

## Bioingeniería y Materiales (BIO-MAT)

Ana M. García, Mohammed Naffakh, Andrés Núñez, Beatriz Sánchez-Parra y Diego A. Moreno



Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.  
c/ José Gutiérrez Abascal 2, 28006 Madrid



Integrantes del grupo de investigación (de izquierda a derecha): Felipe Montero, Andrés Núñez, Beatriz Sánchez-Parra, José M. Ruiz-Román, Ana M. García, Luis E. García-Cambronero, Mohammed Naffakh y Diego A. Moreno

El Grupo de Investigación en Bioingeniería y Materiales (BIO-MAT) de la Universidad Politécnica de Madrid, dirigido por el Profesor Diego A. Moreno, ha estado formado desde sus orígenes por un equipo multidisciplinar de ingenieros, químicos, físicos y microbiólogos, si bien, como es natural, su composición ha ido variando a lo largo del tiempo con la incorporación de nuevos investigadores y la marcha de otros. Esta versatilidad en la formación de sus integrantes es fundamental para poder llevar a cabo nuestras actividades de investigación, relacionadas con la interacción entre los microorganismos y los materiales. Como describimos en el especial de Sem@ foro de diciembre de 2013, nuestras líneas de investigación se centraron inicialmente en el estudio de las biopelículas formadas sobre distintos materiales en diferentes ambientes y las consecuencias de su desarrollo en procesos de corrosión microbiana, biodeterioro, biodegradación y biorremediación. En los últimos años hemos continuado trabajando en estas líneas a través de la participación

en diferentes proyectos de investigación y la colaboración con diferentes grupos de investigación y empresas, si bien hemos centrado nuestra actividad en dos líneas principales que describimos a continuación.

### DIVERSIDAD MICROBIOLÓGICA DEL AIRE

Esta nueva línea está integrada en el marco del Programa AIRBIOTA-CM [S2013/MAE-2874] (<http://www.airbiota.com>) cuyo objetivo es conocer y modelizar la contaminación biológica del aire urbano.

El aire que respiramos contiene, además de partículas inorgánicas, componentes biológicos como bacterias, hongos, arqueas, etc. Conocer la identidad de estos componentes en el aire es importante desde el punto de vista de la salud, ya que algunas esporas de hongos y granos de polen pueden provocar alergias, así como bacterias, virus y hongos

pueden causar diversas enfermedades infecciosas a humanos, animales e incluso a plantas. También, desde un punto de vista del patrimonio cultural, algunos de estos microorganismos pueden influir y acelerar el biodeterioro de edificios y monumentos emblemáticos.

Clásicamente, la diversidad real de estos elementos se ha estudiado por técnicas de cultivo microbiológico y/o identificación mediante rasgos morfológicos observados al microscopio. Además, los análisis se centraban normalmente en el estudio de un solo tipo de organismo (Núñez *et al.* 2016a). Ahora, el Programa AIRBIOTA-CM tiene como aspectos innovadores el análisis integral de los componentes del aire, estudiando varios tipos de microorganismos a la vez, mediante tecnologías emergentes de biología molecular como la secuenciación masiva del ADN (*Next-generation sequencing*) (Núñez *et al.* 2016b). La principal ventaja de esta metodología es que no requiere el cultivo previo de

los agentes biológicos, reduciendo el tiempo necesario de los análisis y evitando la introducción de sesgos derivados del cultivo.

En este Programa participan cinco grupos de investigación especializados en diferentes disciplinas como la microbiología (donde se encuentra BIO-MAT), palinología y biología de sistemas, pertenecientes a tres universidades (Universidad Politécnica de Madrid, Universidad Complutense de Madrid y Universidad Autónoma de Madrid) y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Trabajando desde un punto de vista multidisciplinar, se han realizado muestreos en distintos municipios de la Comunidad de Madrid y durante distintas estaciones del año. Esto ha permitido estudiar la influencia de la localización sobre la diversidad biológica presente en el aire, así como los efectos meteorológicos asociados a cada estación del año. Adicionalmente, se ha analizado la variación de la diversidad con la altitud, mediante muestreos a distintas alturas dentro de un entorno urbano y rural.

Para llevar a cabo estos objetivos se han adaptado los sistemas de muestreo existentes de aerobiología (Núñez *et al.* 2017a; <https://www.youtube.com/watch?v=fsqyiltfd4Y>) (Fig. 1), desarrollado nuevos equipos que permiten la recolección de muestras en movimiento acoplados a distintos vehículos (drones, coches, autobuses, trenes, avionetas, etc.) (Núñez *et*

*al.* 2017b), y elaborado nuevos protocolos para la identificación de patógenos en el aire (Sánchez-Parra *et al.* 2018).

### BIONANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS AVANZADOS BASADOS EN NANOESTRUCTURAS DE DICALCOGENUROS DE METALES DE TRANSICIÓN (TMDCS)

Los materiales híbridos orgánicos-inorgánicos se encuentran en la interfase natural entre dos mundos de la química, radicalmente diferentes, pero ambos con importantes contribuciones a la ciencia de materiales. Una de las áreas de más alto crecimiento en la actualidad es la de los bionanocompuestos poliméricos (Bio-PNCs), ya que se prevé que jueguen un papel fundamental en el desarrollo de los materiales multifuncionales avanzados en el futuro. Si bien los polímeros naturales están generalmente más asociados al término de biodegradabilidad, la gama de polímeros sintéticos que cumplen este concepto se ha incrementado notablemente en los últimos años, debido a la mejora de sus propiedades. En esta tendencia, el desarrollo de nuevos Bio-PNCs híbridos (orgánicos-inorgánicos) se está consolidando debido a la necesidad de un desarrollo sostenible de materiales estratégicos que causen un mínimo impacto sobre la salud humana y el

medio ambiente. Especialmente relevante es el caso del nanorrefuerzo inorgánico que es también ecológico y biocompatible como son las nanoestructuras inorgánicas de dicalcogenuros de metales de transición (TMDCs) basadas en disulfuro de wolframio ( $WS_2$ ) y de molibdeno ( $MoS_2$ ).

Al igual que el grafito, estos materiales están formados por capas atómicas individuales que se pueden exfoliar fácilmente, lo que permite obtener láminas de grosor variable formadas por un número concreto de capas atómicas. En particular, los TMDCs están compuestos por el apilamiento de capas X-M-X siendo X selenio, azufre o telurio y M un metal de transición. Mientras que los átomos dentro de la capa están enlazados fuertemente, las capas se atraen entre sí por las fuerzas de Van der Waals haciendo que estos materiales presenten una estructura laminada fácil de exfoliar. Bajo determinadas condiciones de síntesis, estos materiales son capaces de reordenarse en estructuras cerradas en forma de fullereno, de nanotubo o de grafeno, es decir, estructuras cero-dimensionales (0D) (nanopartículas), mono-dimensionales (1D) (nanotubos) o bi-dimensionales (2D) (nanohojas de una o pocas capas similares al grafeno). Particularmente interesante es el caso de IF- $WS_2$  (0D) e INT- $WS_2$  (1D) que han mostrado una alta tendencia a dispersarse eficazmente en distintos materiales poliméricos, sin añadir



Figura 1. Captador de partículas diseñado por el grupo BIO-MAT, acoplado a un dron.

surfactantes o modificantes, obteniéndose los resultados más espectaculares en cuanto a la mejora de las propiedades físicas en general, p.e. poli (L-ácido láctico), PLLA (Naffakh *et al.* 2014), nylon 11 (Naffakh *et al.* 2015), poli (3-hidroxibutirato-co-3-hidroxivalerato) y PHBV (Silverman *et al.* 2018). Por otra parte, estudios iniciales de biocompatibilidad de PLLA/hidroxiapatita(HA)/1D-WS<sub>2</sub>, en contacto con células de fibroblastos murinos (L929), demostraron que los nuevos nanocompuestos son materiales biocompatibles y no-citotóxicos (Naffakh y Díez-Pascual, 2015). Dichos materiales mantuvieron, además, buenas propiedades mecánicas bajo condiciones biológicas (fluido corporal simulado, SBF, a 37 °C durante 3 semanas).

Igualmente importante resultó el desarrollo de nuevas mezclas ternarias basadas en PLLA, polifluoruro de vinilideno (PVDF) y 1D-WS<sub>2</sub>. La mezcla del PVDF con el PLLA es muy prometedora en el campo biomédico debido a la combinación de las características de biodegradación y de las propiedades piezoeléctricas, pudiendo presentar aplicaciones tales como membrana para la filtración de proteínas o como andamio para cultivo celular. Se comprobó que los nanotubos modificaban la morfología de las mezclas, reduciendo el tamaño de los dominios de la fase dispersa, mejorando las propiedades térmicas (temperatura de cristalización, cristalinidad, etc.) y mecánicas debido a que aumenta el área de contacto entre las fases. De especial relevancia fue el estudio de la influencia del proceso de

biodegradación de dichos sistemas ternarios (PVDF<sub>≤</sub>40%) inducido por la presencia de *Pseudomonas aeruginosa* y *Aspergillus niger*, en medio sólido y en medio líquido (Fig. 2). Se pudo establecer la dependencia del proceso de cristalización y de la morfología desarrollada en los nanocompuestos, en función del tiempo de incubación y de la composición.

Merece una mención especial el desarrollo de nuevos materiales multifuncionales basados en nanoestructuras 2D. Es bien conocido que los nanomateriales 2D pueden emplearse como refuerzo en las matrices poliméricas, que siempre causan un efecto importante sobre las propiedades finales con un contenido sumamente bajo de la nanocarga. En particular, es el caso del nanorrefuerzo 2D-MoS<sub>2</sub> (WS<sub>2</sub>), debido a su alta relación de aspecto, alta superficie específica, extraordinaria estabilidad térmica, así como su característica de semiconductor; este tipo de nanomaterial puede ser utilizado como una alternativa excelente al grafeno en usos que requieran un refuerzo eficaz de las propiedades mientras que también mantienen el aislamiento eléctrico y la alta constante dieléctrica del polímero. En comparación con el grafeno, estos materiales se distinguen por tener unas propiedades físicas y químicas excepcionales ligadas a su estructura molecular interna, que permiten concebir muy variadas aplicaciones. Su uso se está extendiendo especialmente en el desarrollo de nuevos materiales con elevadas propiedades mecánicas y de barrera. En particular se plantea la alternativa de

emplear las nanoestructuras 2D-TMDCs en la elaboración de nuevos bionanocompuestos y analizar su potencial para generar propiedades estructurales y funcionales mejoradas. Asimismo, se estudiará la capacidad de los microorganismos en la descomposición de estos materiales, por ejemplo, en agua y dióxido de carbono, los cuales vuelven así a la naturaleza contribuyendo a un desarrollo sostenible. Esta cualidad convierte a los bionanocompuestos a desarrollar, dotados de las propiedades estructurales y funcionales adecuadas, en unos posibles sustitutos a sistemas multicapa convencionales, de difícil reciclabilidad o compostabilidad.

## BIBLIOGRAFÍA

**Airborne sampling protocol for DNA studies using a Hirst-type spore trap**, video tutorial: <https://www.youtube.com/watch?v=fsqjiltfd4Y>

**Naffakh M, Marco C y Ellis G.** (2014). Development of novel melt-processable biopolymer nanocomposites based on poly(L-lactic acid) and WS<sub>2</sub> inorganic nanotubes. *Cryst Eng Comm* 16: 5062-5072.

**Naffakh M, Shuttleworth PS y Ellis G.** (2015). Bio-based polymer nanocomposites based on nylon 11 and WS<sub>2</sub> inorganic nanotubes. *RSC Adv* 5:17879-17887.

**Naffakh M y Díez-Pascual AM.** (2015). WS<sub>2</sub> inorganic nanotubes reinforced poly(L-lactic acid)/hydroxyapatite hybrid composite biomaterials. *RSC Adv* 5:65514-65525.

**Núñez A, Amo de Paz G, Rastrojo A, García AM, Alcamí A, Gutiérrez-Bustillo AM y Moreno DA.** (2016a). Monitoring of the airborne biological particles in outdoor atmosphere. Part 1: Importance, variability and ratios. *Int Microbiol* 19:1-13

**Núñez A, Amo de Paz G, Rastrojo A, García AM, Alcamí A, Gutiérrez-Bustillo AM y Moreno DA.** (2016b). Monitoring of airborne biological particles in outdoor atmosphere. Part 2: Metagenomics applied to urban environments. *Int Microbiol* 19:69-80

**Núñez A, Amo de Paz G, Ferencova Z, Rastrojo A, Guantes A, García AM, Alcamí A, Gutiérrez-Bustillo AM y Moreno DA.** (2017a). Validation of the Hirst-type spore trap for simultaneous monitoring of prokaryotic and eukaryotic biodiversity in urban air samples by NGS. *Appl Environ Microbiol* 83(13): e00472-17

**Núñez A, García AM y Moreno DA.** (2017b). Dispositivo captador de partículas presentes en el aire de carácter portátil y autónomo. WO Patent No 2017103316 A1

**Programa AIRBIOTA-CM**, página web: <http://www.airbiota.com>

**Sánchez-Parra B, Núñez A y Moreno DA.** (2018). Método de detección por PCR de la bacteria *Legionella pneumophila* en muestras ambientales y/o clínicas. ES Patent No P201830830.

**Silverman T, Naffakh M, Marco C y Ellis G.** (2018). Effect of WS<sub>2</sub> inorganic nanotubes on isothermal crystallization behavior and kinetics of poly(3-Hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate). *Polymers* 10, 166.

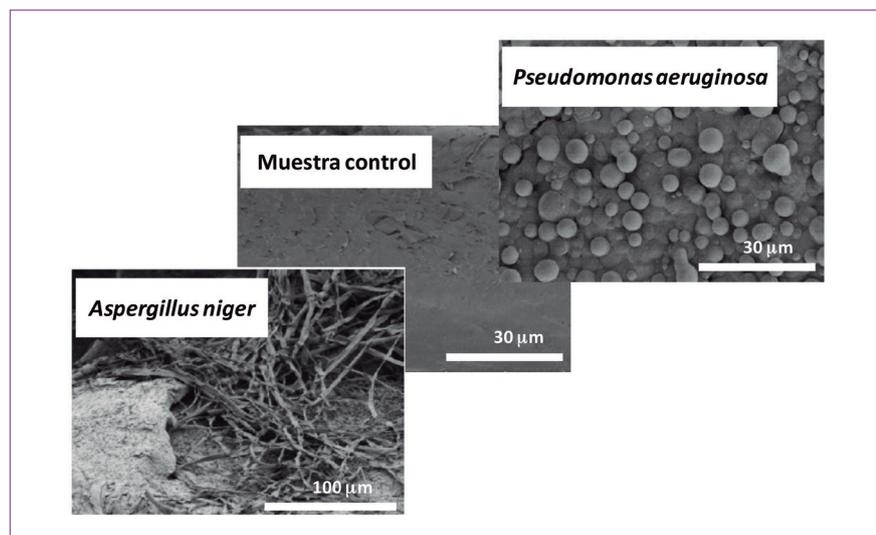


Figura 2. Micrografías SEM de la superficie de las películas no fracturadas (PLLA/PVDF/1D-WS<sub>2</sub>) observadas después de los ensayos de biodegradación en medio líquido con bacterias y hongos durante 3 meses.