

Reciclaje y biorrecuperación de residuos

Papá: Quiero ser bioingeniero y contribuir a la supervivencia del planeta. ¿Por dónde empiezo?



Willy Verstraete¹ y Jan B.A. Arends²

¹Centro de Ecología y Tecnología Microbiana, y² Centro de Tecnología de Procesos Avanzados para la Recuperación de Recursos Urbanos (CAPTURE), Universidad de Gante, Bélgica.

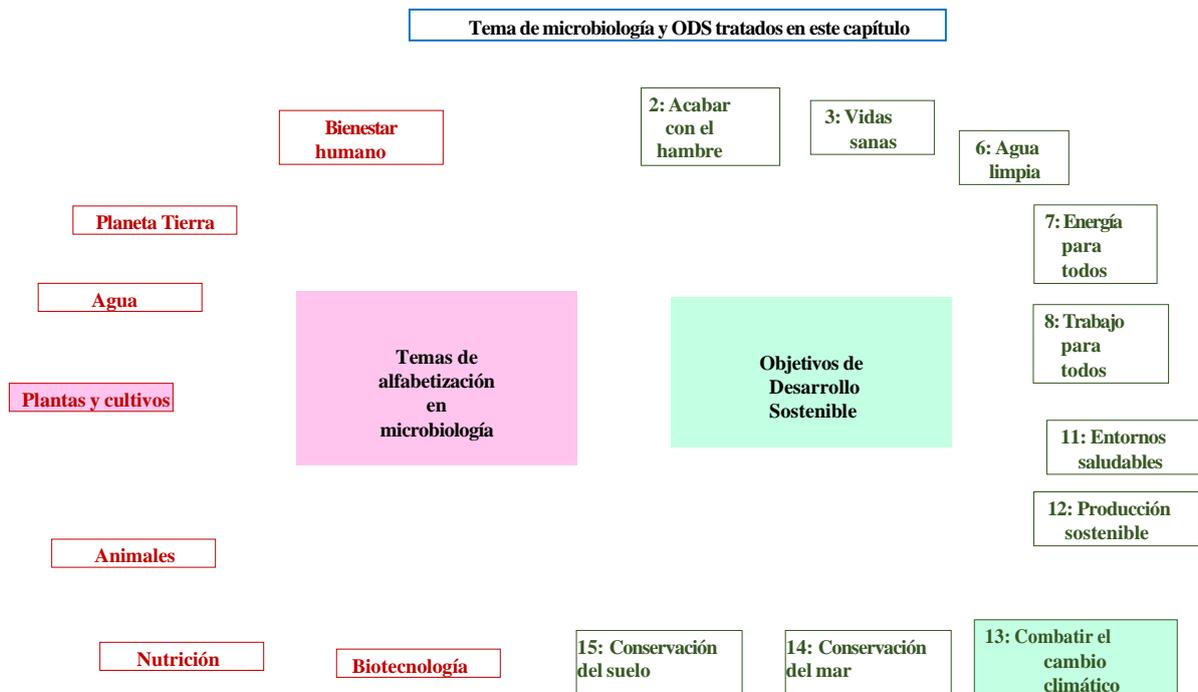
Reciclaje y biorrecuperación de residuos

Sinopsis

Los microorganismos, al igual que las personas, intentan ganarse la vida utilizando las sustancias que les rodean como alimento y convirtiéndolas en materiales celulares. De esta forma sobreviven y, posiblemente, incluso crecen y crean así la siguiente generación. Por ensayo y error, encuentran nuevas formas de utilizar diferentes sustratos para construir nuevos materiales celulares o fuentes de energía. Este proceso, combinado con la supervivencia del más apto, garantiza que los microorganismos evolucionen gradualmente y se especialicen en determinadas tareas. En nuestra sociedad industrial, producimos productos secundarios y flujos de residuos que necesitan tratamiento para ser inocuos. Si consideramos cuidadosamente lo que ocurre en la naturaleza, podemos enriquecer y recuperar algunos organismos, o equipos de organismos, que son útiles para degradar nuestros "residuos" y, en algunos casos, incluso para recuperar algunas de las materias primas utilizadas en los procesos de producción. Sin embargo, no malinterpretemos ésta feliz situación: los microorganismos no hacen su trabajo para complacernos a los seres humanos, sólo aprovechan una situación para su propio beneficio, para crecer. La característica importante de un bioingeniero es que intenta lograr un equilibrio en el que ambas partes -nosotros y los microorganismos- se beneficien del proceso global de tratamiento de residuos y biorrecuperación. En otros TF se habla de la implicación de los microorganismos en el tratamiento del agua y la producción de energía (biogás). En este TF, nos centramos en algunos aspectos diferentes de la bioingeniería en los que los microorganismos pueden utilizarse en beneficio de la sostenibilidad del planeta.

La microbiología y el contexto social

La microbiología: biodegradación microbiana de residuos, bioestimulación, bioaumentación, recuperación de recursos, electromicrobiología, bioingeniería. *Cuestiones de sostenibilidad:* bioenergía, economía y empleo, contaminación ambiental.



Reciclado y biorrecuperación de materiales de desecho: la microbiología

1. **Limpieza de gases residuales.** Cuando la materia orgánica se entierra en el suelo o se arroja al agua, los microorganismos aprovechan esta materia para crecer. Al hacerlo, consumen todo el oxígeno de la región de la materia orgánica en descomposición. Cuando todo el oxígeno se agota, otro grupo de microorganismos -los anaerobios, que crecen sin oxígeno- toman el relevo y producen gases como metano (CH_4 , gas de efecto invernadero e inflamable), hidrógeno (H_2 , inflamable), sulfuro de hidrógeno (H_2S , tóxico, huele a huevos podridos, también llamado gas agrio), amoníaco (NH_3 , tóxico, huele mal) y compuestos orgánicos volátiles (COV, gases malolientes, a veces tóxicos). Estos gases pueden desplazarse a la superficie del suelo o del agua. Aquí entran en contacto con otros microorganismos que pueden transformar de nuevo estos compuestos y aún extraer un poco de energía de ellos combinándolos con oxígeno.

Reacciones RedOx durante la descomposición de la materia orgánica.

La materia orgánica está llena de electrones portadores de energía. Los microbios pueden extraer electrones de la materia orgánica en lo que llamamos una **reacción de oxidación** (la materia orgánica es el *donante de electrones*). Cuando los microbios han utilizado la energía, necesitan colocar los electrones en algún sitio. Esto suele hacerse colocándolos sobre el oxígeno (el oxígeno es el *aceptor de electrones* en este caso). Esto se denomina **reacción de reducción**.

Este proceso puede compararse al de obtener energía comiendo tu sándwich favorito e inhalando aire. Se oxida el carbono orgánico del bocadillo con el oxígeno del aire y se obtiene energía. El carbono se convierte en CO_2 y el oxígeno se transforma en vapor de agua.

Podemos utilizar los microorganismos que encontramos en la interfase del suelo y la superficie del agua para limpiar los gases residuales producidos por la actividad humana. Al proporcionar un entorno adecuado para estos microorganismos (turba, corteza u otras superficies en las que puedan crecer), se han desarrollado varias tecnologías, como los lechos percoladores o las torres de lavado, en las que los gases residuales entran por la parte inferior y el agua se pulveriza desde la parte superior sobre los microorganismos. La figura 1 muestra un sistema de este tipo. Estos diseños se basan en una inteligente combinación de física, química y microbiología.

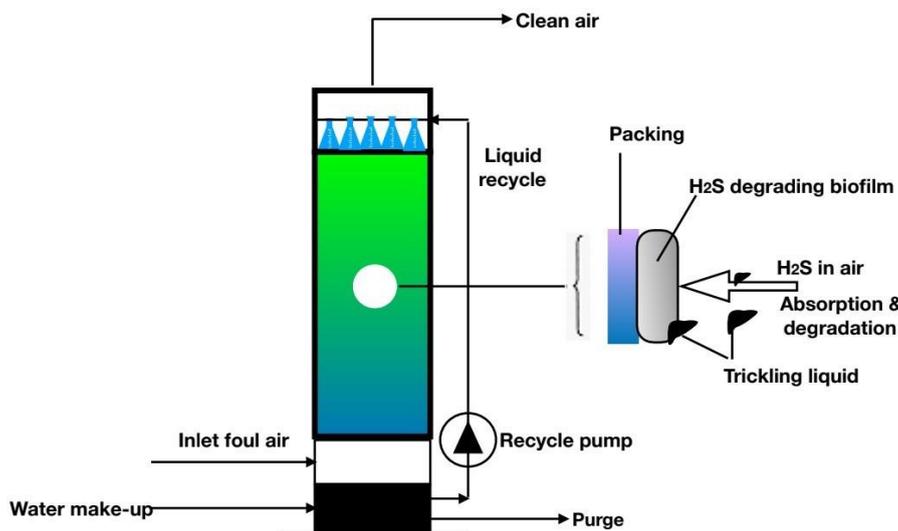


Fig 1: Esquema resumido de un biofiltro en el que los microorganismos crecen sobre un soporte y convierten el compuesto gaseoso, H_2S , en polvo de azufre.

Un marco educativo de microbiología centrada en la niñez

En la cría de animales, por ejemplo, la emisión de malos olores (sobre todo de amoníaco) puede frenarse instalando lechos biológicos de gran tamaño y biofregaderos. Estos últimos albergan bacterias nitrificantes, que convierten el amoníaco volátil en nitrato soluble en agua. El líquido que sale del fondo puede utilizarse de nuevo como abono mineral para los cultivos.

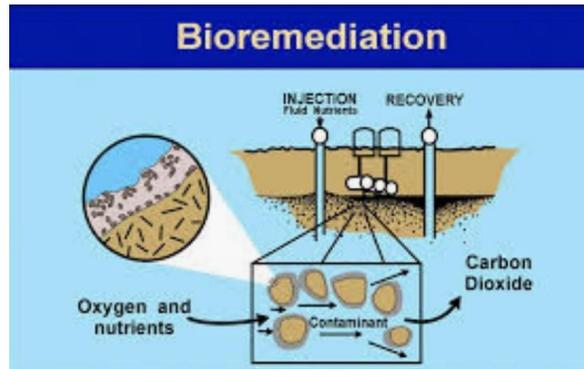
En la **industria petroquímica** a gran escala, el sulfuro de hidrógeno puede eliminarse de los gases de proceso. Mediante un diseño de reactor muy inteligente, la bacteria *Thiobacillus* que oxida el sulfuro se mantiene bajo un suministro limitado de oxígeno y el sulfuro se convierte en azufre en polvo. Este polvo de azufre puede reutilizarse como biopesticida.

También los gases con niveles tóxicos de compuestos orgánicos volátiles pueden convertirse en aire sano haciéndolos pasar por un biofiltro en el que se mantienen bacterias que degradan dichos compuestos orgánicos (por ejemplo, moléculas cloradas), suministrándoles una cantidad limitada de compuestos biodegradables. Habitualmente, un sustrato natural como corteza de árbol o virutas de madera sirve de matriz a través de la cual los gases pueden pasar fácilmente y en la que residen los microorganismos bio-limpiadores.

2. **Biorremediación de suelos.** Numerosos suelos superficiales, y en particular las capas subyacentes más profundas, han sido contaminados por el vertido de aceites (hidrocarburos) y productos químicos. Los contaminantes que permanecen en las capas superiores pueden eliminarse mediante la excavación del suelo, que a continuación recibe un tratamiento especial, como la incineración seguida de la limpieza de los gases residuales. Para los suelos más profundos (entre 10 y 50 m por debajo de la superficie), la excavación es demasiado cara e invasiva, por lo que se han desarrollado métodos alternativos.

En las últimas décadas se han desarrollado diversos procesos elegantes que permiten limpiar estos suelos más profundos con la ayuda de microorganismos. Estos procesos **de biorremediación** se basan principalmente en la adición al suelo de nutrientes suficientes (como nitrógeno y fósforo) y en la mejora de las condiciones de crecimiento (optimización del pH, suministro de agua, aceptores de electrones como nitrato o sulfato, y una fuente de alimento como el lactato), un proceso denominado **bioestimulación**. Cuando las condiciones son favorables para los microorganismos presentes de forma natural en el suelo, pueden degradar, crecer y, en el proceso, degradar los contaminantes que les rodean, restaurando así el sistema del suelo a una condición limpia y saludable.

En algunos casos, las condiciones del subsuelo pueden ser perfectas para la biorremediación, pero no hay microorganismos con las capacidades necesarias. Esto puede subsanarse obteniendo un microorganismo o un equipo de microorganismos de otro lugar, amplificando la población e inyectándolos en el subsuelo objetivo. Este proceso se denomina **bioaumentación**. El sistema del suelo y el subsuelo es estático (= no está mezclado). Esto significa que un bioingeniero tiene que diseñar cuidadosamente los sistemas de inyección y bombeo para que los organismos añadidos y los componentes que puedan necesitar se repartan por los grandes volúmenes de suelo y acuífero que hay que tratar. La industria de la limpieza de suelos mediante biorremediación y bioaumentación es bastante amplia e ingeniosa en todo el mundo. Aunque estas prácticas de biorremediación suelen requerir mucho tiempo para completarse (a veces incluso décadas), son eficaces y permiten que los sistemas de suelos y acuíferos vuelvan a sus condiciones prístinas.



3. **Compostaje (¿y los plásticos?)** En muchos países, la clasificación en casa es una práctica habitual. Se recogen las partes biodegradables (restos de cocina y comida) en el contenedor verde. En las ciudades, estos últimos van a parar a una planta de compostaje. El proceso industrial se basa en insuflar aire suavemente en la materia orgánica. Los microorganismos presentes en los materiales recogidos disponen así de un entorno con abundante alimento y también oxígeno para respirar y oxidar las moléculas orgánicas. Comienzan a crecer, multiplicarse y convertir la materia orgánica en biomasa microbiana y CO₂. Cuando los seres humanos hacemos ejercicio con mucha gente en una habitación pequeña, el calor corporal da lugar a un aumento de la temperatura en la habitación. Cuando millones de microorganismos están comiendo y metabolizando intensamente la materia orgánica ("haciendo ejercicio"), producen tanto calor en la instalación de compostaje que la temperatura sube a 50°C o incluso 75°C. Dado que los microorganismos no pueden funcionar bien a estas altas temperaturas, normalmente se practica una combinación de aireación y enfriamiento concomitante de la biomasa. Poco a poco, a lo largo de varias semanas, la mezcla inicial de residuos orgánicos se convierte en células microbianas y dióxido de carbono. En una fase final, los microbios se quedan sin alimento y mueren. Las altas temperaturas y la falta de alimento también garantizan que cualquier microorganismo nocivo también muera, proporcionando así un buen proceso de saneamiento. Los restos de todos los microbios son ricos en minerales y polímeros orgánicos grandes y estables que absorben y retienen el agua. Estos últimos suelen denominarse humus, y el humus más los residuos vegetales y minerales restantes se denomina compost. Este material es de gran valor para los cultivadores de plantas porque es una matriz que libera lentamente sus componentes (agua, minerales, orgánicos) al suelo circundante en general y a la planta en crecimiento en particular.



¿Y por qué los plásticos no son compostables? Los microbios son muy buenos construyendo moléculas complejas, utilizando enzimas, pero también deconstruyéndolas en las unidades que las componen, invirtiendo el proceso sintético, a veces utilizando las mismas enzimas, a veces diferentes. Los polímeros naturales, como las proteínas, la celulosa, la lignina, etc., están contruidos de tal manera que los microorganismos no pueden descomponerlos.

Un marco educativo de microbiología centrada en la niñez

Los organismos siempre pueden encontrar una forma de cortarlos en trozos más pequeños, que luego pueden canalizarse por rutas metabólicas. Sin embargo, los plásticos sintéticos fabricados por los químicos son polímeros muy largos y densos y están estructurados físicamente de tal forma que las enzimas no encuentran puntos donde empezar a romper las cadenas. Incluso empezar por el final de una cadena suele ser difícil.

La descomposición natural de los polímeros por los microorganismos puede compararse a trepar por un árbol, muchas ramas laterales y patrones ásperos donde agarrarse. La descomposición de los polímeros plásticos es más parecida a trepar por un poste de bomberos, muy liso y sin lugar donde agarrarse.

De hecho, muchos de los productos químicos y materiales que utilizamos hoy en día se diseñaron hace mucho tiempo, cuando la filosofía era crear productos duraderos (estables). Sólo hace relativamente poco que nuestra filosofía ha cambiado para crear productos fácilmente degradables que faciliten su reciclaje y eviten su acumulación como residuos en el medio ambiente. En la actualidad, a la vista de las ingentes cantidades de residuos plásticos en nuestras carreteras, vertederos y masas de agua, se está haciendo un gran esfuerzo para aprender a diseñar moléculas poliméricas que puedan combinar las buenas propiedades funcionales de los plásticos, por un lado, y ser biodegradables al final de su uso, por otro.

Pero ¿qué hacer con todo el plástico existente (y en aumento) en el medio ambiente? En la actualidad, se está haciendo un gran esfuerzo por descubrir o cultivar microorganismos que hayan desarrollado el rasgo de ser capaces de producir enzimas específicas que puedan degradar los residuos de plástico más comunes. Esto, sin embargo, está resultando difícil, aunque se están haciendo progresos. Los retos son enormes, tanto por parte de las industrias productoras de plástico como de la biotecnología medioambiental. Es esencial que las generaciones actuales y futuras encuentren formas biológicas de degradar los plásticos, sin duda en instalaciones industriales como los biofiltros del apartado 1, pero también en el medio natural, a través de los enfoques de biorremediación/bioaumentación que se analizan en el apartado 2.

4. ***Los microorganismos pueden producir y utilizar electricidad.*** En el apartado 1 ya se comentó que todos los seres vivos viven moviendo electrones (reacciones RedOx). Los seres humanos, los animales y la mayoría de los organismos utilizan el oxígeno como aceptor de electrones. Ahora resulta que cierto grupo de microorganismos también puede vivir sin oxígeno. Son los llamados microorganismos anaerobios. Este grupo puede utilizar componentes solubles en agua, como el nitrato o el sulfato, como aceptor de electrones. Dentro del grupo de microorganismos anaerobios también hay ciertos microbios que pueden utilizar metales sólidos como aceptor de electrones. A la inversa, algunos microorganismos también parecen ser capaces de crecer con CO₂ y electrones procedentes de metales o superficies conductoras. Se trata de propiedades muy singulares.

Los bioingenieros han utilizado estos microbios para convertir la materia orgánica residual en una pequeña cantidad de electricidad. Esto puede hacerse instalando un material conductor llamado electrodo (por ejemplo, un trozo de carbón vegetal) en un medio anaeróbico, por ejemplo, el sedimento del fondo de un estanque. Los microbios pueden oxidar la materia orgánica presente y entregar los electrones en el electrodo (el ánodo). Cuando el electrodo se conecta mediante un cable a otro electrodo (cátodo) en la superficie del estanque donde hay oxígeno, los electrones pueden fluir desde la materia orgánica a través de los microbios hasta el electrodo (ánodo) mediante un cable a través de un dispositivo que utiliza electricidad (por ejemplo, una lámpara o un motor) hasta el otro electrodo (cátodo) y finalmente hasta el oxígeno. De este modo, los microorganismos pueden alimentar una pequeña lámpara. El concepto de electricidad producida por microbios se estudia actualmente para alimentar sensores y limpiar tipos específicos de contaminantes en aguas residuales y sistemas de sedimentación.

Un marco educativo de microbiología centrada en la niñez

Relevancia para los Objetivos de Desarrollo Sostenible y los Grandes Retos

Para mantener un planeta sano, los procesos descritos anteriormente son muy necesarios y deben seguir desarrollándose. Los retos son dos: 1) los procesos biotecnológicos deben ser más precisos. El ingeniero debe ser capaz de manejar los microorganismos para que actúen más rápidamente y de forma más dirigida hacia un objetivo concreto, por ejemplo, un contaminante bien conocido. La forma de conseguirlo puede ser seleccionando determinados microorganismos de la naturaleza, o combinando inteligentemente especies en equipos que sean altamente complementarios y eficaces. También puede basarse en la bioingeniería de especies microbianas con rasgos que no se encuentran en la naturaleza. 2) La sociedad tendrá que desarrollar más confianza en los microorganismos, también en las especies de bioingeniería y en los equipos de dichas especies, por ejemplo, para degradar un polímero plástico que ya no se utiliza. El público en general ha aprendido a aceptar la dualidad de una gran variedad de tecnologías (pensemos en el motor de combustión) y también debería apreciar que la bioingeniería puede proporcionar bioprocesos seguros y eficaces, a pesar de que los microorganismos, al igual que toda la biología, evolucionan constantemente y, por tanto, tienen un cierto nivel de imprevisibilidad.

En las secciones anteriores, se dan varios ejemplos en los que los microorganismos son muy útiles para eliminar materiales de desecho. Éste es sólo el primer paso a tener en cuenta. El siguiente paso es que, al convertir los materiales de desecho, se pueden crear productos útiles: pensemos en abonos orgánicos y minerales, compost, pequeñas moléculas (bloques de construcción química o bioplaguicidas), energía, etc. También es importante señalar que, por término medio, un material recuperado, incluso de la misma calidad que las materias primas nuevas, sólo se valorará en una fracción de su valor original, es necesario educar al público para que los materiales recuperados tengan el mismo valor económico que las materias primas nuevas. En general, la aplicación de la biocatálisis en condiciones controladas y diseñadas ofrece una gran cantidad de oportunidades y posibilidades para abordar la sostenibilidad medioambiental en las próximas décadas.

- **Objetivo 7. Garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos** (*garantizar el acceso a una energía limpia, renovable y sostenible, y aumentar la eficiencia en el uso de la energía*). El reciclaje puede liberar energía de los residuos que puede utilizarse como alternativa a los combustibles fósiles

- **Objetivo 8. Promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos** (*promover el crecimiento económico, la productividad y la innovación, la empresa y la creación de empleo*). Un compromiso pleno con una economía circular y cero residuos creará un empleo significativo

- **Objetivo 12. Garantizar modelos de consumo y producción sostenibles** (*lograr prácticas de producción y uso/consumo sostenibles, reducir la producción de residuos/la emisión de contaminantes al medio ambiente, alcanzar ciclos de vida de residuo cero, informar a la población sobre prácticas de desarrollo sostenible*). La reducción de la producción de residuos y el reciclaje de los existentes son esenciales para la sostenibilidad.

Posibles implicaciones para las decisiones

1. Individual

- a. Cooperar en la separación en origen de los residuos
- b. Apoyar enfoques biotecnológicos para limpiar, reciclar y mejorar
- c. No temas a los microorganismos
- d. Estimule el crecimiento microbiano en su jardín

2. Políticas comunitarias

Un marco educativo de microbiología centrada en la niñez

- a. Invertir en diversas biotecnologías que permitan limpiar y recuperar recursos, por ejemplo, el compostaje comunitario.
- b. Cuidar la salud microbiana local no utilizando pesticidas y poniendo en marcha sistemas adecuados de tratamiento de residuos.

3. Políticas nacionales

- a. Establecer normas y reglamentos que favorezcan el biorreciclaje.
- b. Apoyar la actualización al valor de plena economía y considerar los productos por sus especificaciones, no por su origen.
- c. Concienciar sobre el uso de la biotecnología y la bioingeniería para el bien público.

Participación de los alumnos

1. **Debate en clase sobre los problemas asociados a la biotecnología limpia** y el factor "asco" común relacionado con los materiales recuperados.
2. **Sensibilización de los alumnos**
La mayoría de los microbios son positivos y generan procesos y conversiones necesarios para nuestro bienestar. ¿Puede enumerar un conjunto de estos procesos positivos?
3. **Ejercicios**
 - Busca en el supermercado plásticos que afirmen ser biodegradables. ¿Cómo comprobarías si es así?
 - Busque en su región un emplazamiento en el que el suelo estuviera muy contaminado en el pasado (lo que suele denominarse terreno baldío) y que haya sido limpiado y reurbanizado para viviendas u otros fines.

Base empírica, lecturas complementarias y material didáctico

- De Vrieze, J., DeMulder, T., Matassa, S., Zhou, J. Z., Angement, L. T., Boon, N. y Verstraete, W. 2020. Estocasticidad en microbiología: gestionar la imprevisibilidad para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible. *Microb. Biotechnol.* 13: 829-843.
- Maes, A., Van Raemdonck, H., Smith, K., Ossieur, W., Lebbe, L. y Verstraete, W. 2006. Transport and activity of *Desulfotobacterium dichloroeliminans* strain DCA1 during bioaugmentation of 1,2DCA-contaminated groundwater. *Environ. Sci. Technology* 40: 5544- 5552.
- Megharai, M. y Naidu, R. 2017. Biorremediación de suelos y terrenos baldíos. *Microb. Biotechnol* 10:1244-1249.
- Van der Heyden, C., Demeyer, P y Volcke, E. 2015 . Mitigación de las emisiones de las instalaciones de alojamiento de cerdos y aves de corral a través de lavadores de aire y biofiltros: estado de la técnica y perspectivas. *Ingeniería de Biosistemas* 134: 74-93.
- Verstraete, W. 2015. El microbio fabricante. *Microb. Biotechnol.* 8: 36-37
- Verstraete, W. y De Vrieze, J . 2017. Tecnología microbiana con grandes potenciales para las necesidades ambientales urgentes en la próxima década. *Microb. Biotechnol.* 10: 988-994
- <https://www.environment.sa.gov.au/goodliving/posts/2019/05/guide-to-composting>
- <https://www.magicalmicrobes.com/products/mudwatt-clean-energy-from-mud>
- <https://www.nature.com/articles/s41586-020-2149-4#Sec5>

Glosario

Bioaumentación: método por el que se introducen microorganismos especiales para lograr un determinado proceso.

Biobeds/Biofiltros/Bioscrubbers: sistemas técnicos en los que se utilizan microorganismos para limpiar el aire y los gases e incluso recuperar ciertos productos valiosos.

Bioelectroquímica: campo de estudio que se centra en la transferencia de electrones y las corrientes eléctricas concomitantes generadas o utilizadas por los sistemas biológicos.

Biorremediación de suelos: tecnologías mediante las cuales se crean las condiciones del suelo para que los organismos naturales degraden los contaminantes y devuelvan al suelo su capacidad de suministrar aguas subterráneas saludables.

Biotecnología: combinación y explotación de tecnología y sistemas biológicos con fines específicos, por ejemplo, limpieza de arroyos contaminados con microorganismos.

Compostaje: mediante un suave aporte de oxígeno y la eliminación del exceso de calor, la materia orgánica se convierte en una valiosa matriz para el crecimiento de las plantas.

Industria petroquímica: industria que elabora productos orgánicos como petróleo, plástico, caucho y materias primas fibrosas a partir del petróleo y el gas.