

## Ecología Microbiana y Biogeoquímica: La vida secreta del sedimento

Sokratis Pappaspyrou, Juan Luis Jiménez-Arias, Alfonso Corzo



Área de Microbiología. Departamento de Biomedicina, Biotecnología y Salud Pública, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz. Área de Ecología, Departamento de Biología. Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Universidad de Cádiz. Cádiz



Figura 1.

Miembros del grupo durante la edición de La Noche Europea de los Investigadores del 2015. De izquierda a derecha: Eddy Gómez Ramírez, Sara Soria Píriz, Sokratis Pappaspyrou, Silvia Rayo Mato, Alfonso Corzo Rodríguez, Juan Luis Jiménez Arias y Julio Bohórquez Ferrando.

Los sedimentos de los ecosistemas acuáticos costeros, tales como estuarios, lagunas marales y marismas, están habitados por una comunidad microbiana muy compleja y diversa, tanto metabólicamente como taxonómicamente que, sin embargo, pasa totalmente desapercibida. Los componentes principales de esta comunidad desde un punto de vista funcional son: el componente fotoautótrofo, que de forma parecida a las plantas terrestres, produce materia orgánica usando energía solar,  $\text{CO}_2$  y otros nutrientes inorgánicos; y el componente quimioheterótrofo, cuyo metabolismo es parecido al de los animales, es decir, consumen materia orgánica para obtener su energía y crecer.

La comunidad de microorganismos fotoautótrofos del sedimento (conocidos colectiva-

mente como microfitobentos) está constituida por microalgas (diatomeas) y procariontas autótrofos (principalmente cianobacterias), mientras que los microorganismos heterótrofos pertenecen a diversos grupos de procariontas (Bacteria y Archaea) y de protozoos. Todos estos microorganismos constituyen junto con los detritus orgánicos acumulados en los sedimentos los recursos alimentarios para una comunidad taxonómicamente muy diversa de animales pequeños (50-500  $\mu\text{m}$ ) llamados colectivamente meiofauna. Por último, los animales más grandes (>500  $\mu\text{m}$ ), la macrofauna, se alimentan de la comunidad microbiana, la meiofauna y el detritus orgánico con distintos niveles de selección.

El fuerte acoplamiento funcional que existe entre las distintas comunidades bentónicas, y

que es especialmente intenso en los primeros milímetros del sedimento, permite que una fracción importante de la materia orgánica que sedimenta o es producida in situ sea remineralizada rápidamente. Los nutrientes inorgánicos procedentes de la materia orgánica remineralizada, son devueltos a la columna de agua en forma disuelta para ser utilizados por otros productores primarios característicos de este tipo de ecosistemas someros como son el fitoplancton, las macroalgas y las fanerógamas marinas, que junto con el microfitobentos y el detritus forman la base de las cadenas tróficas en sistemas someros. Otra parte de la materia orgánica, sin embargo, queda enterrada miles de años dentro del sedimento dando estabilidad al sistema climático y llegando a controlar la concentración en la atmósfera de gases como el  $\text{O}_2$  y

el  $\text{CO}_2$ . Por todo ello, los sedimentos juegan un papel clave en la productividad primaria y secundaria de sistemas acuáticos costeros, y en el reciclado de nutrientes y el clima a nivel global.

Los sistemas costeros se caracterizan por presentar una gran variabilidad espacial y temporal a distintas escalas y un fuerte forzamiento físico (estacionalidad anual, ciclos de día y noche, mareas, oleaje). A su vez, la interfase agua-sedimento es un sistema biogeoquímico muy complejo dado que se caracteriza por gradientes fisicoquímicos intensos a escalas muy pequeñas. Muchas variables ambientales relevantes para la comunidad microbiana, tales como la irradiancia, el pH y la concentración de  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ , nutrientes, entre otros, cambian considerablemente con la profundidad en el sedimento, en escalas que van de micras a unos pocos milímetros. Por tanto, es importante conocer las interacciones entre estas variables físico-químicas y los organismos bentónicos en diversas escalas espacio-temporales para poder evaluar correctamente el funcionamiento global del ecosistema costero.

El trabajo en el laboratorio de Ecología Microbiana y Biogeoquímica de la Universidad de Cádiz (<http://www2.uca.es/grup-invest/microbentos/>) se centra en el estudio de los procesos biogeoquímicos que ocurren en el sedimento, especialmente en medios acuáticos y en la interfase agua-sedimento, intentando entender el papel de los organismos, y en particular de los microorganismos, en el funcionamiento del ecosistema. Nuestro interés y pasión por la ecología y la biogeoquímica a «micro»-escala empezó en los años 2000 cuando el Profesor Alfonso Corzo, el responsable del laboratorio, inició esta línea de investigación en la Universidad de Cádiz. El laboratorio durante los últimos años ha crecido notablemente y actualmente está constituido además del IP, de un profesor sustituto interino, 2 becarios postdoctorales, 7 doctorandos y un número variable de estudiantes de master y de grado (Fig. 1). Para la realización de nuestros estudios utilizamos diferentes enfoques experimentales, combinando estudios de campo y experimentos, tanto *in situ* como de laboratorio, y empleando diferentes herramientas biogeoquímicas modernas. No obstante, la herramienta fundamental de nuestro grupo son los microelec-

trolos, —los cuales nos permiten determinar gradientes químicos de diversos dadores y aceptores de electrones a microescala en los sedimentos.

La línea prioritaria de investigación durante varios años ha sido el estudio del microfitobentos en sedimentos intermareales. El microfitobentos contribuye de manera importante al total de la producción primaria en sistemas someros (hasta un 50%) y, por lo tanto, representa una fuente importante de oxígeno y carbono para los organismos heterótrofos en este tipo de sistemas. Además, una función ecológica importante y poco conocida del microfitobentos, y que también estudiamos, ocurre a través de la producción de sustancias extracelulares poliméricas (EPS, de las siglas en inglés Extracellular Polymeric Substances). Aparte de ser una fuente adicional de carbono para los heterótrofos, los EPS (predominantemente polisacáridos) contribuyen al mantenimiento de la estructura física del sedimento impidiendo de ese modo

su erosión y resuspensión. Gracias al trabajo realizado a lo largo de estos años en la Bahía de Cádiz, nuestro grupo ha constatado la gran importancia ecológica del microfitobentos en este tipo de ambientes someros, con especial énfasis en la dinámica de nutrientes.

La segunda línea de investigación más importante ha sido el estudio del efecto de las proliferaciones masivas (blooms) de macroalgas verdes (del género *Ulva*, conocida como lechuga de mar) sobre la biogeoquímica del sedimento (Fig. 2). Los blooms de macroalgas son la manifestación más común en sistemas someros de la eutrofización, provocada por el aumento de nutrientes antrópicos (agricultura, residuos urbanos, etc.). Las acumulaciones de macroalgas tienen efectos importantes sobre el ecosistema debido a que atenúan la luz, lo cual afecta negativamente a la producción primaria del microfitobentos, y alteran la composición del resto de la comunidad. Además, las macroalgas reducen la disponibilidad de oxígeno de forma particular-



**Figura 2.**

**A.** Proliferación masiva de macroalgas verdes sobre la superficie una zona intermareal dentro del saco interno de la Bahía de Cádiz. **B.** Testigos de sedimento recolectados en zonas con macroalgas (izquierda) y sin macroalgas (derecha). A la izquierda casi no se aprecia la zona oxidada (color marrón) debajo de la capa de macroalgas, mientras que a la derecha esta zona se extiende varios centímetros. La reducción de hierro con el sulfhídrico producido por la sulfato-reducción es la causa del color negro de la parte baja. **C.** Experimento de laboratorio con biopelículas procedentes de una EDAR. Puede observarse el uso conjunto de microelectrodos de oxígeno, sulfhídrico y pH para este tipo de estudios a microescala. **D.** Imagen de la punta de un microelectrodo de oxígeno cerca de la superficie del sedimento durante la realización de otro experimento. El diámetro de la punta puede variar entre 10-500  $\mu\text{m}$  dependiendo del tipo de sedimento y la resolución del perfil vertical deseada.

mente grave durante la descomposición de los blooms, cuando se producen condiciones hipóxicas o anóxicas incluso en la columna de agua. Tales condiciones favorecen la actividad de las bacterias anaerobias que respiran sulfato en lugar de oxígeno. Dichas bacterias producen sulfuro de hidrógeno como subproducto, el cual es altamente tóxico para la flora y la fauna bentónica, provocando en muchos casos gran mortandad. Hasta el momento, nuestro grupo ha contribuido a la descripción de los efectos de las distintas etapas del desarrollo del bloom (proliferación, senescencia, degradación) sobre los ciclos del carbono y el nitrógeno en el sedimento, la producción primaria microfítobentónica, y los cambios que se producen en la estructura de la comunidad bacteriana y de la meiofauna.

Otro ámbito donde hemos desarrollado una intensa actividad ha sido la microbiología de biopelículas en estaciones de depuración de aguas residuales (EDAR). La producción de sulfuro de hidrógeno por las bacterias sulfatoredutoras constituye uno de los principales problemas en este tipo de instalaciones. Aparte de su olor muy desagradable a huevos podridos, el sulfuro de hidrógeno es un serio peligro para los trabajadores debido a su toxicidad, provocando pérdidas económicas importantes debidas a la corrosión metálica y al deterioro de las estructuras de hormigón. Uno de los métodos propuestos para controlar la producción de esta sustancia es la adición de nitrato durante el tratamiento del agua residual. Nuestro grupo ha demostrado la presencia en las biopelículas de un grupo poco conocido de bacterias, las denominadas bacterias oxidadoras de sulfuro y reductoras de nitrato (NR-SOB). Las bacterias NR-SOB son capaces de oxidar el sulfuro de hidrógeno y el azufre elemental a sulfato, utilizando nitrato. Las aplicaciones potenciales de este grupo de bacterias es muy alto ya que el problema del sulfuro de hidrógeno es común también

en otros tipos de industrias (petrolífera, papelería, etc.).

Durante los últimos años, y gracias a varios proyectos de cooperación internacional y otros nacionales y regionales, hemos expandido nuestro ámbito de estudio a sistemas más «exóticos». En Costa Rica estamos estudiando el acoplamiento entre la producción primaria en la columna de agua y su mineralización en el sedimento en uno de los estuarios más productivos del mundo, el Golfo de Nicoya. En Honduras, estamos involucrados en el estudio de la ecología microbiana y biogeoquímica en la laguna de Los Micos. Más cerca de nosotros, en la provincia de Huelva, estamos trabajando en sistemas acuáticos impactados por drenaje ácido de minas (con un pH que puede ser tan bajo como 1.5 y altas concentraciones de metales). Ese tipo de ambientes son una excelente oportunidad de estudiar microorganismos extremófilos que tienen una gran variedad de metabolismos poco estudiados y que pueden tener un potencial biotecnológico grande.

Cabe destacar que el trabajo que realizamos, bastante interdisciplinar, se debe en gran parte a las colaboraciones que mantenemos tanto dentro de la propia universidad como con investigadores de otras instituciones a nivel nacional e internacional. En este sentido, mantenemos colaboraciones con expertos en el uso de microelectrodos (Prof. N.P. Revsbech, Aarhus University), la ecología del microfítobentos (Prof. G.C. Underwood, Essex University), el ciclo del hierro en el sedimento (Prof. S. Poulton, Leeds University), los estuarios tropicales (Prof. A. Morales, CIMAR), técnicas moleculares para el análisis de comunidades microbianas (Prof. T. McGenity, Essex University, RU; Dr. J.M. González, IRNAS-CSIC; Dr. José Antonio Morillo, Universidad de Granada) y la geoquímica de sistemas impactados por drenaje ácido de minas (Dr. C.

Ayora y Dra. E. Torres, IDAEA-CSIC; Prof. J.M. Nieto, Universidad de Huelva).

## PUBLICACIONES RECIENTES SELECCIONADAS

### Microfítobentos y macroalgas

**Bohórquez J, Pappaspyrou S, Yúfera M, van Bergeijk SA, García-Robledo E, Jimenez-Arias JL, Bright M y Corzo A.** (2013). Effects of green macroalgal blooms on the meiofauna community structure in the Bay of Cádiz. *Mar Pollut Bull* 70:10-17.

**Corzo A, van Bergeijk SA y García-Robledo E.** (2009). Effects of green macroalgal blooms on intertidal sediments: Net metabolism and carbon and nitrogen contents. *Mar Ecol Prog Ser* 380: 81-93.

### Biofilms en depuradoras

**Villahermosa D, Corzo A, García-Robledo E, González JM y Pappaspyrou S.** (2016). Kinetics of indigenous nitrate reducing sulfide oxidizing activity in microaerophilic wastewater biofilms. *PLoS One*. doi:10.1371/journal.pone.0149096.

**García-de-Lomas J, Corzo A, Portillo C, González JM, Andrades JA, Sáiz-Jiménez C y García-Robledo E.** (2007). Nitrate stimulation of indigenous nitrate-reducing, sulphide-oxidising bacterial community in wastewater anaerobic biofilms. *Water Res* 41: 3121-3131.

### Lagos ácidos

**Torres E, Ayora C, Jiménez-Arias JL, García-Robledo E, Pappaspyrou S y Corzo A.** (2014). Benthic metal fluxes and sediment diagenesis in a water reservoir affected by acid mine drainage: a laboratory experiment and reactive transport modeling. *Geochim Cosmochim Acta* 139: 344-361.

**Torres E, Ayora C, Canovas CR, García-Robledo E, Galvan L y Sarmiento AM.** (2013). Metal cycling during sediment early diagenesis in a water reservoir affected by acid mine drainage. *Sci Tot Envir* 461: 416-429.

### Otros

**Graham EB, Knelman JE, Schindlbacher A, et al.** (2016). Microbes as engines of ecosystem function: when does community structure enhance predictions of ecosystem processes? *Front Microb* 7:214.

**Portillo MC, Villahermosa D, Corzo A y Gonzalez JM.** (2011). Microbial community fingerprinting by differential display-denaturing gradient gel electrophoresis. *Appl Environ Microb* 77: 351-354.