteraciones inducidas en el material. A continuación se colocan las muestras en un desecador con gel de sílice y se dejan enfriar tres horas, pesándolas seguidamente hasta peso constante. La diferencia entre dos pesadas consecutivas separadas 24 horas, ha de ser menor o igual al  $0.01 \%$  de la masa inicial de la probeta. De este modo se obtiene la masa seca ( $M_0$ ) basado en las normas italianas (CNR-ICR Normal F/1-7/81, 1.981).

### **3.3.2. Materias primas orgánicas (bacterias)**

Como se ha comentado en el capítulo de objeto del trabajo, no se ha podido realizar esta etapa, por lo que se describirá la metodología que se piensa seguir en los próximos seis meses, ya que pensamos que el interés de la propuesta hace necesario que se continúe la investigación.

En una primera etapa, se procederá al aislamiento y cultivo de las bacterias. Se prepararán distintos medios para empezar a cultivar poblaciones de bacterias cuyos pH oscilarán entre 7 y 8 (aunque después de la precipitación de  $\text{CaCO}_3$  y la fijación de cationes a las paredes celulares probablemente el medio alcance un pH 9). La temperatura de incubación de los distintos cultivos oscilará entre  $34^\circ\text{C}$  y  $37^\circ\text{C}$  y se agitarán para asegurar la suspensión de todas las células durante 24h a 130 o 200 rpm, mediante centrifuga. Se utilizará una cámara climática con temperatura y humedad controlada durante todo el experimento, se realizarán ensayos en distintas condiciones para modelizar, cuáles son las condiciones idóneas donde se reproducen mejor.

Posteriormente, se probarán las mejores condiciones para la producción de cristales. Las poblaciones de bacterias se inocularán en agar (B4) durante unos quince días hasta observar macroscópicamente la formación de cristales sobre la superficie del medio de cultivo. Para elaborar la solución base, por cada litro de agua destilada se necesitarán 3gr de nutriente (agar), 20gr de urea  $\text{NH}_2(\text{CO})\text{NH}_2$ , 10 g de  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , 2 g de  $\text{NaHCO}_3$ , y alcanzar un pH de 4. Seguidamente se añadirán aproximadamente  $2 \times 10^6$  células/ml de *Sporosarcina pasteurii* por cada 400ml de la solución base agua-urea, anteriormente mencionada, junto con 8ml de  $\text{CaCl}_2$ .

Una vez obtenida la solución cementante definitiva se podrá verter sobre moldes llenos con estructuras granulares para solidificarlas o inyectar en muestras de suelos para ver en qué medida se mejora su estabilidad. También se realizará el tratamiento de las calizas, areniscas y calcarenitas con las soluciones cementantes para conocer cómo afecta al sistema poroso.

En función de los resultados obtenidos se comprobará si se han conseguido los objetivos que se proponen o es necesario modificar las condiciones inicialmente propuestas.

En los productos obtenidos de la actividad de las bacterias, se realizará una caracterización mineralógica y se determinarán las propiedades tecnológicas. En concreto:

- *Determinación del carbono total mediante analizador elemental de C, O, H, N.* Esta determinación permitirá conocer el carbono procedente de los carbonatos totales (previos y posteriores al ensayo, y el que corresponda las bacterias residuales).

- *Caracterización mineralógica por difracción de rayos-X.* Las muestras se estudiarán mediante el *microscopio óptico* y la *lupa binocular* para observar los granos de carbonato producidos en el medio de cultivo, y por

*microscopía electrónica de barrido (SEM)*, con detector de energía dispersiva de rayos X (EDX) e imágenes de electrones retrodispersados, para observar y analizar los cambios texturales que se previsiblemente se producirán por la cementación.

- Se efectuarán *ensayos de resistencia mecánica (compresión, flexión)* para determinar la resistencia de los prototipos fabricados. Para ello, se utilizarán las normas de resistencia a compresión uniaxial (UNE-EN\_1926:2007) y para piedra aglomerada (UNE-EN 14617-15:2006), así como el equipo de point-Load, para poder incluso evaluar piezas "in situ".

- Se evaluará *la cinética de absorción de agua a presión atmosférica*, siguiendo las normas UNE-EN\_13755=2002 y UNE-EN\_13755/AC: 2004 y la capilaridad de los materiales siguiendo la norma UNE-EN\_772-11:2001.

- Determinación *la porosidad de los materiales*, mediante ensayos de absorción de agua (porosidad total), mediante porosimetría de mercurio (macro y meso poros) y adsorción de N (microporos). Se seguirán las normas UNE-EN\_772-4:1999 y UNE-EN\_1936:2007, para la evaluación de la densidad real y aparente, la porosidad abierta y cerrada.

- Ensayos de *alteración acelerada de las muestras* de calcarenitas, calizas y areniscas, tratadas con bacterias, en cámara climática. Los ensayos previstos serán de humedad-sequedad, choque térmico (UNE-EN\_14066:2003), cristalización de sales (UNE-EN 12370:1999), y heladicidad (UNE-EN 12371:2002).

## 4. RESULTADOS Y CONSIDERACIONES

### 4.1. DISPOSITIVOS QUE EMITEN LUZ SIN CONSUMO DE ELECTRICIDAD A TRAVÉS DEL USO DE POBLACIONES DE MICRO-ORGANISMOS BIOLUMINISCENTES

El trabajo de investigación experimental y proyectual que se ha definido como *Bioluminescent Devices for Zero-Electricity Lighting*, se sirve de cultivos de poblaciones de micro-organismos bioluminiscentes para producir dispositivos que emiten luz sin consumo eléctrico. En concreto, de las dos especies mencionadas en este artículo con anterioridad: las bacterias *Vibrio fischeri* y las microalgas *Pyocystis fusiformis*. Ambas formas de vida emiten luz de manera natural, por lo que no ha sido necesario manipularlas genéticamente para conseguir que brillaran.

La especie de bacteria *Vibrio fischeri* se encuentra habitualmente en mares, normalmente en aguas subtropicales. Es heterótrofa y se alimenta de sustancias gelatinosas como el agar, aunque también puede sobrevivir alimentándose de cierto tipo de materia en orgánica en

descomposición. Tiene propiedades bioluminiscentes y suele encontrarse en simbiosis con animales marinos. Por ello, se han propuesto dos escenarios posibles de diseño, uno en el que haya que "alimentar" a los dispositivos fabricados, y otro en el que éstos estén en simbiosis con diferentes organismos que alimenten a las bacterias.

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 (Kaplan y Greenberg 1985). 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 éstas se comunican coordinando un comportamiento social complejo y descentralizado, dan lugar a distintos comportamientos bioluminiscentes (Foto 4.1 y 4.2).

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 que por el día (período de tiempo en el que muchas veces ni siquiera brillan). 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 fenómeno 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.

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. Durante la investigación se ha constatado que brillan más si se disponen por capas, de 0.5cm a 2cm de espesor, en geometrías relativamente superficiales.

En estas condiciones pueden usarse para iluminación ambiental en ciudades (Foto 4.3) y en espacios naturales (Foto 4.4 ). 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 en 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. Por ello, conviene 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. (Foto 4.5).

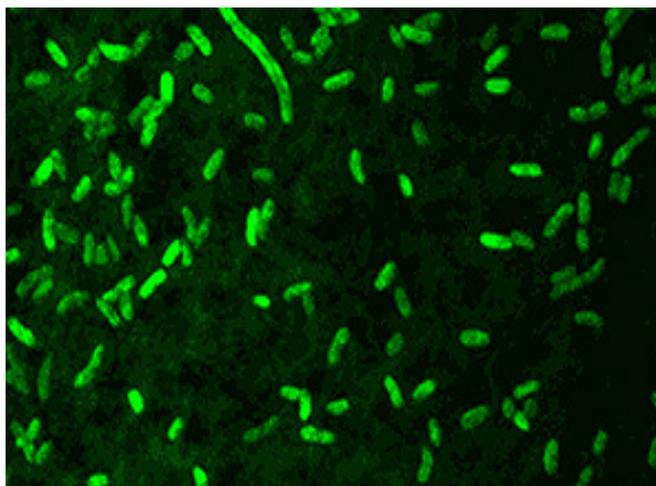


Foto 4.1. Especie de bacteria *Vibrio fischeri* vista al microscopio.



Foto 4.2. Poblaciones de bacterias *Vibrio fischeri*.



Foto 4.3. Bioiluminación ambiente de ciudades y carteles publicitarios.



Foto 4.4. Bioiluminación y señalización de espacios naturales.



Foto 4.5. Prototipo de estructura para pantallas.

La segunda clase de micro-organismos con los que se trabajó pertenecen a la especie de algas unicelulares *Pyrocystis fusiformis* (Fotos 4.6 y 4.7). 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 (Wilson y Hastings 1998). En este proceso, las microestructuras se reemplazan por cloroplastos, lo que resulta ausencia de bioluminiscencia. Sin embargo, durante la noche retornan a la periferia y se produce bioluminiscencia.

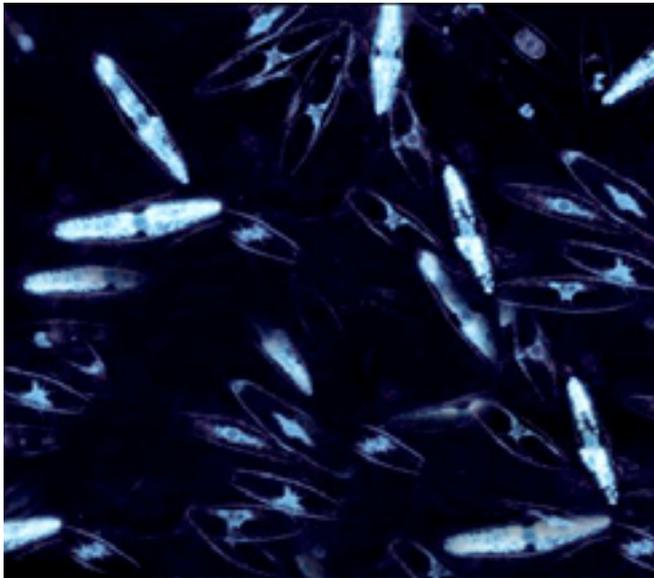


Foto 4.6. Especie de microalgas *Pyrocystis fusiformis* vista al microscopio.



Foto 4.4. Poblaciones de *Pyrocystis fusiformis* en agua de mar.

El primer cultivo de *Pyrocystis fusiformis* que se creció no emitió ningún tipo de luz, de modo que se observó una muestra al microscopio y se pudo comprobar que un organismo estaba alimentándose de las microalgas (Fotos 4.8 y 4.9). El segundo cultivo comenzó a brillar levemente 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 (Foto 4.10). A las dos semanas, se subdividieron los cultivos en otros contenedores con agua salada para aumentar la población de microorganismos bioluminiscentes (Foto 4.11). Para este segundo cultivo, se incrementó el tiempo de exposición a la luz artificial dentro de la cámara climática pasando a 17 h con luz y 7 h 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.

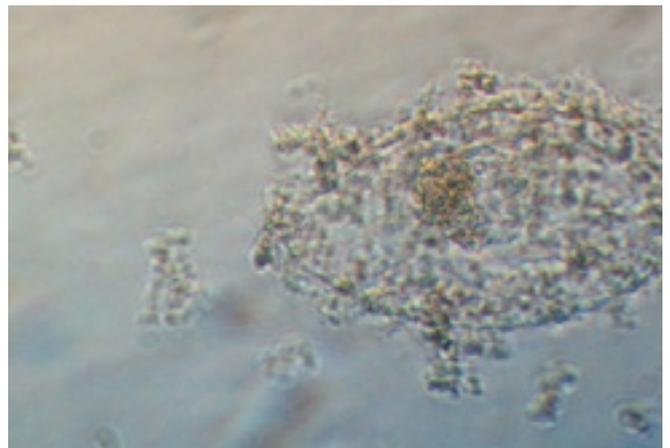


Foto 4.8. Especímenes contaminados de *Pyrocystis fusiformis*.

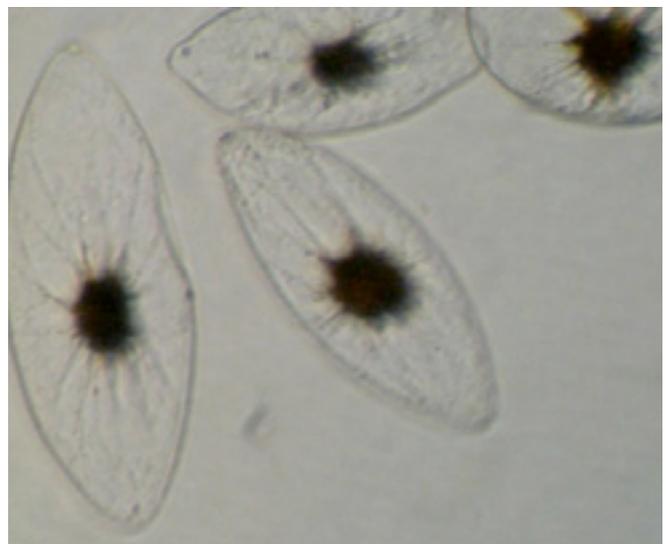


Foto 4.9. Especímenes sanos de *Pyrocystis fusiformis*.

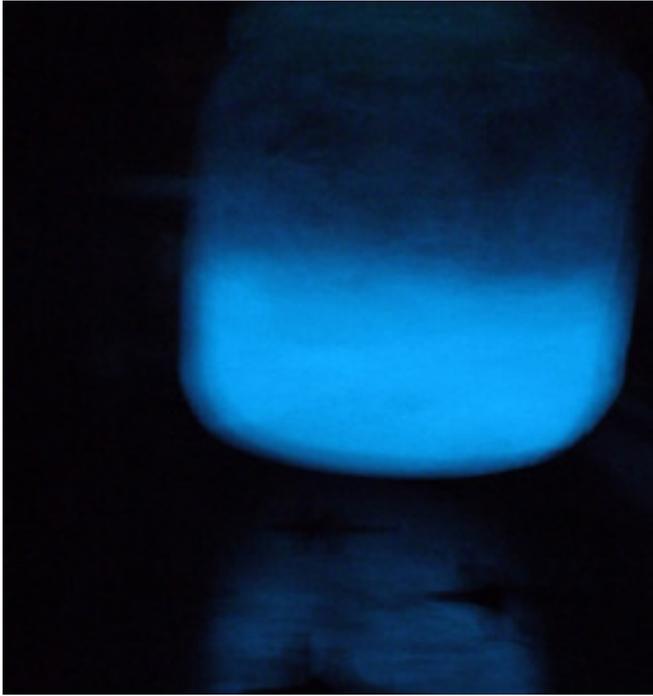


Foto 4.10. Cultivo de *Pyrocystis fusiformis* emitiendo luz al ser excitado por movimiento.

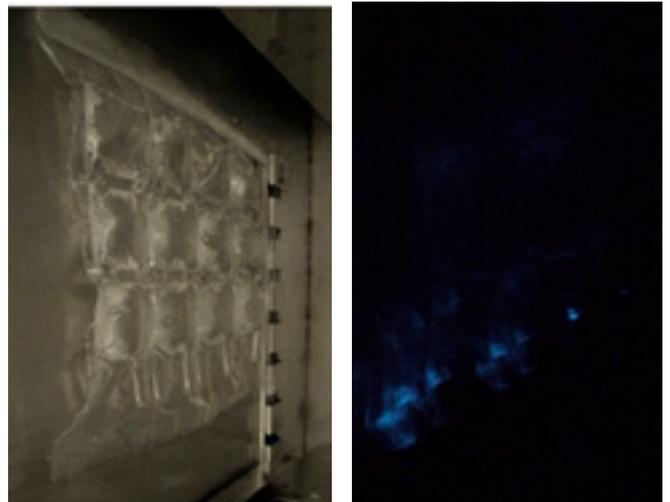


Foto 4.12. Prototipo de estructura pixelada para poblaciones de *Pyrocystis fusiformis* en incubadora.



Foto 4.11. Subcultivos de *Pyrocystis fusiformis* en la cámara climática.

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 (Foto 4.12) 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 (Foto 4.13). Este prototipo podría servir para fachadas, pantallas, carteles comerciales, señalética, o incluso para reproducir imágenes.

Se probó otra geometría cuyo volumen también era de 10ml, pero con una distribución más superficial que la anterior (Foto 4.14). La intención era comprobar las propiedades lumínicas de las microalgas en elementos prácticamente planos para desarrollar superficies transparentes que dividiesen 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 el de 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 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 (Fotos 4.15 y 4.16).

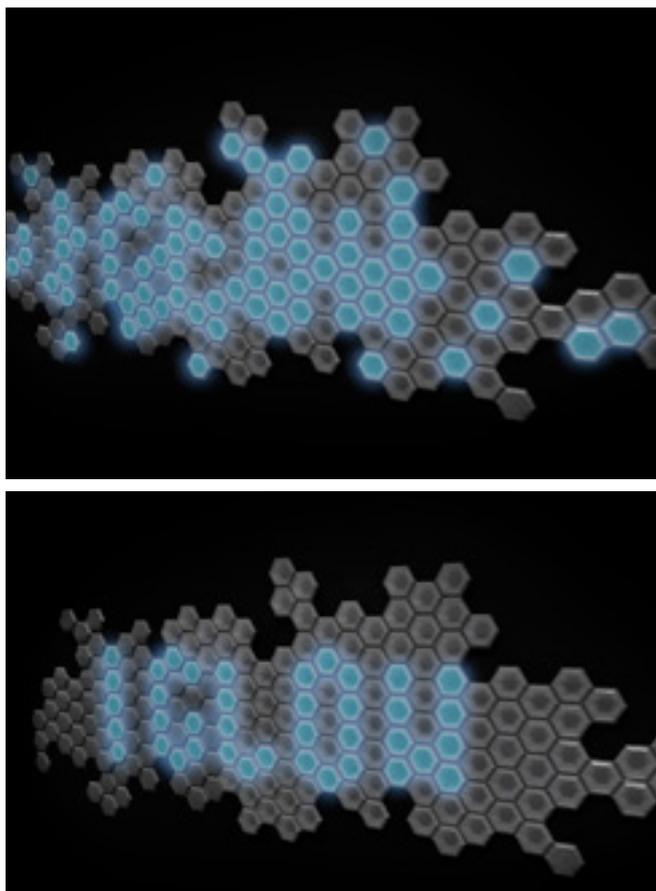


Foto 4.13. Pantallas bioluminiscentes de píxeles hexagonales.

La última geometría que se probó, esta vez con éxito, fue un contenedor plástico flexible y transparente de 200ml en el que se podía apreciar una calidad en el brillo muy similar a la de los contenedores de los cultivos originales (Foto 4.17). Los resultados obtenidos con este prototipo, indican que sería posible pensar en dispositivos bioluminiscentes eficientes para iluminar y señalizar 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.

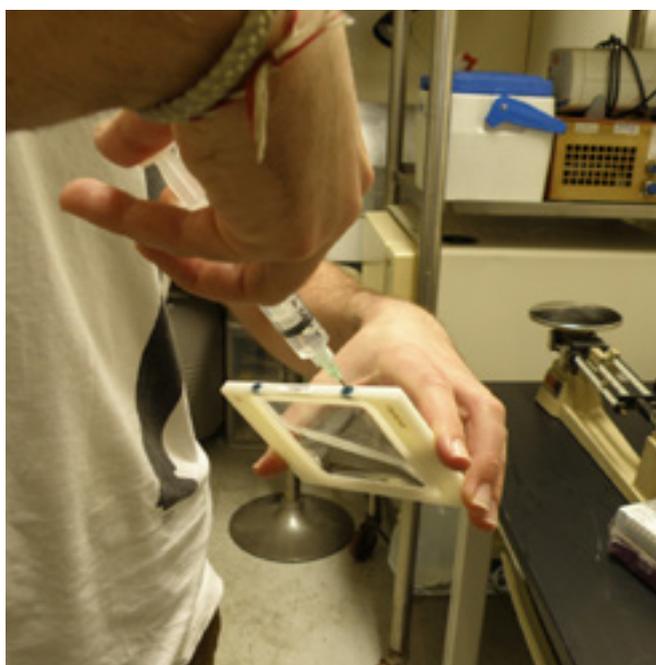
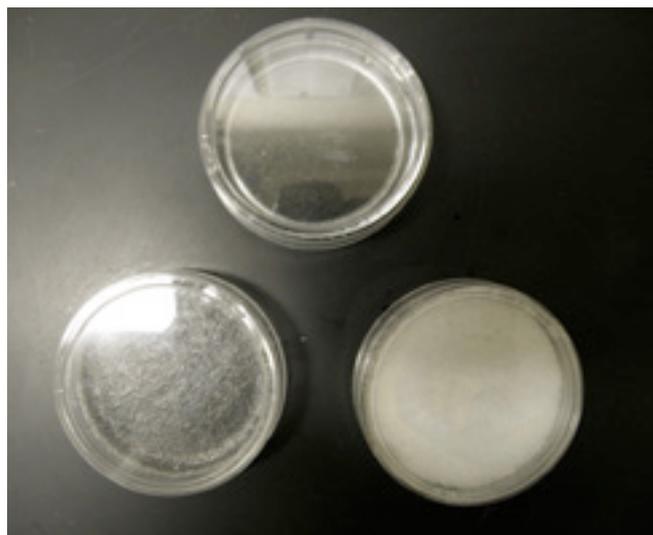


Foto 4.14. Inyección de poblaciones de *Pyrocystis fusiformis* en prototipo de membrana superficial bioluminiscente.



Fotos 4.15 y 4.16. Pruebas con hidrogel.



Foto 4.14. Prototipo de bolsa bioluminiscente de 200 ml.

Este tipo de geometrías condujo a pensar en otro escenario de diseño posible, un campo de barras hechas con material biodegradable, que contuviesen agua salada con poblaciones de *Pyrocystis fusiformis* (Foto 4.18 y 4.19). El movimiento del viento excitaría los dinoflagelados contenidos en las barras transparentes, de modo que éstas 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 (Foto 4.20). Si el prototipo se instalase en un espacio público, la energía cinética podría utilizarse para calentar el pavimento.

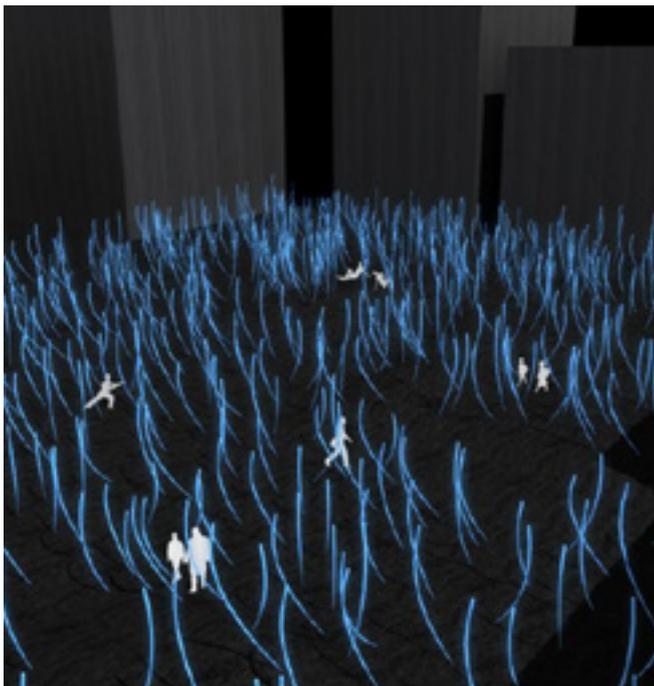


Foto 4.18. Campo de barras bioluminiscentes para espacios públicos.

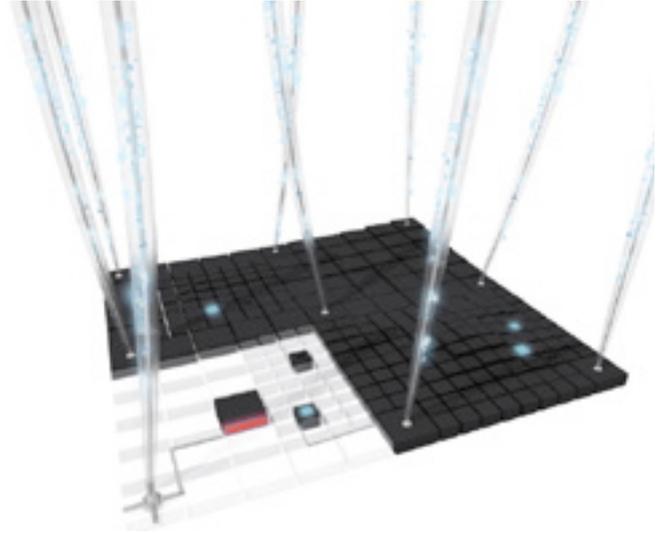


Foto 4.19. Diseño de prototipo para campo de barras bioluminiscentes.

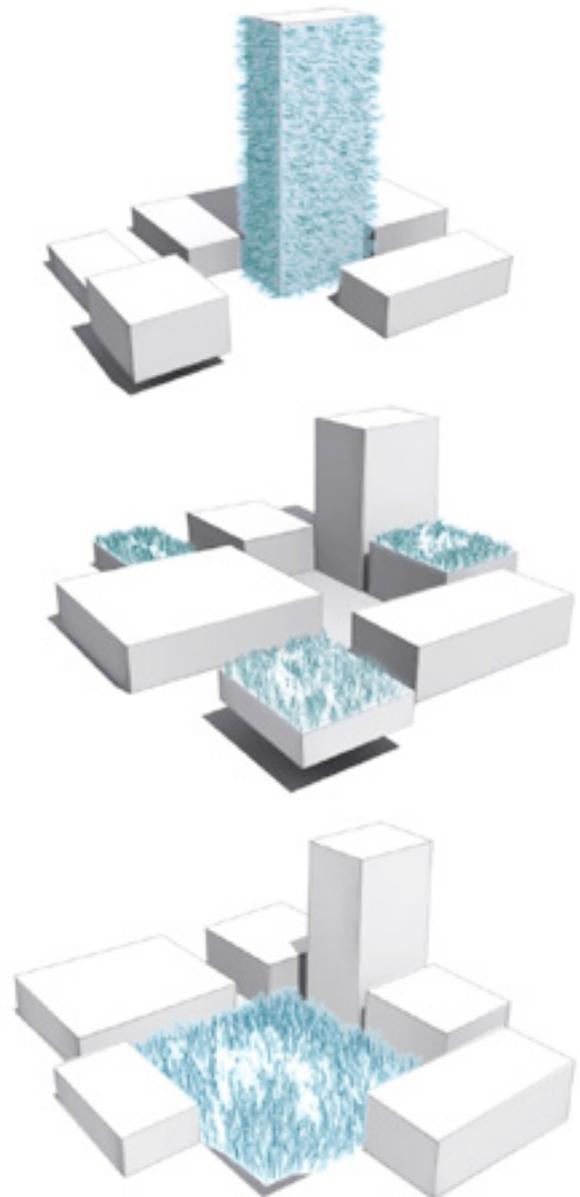


Foto 4.20. Campo de barras bioluminiscentes para fachadas, cubiertas y espacios públicos.

Tras haber estudiado el comportamiento y las características de poblaciones de *Vibrio 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 sólo 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 “alimentarlos” 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 puedan vivir las microalgas.

#### 4.2. CRECIMIENTO DE ESTRUCTURAS GENERADAS CON MICELIO DE HONGO Y RESIDUO AGRÍCOLA.

Antes de empezar a crecer estructuras en moldes a partir de residuo agrícola y semillas de hongo, se analizó

una muestra de *Greensulate* con el fin de averiguar su composición y su estructura interna. Para ello, se estudió una muestra de este material proporcionada por Ecovative Design al Centro de Investigación, Tecnología e Innovación de la Universidad de Sevilla (CITIUS). Los ensayos de caracterización pusieron de manifiesto que en un 95% *Greensulate* está compuesto de materia orgánica amorfa, y los análisis de microscopía electrónica (SEM-EDAX) que se trata de materia porosa con partículas de fosfato cálcico y mica (Foto 4.21). Estos resultados mostraron que el material era 100% biodegradable y que no contiene ningún elemento dañino para los humanos ni para el medio ya que no se han identificado elementos traza en su composición química (Tabla 4.1).

El estudio textural, por SEM, muestra que existe una ligazón relativamente fuerte entre sus componentes, lo que se debe a la acción conglomerante del micelio. (Ver ANEXO I). Sin embargo, a partir de ellos también se pudo deducir que las estructuras fabricadas con *Greensulate* no tienen una vida útil muy larga si se sitúan en el exterior sin protección. Esto sucede porque este material es susceptible de ser atacado por los agentes atmosféricos (si bien Ecovative Design se encuentra ahora desarrollando un método basado en el uso de aceites esenciales para que *Greensulate* se pueda crecer *in situ* y resista más tiempo en el exterior).

A partir de esos datos, se comenzó a experimentar en el laboratorio con distintos tipos de hongo y soportes. Los trabajos de laboratorio efectuados permitieron concluir que la especie *Pleurotus ostreatus* o seta de ostra y

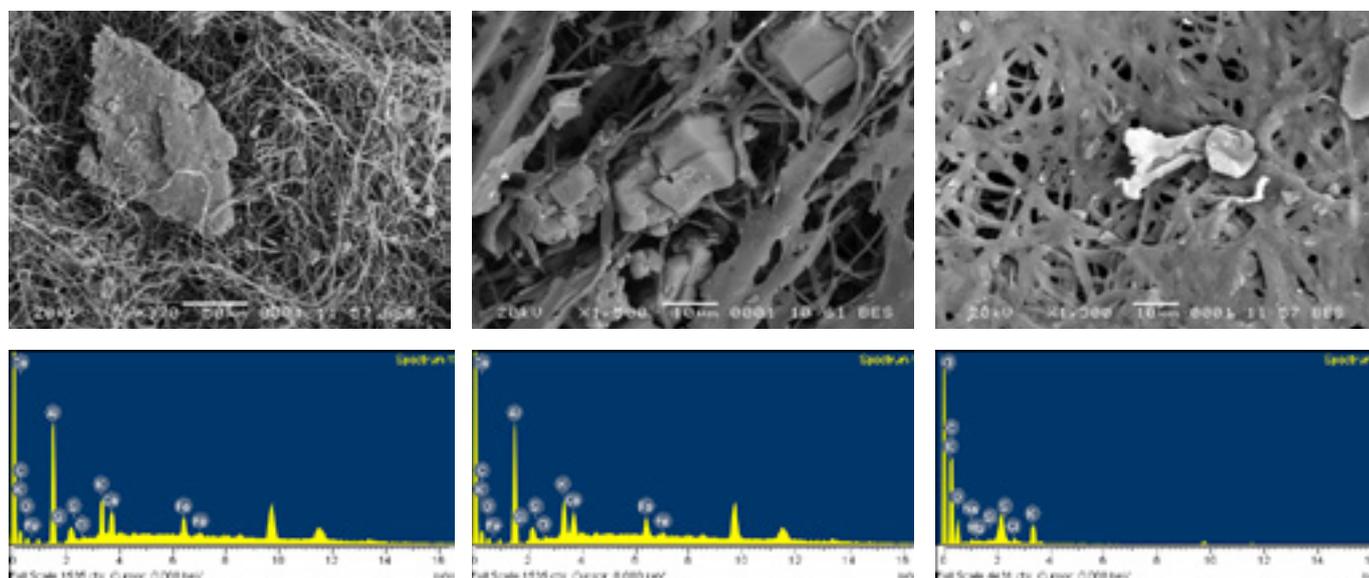


Foto 4.21. Fotografías de microscopía electrónica de barrido de *Greensulate* donde se observa la elevada porosidad de la muestra y espectros con el análisis puntual de las partículas presentes: mica y fosfato cálcico.

K2O	CaO	SO3	P2O5	SiO2	MgO	Cl	Al2O3	Fe2O3	Na2O	TiO2	BaO	MnO	P.C
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1,419	0,983	0,509	0,418	0,395	0,285	0,230	0,090	0,080	0,037	0,008	0,004	0,004	95,53

Tabla 4.1. Composición química de la muestra estudiada, analizada por X-Ray Fluorescence (EDXRF).



Foto 4.22. Micelio de semillas de *Pleurotus ostreatus*, o seta de ostra, creciendo sobre sustrato de paja triturada.



Foto 4.23. Micelio de semillas de *Lentinula edodes*, o Shiitake, creciendo sobre sustrato de virutas de madera de roble.

la especie *Pleurotus citrinopleatus* o seta de ostra amarilla crecen mejor sobre paja o paja triturada pasteurizada (Foto 4.22), la especie *Lentinula edodes* o Shiitake y la especie *Ganoderma lucidum* o Reishi crecen mejor sobre serrín o virutas de madera de roble, castaño, encina o alcornoque (Foto 4.23). 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 se presentan en la propuesta *3D Grown Usable Structures*, la cual plantea una serie de componentes modulares (Figura 4.1) cuya

geometría y topología se pueden modificar en tiempo real en fase de diseño. Dichos componentes no se fabrican, sino que se “crecen” en moldes a partir de residuo agrícola y semillas de hongo. Su forma está pensada para que puedan agregarse y conformar estructuras complejas (Figura 4.2) con un mayor nivel organizacional, dando lugar así a espacios usables, habitables, 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.

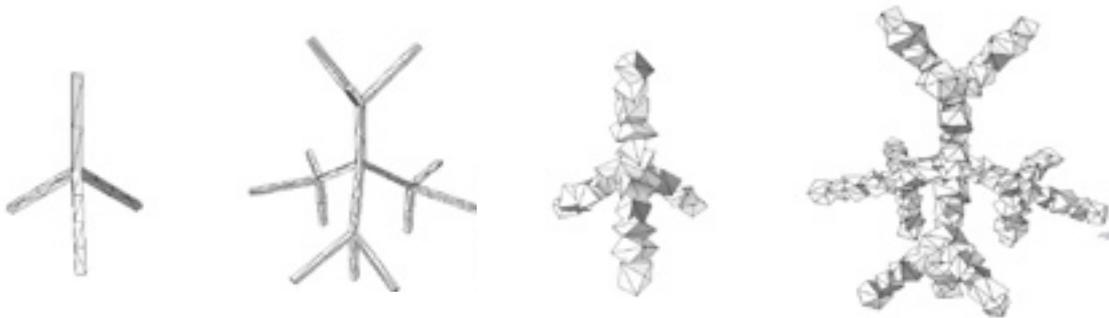


Figura 4.1. De izqda. a dcha.: Módulo Prismático Regular de Una Generación / Módulo Prismático Regular de Dos Generaciones / Módulo Cúbico Regular de Una Generación / Módulo Cúbico Regular de Dos Generaciones.



Figura 4.2. De izqda. a dcha.: Población Prismática Regular de Una Generación / Población Prismática Regular de Dos Generaciones / Población Cúbica Regular de Una Generación / Población Cúbica Regular de Dos Generaciones.

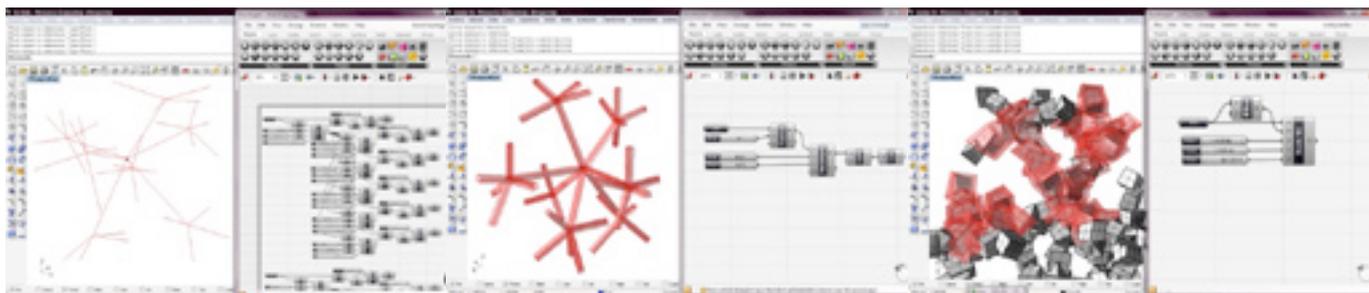


Figura 4.3. De izqda. a dcha.: Estructura lineal de ramas / Topología Prismática / Topología Cúbica.

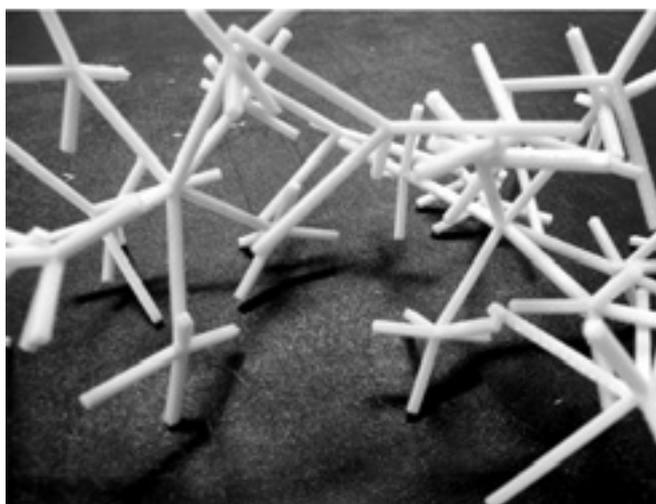


Figura 4.4. Maqueta de Población Prismática Regular Mixta.

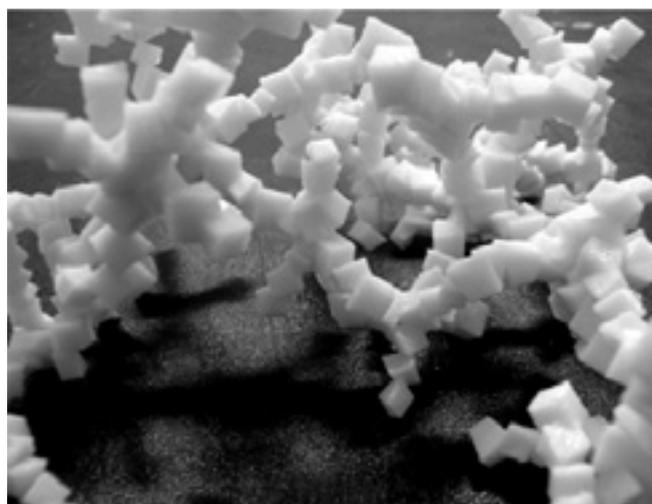


Figura 4.5. Maqueta de Población Cúbica Irregular Mixta.

Estas ramas pueden tener forma de prisma rectangular o estar conformadas por cubos distorsionados unidos entre sí. Tanto la geometría de los componentes (número de generaciones de ramas, número de ramas, dimensiones y ángulo de inclinación de las mismas) como su topología (ramas prismáticas o conformadas por la unión de cubos distorsionados) están controladas algorítmicamente y paramétricamente a través de códigos de Rhinoscript y Grasshopper (Figura 4.3). Esta estrategia de generación de forma permite re-in-formar los componentes modulares en tiempo real, de manera que se puede modificar su geometría y topología para configurar poblaciones personalizadas por agregación de componentes. 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 de los componentes determina 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 pasar más o menos luz, aislará térmicamente mejor o peor, será más o menos fácil acceder a ella (Figuras 4.4 y 4.5).

Para comprobar el acceso solar y la luminosidad de este tipo de estructuras complejas conformadas por agregación de componentes, se simularon en Ecotect varias de estas poblaciones (Fig. 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 7-10, 7-11) arrojando los siguientes resultados:

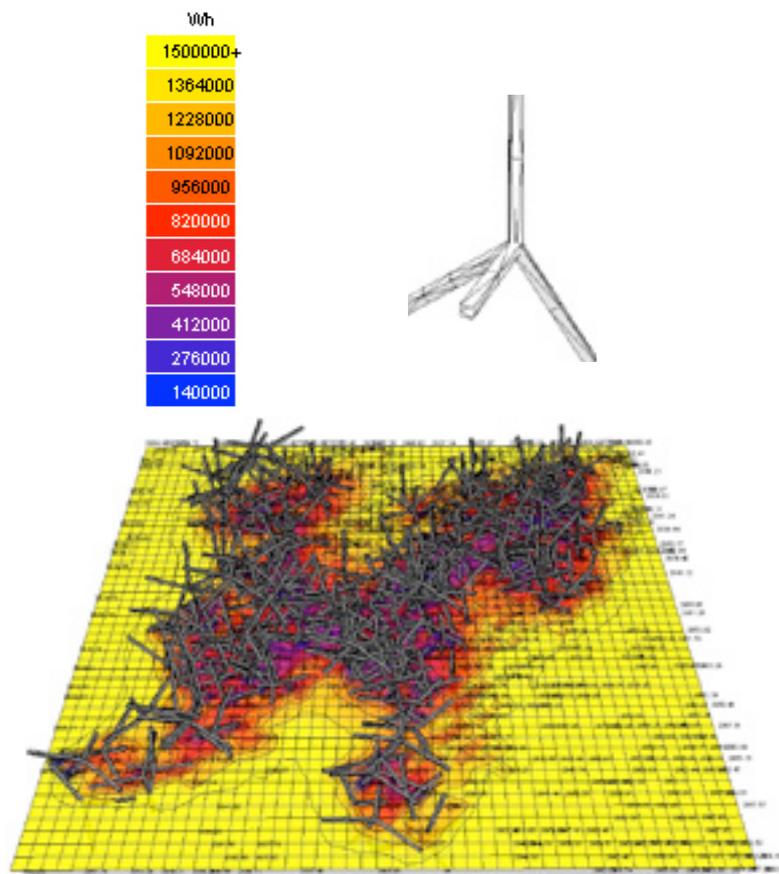


Figura 4.6. Mapa de Acceso Solar para Población Prismática Irregular de Una Generación.

La *Población Irregular Prismática de Una Generación* 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 practicables 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 éstos 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. 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/m<sup>2</sup> y 1354.4 cd/m<sup>2</sup>, excepto en el caso de la *Población Prismática Mixta*, que alcanza un valor de 18271.3 cd/m<sup>2</sup>. 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

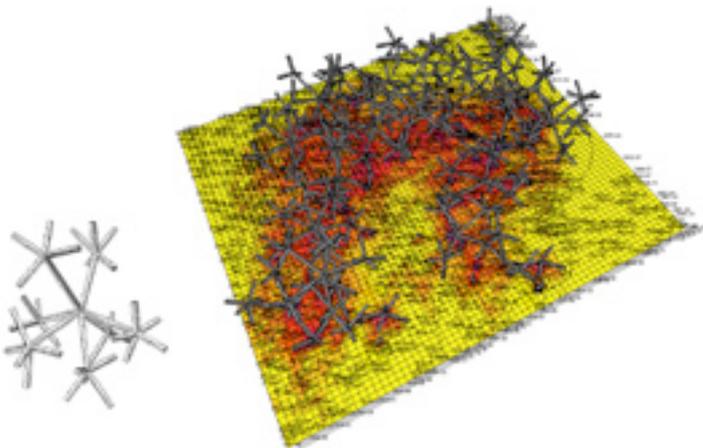


Figura 4.4. Mapa de Acceso Solar para Población Prismática Irregular de Dos Generaciones.

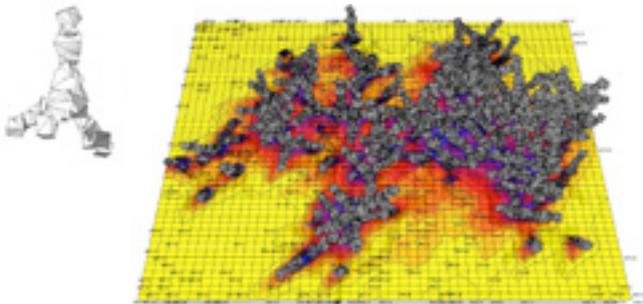


Figura 4.8. Mapa de Acceso Solar para Población Cúbica Irregular de Una Generación.

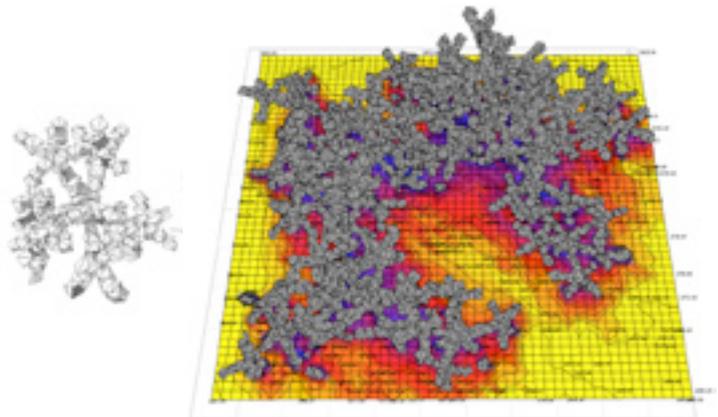


Figura 4.9. Mapa de Acceso Solar para Población Cúbica Irregular de Dos Generaciones.

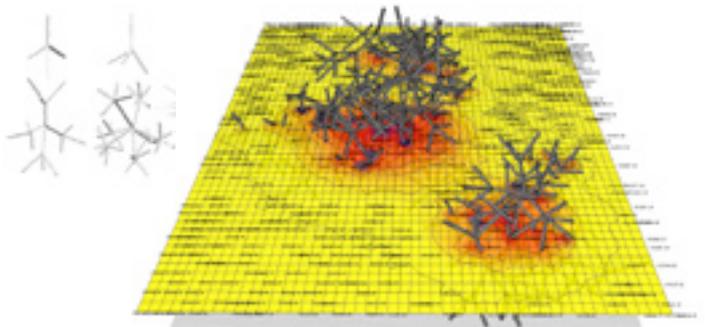


Figura 4.10. Mapa de Acceso Solar para Población Prismática Mixta.

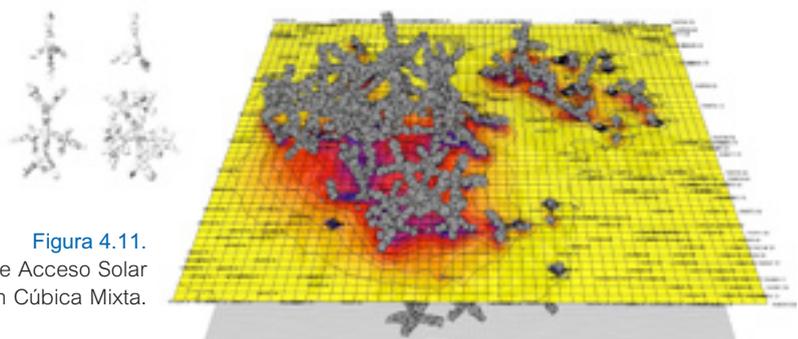


Figura 4.11. Mapa de Acceso Solar para Población Cúbica Mixta.

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 más superficies con valores de luminosidad más altos que los de la *Población Cúbica Mixta* (Figuras 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17).

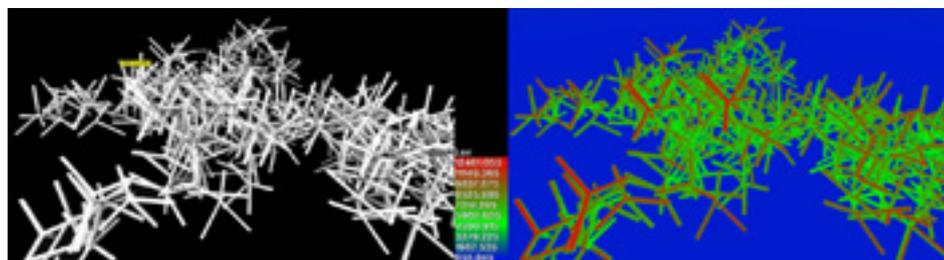


Figura 4.12. Mapa de Luminosidad para Población Prismática Irregular de una Generación.

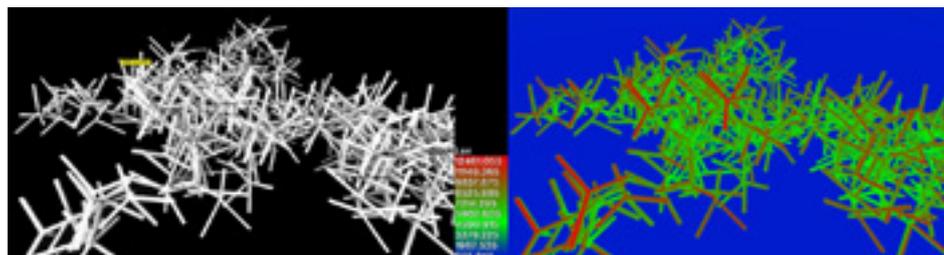


Figura 4.13. Mapa de Luminosidad para Población Prismática Irregular de dos Generaciones.

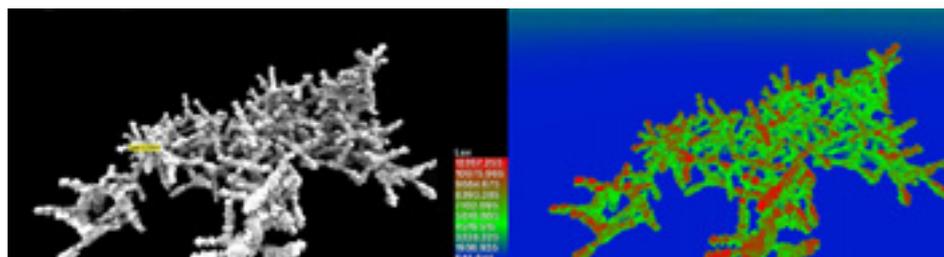


Figura 4.14. Mapa de Luminosidad para Población Cúbica Irregular de una Generación.

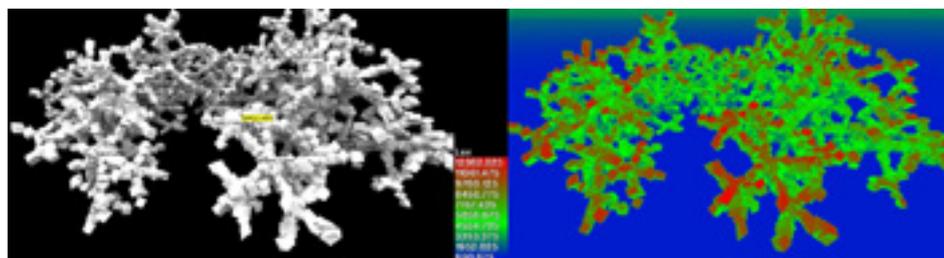


Figura 4.15. Mapa de Luminosidad para Población Cúbica Irregular de dos Generaciones.

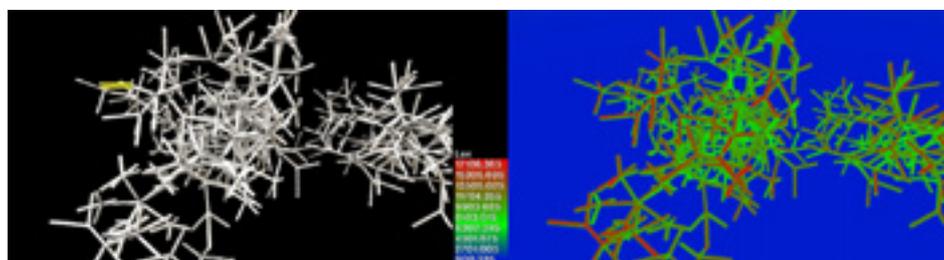


Figura 4.16. Mapa de Luminosidad para Población Prismática Mixta.

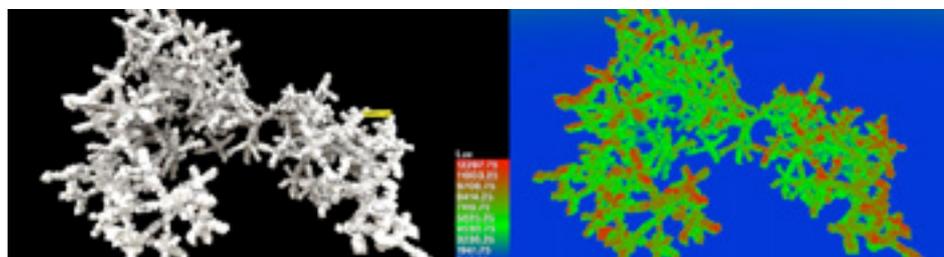
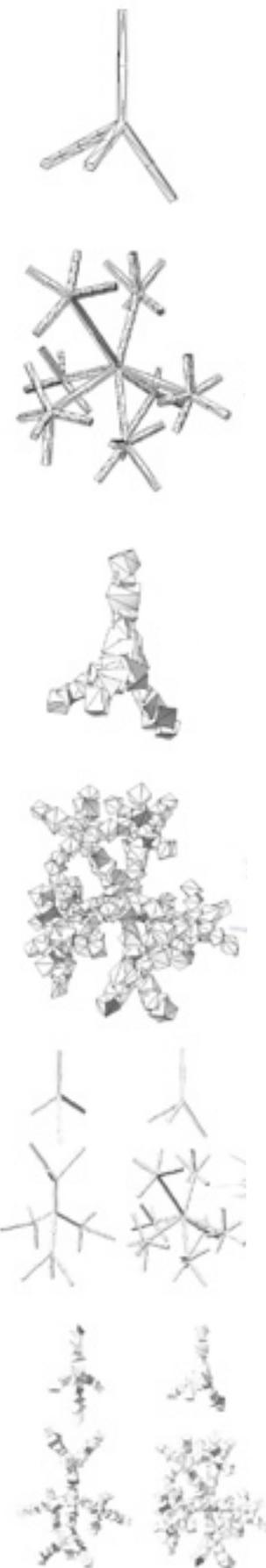


Figura 4.14. Mapa de Luminosidad para Población Cúbica Mixta.



Después de realizar estas pruebas, se creció 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 (Figura 4.18). Una vez fabricados, los moldes se recubrieron con una película de plástico para evitar que el micelio lo colonizara. Posteriormente los moldes fueron desinfectados con alcohol y agua oxigenada en una cámara con extrac-

ción de aire (Figura 4.19). Mientras tanto, se hirvió residuo agrícola (hojas 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 4.20 y 4.21). Se dejaron crecer en la oscuridad durante una semana (Figura 4.22 y 4.23), se juntaron los moldes (Figura 4.24) y a las dos semanas se retiraron y se secó la forma resultante para que dejase de crecer el micelio (Figura 4.25 y 4.26).

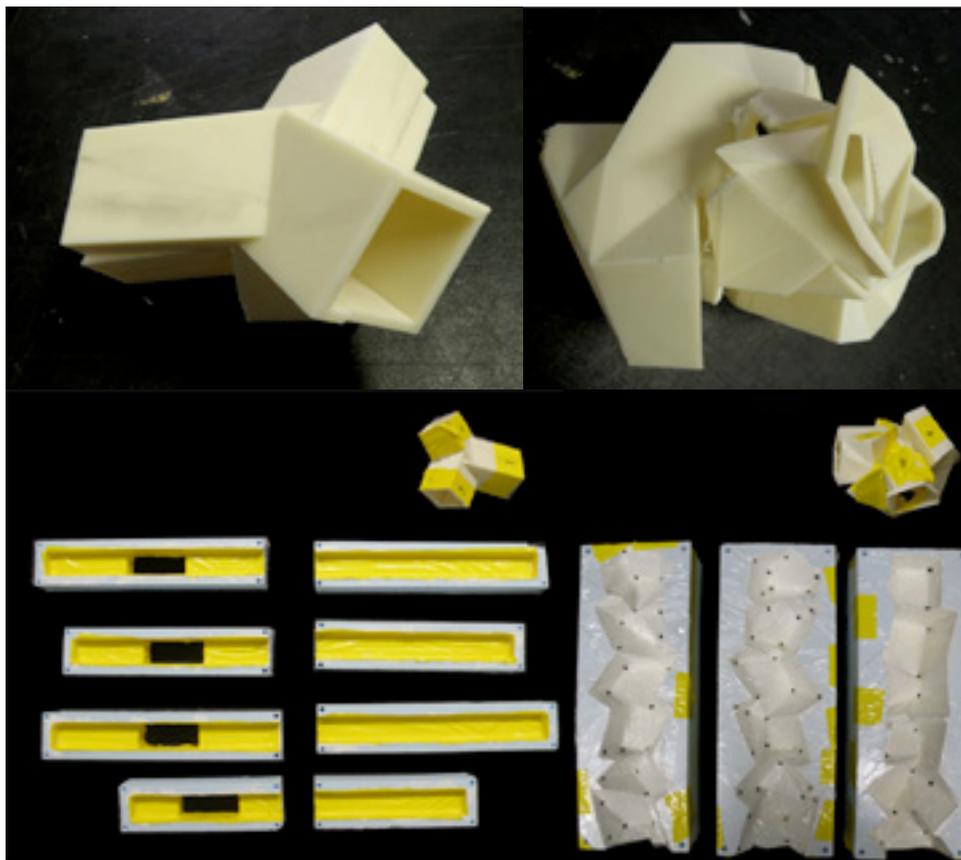


Figura 4.18. Moldes para módulos de topología prismática y cúbica.



Figura 4.19. Proceso de llenado de moldes en cámara con extracción de aire.

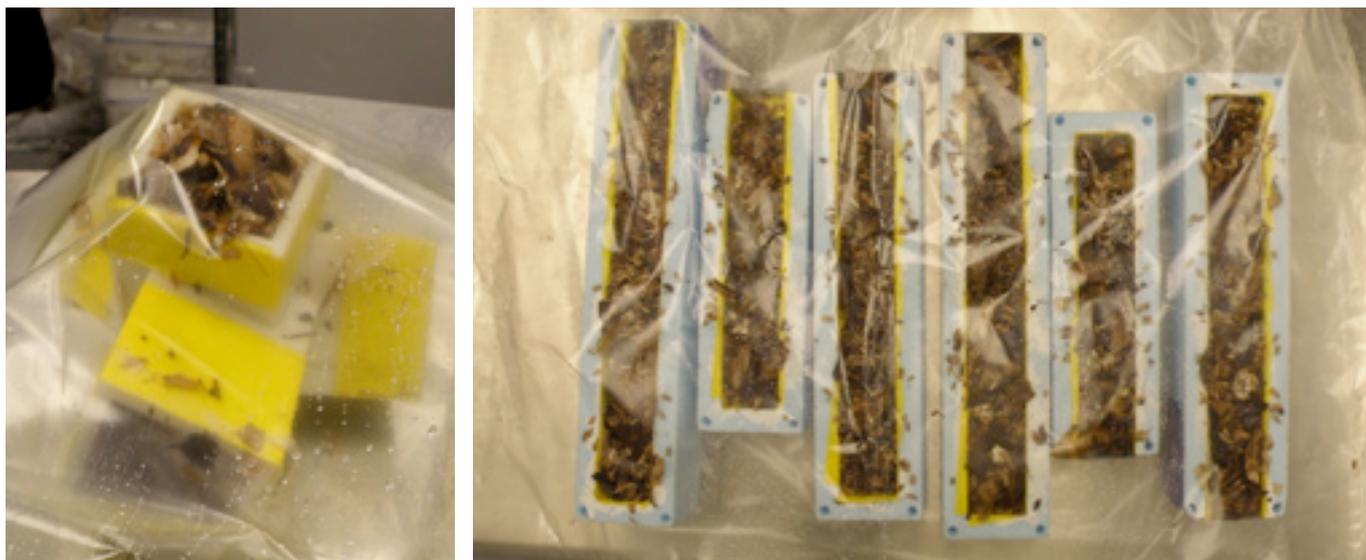


Figura 4.20. Parte central y brazos-ramas de molde de módulo prismático rellenas de residuo agrícola y semillas de hongo.



Figura 4.21. Crecimiento de micelio en parte central y brazos-ramas de molde de módulo prismático.



Figura 4.22. Parte central y brazos-ramas de molde de módulo cúbico rellenas de residuo agrícola y semillas de hongo.



Figura 4.23. Crecimiento de micelio en parte central y brazos-ramas de molde de módulo cúbico.



Figura 4.24. Micelio creciendo en moldes de módulos de topología prismática ensamblados.



Figura 4.25. Prototipo de componente modular prismático.



Figura 4.26. Prototipo de componente modular cúbico.

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. Los módulos fabricados, o más bien “crecidos”, de esta

manera pueden agregarse para configurar estructuras usables que podrían funcionar como elementos delimitadores de espacios, como soportes para jardines verticales y/o como mobiliario público para espacios urbanos, parques o bosques (Figuras 4.27, 4.28, 4.29, 4.30, 4.31 y 4.32). Este tipo de estructuras orgánicas y biodegradables son las que se proponen en el proyecto *3D Grown Usable Structures*.

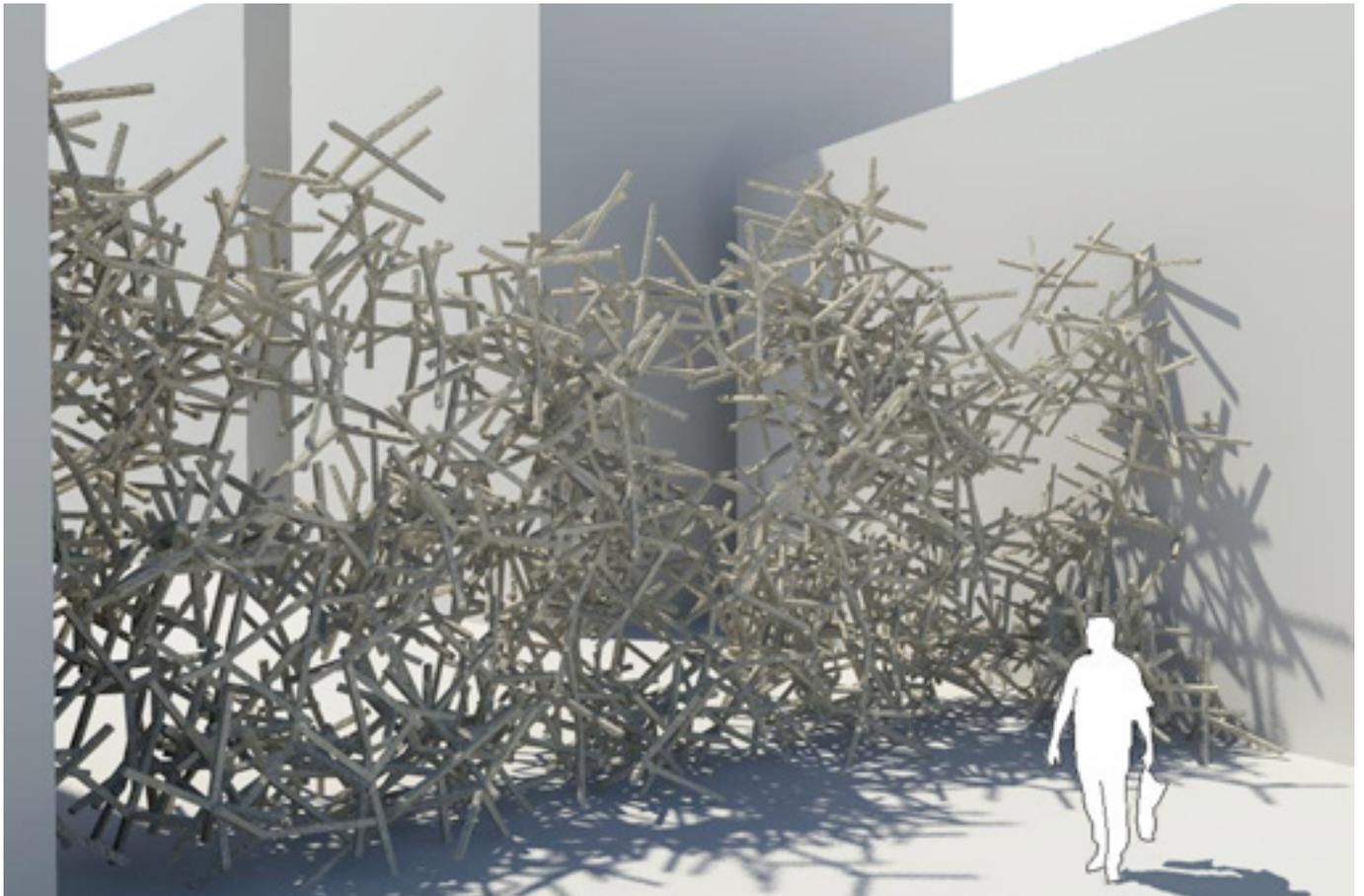


Figura 4.24. *Grown Usable Structure*: Elemento divisorio vertical vegetal creciendo.





Figura 4.29. *3D Grown Usable Structure*: Elemento divisorio vertical vegetal crecido.

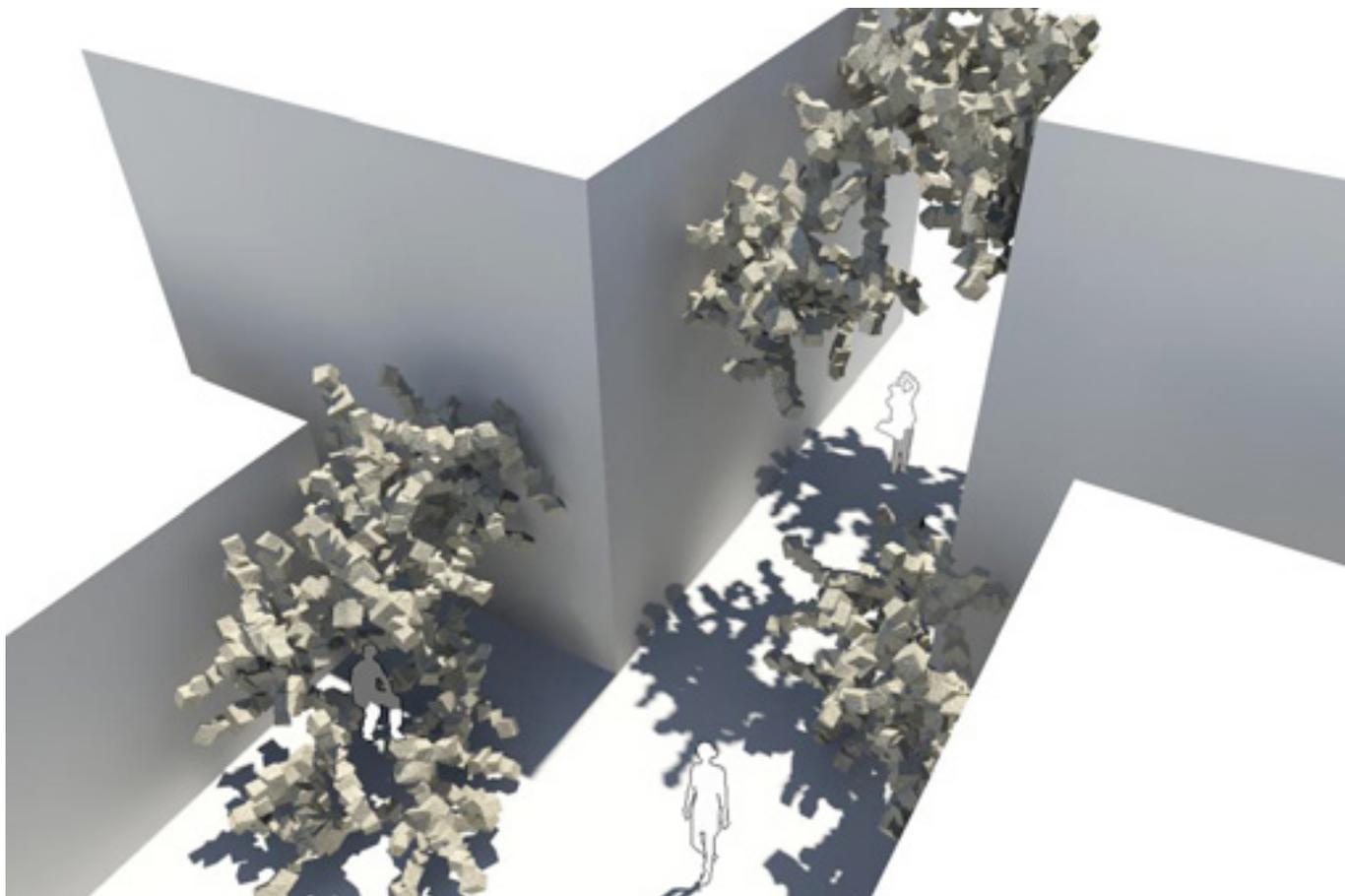


Figura 4.30. *3D Grown Usable Structure*: Mobiliario urbano.

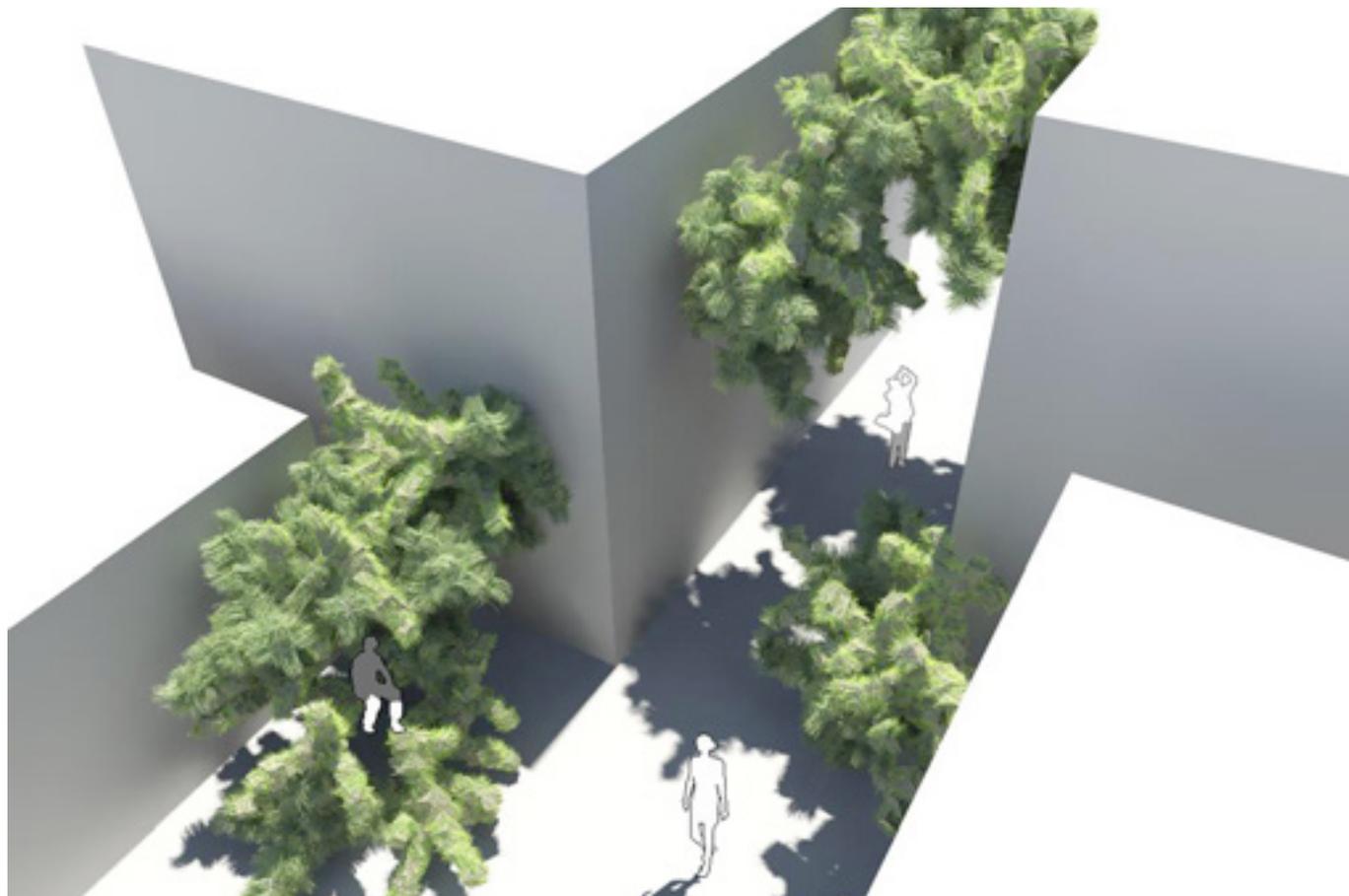


Figura 4.31. 3D Grown Usable Structure: Mobiliario urbano vegetal ya crecido.

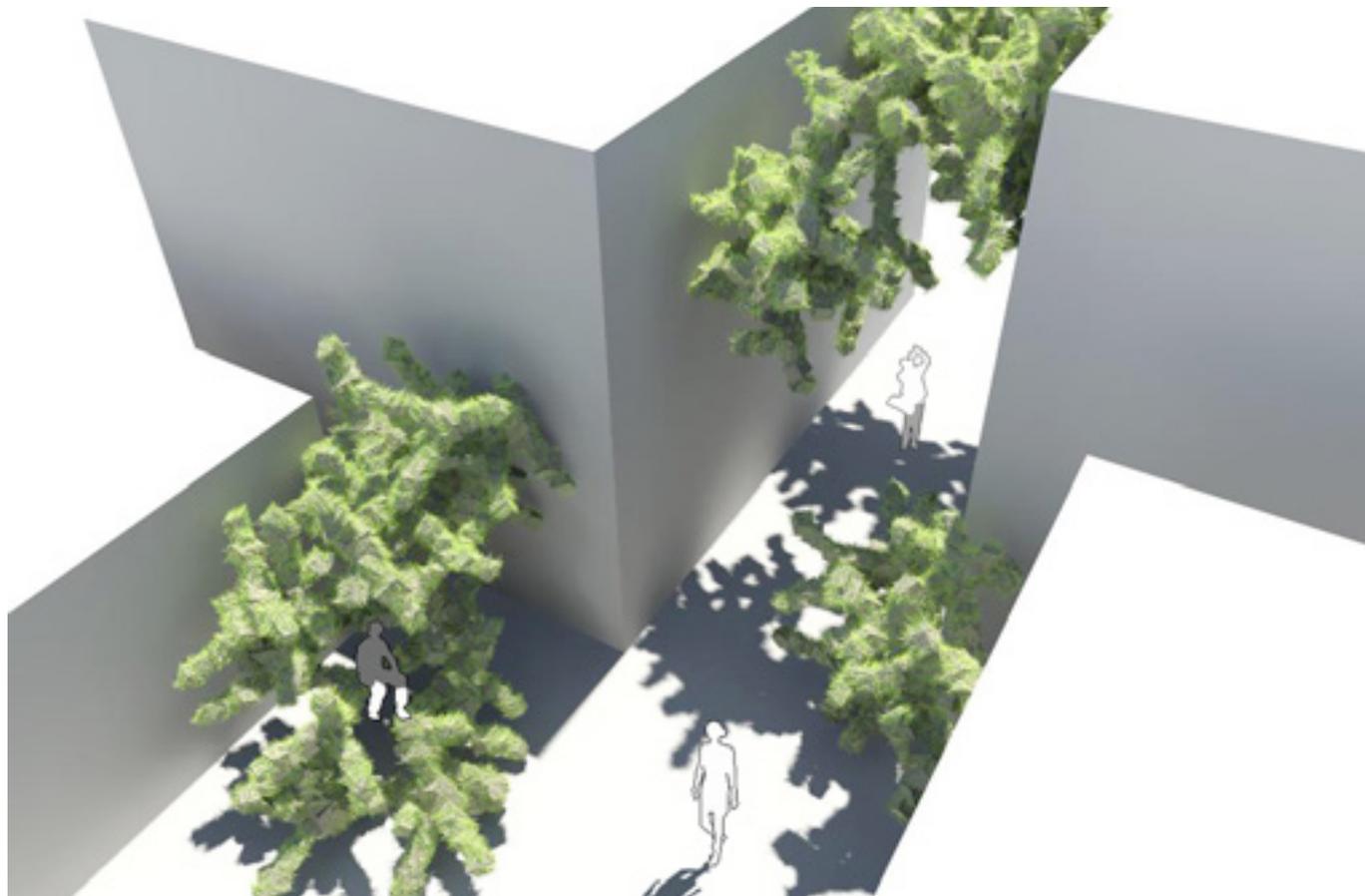


Figura 4.32. 3D Grown Usable Structure: Mobiliario urbano vegetal creciendo.

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 escenario 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*.

Los prototipos consisten en el crecimiento de paneles aislantes (Figuras 4.33, 34, 35, 36, 37, 38 y 39) para ser utilizados en la industria de la construcción como alternativa a los actuales paneles de espumas derivadas del petróleo, y en crecer membranas superficiales en moldes de mayor tamaño para obtener prototipos de componentes para fachadas o paredes (Figuras 4.40 y 4.41). Todos

estos prototipos se crecieron 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. En cada uno de los casos, el residuo agrícola que se utilizó se hirvió durante sesenta 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. Acto seguido, 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 (Fig. 4.36) para secar más rápido el micelio.



Figura 4.33. Residuo agrícola (hojas secas) para panel aislante.



Figura 4.34. Crecimiento de micelio en molde para panel aislante.



Figura 4.35. Micelio desarrollado dentro de molde para panel aislante.



Figura 4.36. Secado en horno de prototipos para panel aislante.



Figura 4.34. Prototipo de panel aislante.



Figura 4.38. Prototipo de panel aislante.



Figura 4.39. Prototipo de panel aislante.



Figura 4.40. Molde y estructura de ramas para prototipo de pared orgánica aislante.



Figura 4.41. Prototipo de pared orgánica aislante.

Parte de este experimento se llevó a cabo en un taller impartido en el FabLab de la ETSA de Sevilla (Figura 4.42). Las estructuras de madera y los moldes 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 (Figura 4.43). Para la fabricación de la estructura de madera se utilizó una cortadora láser y

para fabricar el molde una fresadora digital. La estructura se introdujo en el molde, se desinfectó el conjunto con alcohol y agua oxigenada, se vertió residuo agrícola previamente hervido, se esparcieron semillas de hongo, y se dejó crecer el micelio, siguiendo el mismo protocolo que para los prototipos anteriormente mencionados. Finalmente se retiró el molde y se secó la forma resultante.



Figura 4.42. Exposición de molde y estructura para pared orgánica aislante.



Figura 4.43. Fabricación con fresadora digital de molde para pared orgánica.

En este taller se diseñaron seis moldes y estructuras para prototipos de paredes orgánicas aislantes. Dichos moldes (Figuras 4.44, 4.45), se rellenaron 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 4.46 y 4.47), *Pleurotus ostreatus* (Figura 4.48 y 749), y *Gano-*

*derma lucidum* (Reishi) (Figura 4.50 y 4.51), y tres tipos de residuo agrícola diferentes: paja, virutas de madera y hojas secas. Los moldes se rellenaron con distintas combinaciones de especies de hongos y sustrato agrícola y la que ofreció mejores resultados fue la combinación de *Pleurotus ostreatus* y paja.



Figura 4.44. Propuesta de prototipo de pared orgánica aislante.



Figura 4.45. Propuesta de prototipo de pared orgánica aislante.



Figura 4.46. Semillas de la especie de hongo *Lentinula edodes*.



Figura 4.44. Llenado de molde con virutas de madera y semillas de *Lentinula edodes*.



Figura 4.48. Semillas de la especie de hongo *Pleurotus ostreatus*.



Figura 4.49. Llenado de molde con virutas de madera y semillas de *Pleurotus ostreatus*.



Figura 4.50. Semillas de la especie de hongo *Ganoderma lucidum*.



Figura 4.51. Molde relleno con virutas de madera, paja y semillas de Rehisí, cubierto con plástico humedecido.

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. Por ello, finalizado el taller, se realizó otro experimento mejorando las condiciones higiénicas de llenado, en el que se obtuvieron resultados más satisfactorios. En este segundo intento, el molde (Figura 4.52) se protegió con un plástico aislante, la estructura de madera se desinfectó mejor y el proceso de llenado se realizó en una cámara aislada con extracción de aire. En general, la mejora de estas condiciones facilitó el crecimiento de raíces de hongo, pero no en todos los prototipos que se probaron se obtuvo un resultado satisfactorio.

Se ensayaron dos clases de prototipos con moldes y estructuras de madera idénticos y ambos crecidos con semillas de *Pleurotus ostreatus* (Figura 4.53). El primer molde (Figura 4.54) se rellenoó con sustrato agrícola compuesto por hojas secas (Figura 4.55) y el segundo (Figura 4.56) con paja (Figura 4.57). El primer molde (Figura 4.54) 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 *Pleurotus ostreatus*. Dicha especie crece mejor sobre paja, por lo que el crecimiento de micelio en el segundo molde (Figura 4.56) se desarrolló con más éxito. En todo caso, el segundo prototipo aunque presentó más resistencia a la tracción y desbroce que el primero, creció mostrando un color negrozco porque desarrolló moho. Debido a ello, se creció en un tercer molde (Figura 4.58) un tercer prototipo de pared orgánica aislante, usando como sustrato agrícola paja triturada pasteurizada (Figura 4.59). Este último prototipo creció muy bien (Figura. 4.60 y 4.61), 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 otro de metacrilato. El molde de madera (Figura 4.62) 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



Figura 4.52. Molde protegido con plástico aislante y estructura de madera.



Figura 4.53. Semillas de la especie de hongo *Pleurotus ostreatus*.



Figura 4.54. Molde relleno con hojas en el que no terminó de crecer el micelio de *Pleurotus ostreatus*.



Figura 4.55. Residuo agrícola (hojas secas).



Figura 4.56. Molde relleno con paja en el que creció micelio de *Pleurotus ostreatus* contaminado con moho.



Figura 4.54. Residuo agrícola (paja).



Figura 4.58. Molde relleno con paja triturada pasteurizada.



Figura 4.59. Residuo agrícola (paja triturada pasteurizada).



Figura 4.60. Molde relleno con paja triturada pasteurizada en el que crece micelio de la especie *Pleurotus ostreatus*.



Figura 4.61. Prototipo de pared orgánica aislante crecida a partir de paja triturada pasteurizada y micelio de la especie *Pleurotus ostreatus*.



Figura 4.62. Molde de madera relleno con virutas de madera de roble y semillas de hongo de la especie *Lentinula edodes*.



Figura 4.63. Detalle de crecimiento de micelio de *Lentinula edodes* en molde relleno con virutas de madera de roble.



Figura 4.64. Molde de metacrilato relleno con paja triturada pasteurizada y semillas de hongo de la especie *Pleurotus ostreatus*.



Figura 4.65. Detalle de crecimiento de micelio de *Pleurotus ostreatus* en molde relleno con paja triturada pasteurizada.



Figura 4.66. Prototipo de módulo para pared orgánica aislante crecido a partir de paja, paja triturada pasteurizada y semillas de *Pleurotus ostreatus* con grietas en zonas de menor sección.



Figura 4.64. Prototipo de módulo para pared orgánica aislante crecido a partir de paja, paja triturada pasteurizada y semillas de *Pleurotus ostreatus*.



Figura 4.68. Detalle de prototipo de módulo para pared orgánica aislante crecido a partir de paja, paja triturada pasteurizada y semillas de *Pleurotus ostreatus*.

de la geometría de madera (Figura 4.63). El molde de metacrilato (Figura 4.64) 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 (Figura 4.65). 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 de estos dos últimos (Figuras 4.67 y 4.68) se comportó mejor que el primero (Figura 4.66) tan solo por una cuestión de geometría, porque no tenía zonas tan estrechas y era más compacto.

Finalmente, se creció un último prototipo de componente hexagonal (Figura 4.69) 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, por lo que podría pensarse en obtener de una forma más rápida componentes aislantes para cubrir superficies interiores.



Figura 4.69. Prototipo de componente hexagonal aislante para cubrir superficies interiores.

De estos últimos experimentos de laboratorio se deduce que el procedimiento de desinfección que se siguió es mucho más adecuado que en los primeros intentos, que la especie *Pleurotus ostreatus* crece mejor sobre un residuo de paja triturada que sobre hojas o madera, pero que hace falta incorporar elementos orgánicos con cierta resistencia a tracción como paja sin triturar o fibras vegetales para dotar al conjunto de mayor resistencia a tracción y evitar que se desbroce.

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* (Figuras 4.70, 4.71, 4.72), 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.



Figura 4.70. *Grown Cultivated Habitat*: Sistema de colonización de espacios residuales.

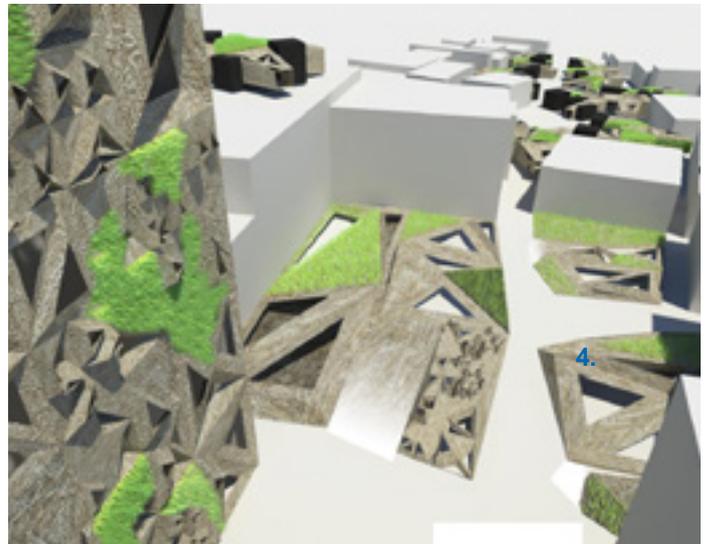


Figura 4.71. *Grown Cultivated Habitat*: Sistema de colonización de espacios residuales.

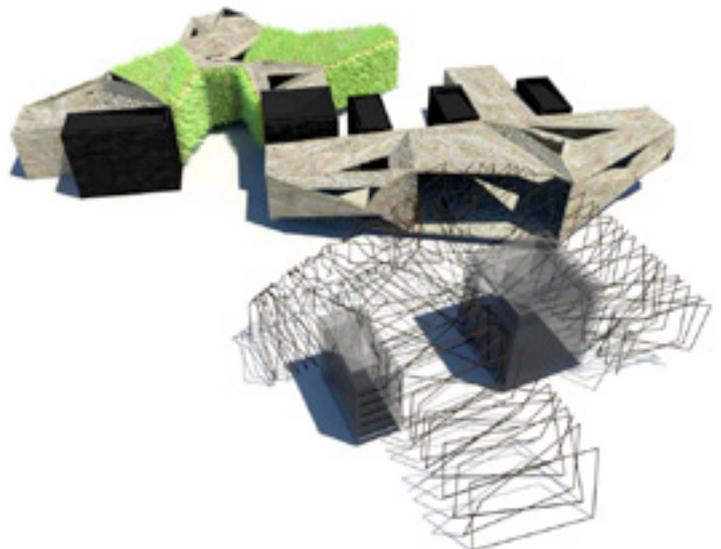


Figura 4.72. *Grown Cultivated Habitat*: Estructura y materialidad de volúmenes construidos.

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 exteriores, y superficies públicas de conexión. En función de cómo se conjuguen estos elementos, se pueden diseñar distintas clases de espacios. Esta característica no sólo 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 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 éstas. 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 CO<sub>2</sub> y otras sustancias contaminantes, y sería reabsorbible por el medio casi al 100%. Además, del mismo modo que se presentó la idea en los prototipos de componentes modulares para conformar estructuras complejas por agregación, podría pensarse en modificar genéticamente los elementos vegetales que pudieran crecer sobre el micelio y restos orgánicos, o en implementar poblaciones de microorganismos bioluminiscentes que se alimentaran de la misma materia orgánica que conforma las superficies y volúmenes habitables, para emitir luz.

### 4.3. DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES PARA SU USO EN PROCESOS DE CEMENTACIÓN INDUCIDA POR MICROORGANISMOS

#### 4.3.1. Caracterización de las materias primas (calcarenitas, calizas)

Calcarenitas: Se trata de calcarenitas masivas amarillentas alteradas en superficie por la presencia de óxidos de hierro, con gran cantidad de restos fósiles muy fragmentados y que en ocasiones llegan a constituir lumaquelas. En general, todas las muestras estudiadas corresponden a areniscas calcáreas bioclásticas o calcarenitas (grainstones según Dunham, 1962) con abundante presencia de restos fósiles, esencialmente de moluscos y como minoritarios se han visto cristales de cuarzo terrígenos redondeados y de elevada esfericidad. La composición mineralógica global es de calcita y cuarzo mayoritarios con filosilicatos minoritarios y esporádicos. La calcita varía entre el 40-85%. El cuarzo es el segundo mineral en orden de abundancia con una media del 20%. La dolomita está presente en algunas muestras en cantidades menores del 2%.

Son rocas con una textura clástica orientada heterométrica (Foto 4.24), formadas por fragmentos de bivalvos (pectínidos y ostreidos) carbonatados constituidos por calcita. Los fragmentos de estos organismos están bastante triturados y retrabajados, lo que origina su heterometría. Los bioclastos representan alrededor del 70-90% de la roca, aunque las proporciones varían según el campo y la muestra que se observe. Se han podido identificar moluscos bivalvos (pectínidos y ostreidos), foraminíferos bentónicos y planctónicos, equinodermos (placas y espículas), restos de algas, briozoos y ostrácodos. El resto de la roca, lo constituyen los minerales detríticos y de alteración. Los detríticos más abundantes son granos de cuarzo de hasta 3 mm, esféricos-subesféricos, bien redondeados-redondeados, principalmente monocristalino y de extinción ondulante (Foto 4.25), aunque puntualmente pueden aparecer granos de cuarzo policristalino. Los cristales de menor tamaño son más angulosos y en algunos casos pueden estar corroídos o alterados.

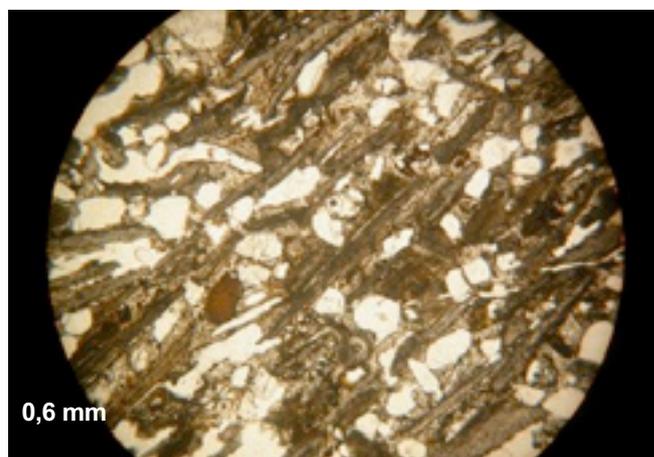


Foto 4.24. Aspecto general al microscopio de la textura clástica orientada heterométrica (A.1; 5x //).

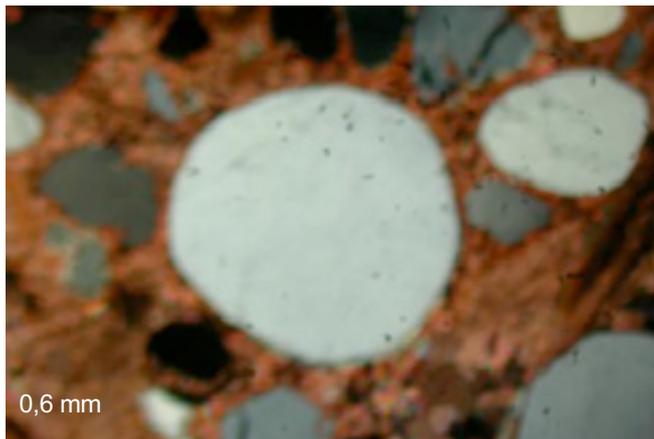


Foto 4.25. Aspecto de los cristales terrigenos de cuarzo redondeados y esféricos (A-1; 5x X)..

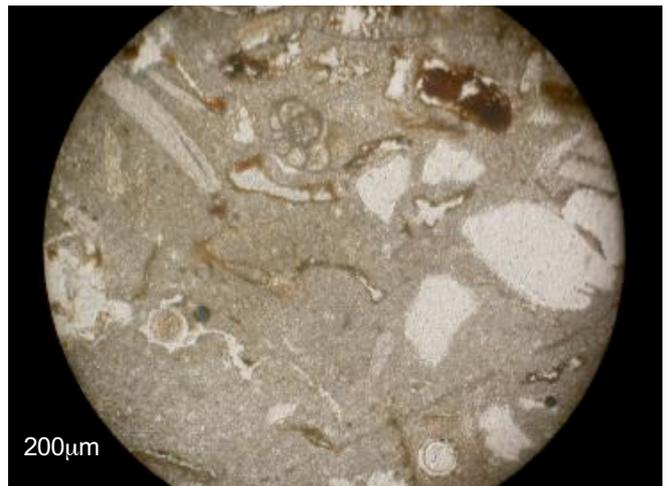


Foto 4.24. Muestra con escasa porosidad (A-2; 10x //)..

En ocasiones también se pueden ver algunos microcristales de feldespato (Foto 4.26) y de algún mineral de pequeño tamaño cloritizados o limonitizados, micas y menas opacas, probablemente pirita. No se ha detectado en ninguna muestra la presencia de dolomita.



Foto 4.26. Aspecto de los cristales terrigenos de microclina (Feldespato potásico) (NOR-14; 5x X).

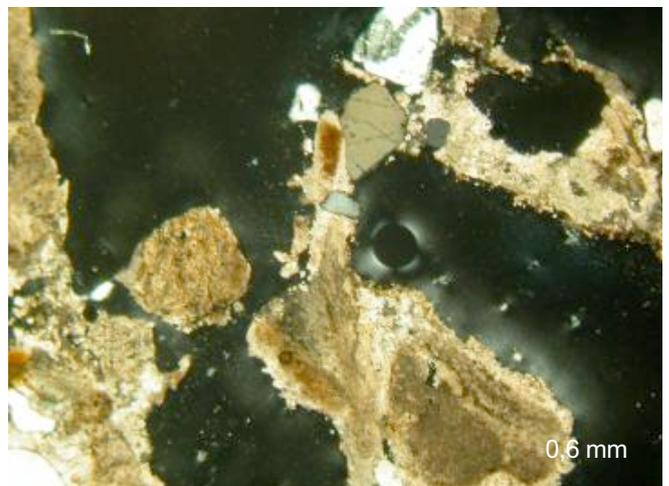


Foto 4.28. Muestra con macroporosidad (A-3; 5x X).

Este tipo de rocas presenta una porosidad muy alta; principalmente de tipo interparticular (aunque también se aprecian numerosos microporos intraparticulares y mólidos), existiendo notables diferencias entre unas muestras y otras (Fotos 4.27 y 4.28). Se aprecia una clara disposición ordenada de los bioclastos alargados, presentando el eje mayor paralelo al plano de estratificación y sin que se definan láminas enriquecidas en un tipo u otro de elementos bioclásticos. El cemento intergranular es normalmente de tipo esparítico, formando una textura de mosaico (Foto 4.29), en ocasiones en forma de drusa. El tamaño de estos cristales de esparita parece similar en todas las muestras. En general se observan signos de recrystalización en los bioclastos, dificultando en muchos casos la identificación de los fósiles, en otros se distinguen bellas formas de cortes de espículas y placas de equinodermos, cortes de foraminíferos bentónicos de tipo "Elphidium", "ammonia", foraminíferos planctónicos (globigerinidos,), (Fotos 4.30 y 4.36).

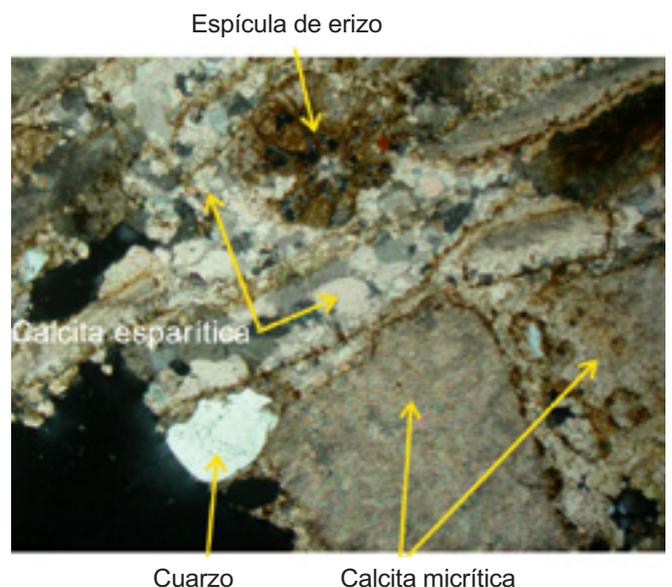
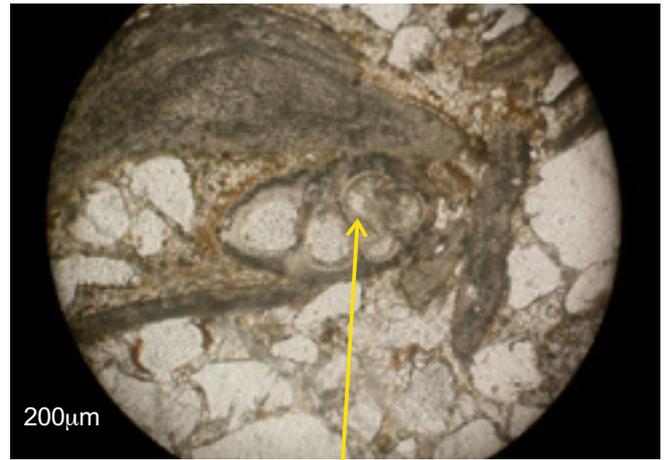


Foto 4.29. Muestra con calcita micrítica (clasto de molusco) y esparítica de cemento y relleno (A 2; 5x X).



Foto 4.30. Muestra con clastos de bivalvos y con restos de placas de equinodermos (erizos) (A-2; 5x //).



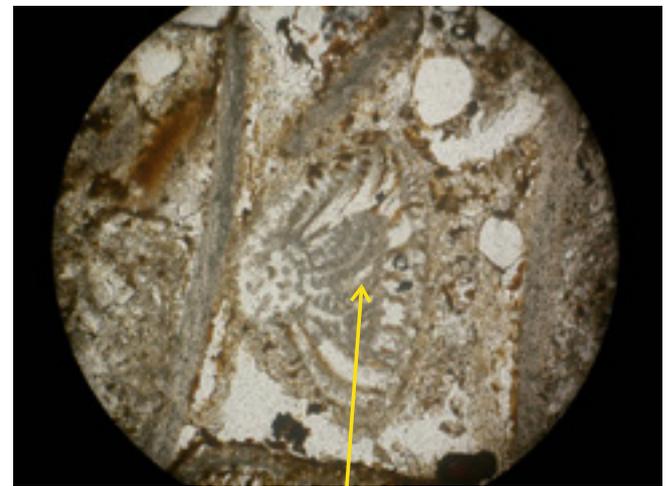
Foraminífero planctónico de tipo globorotalia

Foto 4.33. Muestra con clastos de bivalvos y con restos de foraminíferos planctónicos de tipo *globorotalia* (A1; 10x //).



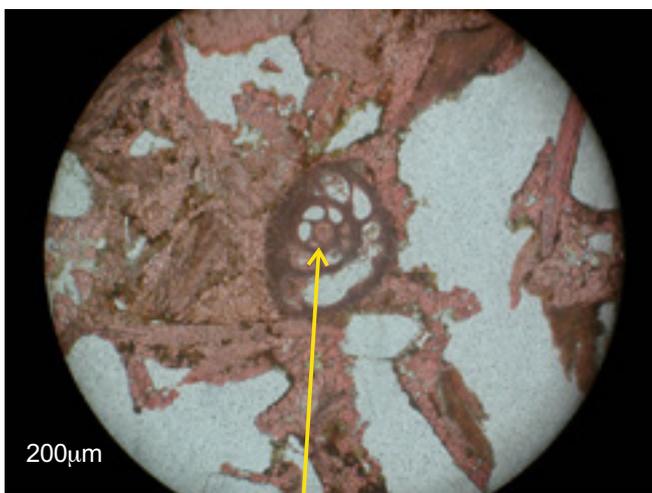
Fragmento de briozco

Foto 4.31. Muestra con clastos de bivalvos y con restos de briozoos (A 1; 5x //).



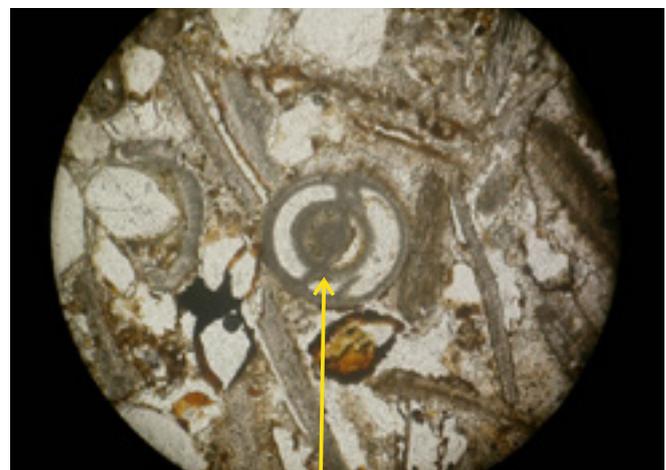
Foraminífero bentónico "Elphidium crispum"

Foto 4.34. Muestra con clastos de bivalvos y un corte oblicuo de foraminífero bentónico *Elphidium crispum* (A3; 10x //).



Foraminífero de tipo ammonia

Foto 4.32. Muestra con clastos de bivalvos y con restos de foraminíferos bentónicos de tipo *ammonia* (A3; 10x //).

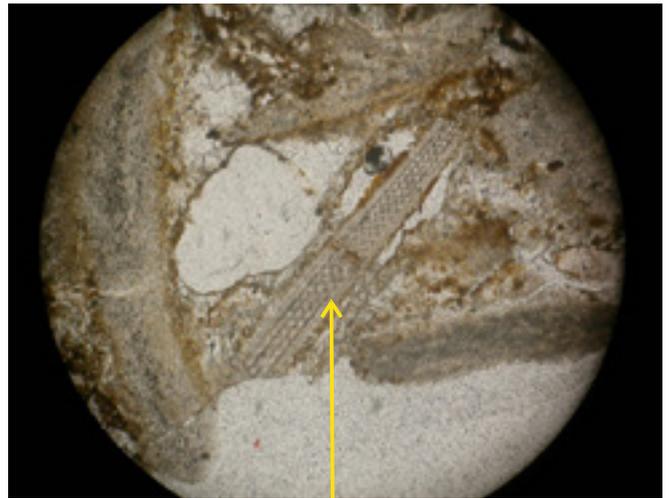


Foraminífero bentónico miliólido

Foto 4.35. Muestra con clastos de bivalvos y un foraminífero bentónico miliólido A3; 10x //) esparítica de cemento (A 2; 5x X).



Espícula de equinodermo



Espícula de equinodermo

Foto 4.36. Muestras con clastos de bivalvos y secciones de espículas de equinodermos (a: A1; 20x // y b: A2; 10x //).

El estudio de lámina delgada ha podido diferenciar dos grupos: a) Biocalcarenitas esparíticas (muestras A1 y A2) y b) Calcarenita bioesparíticas (muestra A3).

Grupo a: Las muestras de este grupo presentan las siguientes características: Granos de cuarzo heterométricos y subredondeados. Matriz esparítica. Presencia de foraminíferos planctónicos. Existen bastantes secciones de radiolas de equínidos, fragmentos de moluscos bivalvos y briozoos. Se observan fenómenos de disolución de fósiles, que se traduce en un reemplazamiento posterior por calcita de recristalización o por cuarzo. Esta recristalización da lugar a huecos y espacios intergranulares.

Grupo b: Estas muestras se caracterizan por la existencia de granos pequeños y subangulosos. La matriz es esparítica, se observa la presencia frecuente de glauconita. Los foraminíferos son bastante abundantes predominando los bentónicos. Los planctónicos aparecen normalmente muy recristalizados y fragmentados. También hay arenáceos uniseriados (Hormosininae) y biseriados (Textularia).

Calizas: La composición mineralógica es idéntica en todas las muestras analizadas, ya que en los difractogramas únicamente aparecen reflexiones correspondientes a la calcita. El análisis petrográfico de las muestras estudiadas al microscopio óptico pone de manifiesto que las calizas poseen características texturales bastante diferentes. El carbonato cálcico está presente en forma de clastos calcáreos (bioclastos, oolitos, oncolitos, pelletoides e intraclastos) y de cemento micrítico o esparítico. De acuerdo con las microfacies existentes en las calizas seleccionadas para este proyecto se pueden clasificarse en dos grupos (Tabla 4.2).

MUESTRA	GRUPO	VARIEDAD
PA	Calizas oncolíticas grano grueso	Oncomicroesparitas
PB		
PC	Calizas Ooesparíticas	

Tabla 4.2. Clasificación de las muestras de calizas estudiadas.

Las muestras PA y PB; (Fotos 4.37 y 4.38) pertenecen al grupo de las calizas oncolíticas de grano grueso (≈1-2 mm ó >2 mm) y variedad oncomicroesparitas. Son calizas de matriz y cemento microesparíticos, que alcanzan poco desarrollo entre los elementos texturales. Los bioclastos son escasos (<15%) y están formados por fragmentos de equinoideos, briozoos, gasterópodos, bivalvos y algunos foraminíferos bentónicos (lituólidos).

La porosidad es baja, aproximadamente del orden del 5% o menos en PB, de tipo intrapartícula, mientras que en PA es del 15% de tipo interpartícula y fenestral concéntrica.

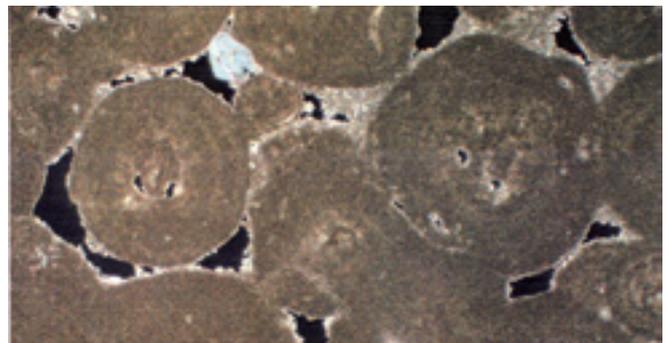


Foto 4.34. Muestra PA. Oncoides rodeados de cemento microesparítico. Se aprecia una elevada porosidad.

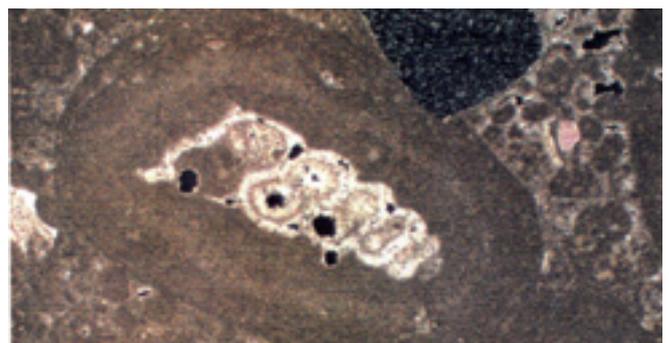


Foto 4.38. Muestra PB. Gasterópodo en el núcleo de un oncolito y fragmento de equinodermo.

La muestra PC; (Foto 4.39) pertenece al grupo de las calizas ooesparíticas. Es una roca de cemento esparítico granular, drúsico irregular en el interior de los poros y de crecimiento de borde sintaxial alrededor de los fragmentos de equinodermos. La matriz está muy reducida, de tipo microesparítico. Los únicos bioclastos que aparecen son foraminíferos bentónicos muy fragmentados (en su mayoría Spiroplectamina o similares) y restos de equinoideos (radiolas y placas). La porosidad es muy baja (<5%), de tipo interpartícula.

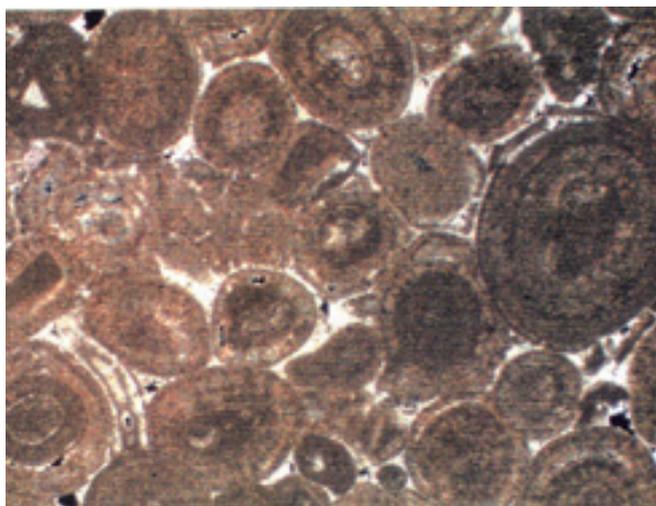


Foto 4.39. Muestra PC. Ooides ( $\approx 750 \mu\text{m}$ ).

#### 4.3.2. Porosidad, densidad y superficie específica de las calizas

La porosidad total accesible al mercurio de las muestras es superior al 10%. Existe una relación directa entre el tamaño de grano de las muestras y la porosidad total. Así, la muestra con mayor tamaño de grano tienen la porosidad mayor, de 13,25% (PA), y la muestra de menor tamaño de grano 10,33% (PC) (Tabla 9.3). En cuanto a la superficie específica, está en relación inversa al tamaño de grano de las muestras, PA, posee menor superficie específica ( $0,88 \text{ m}^2/\text{g}$ ) que la muestra PC ( $0,97 \text{ m}^2/\text{g}$ ).

Los valores de densidad real se encuentran comprendidos dentro de un corto rango de variación ( $2,67\text{-}2,85 \text{ g}/\text{cm}^3$ ) de acuerdo con la idéntica composición químico-mineralógica de las muestras.

La muestra PB, aunque tiene la misma clasificación desde el punto de vista petrográfico que la PA, puede considerarse como una variedad intermedia entre PA y PC, con granos más heterométricos (Tabla 4.2).

MUESTRA	Porosidad total (%)	Radio medio poro ( $\mu\text{m}$ )	Densidad aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Densidad real ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Superficie específica $\text{m}^2/\text{g}$
PA	13.25	0.150	2.45	2.82	0.88
PB	11.41	0.150	2.53	2.85	0.96
PC	10.33	0.150	2.40	2.67	0.97

Tabla 4.3. Porosidad, densidad y superficie específica de los poros (Porosimetría de Hg).

#### Porosimetría de mercurio

La porosidad total de las calizas de está constituida, principalmente, por microporos. El volumen poroso está referido en porcentaje de volumen acumulado de mercurio ( $\text{mm}^3/\text{g}$ ) y en % de porosidad total. El tamaño de radio de poro analizado está comprendido entre  $0,001$  y  $100 \mu\text{m}$ . El radio medio de poro es igual en todas las muestras,  $0,150 \mu\text{m}$  (Tabla 2). Sin embargo, puede apreciarse que la muestra PA, posee la mayor distribución de tamaño de poro, desde  $\approx 0,015$  a  $\approx 35 \mu\text{m}$ , seguido de la muestras PB, de  $0,01$  a  $\approx 15 \mu\text{m}$ , y de la PC, de  $\approx 0,015$  a  $10 \mu\text{m}$ .

Si comparamos la curvas acumuladas, PA posee mayor proporción de poros  $>$  de  $1 \mu\text{m}$  que PB y PC, siendo esta última la que tiene mayor proporción de poros  $<$  de  $1 \mu\text{m}$  (Figuras 4.73, 4.74 y 4.75).

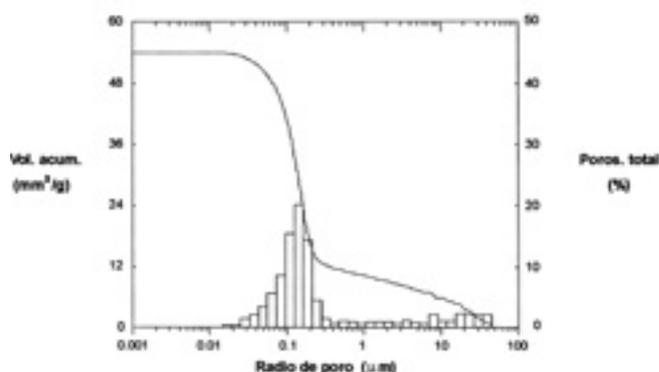


Figura 4.73. Histograma y curva acumulada de la distribución del volumen poroso en función del radio de poro, obtenidos mediante porosimetría de mercurio. Muestra PA.

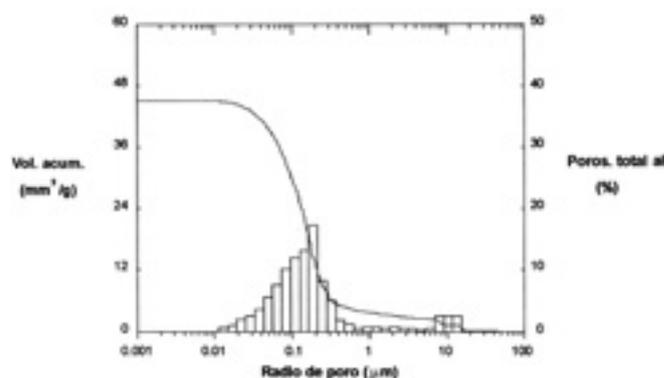


Figura 4.74. Histograma y curva acumulada de la distribución del volumen poroso en función del radio de poro, obtenidos mediante porosimetría de mercurio. Muestra PB.

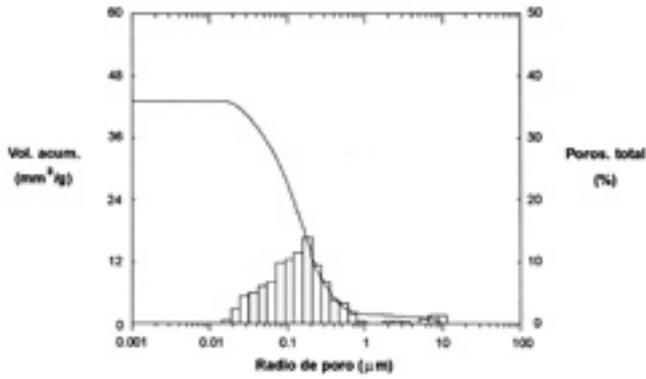


Figura 4.75. Histograma y curva acumulada de la distribución del volumen poroso en función del radio de poro, obtenidos mediante porosimetría de mercurio. Muestra PC.

*Porosidad al microscopio óptico de las calizas*

El estudio al microscopio óptico de la porosidad permite un acercamiento a la imagen real de los poros, se trata por tanto de un estudio morfológico de los poros y de sus dimensiones. A continuación se describe la imagen de la caliza PA (Foto 4.40), en la que se aprecia la porosidad intergranular debida a la pérdida de cemento esparfítico.

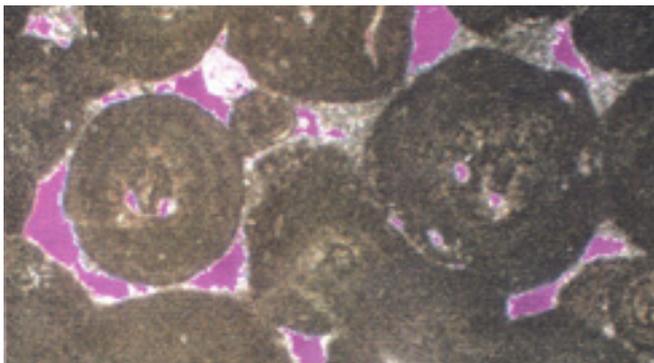


Foto 4.40. Caliza oncolítica (40x, nicoles cruzados y cuña de yeso). Porosidad intergranular por pérdida de cemento esparfítico de grano muy fino e intragranular confinada. Muestra PA.

*Porosidad al microscopio electrónico*

La observación al microscopio electrónico de caras pulidas de la muestra, permite un estudio de la porosidad por debajo de  $4 \mu\text{m}$ , límite del microscopio óptico. En las fotografías 4.41 y 4.42 se aprecia la diferencia entre la porosidad de las calizas PA y PC.

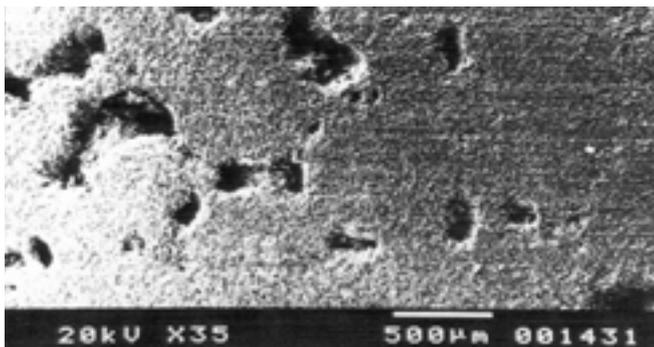


Foto 4.41. Caliza oncolítica. Macroporos de radio  $> 100 \mu\text{m}$  y de forma variable. Muestra PA

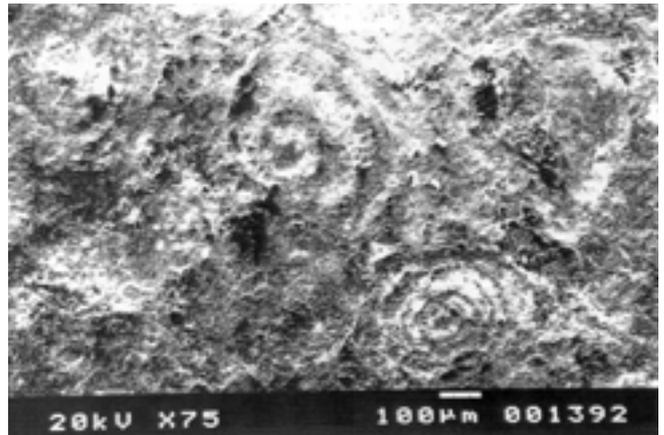


Foto 4.42. Caliza ooesparfítica. Porosidad a favor de la textura concéntrica de los oolitos. Superpuestos a la misma se puede observar el crecimiento generalizado de calcita. Muestra PC.

**4.3.3. Comportamiento hídrico de las muestras calcáreas**

Se ha realizado un estudio más detallado de las propiedades hídricas sobre las muestras PA (en rosa), PB (en azul) y PC (en verde). Los valores representados son promedios de cinco ensayos (Tabla 4.4 y Figuras 4.76 a 4.79). Estas muestras, de porosidad semejante (10-15%), presentan un comportamiento hídrico con cinéticas de absorción muy similares, en las que se diferencian claramente tres etapas. Una de acusada pendiente cuyo tiempo de duración es aproximadamente 15 minutos. Esta etapa está regida por la existencia de macroporos. La etapa de equilibrio de pendiente nula indica que se ha alcanzado la saturación. Dado que el contenido máximo de agua absorbida depende de la porosidad total, la muestra PA es la que absorbe mayor volumen de agua. La duración de las dos primeras etapas es relativamente corta, ya que en las dos primeras horas se ha absorbido  $\approx 85\%$  de agua.

Las probetas sometidas a vacío absorben 2.9-5.7%. El grado de saturación al final del ensayo de absorción libre bajo vacío y a presión atmosférica varía entre 85 y 100%, lo que implica que prácticamente todos los poros se han llenado de agua. El equilibrio de absorción de agua por capilaridad se alcanza más lentamente. La fase inicial se prolonga con una pendiente menos acusada. La fase de transición es prácticamente inexistente.

También se ha determinado la absorción de agua en fase de vapor que a resultado ser prácticamente nula, de acuerdo con la superficie específica ( $0.48\text{-}0.56 \text{ m}^2/\text{g}$ ) que presentan las muestras.

MUESTRA	$S_i$	$S_c$	PT	$W_c$	$C_c$
PA	5.64	86.9	13.1	5.09	0.27
PB	3.60	91.2	8.8	3.55	0.19
PC	4.28	89.7	10.3	4.24	0.20

Tabla 4.4. Parámetros hídricos de las calizas de Pedrera (muestras PA, PB y PC).

- $S_i$  = coeficiente de saturación por inmersión total en %
- $S_c$  = coeficiente de saturación por capilaridad en %
- PT = porosidad total en %
- $W_c$  = contenido de agua capilar en %
- $C_c$  = coeficiente de capilaridad  $Kg.m^{-2}.h^{-1/2}$

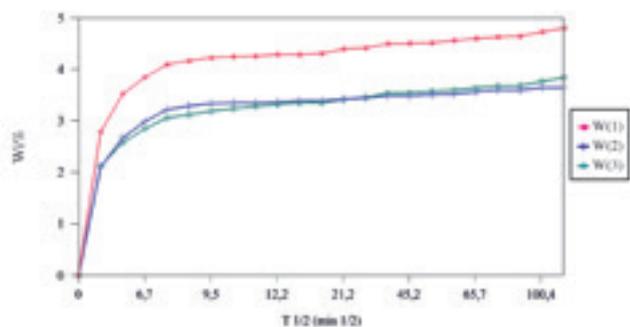


Figura 4.76. Absorción de agua por inmersión total.

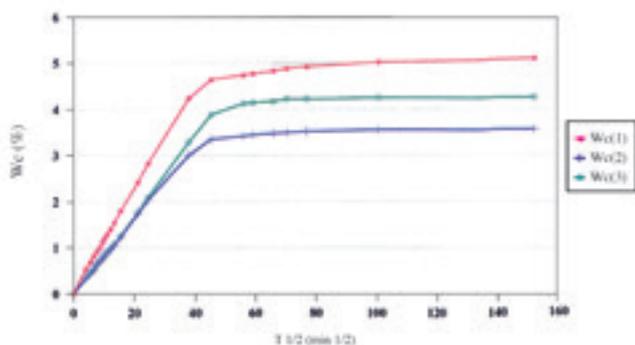


Figura 4.77. Absorción de agua por capilaridad.

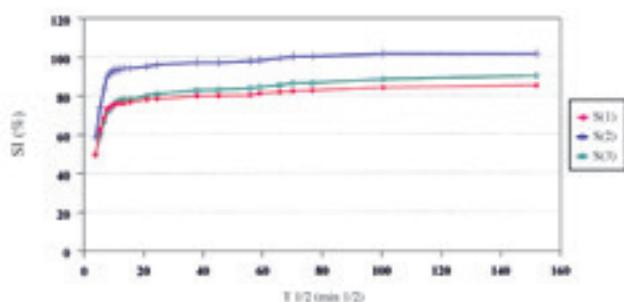


Figura 4.78. Grado de saturación (SI %) por inmersión total.

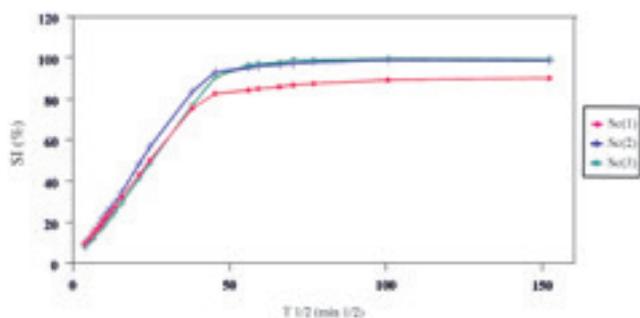


Figura 4.79. Grado de saturación (SI %) por capilaridad.

#### 4.3.4. Caracterización de las muestras silíceas (diatomitas)

Las diatomitas son rocas sedimentarias silíceas formadas por la acumulación de frústulas de diatomeas, suelen tener espículas de esponjas y otros materiales silíceos. Tienen baja densidad, alta porosidad, y elevada capacidad de absorción. La composición mineralógica de las margas diatomíticas, es de ópalo A y ópalo C-T, en ocasiones supera el 80%, con carbonatos y filosilicatos en menores proporciones. La mayoría de las muestras tienen elevados contenidos en sílice y carbonatos (Fotos 4.43-4.49). Los filosilicatos identificados han sido esmectitas en el 90% con illita y caolinita en menores proporciones. Por sus propiedades físicas las diatomitas pueden ser utilizadas como materia prima para la elaboración de estructuras aislantes del calor y frío, incluye ladrillos, bloques y cementos.

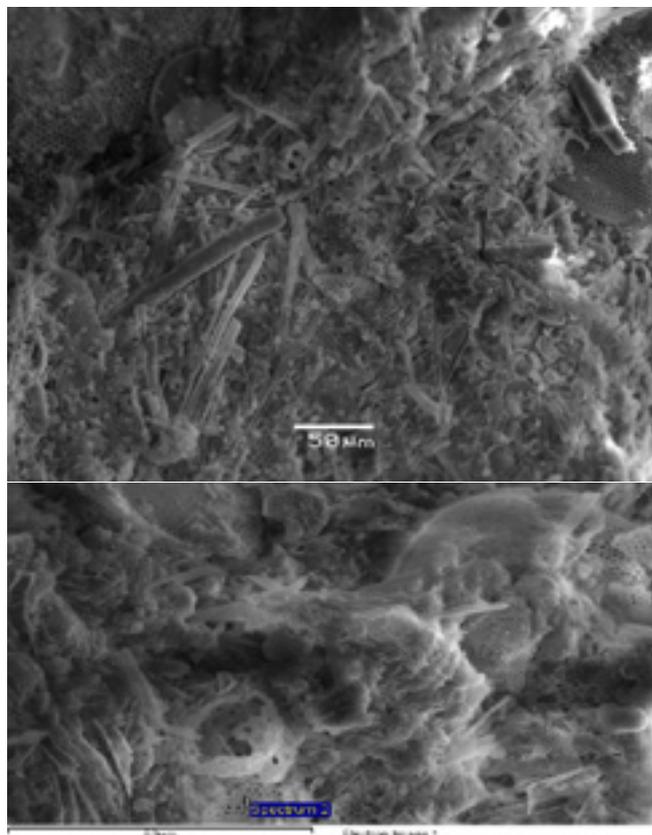
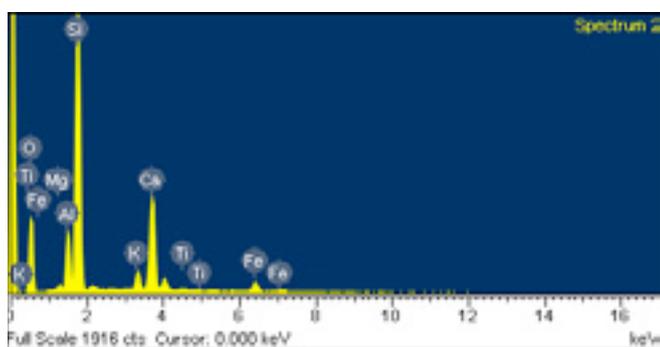
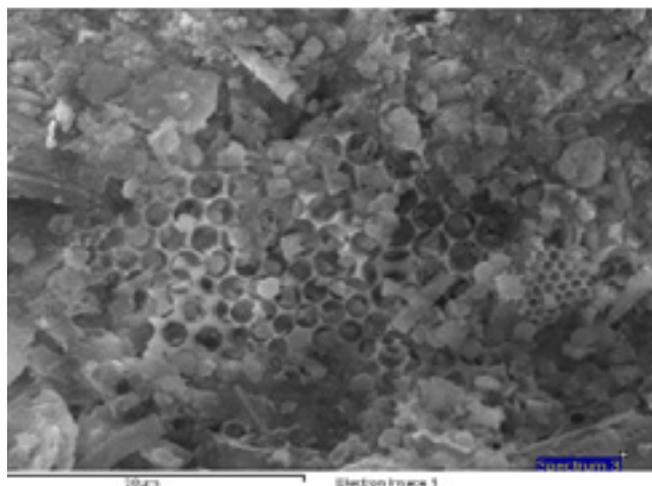
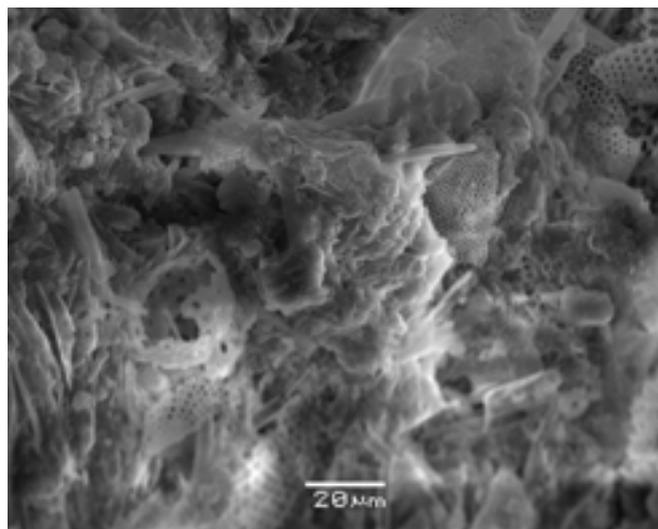


Foto 4.43. Fotografía de microscopio electrónico de muestras de diatomitas. Se observan diatomeas pennales y céntricas, con restos de espículas. Muestra D2.



Element	Weight %	Atomic %
O K	52.43	64.70
Mg K	0.54	0.46
Al K	4.81	3.69
Si K	30.11	22.15
K K	1.56	0.83
Ca K	8.68	4.47
Ti K	0.22	0.10
Fe K	1.65	0.61
Totals	100.00	

Foto 4.44. Fotografía de microscopio electrónico de diatomeas. Análisis químico por EDAX donde se puede observar su naturaleza silíceas. Muestra D2.

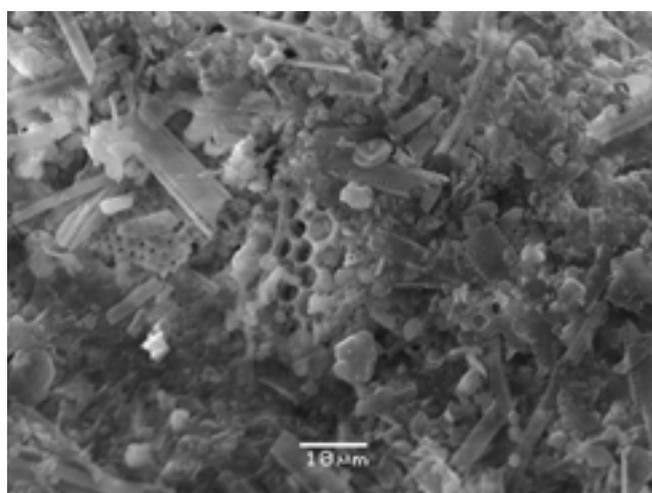
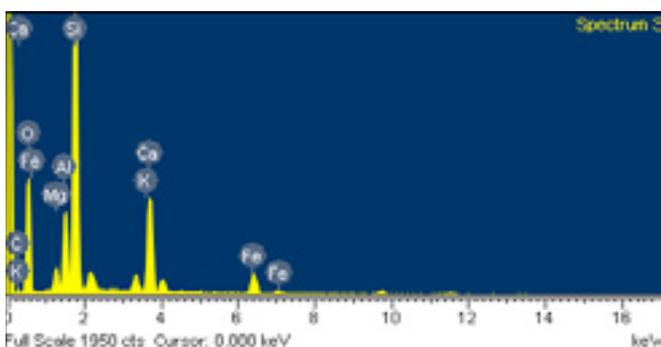
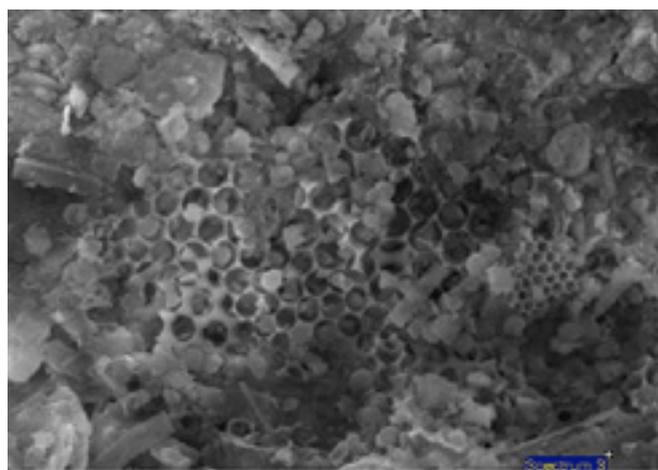


Foto 4.45. Aspecto de la muestra D6, se pueden observar los dos tipos de diatomeas presentes pennales y discoidales.



Element	Weight %	Atomic %	Compd %	Formula
C K	10.12	15.44	34.09	CO2
Mg K	1.90	1.44	3.16	MgO
Al K	4.76	3.23	8.99	Al2O3
Si K	18.03	11.76	38.58	SiO2
K K	0.83	0.39	1.00	K2O
Ca K	5.79	2.65	8.10	CaO
Fe K	2.40	0.79	3.09	FeO
O	56.16	64.31		
Totals	100.00			

Foto 4.46. Fotografía de microscopia electrónica de las muestras de diatomitas. Se puede observar la porosidad natural. La composición química de la muestra es silicea con algo de carbonatos espectro EDAX.

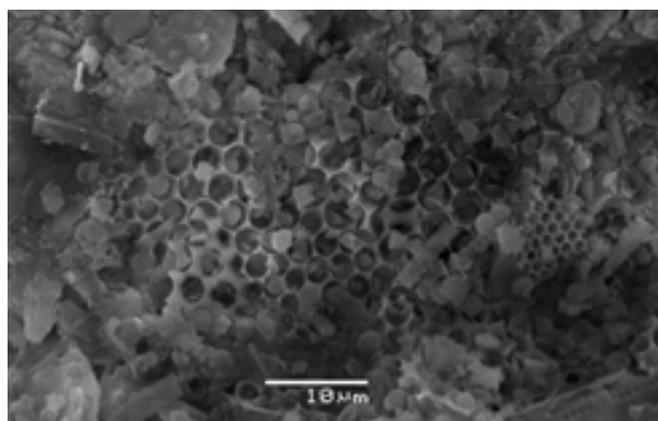


Foto 4.44. Detalle de los materiales diatomíticos, Se observa que pueden constituir en ocasiones filtros naturales. Muestra D6.

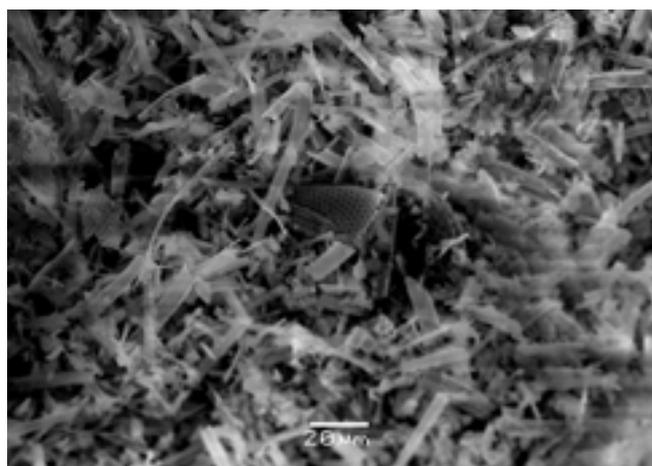
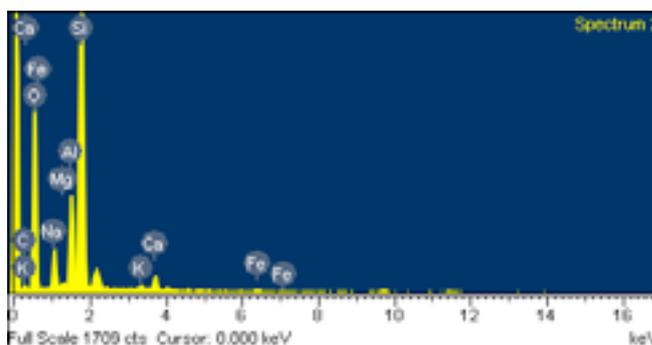
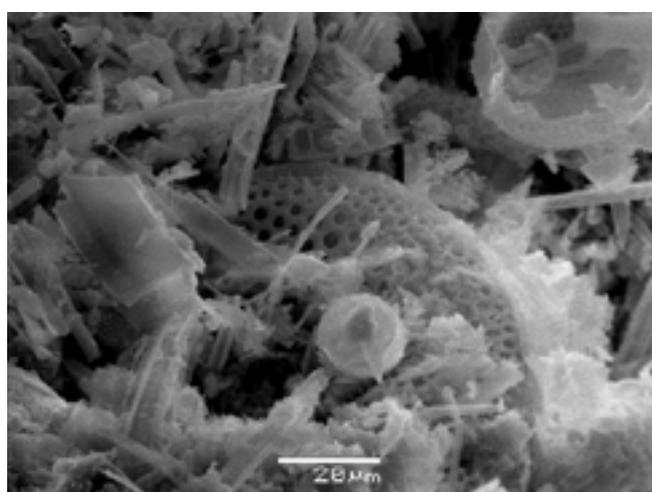


Foto 4.48. Aspecto de la muestra D10. Se puede apreciar una mayor abundancia de las diatomeas pennales.



Element	Weight %	Atomic %	Compd %	Fórmula
C K	0.00	0.00	0.00	CO2
Na K	5.83	5.14	4.85	Na2O
Mg K	0.43	0.36	0.72	MgO
Al K	6.78	5.10	12.81	Al2O3
Si K	35.62	25.72	76.21	SiO2
K K	0.27	0.14	0.33	K2O
Ca K	1.21	0.61	1.70	CaO
Fe K	0.30	0.11	0.39	FeO
O	49.55	62.82		
Totals	100.00			

Foto 4.49. Análisis por EDAX de la muestra D10. Se observan diatomeas pennales y céntricas.

## 5. DISCUSIÓN

### 5.1. DISEÑO DE PROTOTIPOS

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. En la elaboración de prototipos se ha comprobado que en el caso de *Vibrio fischeri* brillan más si se disponen por capas, de 0.5cm a 2cm 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. También se ha comprobado que crecen mejor entre 18 y 27°C. 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.

Para obtener el mejor cultivo de *Pyrocystis fusiformis*, se incrementó el tiempo de exposición a la luz artificial dentro de la cámara climática pasando a 17h con luz y 7h sin ella. De esta forma, las poblaciones de microalgas crecieron más deprisa y se acostumbraron a un ciclo circadiano en el que brillaban más. La primera geometría que se probó fue una estructura pixelada con pequeños volúmenes de 10ml en los que se inyectó agua salada con poblaciones de *Pyrocystis fusiformis*. Esta geometría 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. Este prototipo podría servir para fachadas, pantallas, carteles comerciales, señalización, entre otras.

La última geometría que se probó con éxito, fue un contenedor plástico flexible y transparente de 200ml en el que se podía apreciar una buena calidad en el brillo. Los resultados obtenidos con este prototipo, indican que sería posible pensar en dispositivos bioluminiscentes eficientes para iluminar y señalizar 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.

Tras haber estudiado el comportamiento y las características de poblaciones de *Vibrio 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 sólo 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 “alimentarlos” 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 puedan vivir las microalgas.

Respecto a la propuesta *3D Grown Usable Structures*, el principal interés es la posibilidad de modificar en tiempo real el diseño de los moldes usando software paramétrico, y el de obtener componentes estructurales para conformar estructuras complejas por agregación, hechos con material 100% biodegradable. Estos componentes modulares tienen una estructura de ramas que pueden tener forma de prisma rectangular o estar conformadas por cubos distorsionados unidos entre sí y están controladas algorítmicamente. La estrategia de generación de forma utilizada para generarlos, permite re-informar los componentes modulares en tiempo real, de manera que se puede modificar su geometría y topología para configurar poblaciones personalizadas. La geometría y la topología determina 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 pasar más o menos luz, aislará térmicamente mejor o peor, será más o menos fácil acceder a ella. 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. Los módulos fabricados, o más bien “crecidos”, de esta manera 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.

El proyecto *Growing Architecture through Mycelium and Agricultural Waste*, pretende realizar paneles aislantes para ser utilizados en la industria de la construcción como alternativa a los actuales paneles de espumas derivadas del petróleo, y en crecer membranas superficia-

les en moldes de mayor tamaño para obtener prototipos de componentes para fachadas o paredes. La obtención de este tipo de productos no fue fácil, se probaron distintas especies de hongos y residuos agrícolas, Los primeros resultados no fueron buenos, ya que el micelio de hongo no creció debido a que hay que tener mucho cuidado en la manipulación ya que se contaminan con facilidad. 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 distintas clases de prototipos con moldes y estructuras de madera y metacrilato, con semillas de *Pleurotus ostreatus*. Después de varios intentos que ocasionaron problemas de crecimiento del micelio, cuando el sustrato eran hojas secas, la combinación que mejor funcionó fue la mezcla de semillas de *Pleurotus ostreatus* y sustrato de paja triturada pasteurizada. 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.

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*, que 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 exteriores, y superficies públicas de conexión. 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 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 éstas. 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.

## 5.2. CONCEPTUALIZACIONES DERIVADAS DE LA INVESTIGACIÓN

### 5.2.1. El sentido de una conceptualización

Llevadas en paralelo, implementación objetual y procesual de toda investigación, y la conciencia de sí, desafían a la historia moderna de la tecnología, que prima el artefacto ante su consecuencia. El ya conocido pero no muy bien asumido *dictum* por el que cualquier tecnología que cause daños –medioambientales, en un pacato sentido de la verdadera perspectiva que debería ser tenida en cuenta– tendría sin mucha demora una nueva generación de tecnologías que restañarán los errores cometidos, no es sino la cara comercial de un espíritu mezquino que sabe que las catástrofes contra la naturaleza rentan al desarrollo incrementando el PIB de un país. Esta indolencia, ignorancia y falta de responsabilidad de cara al futuro no puede caber en nuestros días. A pesar de las dificultades económicas que nuestro entorno padece, que pudiera despertar deseos inmediatos de generación de riqueza, un desvío de la atención primordial que las consecuencias a largo plazo (y no tan largo) no son de orden local, de escala reducida y controlada, en lo que se refiere a la manipulación de lo vivo, aportaría una investigación como ésta, pocas o ninguna contribución, ni a su campo de conocimiento, ni a la sociedad en general.

Este será un asunto que será clave para nuestro entendimiento de estar en el Mundo, y la arquitectura, disciplina que no significa meramente construcción, no puede permanecer a la expectativa de saber qué conclusión aceptar como válida, sino que su hacer aportará en los próximos años a la búsqueda de ello, procesos, morfológicas y conceptualizaciones.

Esta es una de las apuestas que se trazan desde este proyecto de investigación “Diseño de prototipos de materiales biosintéticos para su uso como materiales de construcción” de aquí a un futuro cercano. Trabajar con estos materiales no sólo articula alternativas y renovaciones en los métodos constructivos, sino que esta claridad de miras que podemos desde esas líneas providenciar, también se presenta como importante de cara a ese futuro.

Las elucidaciones que podemos hacer desde nuestra investigación, siendo ésta incipiente, por la gran cantidad de posibilidades que ofrece para su continuación, pueden concentrarse en una serie de preguntas intencionales.

Heisenberg ha dejado escrito que la realidad objetiva se ha evaporado y lo que nosotros observamos no es la naturaleza en sí, sino que la naturaleza se ve expuesta a nuestro método de interrogación. Trataremos de construir esas preguntas para explicitar, pero a sabiendas de sus limitaciones.

### 5.2.2. La pregunta por la naturaleza

Dentro del paradigma ya clásico de polarización de época, constituido por el arco de la modernidad, la relación natural-artificial presenta derivas que se hacen patentes desde planteamientos no sólo provenientes del desarrollo científico. Podemos decir sin cometer serias imprecisiones, que lo que antes supuso tal relación de opuestos, ahora viene determinado por algunos cambios de sentido de los atributos de cada uno de los polos, e incorpora condiciones no materiales. Desarrollando este argumento, es posible decir que la tendencia es hacia una superación del contraste entre opuestos, en lo que podríamos llamar *artificialidad*, como lo harían los sociólogos de la ciencia, e incorpora un nuevo *sensu*: la virtualidad. Nuevo, no como novedad nunca antes descrita, sino como acepción radicalmente diferente, hasta el punto de posicionarse para ser una condición paradigmática de nuestra cosmovisión.

El uso de la palabra naturaleza no se refiere ya a lo que sucede sin nosotros, sino justamente a una relación mucho más fuerte que la que hasta ahora hemos sostenido. No es posible renunciar a la técnica como sistema de inmunidad, ello es cierto, pero empezamos a darnos cuenta de ser con las cosas. Ambos argumentos, los sistemas de doblegamiento de la naturaleza, bien estudiado por Sloterdijk en el conjunto de su obra filosófica y, ser en y con las cosas, república de los objetos, de Latour, inclinan lo que es calificable como paradigmático –eso que echamos de menos en nuestra concepción de nosotros mismos, cuando ya no lo tenemos– hacia un reposicionamiento en el que podemos participar. Quizá no se pueda determinar una direccionalidad paradigmática, pero sí sumar esfuerzos con criterio, razón y voluntad de servicio en comunidad, que a la postre pueda entenderse como idea de mundo, como voluntad, ya no de poder, sino de crear.

Y esa deriva es el concepto de vida. En él se han de refundar las ciencias, se han de reconsiderar las pertenencias y adscripciones, tanto como para remover siglos de Humanismo. Y, en este sentido, hay dos claves que organizan nuestras hipótesis. La primera será que en lo que supera el Humanismo no se encuentra ya la confianza por la que todo problema que se le plantee a la Humanidad pueda tener respuesta en los Libros, en esa habilidad de la escritura-lectura con la que comunicarnos (epistolariamente) para resolverlos. La segunda, que los Hombres no están en el centro, y sólo son, en palabras de Sloterdijk y en cadencia arquitectónica, “vecinos del Ser”, sin derecho de propiedad de su casa, o ni siquiera con derechos adquiridos por “virtud de un contrato irrevocable de alquiler”. Al aceptar estas dos hipótesis, aceptamos igualmente que el punto de vista de lo humano es ahora externo a sí mismo, y reivindica un nuevo estatuto con las cosas, vivas y no vivas. Es, será nuestra eco-logía en lo venidero, si sabemos organizar lo que vamos a llamar “articulación”.

### 5.2.3. La pregunta por la procesualidad, la articulación de lo vivo y lo inerte

Articular viene a significar aquí, para nuestros supuestos, “explicación”, y organiza por su aparición una red más densa relacional entre ciencia y sociedad. No trata con totalidades, no trabaja con hechos demostrados, comprobados, sino “un horizonte agitado de todas las propuestas, en las que se ofrece a la advertencia humana algo existente, posible y real, de modo proposicional o provocativo”. Éste es el estado de la cuestión a tener presente y no como fijaciones de contenidos, líneas epigonales estilísticas o frivolidades tecnológicas sin alma, para un mundo que además, ya perdió paradójicamente su paradigma desde lo tecnológico y reclama una refundación de todos y cada uno de los sentidos que hoy manejamos de términos, algunos ya esbozados, como cultura, naturaleza, artificialidad, técnica, que han de mutar a nuevas reacciones verbales como: artificialeza, naturar, encasamiento, esferología e inmunidad.

La intencionalidad del empleo del término “articulación” reside en que no ni siendo una categoría filosófica, permite alcanzar una visión más allá incluso de lo escópico, en lo pluriespacial, que no es unívoca, lineal, sino irregular, compleja, que estudia la unión cualitativa y no previsible entre partes, entre fuerzas de heterogénea y disímil entidad. Y, ulteriormente, implica manejar cuestiones que pueden acelerarse o frenarse según intervención del sentido de lo humano, pero no completamente por la voluntad de hacerlo: existe una cierta autonomía en su proceso. Se articulan las transferencias, que no son continuidades entre nociones de lo humano. La pregunta que evocamos desde Nietzsche se comprende al aclarar que se halla más allá de la naturaleza de lo humano, al indicar qué papel ha de jugar el último hombre hacia lo que lo supera, en una concepción que muestra asimismo la repugnancia que le causa el devenir metafísico, banalizado, consumista y egoísta del hombre desde Sócrates. El surgir de un *neohumanismo* como focalización del problema del último humano reflexionando sobre su apocalíptica cotidiana condición, muestra un carácter bifronte. Se debate, como ser biológico, entre tendencias neófilas o neófobas, que dan a entender, en sus pugnas, la actual situación.

### 5.2.4. ¿Quién necesita entonces una diferenciación entre natural y artificial? ¿Qué es la vida sino una definición para unos supuestos acordables y puede ser invocada sin histerias? ¿Qué es lo ecológico sino unos ojos vueltos a estas sensibilidades, especialmente susceptibles de reconocer incluso derechos cívicos a las cosas, a las máquinas?

Erwin Schrödinger enuncia en 1945 el Segundo Principio de la Termodinámica por el que señala que la materia tiene una tendencia al desorden molecular y a la desorganización, lo que se llama Entropía. Sin embargo, y esto es crucial para nosotros, la vida, propende a la organización, lo

que se denomina Neguentropía: una complejidad creciente. En el año 1959, León Brillouin, a partir de la noción de información que vincula sistémicamente las nociones de orden y desorden da un sentido correlativo a la relación materia-vida con organizaciones contrapuestas.

En el resto de este informe, pueden encontrarse alusiones a la noción de autoorganización. Pues bien, estas reflexiones van a ser condicionadas por el establecimiento de bases argumentales descriptivas en 1966 por parte de von Neumann, en lo que él denomina autoorganización de la máquina viva, de autorreparación, que traza que los seres vivos poseen la aptitud de no decaer como la máquina artificial sino de amplificar su complejidad. Podríamos invocar aquí los trabajos de Ecosistemología de Wilden, como valora Morin en su libro sobre el paradigma complejo.

Lo complejo, algo considerado como fundamental por John von Neumann, implica una singular razón de funcionamiento de los seres vivos. Se convocan en el ser vivo, azar, desorden e indeterminación como factores de autoorganización lo que es lo mismo, la organización a un nivel superior.

La vida como un sistema que se autoorganiza generando sus propios elementos constitutivos y que se autoreproduce en su globalidad modifica, en una ruptura paradigmática sin precedentes, la noción de vida, constituyendo una “revolución biológica” cuyos alcances hoy empezamos a valorar en lo que fueron aquellos arranques, y a saber conjugar, en lo que refiere a los desarrollos extendidos, dispares y de increíbles aplicabilidades y reformulaciones de nuestro estar en la Tierra, que aquellas potencialidades promovieron para nuestro tiempo.

Las nuevas máquinas son los nuevos seres. Los que nos redefinirán el concepto de alteridad. Nuestra alteridad no es lo natural, sino una nueva sensibilidad con lo natural, que nunca que fue tal, pero que su proyección mental nos da las claves para entender qué está pasando.

Viramos de ser unos seres vivos, los únicos en la vida terrestre, que carecemos de función en los ecosistemas, por propia decisión de retirarnos de tales funciones, llegando incluso a olvidar nuestras pertenencias. Nos hemos dado cuenta de que ser ecológicos es mirar con admiración a los cloroplastos ya que son los únicos seres vivos que saben metabolizar la energía del sol y constituir otra cosa distinta: energía química en el denominado ciclo de Calvin.

Esta investigación aúna procesos de organización, concede nuevos derechos a las cosas, revierte en la redefinición de lo vivo, al mismo tiempo que auspicia nuevas formas de construcción, que ensaya mejora de la relación con los entornos y los ecosistemas, y que es capaz de imaginar. De imaginar más allá del empleo de materias disímiles en forma autoorganizada, todo un mundo que vuelve sus ojos de nuevo a la expansión de las formas de la vida como modelo.

### 5.2.5. ¿Cómo lo haría la naturaleza?

Desde los símiles óseos de da Vinci, a las formas animales marinas para la construcción de barcos de G. Cayley en el Siglo XIX, pasando por la inspiración de innumerables edificios de clave moderna en el tránsito de ese siglo al XX (léase esta referencia meramente con los ejemplos de las arquitecturas de Paxton, Nervi, Fuller, Le Ricolais, Otto, etc.), la naturaleza –que ya definimos aquí como *artificialidad*– han marcado el ritmo de los tiempos, en clara oposición con otros modos de hacer donde la instancia de lo natural era sólo el escenario donde inscribir las habilidades técnicas que se iban sucediendo.

Desde hace unos años, los posicionamientos han empezado a funcionar de manera diferente. Bien como fijaciones metafóricas de procesos provenientes de otras disciplinas –que acaban por ser meros reduccionismos formalistas– bien como intentos parciales, pero altamente sofisticados en sus tecnologías de análisis y toma de datos de parámetros que sólo son extrapolables a una modelización de corto alcance, aun pretendiendo abarcar mucho, la cuestión del equilibrio energético en generación de forma no ha tenido la necesidad sino de ser una posibilidad más de aparecer en el escenario efímero del consumo.

Sin embargo, ahora sabemos que podemos y debemos acometer una empresa más importante, inteligente y amplia. La observación de los procesos biológicos conduce a una sabiduría que nos restituye a la cadena de competencias en los ecosistemas, de respeto completo, de mantenimiento de los preceptos de equidad: social, entre humanos, de intercambio entre humanos y no humanos.

He aquí una singular propuesta: desde la ciencia, formar parte de los procesos holísticos. Palabra no siempre bien avenida con la ciencia, lo holístico descubre y mantiene los equilibrios incluso de lo que no es visible, ni registrable, al menos por los métodos clásicos de esa ciencia.

Así pues, si esta investigación no tiene como objetivo el poder aclarar estas cuestiones, sino generar un protocolo de producción de lo vivo en su relación con lo no vivo, con aplicabilidad determinable, ya es factible aceptar que estos cambios descritos en este apartado están convocados en paralelo.

Las aportaciones de las investigaciones previas a este proyecto realizadas por los miembros del equipo, en distintas fases y acciones, contrastadas con otros especialistas, imprimen sobre la actual investigación un horizonte de expectativas que involucran a distintos ámbitos de conocimiento, como la arquitectura, la geología, la biología, construcción, etc.

Las posibilidades de estas prácticas híbridas son aún poco percibidas en nuestro entorno más cercano como de una alta resonancia. Sin embargo, si se mira en puntos clave del desarrollo tecnológico y conceptual en el mundo, ya se pueden ver patentes y centros de formación especializados.

Es imprescindible mantenerse en el camino de estos descubrimientos basados en la naturaleza como imaginario: la biomimesis, pero entendida como inteligencias cruzadas que amplifican nuestra visión del mundo y nuestro estar en él.

## 6. CONCLUSIONES

- Las bacterias de la especie *Vibrio fischeri* emiten una luz tenue pero se pueden usar en espacios que no demanden mucha luz, 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 sólo cuando se excitan mecánicamente, se puede 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 puedan vivir las microalgas.
- Las 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.
- *Grown 3D 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 semillas 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, soportes para jardines verticales.
- *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.

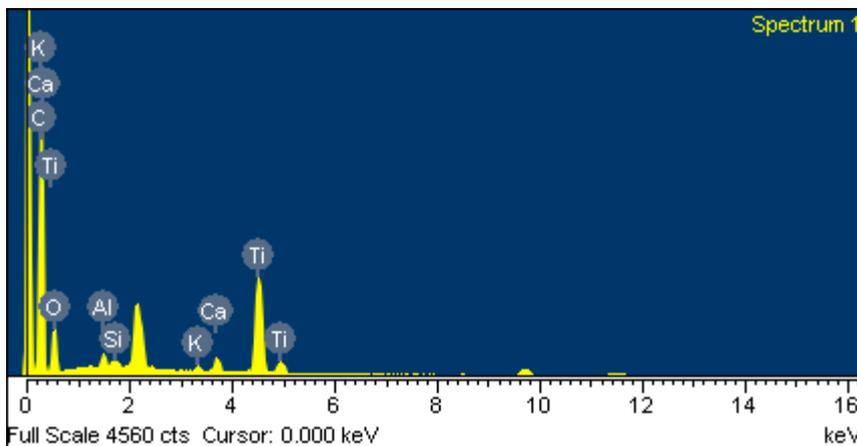
De entre todos los paneles de *micelio* que se crecieron en moldes utilizando diferentes especies de hongo y de residuo agrícola, la mejor combinación fue la de los hongos de la especie *Pleurotus ostreatus*, crecidos sobre paja triturada pasteurizada. el crecimiento tanto de paneles como de paredes de *micelio* favorecería el ahorro energético porque las estructuras de *micelio* no necesitan energía adicional para crecer, contribuiría a disminuir las emisiones de CO2 y sustancias contaminantes, y sería reabsorbible por el medio al 100%.

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.

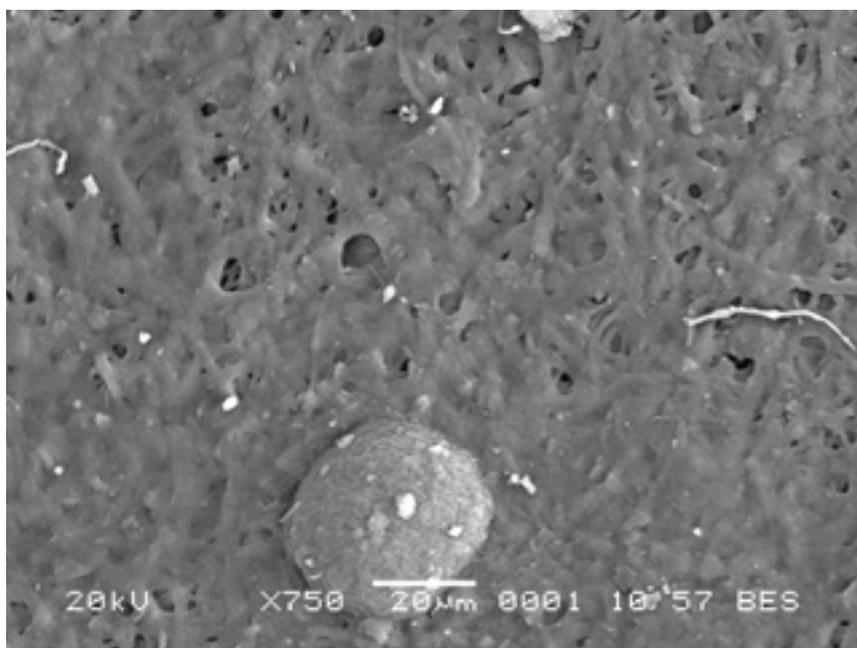
## 7. BIBLIOGRAFÍA REFERENCIADA

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, P.P., Abramson, L.W., & Bruce, D. A. *Ground Control and Improvement*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1994. 240-243.
5. Karol, R.H., 2003. *Chemical Grouting and Soil Stabilization*. Marcel Dekker, New York, NY, (2003). 558 pp.
6. DeJong, JT, Fritzges, MB & Nüsslein, K. Microbially Induced Cementation to control sand response to undrained shear, *ASCE Journal of Geotech. Geoenviron. Eng.* 2006, 132, 1381-1392.
4. DeJong, Brina M. Mortensen Brian C. Martinez Douglas C. Nelson Bio-mediated soil improvement *Ecological Engineering* 36 (2010) 197-210
8. Jason T. DeJong, Kenichi Soga, Steven A. Banwart, W. Richard Whalley, Timothy R. Ginn, Douglas C. Nelson, Brina M. Mortensen, Brian C. Martinez & Tammer Barkouki. 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 ; M. S. 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. Douglas C. Nelson Bio-mediated soil improvement. *Ecological Engineering* 36 (2010) 197-210
12. Shimomura, O. *Bioluminescence: Chemical Principles and Methods*, World Scientific Publishing Company, 2006.
13. Nealson, K.H. & Hastings, J.W., 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, Massachussets, 2004.
16. Wider, E. A. & Case, J.F., Two flash forms in the bioluminescent dinoflagellates, *Pyrocystis Fusiformis*, *Journal of Comparative Physiology*, 143 pp. 43-52, 1981
  - ASTM (1978). Standard test method for absorption and bulk specific gravity of natural building stone. An. Book of ASTM Standards, 19, Norma C97-47, 1-3.
  - CNR-ICR (1985). Assorbimento d' acqua per capillarità. Coefficiente di assorbimento capillare. Doc. Normal: 11/85. Roma, 7 pp.
  - CNR-ICR (1981). Assorbimento d' acqua per immersione totale. Capacità de imbibizione. Doc. Normal 7/81. Roma, 5 pp.
  - CNR-ICR (1980). Distribuzione del volumes dei pori infunzione del loro diametro. Doc. Normal: 4/80, Roma 1/10-10/10.
  - Crnkovic, B. (1982). Non destructive method in determination of technical properties of natural stones. *Durability of building materials*, 1, 35-44.
  - Choquette, P.W. & Pray, L.C (1970) .Geologic nomenclature and classification of porosity. *Bull. AAPG* 54: 207-250..
  - Franklin, J.A & Broch, E. (1972). The point-load test in geotechnical practice. *Eng. Geol.*, 9, 1-11.
  - ISRM (1979). Suggested method for determining water content, porosity, density, absorption and relates properties. Sweling and slake durability index. *Properties Int. J. Rock. Mech. and Min. Sci.*, 16(2), 143-156.
  - Montoto, M. (1983). The petrographic interpretation of the physical properties of rocks. *Proc. 5th Int. Cong. Soc. Rocks Mechanics*, Sec B, Melbourne, 93-98.
  - Van Keulen J.; Van Haastracht, J.A. (1972). Determination of the maximum water content. *INO. Delft. Holl.*, Rep. BI-72-39.

## 8. ANEXOS



Element	Weight %	Atomic %
C	50.42	65.89
O	24.60	24.08
Na	0.41	0.28
Mg	0.33	0.21
Al	0.24	0.14
Si	0.54	0.30
Cl	0.55	0.24
K	2.02	0.81
Ca	0.31	0.12
Fe	14.03	4.79
Totals	100.00	



Element	Weight %	Atomic %
C	58.14	71.32
O	25.21	23.22
Al	0.77	0.42
Si	0.25	0.13
K	0.48	0.18
Ca	1.18	0.44
Ti	13.98	4.30
Totals	100.00	

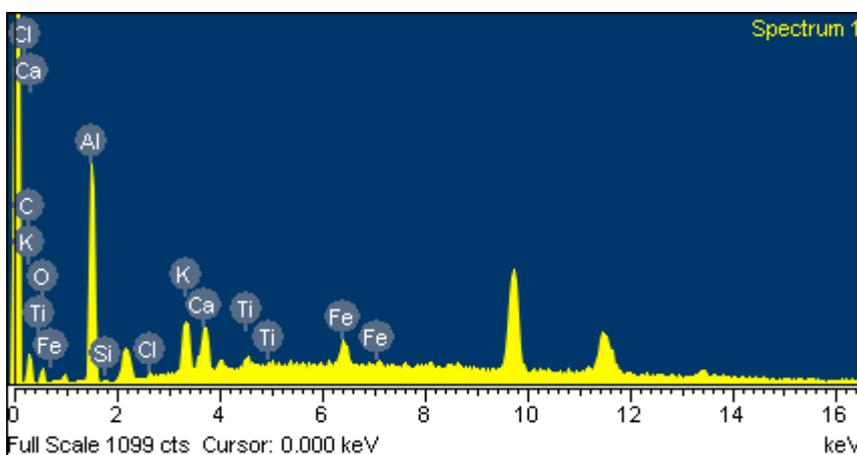
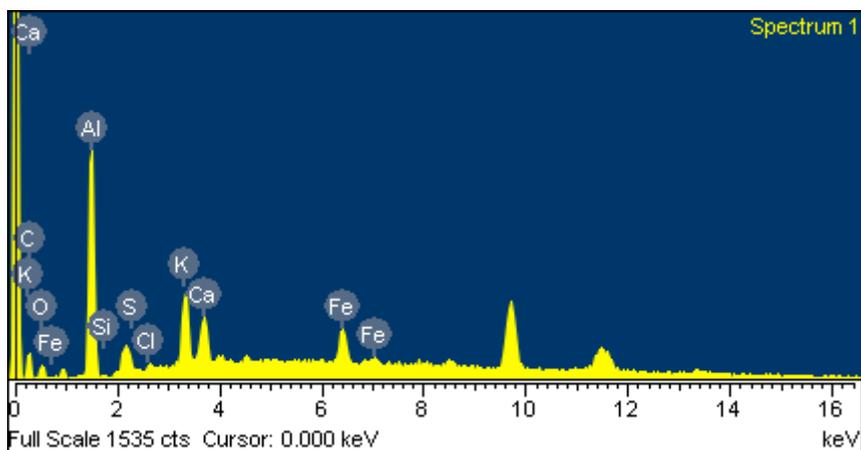


Figura 1.

Fotografía de microscopía electrónica de barrido y análisis EDAX de la muestra de Greensulate. La composición de la muestra es de la carbono y oxígeno en el toda el área, excepto la partícula que es de rutilo (óxido de titanio)

Element	Weight %	Atomic %
C	28.04	48.83
O	11.71	15.31
Al	24.91	19.31
Si	0.44	0.33
Cl	0.79	0.46
K	9.39	5.02
Ca	8.87	4.63
Ti	2.74	1.19
Fe	13.13	4.92
Totals	100.00	



Element	Weight%	Atomic%
C	26.20	44.13
O	11.24	15.18
Al	23.92	19.15
Si	0.38	0.29
Cl	1.06	0.65
K	11.67	6.45
Ca	8.39	4.52
Fe	14.13	6.63
Totals	100.00	

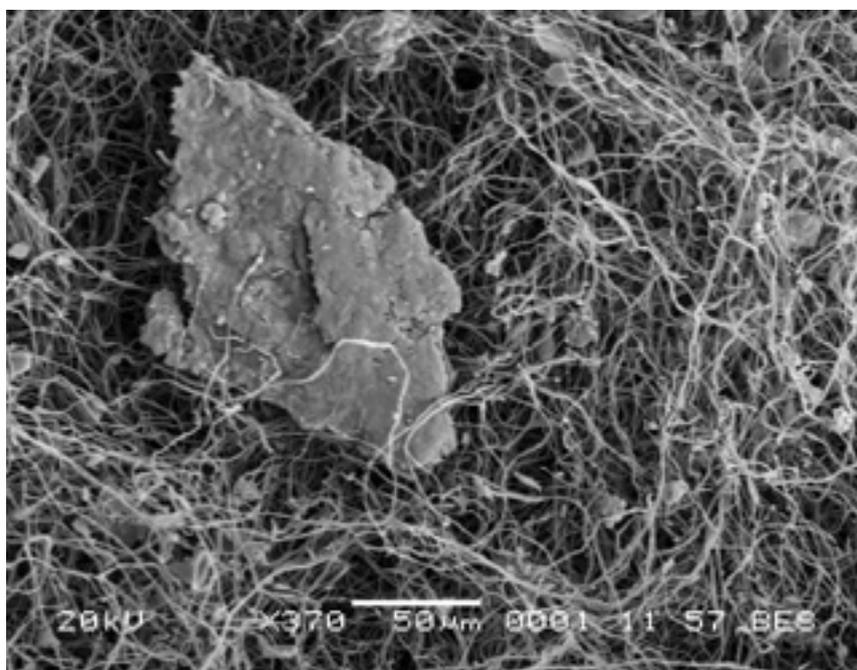
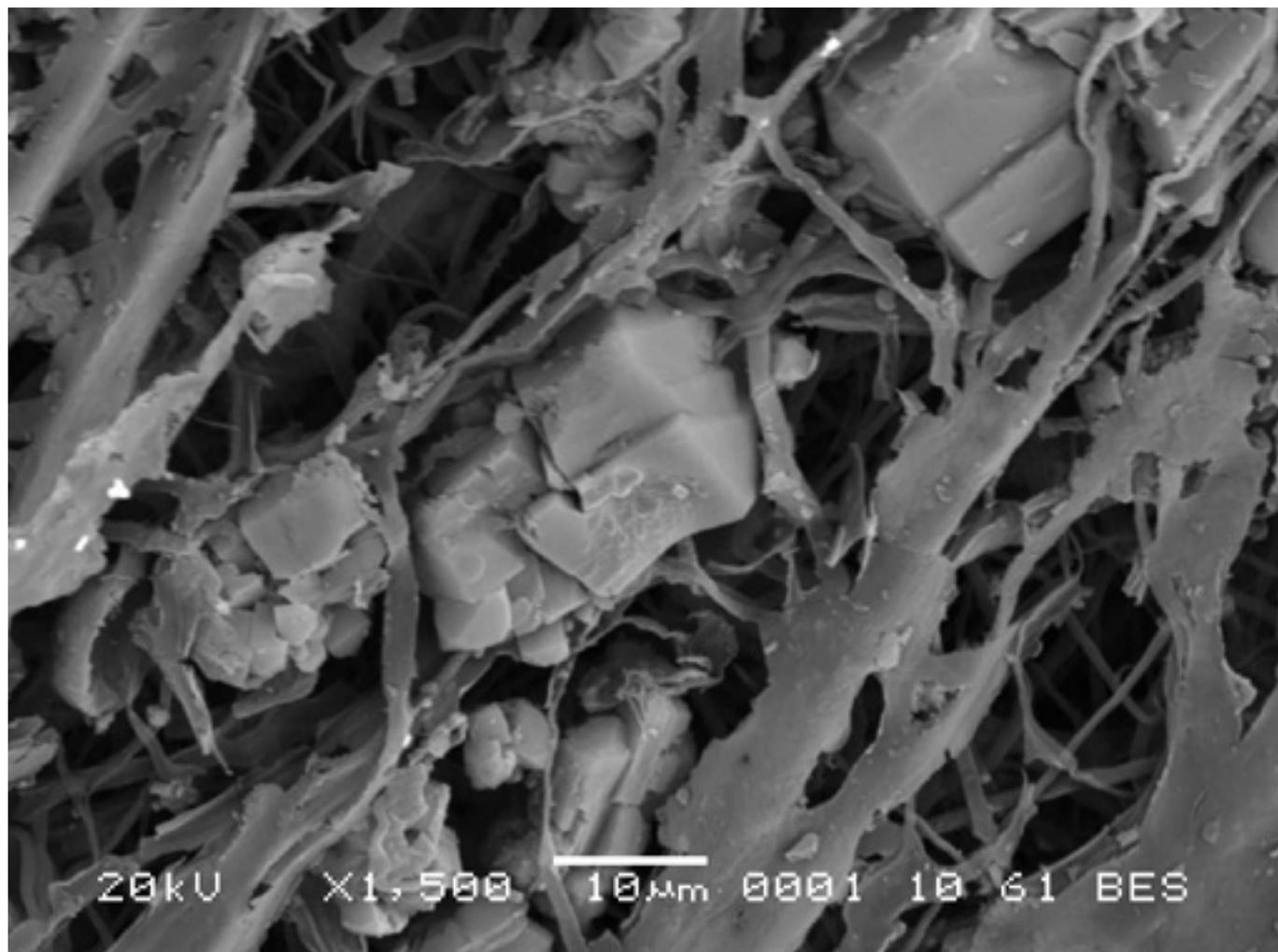


Figura 2.

Microfotografía SEM y análisis EDAX . La partícula es de mica compuesta por silicato de aluminio, potasio y hierro.



Element	Weight %	Atomic %
C	5.35	11.58
O	28.32	46.06
Cl	0.28	0.21
K	1.33	0.88
Ca	62.97	40.88
Sn	1.76	0.39
Totals	100.00	

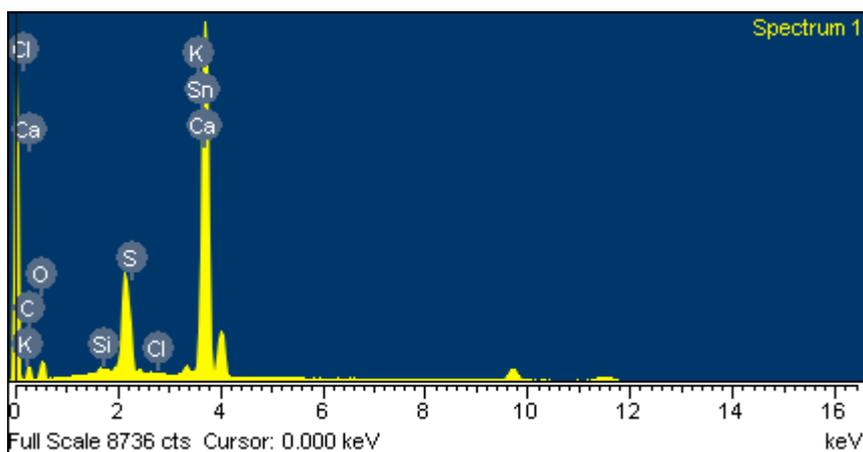
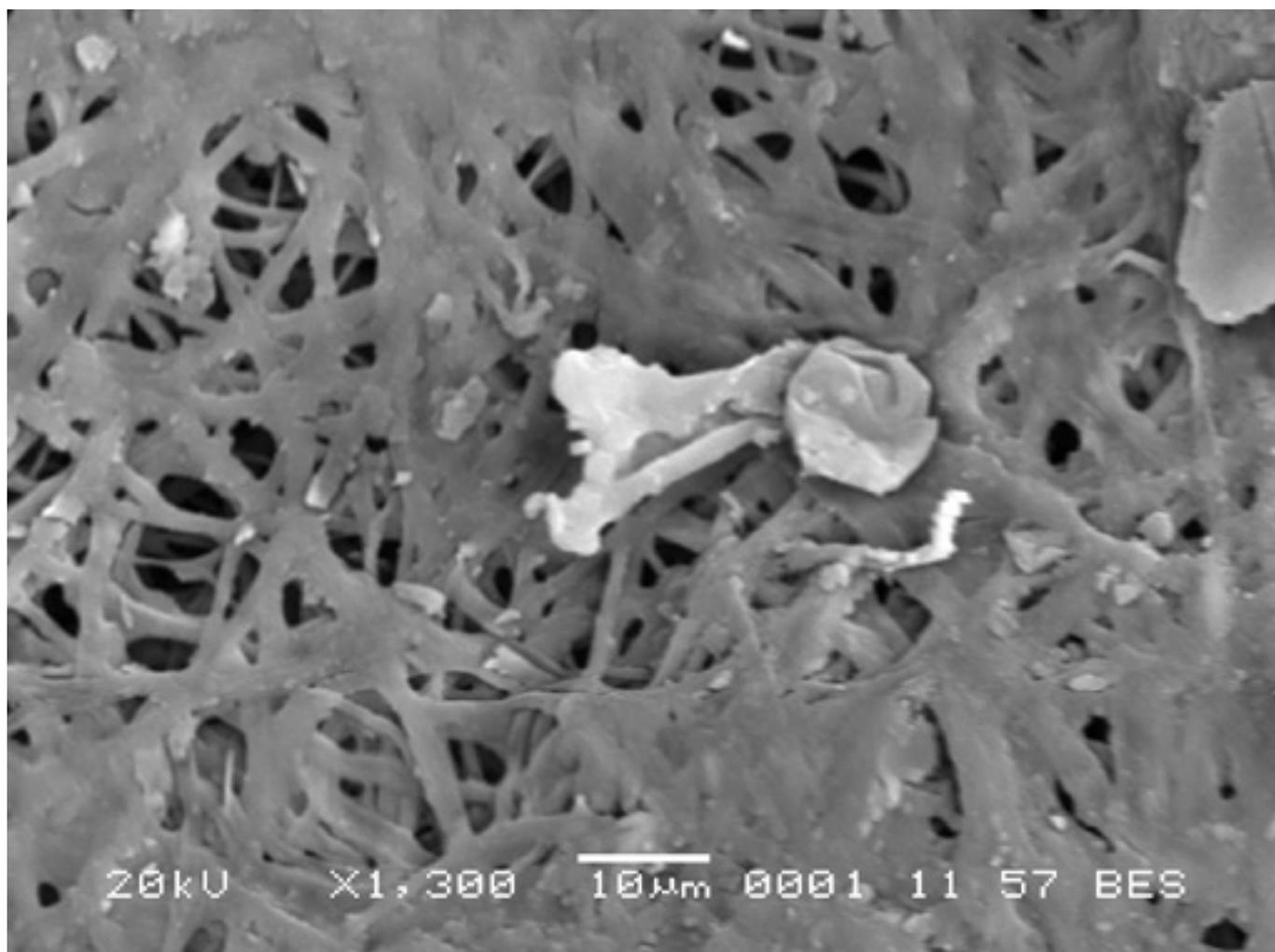


Figura 3.

Fotografía de microscopía electrónica de barrido y análisis EDAX de la muestra de Greensulate. Se observa la alta porosidad, y la composición de la muestra tiene calcio fundamentalmente (un sulfato o un fosfato ??)



Element	Weight %	Atomic %
C	58.19	64.12
O	34.83	30.16
Na	0.57	0.34
Mg	0.36	0.21
Cl	0.88	0.34
K	5.17	1.83
Totals	100.00	

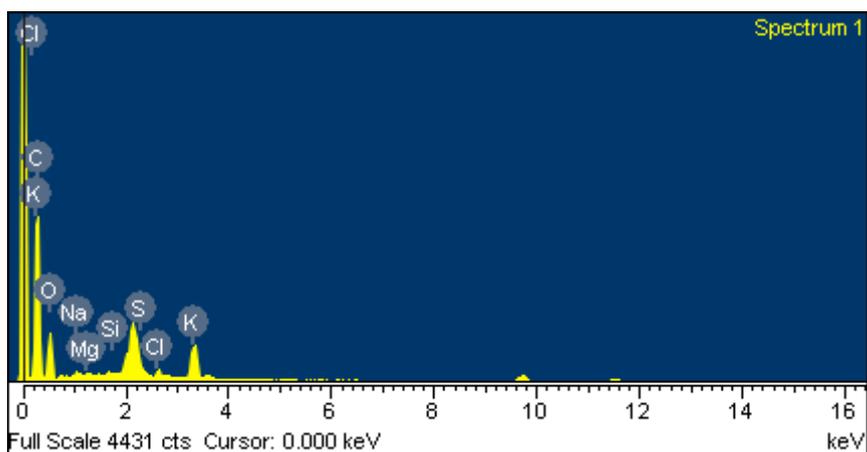


Figura 4.

Fotografía de microscopia electrónica de barrido y análisis EDAX de la muestra de Greensulate. Se observa la alta porosidad, y la composición de la muestra Es de la (carbono y oxígeno en el análisis)

## 9. MEMORIA ECONOMICA

Presupuesto Total: 15.000 euros

Relación de Inversiones: Se ha contratado a tiempo parcial, durante 8 meses al Arquitecto Eduardo Mayoral González

Gastos de personal contratado = 11.494,49 + 10% Costes directos FIUS (1.007,49) = 12,501,90 euros gastados

Relación de personal que participa en el proyecto:

**Dra. Isabel González Díez**

**Dr. Eduardo Mayoral González. Arquitecto**

**Dra. Auxiliadora Vázquez González. Universidad de Sevilla**

**Dra. Pilar Ortiz Calderón. Universidad Pablo de Olavide. Sevilla**

**Dr. Carlos Tapia. Universidad de Sevilla**

Se adjunta copia del desglose económico realizado por la FIUS de la Universidad de Sevilla