

Biotecnología ambiental. Aplicaciones biotecnológicas en la mejora del medio ambiente

Anicet R. Blanch

Universidad de Barcelona

1

La biotecnología y el medio ambiente

El mantenimiento y la preservación de los recursos naturales que al mismo tiempo facilitan el desarrollo de las diversas actividades humanas en las sociedades desarrolladas se han convertido en uno de los retos más importantes del siglo XXI. Esta gestión del medio ambiente, debidamente coordinada y complementaria del desarrollo social, la entendemos y definimos actualmente como sostenibilidad. Este nuevo y complejo concepto económico, social y ecológico entorno a las relaciones entre las sociedades y el medio ambiente se ha ido consolidando progresivamente como una demanda social imperativa.

Al mismo tiempo, el gran desarrollo científico y tecnológico, particularmente en el ámbito de las ciencias de la vida, que se ha dado desde los años cincuenta del siglo pasado, nos ha permitido aplicar principios científicos y de ingeniería a la transformación de materiales por acción de agentes biológicos (microorga-

nismos, enzimas, células de animales o de plantas, principalmente) con el fin de proveer a nuestra sociedad de bienes y servicios. Actualmente nos referimos al conjunto de estos tipos de actividades humanas con el término *biotecnología*. Hay diferentes actividades biotecnológicas que nos están aportando nuevas herramientas metodológicas con el fin de poder responder a este reto de un desarrollo socioeconómico sostenible, respetuoso con el medio ambiente y la preservación de los recursos naturales. Así, definimos la biotecnología ambiental como el conjunto de actividades tecnológicas que nos permiten comprender y gestionar los sistemas biológicos (principalmente los sistemas microbianos) en el medio ambiente con el fin de proveer a la sociedad de productos y servicios.

El desarrollo de la biotecnología ambiental continúa dependiendo en gran parte de los avances de diferentes áreas científicas así como del conocimiento de los materiales, pero ha ido adquiriendo en los últimos años un papel destacado entre las diferentes actividades de la biotecnología. Este hecho resulta comprensible si tenemos en cuenta que dentro de las necesi-

dades determinadas por la sostenibilidad encontramos dos recursos que se han convertido en los principales retos del siglo XXI: el agua y la energía.

En nuestras sociedades, disponer de agua adecuada que se ajuste a los diferentes usos y demandas de las actividades humanas, presenta de manera inherente un compromiso de calidad, que comporta a menudo distintos tratamientos para eliminar o mitigar riesgos sanitarios y mejorar las características organolépticas del agua. Este abastecimiento se tiene que realizar de manera continua y sostenible. Eso comporta que hay que asegurar el retorno del agua usada a la naturaleza manteniendo unos niveles de calidad sanitaria y ecológica que nos permitan una protección de la salud humana y un impacto limitado o controlado en los ecosistemas naturales. Se estima que actualmente hay en torno a un 20% de la población humana que no dispone de un abastecimiento de agua de calidad y casi un 40% que no dispone de sistemas de saneamiento aceptables. Por lo tanto, el suministro y el saneamiento del agua tienen un protagonismo importante dentro de las aplicaciones biotecnológicas en el medio ambiente.

Los requerimientos energéticos son necesarios en los distintos ámbitos de las actividades humanas, tanto las domésticas como las industriales, agrícolas y ganaderas, o las relacionadas con el ocio o los servicios. La disponibilidad de energía es una necesidad determinante para el funcionamiento de las sociedades desarrolladas. El incremento de la población mundial y una mejor calidad de vida para un mayor número de humanos en el último siglo nos han situado delante de un escenario de crisis energética global. Estos dos aspectos han hecho que en las últimas décadas la utilización de fuentes energéticas fósiles se haya acelerado y, vista su disponibilidad limitada y el planteamiento de sostenibilidad antes indicado, nos enfrentamos a un inminente reto tecnológico: la disponibilidad de fuentes energéticas renovables y que verdaderamente resulten alternativas. La biotecnología ambiental puede contribuir en parte al desarrollo de procesos que nos permitan disponer de fuentes energéticas renovables –principalmente biomasa y

energía solar– que se tendrán que convertir en reservas energéticas útiles. Estas bioenergías renovables pueden ser una contribución importante para aligerar una crisis energética global, pero sobre todo presentan interés porque pretenden producir energía a partir de recursos renovables sin una emisión neta de dióxido de carbono. Los desarrollos de métodos más destacables se están haciendo con el estudio de procesos alternativos de producción de electricidad.

Ahora bien, las aportaciones de la biotecnología ambiental a la gestión del medio ambiente tienen implicaciones científicas y tecnológicas que van más allá del abastecimiento de mejoras tecnológicas a los recursos y la gestión de la energía y el agua. Hay una estrecha relación entre los avances científicos y metodológicos de la ecología microbiana y los progresos que se están haciendo en la biotecnología ambiental, tanto desde el punto de vista de las bases científicas conceptuales, las ventajas y las limitaciones de las metodologías tradicionales y las nuevas aproximaciones moleculares, como en las actividades humanas a las que se pueden aplicar sus nuevos conocimientos.

2

Ámbitos de actuación de la biotecnología ambiental

Los ámbitos de actuación de la biotecnología ambiental se relacionan con la gestión del medio ambiente y/o con el aprovechamiento de los recursos naturales. Las distintas acciones se realizan en los sistemas biológicos con un objetivo final de prevenir, mitigar o eliminar la presencia de compuestos contaminantes en el medio ambiente (Blanch, 2007). Evidentemente se pueden utilizar, en ciertos casos, otras herramientas tecnológicas, como pueden ser tratamientos de tipo físico o químico, pero hay una ventaja diferencial en la utilización de tratamientos biológicos viables, ya que éstos presentan un coste relativamente más bajo y comportan una menor alteración del medio ambiente. El principio básico de actuación de los métodos biológicos se basa en una degradación de los

compuestos orgánicos contaminantes en compuestos inorgánicos, que en los casos ideales resultan inocuos (por ejemplo, CO₂, H₂O, Cl⁻, etc.). Además, estos procesos biotecnológicos procuran realizarse en la medida de las posibilidades en el mismo lugar donde se ha producido el impacto contaminante y se evitan los costes asociados al desplazamiento del material contaminado a plantas de tratamiento específicas, a vertederos controlados o a otras ubicaciones. Esta característica también resulta diferencial respecto de los procedimientos físicos y/o químicos que a menudo simplemente transfieren el contaminante a una ubicación diferente con el fin de mitigar y/o controlarlo más adecuadamente.

Tradicionalmente, las actividades biotecnológicas relacionadas con el medio ambiente se han fundamentado principalmente en la capacidad degradadora de los compuestos contaminantes por parte de la actividad metabólica de los microorganismos presentes en los ecosistemas naturales. Esta necesidad de utilizar la biodegradación microbiana ha hecho que durante mucho tiempo el esfuerzo tecnológico y de investigación de la biotecnología ambiental se orientara a aislar microorganismos del medio ambiente, clasificarlos y caracterizarlos fisiológicamente, analizar las capacidades enzimáticas degradadoras para desarrollar procesos tecnológicamente aplicables a gran escala e intentar, en determinados casos, una mejora genética de los microorganismos utilizados con el fin de obtener cepas más eficientes en la degradación de compuestos orgánicos contaminantes. Se ha observado que a menudo los microorganismos aislados no presentan las mismas capacidades degradadoras de los contaminantes que el conjunto de poblaciones microbianas tal como las encontramos en el medio natural. Este limitado conocimiento de la ecología microbiana y de las relaciones metabólicas entre los microorganismos constituyentes de estos consorcios microbianos ha hecho que los consideremos como “cajas negras” con capacidades degradadoras (Bragg *et al.*, 1994; Swannell *et al.*, 1996). En los últimos años, el desarrollo y la adaptación de nuevos métodos moleculares en los estudios de ecología microbiana nos han per-

mitido constatar que las poblaciones microbianas del medio ambiente son mucho más diversas que los microorganismos aislados y estudiados en condiciones de cultivo puro en el laboratorio.

Tradicionalmente la biotecnología ambiental ha estado utilizando durante mucho tiempo la aproximación metodológica basada en aislar primero un microorganismo, valorar la capacidad degradadora en el laboratorio y posteriormente intentar desarrollar un procedimiento con cultivo puro del microorganismo en la biodegradación a gran escala. Los avances metodológicos, sobre todo basados en las nuevas técnicas moleculares, nos están permitiendo hacer otras aproximaciones conceptuales y aplicadas en los estudios de la ecología microbiana y su aplicación a la gestión de los recursos naturales.

Las nuevas tecnologías moleculares y la estrecha relación entre la ecología microbiana y la biotecnología ambiental nos han permitido un nuevo enfoque del estudio de los consorcios microbianos y extender el ámbito de las aplicaciones biotecnológicas más allá de los procesos degradadores de compuestos contaminantes en el medio ambiente. Como consecuencia, existe un efecto de cooperación y sinergia entre la ecología microbiana y la biotecnología ambiental. La primera provee los cimientos científicos para el desarrollo de procesos aplicados, que son los objetivos prácticos perseguidos por la biotecnología ambiental. Al mismo tiempo, las experiencias derivadas de la biotecnología ambiental facilitan el estudio de los ecosistemas en la ecología microbiana, lo cual comportará continuar aportando nuevos avances conceptuales y nuevas metodologías y técnicas que la biotecnología ambiental podrá considerar de nuevo para sus aplicaciones y que le permiten avanzar conceptualmente y desarrollar nuevas metodologías (Rittmann, 2006). Tenemos un buen ejemplo en la práctica si consideramos que la biotecnología ambiental no puede considerar sólo la microbiota presente en el agua, el aire y el suelo que nos rodea con el fin de desarrollar aplicaciones biotecnológicas medioambientales, sino que también debe tener en cuenta, por ejemplo, las poblaciones microbianas presentes en el trato gastrointesti-

nal. Estas poblaciones son una parte del mundo exterior en el interior de los animales vivos, que en el caso concreto del agua están en comunicación a través del ciclo del agua. Las nuevas técnicas de metagenómica nos han permitido estimar que hay un enorme recurso de genes y de funciones biológicas cuando se estudian estas poblaciones microbianas y que a medida que podamos caracterizarlos pueden convertirse en nuevas herramientas aplicadas a la gestión de los recursos naturales por parte de la biotecnología ambiental.

En los últimos años, los estudios impartidos en las escuelas de estudios empresariales y de negocios han introducido y utilizado el concepto de la gestión de los recursos humanos como una herramienta esencial para poder dirigir empresas y establecer planes estratégicos. Similarmente, uno de los retos actuales de la biotecnología ambiental y, en general, de la microbiología es el conocimiento y la gestión de estos recursos microbianos (los genes y sus funciones biológicas) como herramientas esenciales para poder gestionar los recursos naturales y para establecer planes estratégicos medioambientales. Esta nueva visión del aprovechamiento de la biodiversidad microbiana de los ecosistemas con el fin de proveer a nuestra sociedad de productos y servicios biotecnológicos se llama gestión de los recursos microbianos (MRM, siglas del inglés *microbial resource management*) (Verstraete, 2007).

3

Distintos enfoques metodológicos aplicados por la biotecnología ambiental

Tal como ya hemos indicado anteriormente, podemos diferenciar dos maneras metodológicas de realizar los estudios en la biotecnología ambiental:

1. Las metodologías basadas en el aislamiento del microorganismo de interés y en la caracterización de sus funciones metabólicas a partir de su estudio en el laboratorio mediante su cultivo puro. Ya hemos comentado que la limitación de este enfoque metodológico reside principalmente en

el hecho de que las situaciones generadas en el laboratorio y la información que se deriva de ellas bajo condiciones de cultivo puro a menudo no resultan fáciles de transferir a lo que ocurre en el medio natural, o incluso no resulta posible interpretar esta información cuando se analizan estas funciones metabólicas como una parte de todo el ecosistema. Pero eso no quiere decir que tengamos que despreciar cualquier actuación de la biotecnología ambiental que se base en estas metodologías. Esta limitación es consecuencia de la complejidad de los consorcios microbianos y sus interacciones con el entorno.

2. Las metodologías basadas en el análisis del consorcio microbiano considerándolo como una unidad funcional. Las aplicaciones basadas en esta aproximación conceptual pueden resultar más empíricas, sobre todo cuando se tiene un desconocimiento del consorcio. Ahora bien, en determinadas circunstancias puede resultar más práctica. No obstante, presenta la limitación que no detectamos las estructuras y/o los grupos relevantes fisiológicamente en el consorcio y perdemos posibilidades de intervención sobre éstos.

La combinación de las dos aproximaciones metodológicas no ha resultado fácil hasta los últimos tiempos. Las nuevas técnicas moleculares nos están permitiendo explorar y empezar a comprender el funcionamiento de esta “caja negra” que hasta ahora nos resultaba el consorcio microbiano. Un número importante de las técnicas moleculares se fundamenta en las secuencias específicas que presentan los ácidos nucleicos en los seres vivos. Estas nuevas técnicas de biología molecular nos facilitan el conocimiento de los consorcios microbianos *in situ*, la evaluación de la composición y la estructura de poblaciones presentes y las funciones metabólicas que realizan, la identificación de los microorganismos relevantes en el consorcio, el aislamiento de estos microorganismos y la manipulación o gestión de los procesos desarrollados por el consorcio. Por lo tanto, nos estamos proveyendo de nuevo conocimiento para una gestión medioambiental que se pue-

da fundamentar mejor en un sistema de MRM. A pesar del apoyo que suponen estas técnicas de análisis molecular (genómica o metagenómica) en poblaciones microbianas ambientales, apenas hemos empezado el aprendizaje de la diversidad y la complejidad de los sistemas naturales que contienen decenas de miles de microorganismos diferentes, tal como nos los encontramos en el trato intestinal o en un lodo activo de una planta depuradora de aguas. Por eso, nos hace falta todavía identificar y comprender qué microorganismos son esenciales y cómo nos podemos beneficiar selectivamente de sus acciones metabólicas dentro de un ecosistema en concreto.

El éxito de procesos de intervención ambiental, basados en la utilización de un microorganismo o de un consorcio microbiano específico que nos interesen, necesita mecanismos activos para el mantenimiento de estos microorganismos y del metabolismo por el cual los hemos escogido, ya que los procesos naturales de selección microbiana fácilmente desplazan estos microorganismos de nuestro interés. También se ha planteado la introducción de microorganismos manipulados genéticamente para realizar tareas específicas en el medio, pero estos microorganismos seleccionados de manera artificial resultan a menudo muy malos competidores en entornos naturales y, además, las aplicaciones medioambientales basadas en éstos tienen una baja aceptación social. Los microorganismos manipulados genéticamente a menudo no pueden superar los diferentes condicionantes ambientales para su crecimiento o incluso para su supervivencia. Actualmente muchas de las aplicaciones de la biotecnología ambiental tratan más de fundamentarse en técnicas que nos permitan el uso de cepas microbianas naturales con el fin de mantenerlas adecuadamente dentro de un entorno natural, que no de generar sofisticados microorganismos manipulados genéticamente con el fin de obtener nuevas combinaciones artificiales de genes. Esta aplicación práctica nos tendría que permitir estabilizar los microorganismos autóctonos del medio natural que pueden realizar la función de biodegradación que pretendemos en nuestra actuación.

4

Actividades de interés actual en la biotecnología ambiental

Se diferencian cinco grandes ámbitos de aplicación de la biotecnología ambiental, en la que probablemente veremos las contribuciones más destacables durante los próximos años:

1. *El cambio climático*. El control de las emisiones de CO₂ por el suelo así como la posibilidad de secuestrar cantidades importantes de carbono en el suelo mediante cambios significativos en las prácticas agrícolas rutinarias pueden convertirse en una de las contribuciones de la biotecnología ambiental, y en particular de la biotecnología microbiana, a la regulación del cambio climático que tal vez nos podría afectar durante las próximas décadas (Rosenberg e Izaurralde, 2001). Otro aspecto relacionado con este ámbito es el control o la prevención de las emisiones de metano procedente de residuos, de prácticas agrícolas y de sistemas naturales. Aunque están en fase de estudio, existen algunas metodologías para intentar eliminar metano atmosférico a través de bacterias metanotróficas del suelo (Boecks *et al.*, 1997; Mohanty *et al.*, 2006).
2. *Energías alternativas*. La disponibilidad de nuevas fuentes energéticas renovables se está convirtiendo en uno de los objetivos tecnológicos más destacables del siglo XXI, tal como hemos indicado anteriormente. Hay que indicar que hasta ahora las posibles contribuciones por parte de microorganismos son limitadas. Muchas de las propuestas se han quedado a escala experimental de laboratorio o como mucho en ensayos de planta piloto. No obstante, no podemos despreciar algunas aportaciones potenciales, como por ejemplo la síntesis de hidrógeno por parte de nuevas cepas de arqueobacterias o la producción de la llamada bioelectricidad mediante los generadores microbianos de energía dentro de una escala muy modesta (*microbial fuel cells*).

Otras potenciales fuentes energéticas alternativas están considerando la utilización del metabolismo microbiano para producir gas natural (metano), etanol o hidrógeno. Estas unidades están basadas en generar electricidad directamente a partir de la oxidación de compuestos orgánicos por el metabolismo bacteriano (cepas de los géneros *Geobacter* o *Rhodoferrax*) al transferir los electrones a un ánodo en lugar de hacerlo en un aceptor tradicional de electrones (Lovley, 2006; Du *et al.*, 2007). También habrá que valorar en un futuro los progresos de técnicas que se consigan con el fin de aumentar el rendimiento energético a gran escala de las diferentes fuentes de bioenergía, principalmente la síntesis de metano, etanol e hidrógeno. Además, la potencial aplicación de estas mejoras tecnológicas está supeditada al hecho de si resultan económicamente competitivas respecto de los precios de mercado de las energías fósiles (petróleo, gas y carbón). Las fuentes de bioenergía proceden de la degradación de la materia orgánica por diversas rutas del catabolismo microbiano y presentan diferente eficiencia energética y diferentes costes por su síntesis. Ésta requiere habitualmente tres procesos tecnológicos que comportan la preparación de las materias primas, la posterior síntesis del compuesto bioenergético normalmente por un proceso de fermentación microbiana y finalmente una serie de manipulaciones que nos permitirán obtener el compuesto bioenergético (*downstream processing*). La eficiencia y los costes asociados a estos tres procesos tecnológicos nos determinarán si el compuesto bioenergético resulta verdaderamente alternativo a otras fuentes energéticas presentes en el mercado.

3. *Procesos de reciclaje*. El reciclaje efectivo de muchos elementos y compuestos en los ecosistemas nos determina la sostenibilidad medioambiental de determinadas actividades humanas. La comprensión de la estructura y de las funciones de los consorcios microbianos nos puede proporcionar herramientas para la descontaminación

de suelos y sedimentos, la eliminación de contaminantes en el aire y la degradación de compuestos recalcitrantes procedentes de diferentes actividades humanas. Podemos destacar en este ámbito la biodegradación microbiana de compuestos aromáticos derivados de las actividades industriales que resulta esencial para mantener el ciclo del carbono en el planeta. Muchos de los procesos de degradación de los compuestos aromáticos se han basado en la utilización de cepas del género *Pseudomonas*, aunque no exclusivamente, ya que no podemos descartar el uso de otros grupos bacterianos (Díaz *et al.*, 2001).

4. *Los recursos hídricos*. El aprovechamiento y la gestión optimizada de los recursos hídricos resultan un elemento clave en el desarrollo social y económico de las sociedades actuales. Por un lado, existe una estrecha relación entre el crecimiento económico y la demanda de agua y, por otro lado, los recursos hídricos (en términos cualitativos y/o cuantitativos) de que se dispone no siempre pueden satisfacer la demanda de nuestras sociedades. El resultado es que la calidad en el suministro de agua potable (con continuidad y de manera sostenible), el saneamiento de las aguas residuales (por procesos eficientes y de bajo consumo energético) y su potencial regeneración se están convirtiendo en un reto primordial para poder garantizar este recurso con la calidad adecuada que requieren las distintas actividades humanas en muchas zonas del planeta con recursos hídricos limitados o muy variables. La regeneración de aguas es un factor ambiental estratégico en muchos territorios, como por ejemplo en los casos de recuperación de acuíferos, la gestión integral de cuencas fluviales o zonas costeras, o el abastecimiento de recursos hídricos alternativos en las aguas potables de suministro para diferentes actividades industriales y de ocio (Jofre, 2007). Resulta cada vez más importante la identificación de las contaminaciones de las aguas en su origen. Las aportaciones de materia orgánica se encuentran entre las con-

taminaciones más importantes que reciben las aguas y, dentro de esta aportación, tiene una proporción muy importante la contaminación fecal, que llega proveniente principalmente de las aguas residuales urbanas, los lixiviados y las escorrentías de actividades ganaderas, de efluentes de mataderos y de plantas de procesamiento y manufactura de alimentos de origen animal. En los últimos años se están haciendo esfuerzos importantes en el desarrollo de metodologías por detectar el origen de la contaminación fecal en las aguas superficiales (detección del origen microbiano o *microbial source tracking*) y poder detectar, contener y eliminar este tipo de contaminación fecal estrechamente ligado a las enfermedades de transmisión hídrica. Los riesgos sanitarios asociados debidos a la presencia de esta contaminación fecal resultan diferentes según si es de origen humano o animal. Eso ha hecho que últimamente se hayan propuesto diferentes métodos microbiológicos o químicos para la determinación del origen de la contaminación fecal (Blanch *et al.*, 2006). También ha habido más interés por la detección de contaminantes y patógenos en el agua con el fin de determinar los riesgos sanitarios y tomar medidas para su control y/o eliminación. Eso ha hecho potenciar el desarrollo de nuevas técnicas y tests comerciales para la detección de patógenos en aguas y para el análisis de la transferencia horizontal de genes que codifican por factores de virulencia o por la resistencia a antibióticos.

5. *Salud y medio ambiente.* El gran éxito del uso clínico de los antibióticos de manera universal, sobre todo en los países desarrollados, hizo que algunos analistas pensaran durante la década de los años setenta del siglo xx que en pocos años conseguiríamos la erradicación de las enfermedades infecciosas. Estas expectativas se han quedado sin cimiento en los últimos años, ya que se ha constatado la aparición de cepas microbianas resistentes a antibióticos por un uso intensivo o inapropiado de éstos en la medicina humana y

veterinaria para el tratamiento y la prevención de enfermedades, o bien por usar los antibióticos como promotores de crecimiento en la producción ganadera. El uso excesivo de antibióticos ha dado como resultado la selección de resistencias a algunos de ellos por parte de algunas poblaciones bacterianas en el trato intestinal de los animales que se utilizan en la cadena alimenticia humana. Eso ha contribuido a la aparición de cepas de patógenos resistentes a los antibióticos en la medicina humana. En consecuencia, el conocimiento y la gestión de las poblaciones bacterianas intestinales –tanto de los humanos como de los animales relacionados con la cadena alimenticia– y de otras poblaciones microbianas extraintestinales, ya sean simbioses o comensales (principalmente en mucosas y en la epidermis), que están directamente o indirectamente relacionadas con el estado sanitario, están adquiriendo un papel esencial. Hay una demanda creciente de métodos de diagnóstico y detección efectivos y operativos (fácil uso y bajo coste), que se ha convertido en una actividad de desarrollo importante para la biotecnología ambiental para el control y la contención de los patógenos en nuestra sociedad. Los recientes conocimientos en este ámbito permiten establecer nuevos procesos activos y alternativos de prevención y control de los agentes causantes de enfermedades. Entre estos procesos pueden destacar la utilización de los autoinductores e inhibidores de los mecanismos o percepción de quórum o *quorum sensing* bacterianos (Waters y Bassler, 2005). Estos mecanismos permiten la coordinación poblacional de la expresión génica relacionada con la concentración celular de una población bacteriana. También tenemos la utilización de los bacteriófagos para el control de patógenos emergentes o como alternativa a las resistencias a los antibióticos y también como organismos modelo para validar procesos de depuración de aguas residuales o procesos de higienización de lodos de depuradora o de suelos contaminados por

microorganismos. Hace falta añadir que el incremento de la movilidad de las personas por todo el planeta, acompañado por una economía globalizada que permite una movilidad más fácil y más recursos materiales y consecuentemente más microorganismos, ha facilitado la extensión de determinadas enfermedades infecciosas que estaban limitadas territorialmente y, al mismo tiempo, también ha contribuido a la aparición de los llamados patógenos emergentes. Nos hacen falta nuevas técnicas de control de los agentes infecciosos no sólo en el entorno clínico o sanitario sino también en el medio ambiente.

5

Actuaciones biotecnológicas ambientales en Cataluña

Hay diferentes ámbitos en los cuales se puede esperar que algunos procesos biotecnológicos se puedan aplicar a nuestro país. No obstante, hay que ponderarlos según la eficiencia (y, por lo tanto, la competitividad económica) de su aplicación delante de otros instrumentos de gestión ambiental.

5.1

Actuaciones potenciales sobre el cambio climático

Las posibles intervenciones significativas a través de la biotecnología ambiental que pudieran modificar cualquier efecto del clima en nuestro país resultan prácticamente y económicamente poco probables, si podemos decir que existen. En el *Informe sobre el cambio climático en Cataluña*, elaborado por el Servicio Meteorológico de Cataluña y con el apoyo del Institut d'Estudis Catalans (Llebot *et al.*, 2005), se considera oportuno valorar los impactos y los instrumentos de gestión vinculados a la adaptación y la mitigación de las emisiones causantes del calentamiento global. Los instrumentos que se plantean están relacionados con la modificación de algunas

prácticas en el sector energético, en las infraestructuras, el transporte y el medio urbano; con cambios en algunas actividades industriales, agrícolas y ganaderas, y con la eliminación de residuos, la gestión de los suelos y de los recursos hídricos. Por lo tanto, algunas de las aportaciones sobre el cambio climático que se pueden hacer desde la biotecnología ambiental están más relacionadas con los otros ámbitos de actuación que se comentan a continuación (biodegradación de residuos, recursos hídricos, energías alternativas y gestión de suelos). Consecuentemente, en el mejor de los casos, estas prácticas biotecnológicas ambientales presentan un efecto menor e indirecto de actuación sobre las modificaciones en el clima. Por ejemplo, si se hace una valorización de la materia orgánica teniendo en cuenta la generación de emisiones de CO₂, el compostaje (proceso basado en la degradación de la materia orgánica realizado principalmente por el metabolismo microbiano) es un proceso que genera menos emisiones de CO₂ que los vertederos, la utilización directa de purín como abono en los campos o las incineradoras (Llebot *et al.*, 2005). Ahora bien, hay que evaluar los costes asociados a la aplicación indiscriminada del compostaje en cualquier lugar del territorio, ya que los costes económicos y energéticos del transporte del residuo rico en materia orgánica en la planta de compostaje pueden resultar negativos en un balance final de este proceso. Por lo tanto, el control de las emisiones de CO₂ se basa principalmente en secuestrar cantidades importantes de carbono del suelo o bien en el control o la prevención de metano procedente de la degradación de la materia orgánica derivada de diferentes actividades (degradación de residuos, prácticas agrícolas o de los sistemas naturales). El secuestro de carbono en el suelo está más relacionado con acciones sobre las prácticas agrícolas y de silvicultura y con la gestión fisicoquímica de los suelos. El interés por el control de la emisión de metano derivado de la degradación de la materia orgánica está más relacionado, en nuestro contexto, con el aprovechamiento energético (sistemas de cogeneración) del biogás, principalmente en los digestos anaerobios de

lodos procedentes del tratamiento biológico de aguas residuales. La aplicación de las metodologías en desarrollo que pretenden eliminar metano atmosférico mediante bacterias metanotróficas del suelo comporta una complejidad importante y todavía están lejos de ser consideradas biotecnologías efectivas y aplicables a gran escala para este objetivo.

5.2

Actuaciones en la búsqueda de energías alternativas

La contribución realizada con procesos biotecnológicos que se han desarrollado para aportar nuevas fuentes de energía renovable es muy modesta tanto en Cataluña como en el conjunto del Estado. En diversos estudios que analizan el potencial de las diferentes tecnologías renovables en España (Maure y Baras, 2010) las únicas energías renovables basadas en procesos biotecnológicos son la producción de biogás y de etanol. Los consumos de energía primaria que se estiman para Cataluña el año 2015 (*Plan de la energía 2006-2015, revisión 2009*) respecto de estas dos energías basadas en biotecnologías resultan ser las aportaciones menores a las otras energías renovables y son inferiores a los que resultan del conjunto de los diferentes tipos de energía solar (cuadro 1). Estos consumos estimados son 205,6 ktep para el biogás y 93,9 ktep para el bioetanol.

El biogás es un gas con un alto contenido de metano que proviene de la conversión de biomasa residual húmeda mediante un proceso de digestión (fermentación) anaerobia por un consorcio microbiano complejo. Una aplicación de este procedimiento en Cataluña son los digestores anaerobios de lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, donde se consigue reducir el volumen de lodos de depuración y generar biogás, que en algunas plantas se aprovecha en procesos de cogeneración eléctrica. El bioetanol procede de un proceso biotecnológico que comprende 3 fases. En la primera se prepara la materia prima (azúcar de la remolacha, azúcar de caña, almidón, celulosa, residuos y subproductos, etc.) rica en hidra-

Cuadro 1

Consumo de energía primaria estimada para el año 2015 según el Pla de la energia 2006-2015 (revisión 2009)		
Fuente de energía renovable	Plan de la energía 2006-2015 (revisión 2009)	
	ktep	%
Solar	358,9	13,28
Solar térmica	111,7	4,13
Solar fotovoltaica	57,9	2,14
Solar termoeléctrica	189,3	7,00
Eólica	698,4	25,83
Hidráulica	504,3	18,65
Biomasa forestal y agrícola	306,6	11,34
Biogás	205,6	7,61
Bioetanol	93,9	3,47
Biodiésel	348,0	12,87
Otros residuos renovables	187,7	6,94
Total	2.703,40	

ktep: kilotonelada equivalente de petróleo.

Fuente: Departamento de Economía y Finanzas de la Generalitat de Catalunya.

tos de carbono mediante tratamientos químicos o enzimáticos que faciliten la movilización (hidrólisis) de los hidratos de carbono de manera que puedan ser metabolizados posteriormente por los microorganismos. La segunda fase consiste en un proceso de fermentación alcohólica, habitualmente realizado con levaduras, que transforma los azúcares movilizados en etanol. Finalmente, hay que recuperar el etanol producido por un proceso de destilación. Este bioetanol será entonces utilizado como combustible.

Se ha considerado durante mucho tiempo la posibilidad de encontrar mecanismos de fabricación de biocarburantes a partir del crecimiento de microalgas aprovechando la fotosíntesis, que les permite la fijación de CO₂ atmosférico en biomasa verde. Se ha planteado utilizar el cultivo de estas microalgas para producir biodiésel basado en el alto contenido de lípidos que pueden llegar a acumular. Actualmente no podemos considerarlo una alternativa de energía renovable a partir del conocimiento y los estudios que se han hecho. Por lo tanto, no se dispone de una tecnología eficiente con el fin de conseguir este objetivo, aunque hay quien estima que en un futuro tal vez podría contribuir a las estrategias de emisión cero de CO₂ y se

considera el proceso de captación de CO₂ que se da por la fotosíntesis.

Finalmente, hay que indicar que la biomasa, como aprovechamiento de residuos agrícolas y forestales, y el biodiésel, aunque se consideran biocombustibles, no se pueden asociar a una actividad biotecnológica, dado que no se realizan por procesos de fermentación o digestión microbiana. Estas bioenergías se fundamentan en procesos de conversión termoquímica (pirólisis, gasificación, combustión) o de transesterificación (biodiésel).

5.3

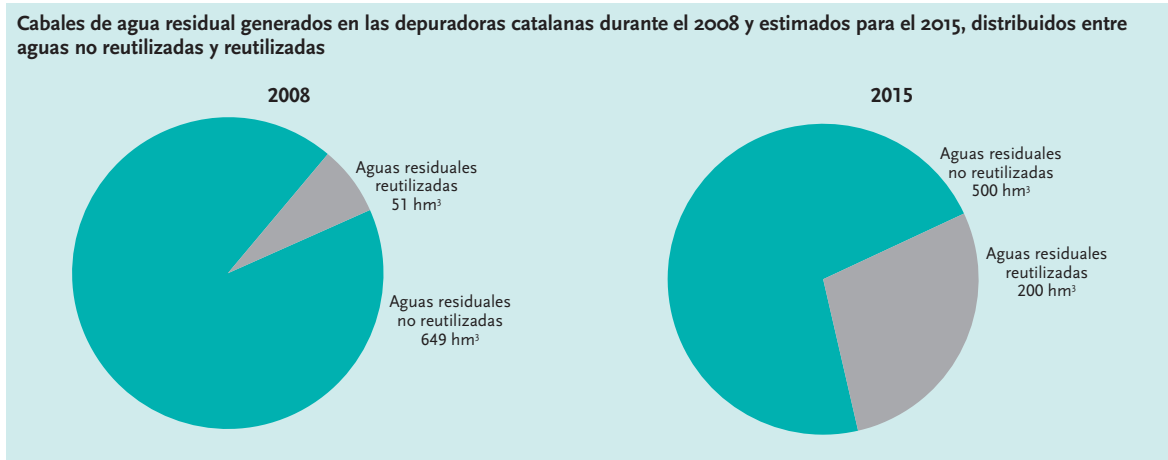
Actuaciones sobre los recursos hídricos

La contribución de la gestión del agua al PIB de Cataluña es más importante de lo que se podría pensar. En estudios sobre la industria del agua en el área metropolitana de Barcelona (AMB) se estima que el sector tiene unas 550 empresas que representan entre un 20% y un 22% del total de las empresas del sector en el Estado, que ocupan a un 0,7% de la población activa del AMB y que generan más del 2% del PIB. Además, todo indica que el sector industrial y de servicios relacionado con la gestión de los recursos hídricos tiene un buen potencial de crecimiento tanto en el mercado nacional como en el internacional (Jofre, 2007).

La limitación de recursos hídricos y la ordenación del territorio, junto con la distribución de la población, hacen que nos encontremos con dos situaciones antagónicas en la manera en la que se utiliza el agua en Cataluña: las cuencas del Ebro concentran las zonas de regadío con una menor incidencia en el consumo doméstico urbano e industrial, y en las cuencas internas, donde hay el 92% de la población y una parte importante de la actividad industrial, este efecto es todavía más acentuado si consideramos la situación generada en el AMB (Armengol y Dolz, 2009). Esta realidad condiciona significativamente la política hidráulica en Cataluña y hemos tenido que ir identificando medidas para poder corregir este antagonismo y, al mismo tiempo, gestionar apropiadamente los

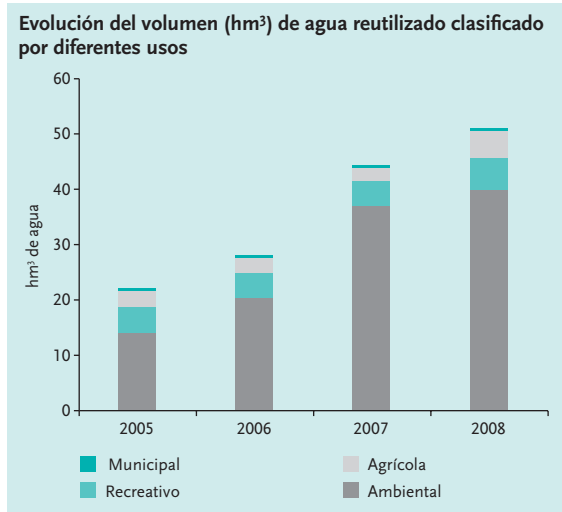
recursos hídricos. Entre estas medidas, encontramos una moderación del consumo domiciliario, industrial y sobre todo agrícola del agua. La actitud más consciente de los ciudadanos en temas medioambientales relacionados con las reservas de agua se ha visto incrementada después de la situación crítica de las reservas disponibles el verano de 2008 en Cataluña. Eso ha hecho que otra medida de aprovechamiento de los recursos hídricos, como es la reutilización de aguas (agua regenerada), se haya ido haciendo más popular y haya aumentado actualmente su aceptación social. Llamamos *agua regenerada* aquella agua residual que se ha depurado hasta un nivel de tratamiento secundario (degradación de la materia orgánica biodegradable por la actividad del metabolismo microbiano) y que a continuación recibe un tratamiento adicional con el fin de poder hacerla apta para muchas actividades humanas, aunque no se puede considerar habitualmente para su uso como agua potable. En los diversos tratamientos de las aguas residuales y regeneradas participan diferentes procesos biotecnológicos. El diseño y la validación de estos procesos, así como el desarrollo de técnicas de análisis y detección de los indicadores microbianos y patógenos para asegurar la calidad y seguridad sanitaria de este nuevo recurso hídrico, son actividades biotecnológicas ambientales de máximo interés y prioridad en el sector. No obstante, todavía no podemos considerar que la reutilización de aguas residuales regeneradas sea una actividad económica consolidada e importante dentro de la gestión de los recursos hídricos de nuestro país. Ahora bien, las estimaciones hechas por la Agencia Catalana del Agua en el Programa de reutilización de agua en Cataluña (ACA 2009) nos indican que el uso de este nuevo recurso hídrico va creciendo y se espera que lleguemos a un aprovechamiento del 31% de nuestras aguas residuales el año 2015 (gráfico 1); por lo tanto, hay que esperar un incremento de actividades de la biotecnología ambiental en este ámbito. Es importante destacar que este incremento del volumen de agua regenerada de diferentes cualidades se ha dado más destacadamente en los últimos años por los diferentes usos de los sectores agrícola y ambiental

Gráfico 1



Fuente: programa de reutilización de aguas en Cataluña. Junio 2009. Agencia Catalana del Agua, Generalitat de Catalunya.

Gráfico 2



Fuente: Agencia Catalana del Agua. Generalitat de Catalunya.

(gráfico 2), que reúnen algunas de las mayores demandas (riego y recuperación de recursos hídricos naturales, respectivamente).

Es importante destacar la tecnología, el conocimiento y la aplicación práctica de las aguas residuales que ya se está haciendo en nuestro país desde hace unos años. Tenemos el mejor ejemplo en el programa y las actualizaciones de reutilización que está haciendo el Consorcio Costa Brava (www.ccbgi.org). Se han reali-

zando progresos significativos en el desarrollo de procesos de regeneración de aguas residuales, en su control de calidad y en los sistemas de distribución que han ido incrementando no sólo los caudales tratados y disponibles sino también el ámbito municipal de prestación de estos recursos (cuadro 2). Si las expectativas indicadas por la Agencia Catalana del Agua se cumplen y se extiende la experiencia del Consorcio Costa Brava al resto del territorio catalán, hay que esperar una fuerte contribución de la biotecnología ambiental a esta actividad creciente del sector.

El saneamiento de las aguas residuales en las plantas depuradoras da como resultado el agua depurada y los barros. Éstos se generan por los procesos físico-químicos y biológicos constituyentes del tratamiento de depuración a partir de la separación de la fase sólida (materia orgánica e inorgánica) presente en las aguas depuradas. Por lo tanto, los barros o lodos de depuración (sobre todo los procedentes de las aguas residuales urbanas) tienen un contenido en materia orgánica, nitrógeno y fósforo que hace que sean adecuados, después de procesos de higienización, para su utilización como abono agrícola, fabricación de compuesto, restauración de pedreras y recuperación de suelos, o incluso como material para la construcción. Hay que indicar que estos lodos también pueden derivar hacia una valorización energética (combustión

Cuadro 2

Caudales tratados en miles de m ³																					
Año	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09
Blanes	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	222	3.199	3.298	3.634	3.155	2.830	2.127	2.402
Cadaqués	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11	19	15	15	14	30	6	6	6
Castell - Platja d'Aro	40	146	280	248	289	152	198	217	194	231	1.071	1.198	1.292	1.212	1.045	899	944	982	868	780	1.018
Colera	-	-	-	-	-	-	-	-	3	16	10	10	15	9	13	19	23	16	4	9	3
El Port de la Selva	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	12	7	36	65	96	58	69	53
Empuriabrava - Pitch & Putt Castelló d'E.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15	14	10	9	25
Empuriabrava - PNAE	-	-	-	-	-	-	-	-	442	511	527	536	557	745	467	439	903	661	948	1.018	1.032
Llançà	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	39	87
Lloret de Mar	-	-	-	-	-	44	103	77	106	101	101	95	75	53	74	64	58	54	64	252	492
Palamós	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	3	11	4	4
Pals	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	122	254	207	264	270	240	263	281	440	456
Portbou	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	7	10	12	10	7	11	9
Roses	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24	20
Torroella de Montgrí	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	185	64	281	637	476
Tossa de Mar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40	49	49	247	222	235	163	90	104	116
Total	40	146	280	248	289	196	301	294	745	859	1.709	2.001	2.265	2.538	5.338	5.274	6.330	5.510	5.460	5.529	6.199

Fuente: Consorcio Costa Brava. <<http://www.ccbgi.org/reutilitzacio.php>>

en cementeras, como ejemplo más destacable en Cataluña). La producción anual de lodos de depuradora se ha visto incrementada desde la implantación de las normativas europeas de tratamiento de aguas residuales urbanas (Directiva 91/271/CEE) y la normativa (Directiva 2000/60/CE) por la cual se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas, dirigida a la protección de las aguas y que pretende conseguir antes del año 2015 un buen estado de las masas de agua superficiales, mediante el desarrollo de medidas de protección, mejora y regeneración de estas masas. Este volumen de lodos se sitúa en los últimos años ligeramente por debajo de las 600.000 toneladas (cuadro 3) y se prevé que se llegará, al final del plazo de vigencia del programa de barros, a 624.700 toneladas/año (ACA, 2010).

Hay diferentes procesos biotecnológicos implicados en algunos tipos de tratamiento e higienización de estos lodos, que son los más habituales en nuestro territorio, el compostaje y las digestiones microbianas en condiciones aerobias y anaerobias. Dejando de

lado la eficiencia, las ventajas y las limitaciones de cada uno de estos procesos se fundamentan en el hecho de que la actividad metabólica de consorcios microbianos realiza una reducción de la masa y una higienización de lodos (eliminación de patógenos y sus indicadores microbianos), con el fin de facilitar una seguridad sanitaria en los usos posteriores que se puedan hacer o bien una disminución de la masa que se tendrá que gestionar como residuo. Las aplicaciones de los barros tratados que se están realizando son principalmente el uso en las prácticas agrícolas y de jardinería, el depósito (vertido) controlado, la valorización energética (combustión en cementeras) y la restauración de canteras (cuadro 3). Por lo tanto, la biotecnología ambiental también tiene un campo de actuación muy importante en el desarrollo de procesos de tratamiento de los lodos, su validación, el control y el seguimiento de la calidad sanitaria de este subproducto o residuo final. La biotecnología que se desarrolle y se aplique en nuestro país para la gestión de los barros tiene un mercado potencial actual

Cuadro 3

Evolución de los datos de la producción (t MF: toneladas de lodo) i de la gestión de los lodos de las aguas residuales depuradas				
	2005	2006	2007	2008
Producción de lodo deshidratado en la salida de las estaciones depuradoras de agua residual (t MF)				
Tratados	490.629	520.561	563.659	563.154
No tratados	48.724	26.727	29.931	21.435
Total lodo generado	539.353	547.288	593.590	584.589
Distribución de los tratamientos del lodo (t MF)				
Compostaje	179.272	203.165	298.126	287.475
Secado térmico	202.732	182.380	109.624	123.404
Digestiones aerobias/anaerobias	108.625	135.016	141.609	137.610
Otros			14.300	14.665
Total lodo tratado	490.629	520.561	563.659	563.154
Destinación final del lodo tratado (t MF)				
Agricultura y jardinería	272.124	332.489	427.417	421.496
Depósitos controlados	70.509	45.703	42.834	24.170
Valorización energética (cementera)	23.765	9.703	7.767	15.738
Restauración canteras		527	677	
Total eliminado	366.398	388.422	478.695	461.404

Fuente: Agencia Catalana del Agua. Generalitat de Catalunya.

Cuadro 4

Producción (toneladas de peso seco) de lodo de depuradora de los países miembros de la UE estimada a lo largo de los años					
	1995	2000	2005	2010	2020
Alemania	2.248.647	2.297.460	2.059.351	2.000.000	2.000.000
Reino Unido	1.120.000	1.066.176	1.544.919	1.640.000	1.640.000
Francia	750.000	855.000	910.255	1.600.000	1.600.000
Italia	609.256	850.504	1.070.080	1.500.000	1.500.000
España	685.669	853.482	1.064.972	1.280.000	1.280.000
Polonia	340.040	397.216	523.674	520.000	950.000
Holanda	550.000	550.000	550.000	560.000	560.000
Rumanía	–	–	137.145	165.000	520.000
Resto*	1.528.989	1.718.478	2.167.190	2.711.000	3.354.000
Total 27 estados	7.832.601	8.588.316	9.890.441	11.811.000	12.884.000

* 15 estados miembros los años 1995 y 2000.

Fuente: *Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land. Draft Summary Report 2. Baseline scenario, Analysis of risk and opportunities.* Milieu Ltd. & RPA for the EU Commission, 2009.

y creciente dentro de la Unión Europea, donde se estima que como mínimo estaremos generando un total de 12.884.000 toneladas de lodos (peso seco)/año en el 2020 (cuadro 4) entre todos los países miembros (Gendebien, 2009).

No hay que olvidar que, además de los barros procedentes de los tratamientos biotecnológicos de depuradoras de aguas residuales urbanas, se estima que en Cataluña se generan 6.939.243 toneladas/año de estiércoles y 12.507.217 m³/año de purín. Actualmente

estos residuos orgánicos tienen dos destinaciones principales: el abono de los cultivos y el tratamiento en centros de recogida y procesamiento de los excedentes (Llebot *et al.*, 2005). Por lo tanto, también aquí encontramos la aplicación de procesos biotecnológicos de manera similar a los barros de depuradora.

5.4

Actuaciones de biorremediación de suelos contaminados

Se ha estimado que la contaminación de suelos por hidrocarburos del petróleo y sus derivados en lugares potencialmente contaminados en Cataluña el año 2007 era de un 48,7% con respecto al total de contaminación (Solanas *et al.*, 2009). La biotecnología ambiental también nos ofrece procesos para realizar diferentes tipos de tratamientos de estos suelos.

Uno de estos tratamientos de suelos contaminados es la biorremediación. Esta tecnología se fundamenta en el uso de la actividad de los microorganismos para desintoxicar o eliminar contaminantes del medio. Esta biotecnología nos permite la transformación de los contaminantes en productos inocuos, habitualmente mediante la actividad enzimática microbiana. Por lo tanto, el proceso comporta una solución definitiva del problema, ya que no genera un residuo final, como puede pasar en otros tipos de tratamientos. También se busca que tenga un coste bajo en su aplicación y se convierta, por lo tanto, en una ventaja adicional. La biodegradación microbiana de los contaminantes está condicionada por factores relacionados con el tipo de contaminante y con las condiciones ambientales del emplazamiento (Solanas *et al.*, 2009). Consecuentemente, si podemos identificar estos factores, podremos aplicar una estrategia de MRM, realizar una gestión de las poblaciones microbianas presentes y aumentar la eficiencia de la biodegradación. Estos procesos microbianos se pueden realizar *in situ*, donde se ha producido la contaminación del suelo (sin excavación ni traslado del suelo), o *ex situ* (con excavación y traslado del suelo). No obstante, hace falta caracterizar el emplazamiento, hacer ensa-

yo de tratamiento de muestras del suelo contaminado en el laboratorio y finalmente hacer ensayos piloto, antes de aplicar el tratamiento a gran escala en el medio natural contaminado. También habrá que realizar un seguimiento cuantificado por diferentes parámetros del desarrollo efectivo del proceso de descontaminación, con el fin de asegurarnos de que se está produciendo adecuadamente según lo que teníamos establecido.

Tenemos dos ejemplos bien documentados en nuestro territorio. Uno de ellos es la descontaminación de suelos contaminados por aceites minerales en Lliçà de Vall, donde se aplicó un proceso de remediación dirigida por bioestimulación (condicionar los factores ambientales para potenciar la actividad de los microorganismos autóctonos del mismo suelo) con las poblaciones microbianas presentes. La contaminación de los hidrocarburos presentes se disminuyó hasta el 51% al cabo de 3 meses, hasta el 60% al cabo de 6 meses y hasta el 79% al cabo de 12 meses (Solanas *et al.*, 2009).

El otro ejemplo es una prueba piloto de biorremediación sobre un suelo contaminado por creosota en Callús. La creosota está formada por una mezcla de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) de los cuales se conoce la toxicidad. En este caso la tecnología utilizada fue una biorremediación por biopila dinámica (Viñas, 2005). Este procedimiento permite la gestión de diferentes factores. En los ensayos piloto, que duraron 6 meses, se pudieron mantener la aireación, la humedad óptima mediante el volteo de la tierra y el riego en agua. Se consiguieron unas degradaciones entre el 96% y el 100% para los HAP de tres anillos y del 46% y el 76% para los HAP de cuatro y cinco anillos.

La contaminación por nitratos de las aguas subterráneas debida a las aportaciones excesivas de éstos a los suelos, principalmente por la aplicación incontrolada de purín, es otro ámbito de actuación para los procesos biotecnológicos. Se han hecho ensayos utilizando procesos fundamentados en la desnitrificación bacteriana con el fin de eliminar nitratos de las aguas subterráneas contaminadas (Solanas, 2007).

6

Consideraciones finales

En las últimas décadas, la biotecnología ambiental nos está proporcionando nuevas herramientas metodológicas para una gestión sostenible de los recursos naturales y del medio ambiente, y consecuentemente nos facilita al mismo tiempo una mejora global de la calidad de vida. Todo eso ha sido posible a partir de un análisis más interdisciplinario del entorno natural, que ha sido facilitado por los nuevos conocimientos provenientes de diferentes campos científicos pero muy especialmente de la ecología microbiana y de las nuevas técnicas moleculares de genómica, proteómica y metabolómica. El uso combinado de estas disciplinas nos está aportando nuevos conocimientos sobre la composición y las funciones de los consorcios microbianos presentes en los ecosistemas naturales y, por lo tanto, nos permite desarrollar nuevas aplicaciones biotecnológicas en el control de los contaminantes, la regulación del ciclo de los elementos, la gestión de los recursos hídricos y energéticos y la mejora de la situación sanitaria.

7

Bibliografía

ACA (2009). *Programa de reutilització d'aigua a Catalunya*. Agència Catalana de l'Aigua, junio. Generalitat de Catalunya, pág. 75.

ACA (2010). *Programa d'actuacions per a la gestió dels fangs residuals generats en els processos de depuració d'aigües residuals urbanes de Catalunya*. Agència Catalana de l'Aigua, junio. Generalitat de Catalunya, pág. 120.

ARMENGOL, J.; DOLZ, J. (2009). "L'abastament d'aigua a Catalunya i la seva garantia. Generalitat de Catalunya". *Monogràfic. Aigua i activitat econòmica*. Nota d'economia 93-94, pág. 127-139.

BLANCH, A.R. (2007). "Biotecnologia i medi ambient". Puigdomènech, P.; Gòdia, R. (ed.). *Les biotecnologies*. Treballs de la Societat Catalana de Biologia 58, pág. 175-186.

BLANCH, A.R.; BELANCHE-MUNOZ, L.; BONJOCH, X.; EBDON, J.; GANTZER, C.; LUCENA, F.; OTTOSON, J.; KOURTIS, C.; IVERSEN, A.; KUHN, I.; MOCE, L.; MUNIESA, M.; SCHWARTZBROD, J.; SKRABER, S.; PAPAGEORGIOU, G.T.; TAYLOR, H.; WALLIS, J.; JOFRE, J. (2006). "Integrated analysis of established and novel microbial and chemical methods for microbial source tracking". *Appl. Environ. Microbiol.* 72, pág. 5915-5926.

BOECKS, P.; VAN CLEEMPUT, O.; VILLARALVO, I. (1997). "Methane oxidation in soils with different textures and land use". *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 49, pág. 91-95.

BRAGG, J.R.; PRINCE, R.C.; HARNER, E.J.; ATLAS, R.M. (1994). "Effectiveness of bioremediation for the Exxon Valdez oil spill". *Nature* 368, pág. 413-418.

DÍAZ, E.; FERNÁNDEZ, A.; PRIETO, M.A.; GARCÍA, J.L. (2001). "Biodegradation of aromatic compounds by *Escherichia coli*". *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 65, pág. 523-569.

DU, Z.; LI, H.; GU, T. (2007). "A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy". *Biotechnol. Advances* 25, pág. 464-482.

GENDEBIEN, A. (2009). *Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land. Draft Summary Report 2. Baseline scenario, Analysis of risk and opportunities*. Milieu Ltd. & RPA for the EU Commission.

JOFRE, J. (2007). "Oportunitats relacionades amb el cicle integral de l'aigua per a les empreses de l'Àrea Metropolitana de Barcelona". *Pla estratègic Metropolità de Barcelona*. Barcelona. Col·lecció estratègica, núm. 5.

- LLEBOT, J.E.; JORGE-SÁNCHEZ, J.; QUERALT, A.; RODÓ, J. (2005). *Informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*. Generalitat de Catalunya. Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible, Servei de Meteorologia i Institut d'Estudis Catalans, pág. 815.
- MAURE, A.; BARAS, E. (2010). "La política energètica a Catalunya i la participació de les energies renovables". *Monogràfic. Energies renovables: present i futur*. Generalitat de Catalunya. Nota d'economia 95-96, pág. 67-88.
- MOHANTY, S.R.; BODELIER, P.L.E.; FLORIS, V.; CONRAD, R. (2006). "Differential effects of nitrogenous fertilizers on methane-consuming microbes in rice field and forest soils". *Appl. Environ. Microbiol.* 72, pág. 1346-1354.
- Pla de l'energia de Catalunya 2006-2015*. Revisió 2009. Generalitat de Catalunya.
- RITTMANN, B.E. (2006). "Microbial ecology to manage processes in environmental biotechnology". *Trends Biotechnol.* 24, pág. 261-266.
- ROSENBERG, N.J.; IZAURRALDE, R.C. (2001). *Storing Carbon in Agricultural Soils: A Multi-Purpose Environmental Strategy*. Holanda. Kluwer Academic Publishers.
- SOLANAS, A.M. (2007). "La bioremediació". Puig-Domènech, P.; Gòdia, R. (ed.). *Les biotecnologies*. Treballs de la Societat Catalana de Biologia 58, pág. 187-202.
- SOLANAS, A.M.; RIERA REVERTÉ, M.; VIDAL GAVILÁN, G. (2009). *Guia de bioremediació de sòls contaminats per hidrocarburs del petroli*. Agència Catalana de Residus. Generalitat de Catalunya.
- SWANNELL, R.P.J.; LEE, K.; MCDONAGH, M. (1996). "Field evaluation of marine oil spill bioremediation". *Trends Biotecnol.* 11, pág. 344-352.
- VERSTRAETE, W. (2007). *Microbial ecology and environmental biotechnology*. ISME J. 1, pág. 4-8.
- VIÑAS, M. (2005). *Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos: caracterización microbiológica, química y ecotoxicológica*. Universitat de Barcelona. [Tesis doctoral]
- WATERS, C.M.; BASSLER, B.L. (2005). "Quorum Sensing: cell-to-cell communication in bacteria". *Annu. Rev. Cell. Dev. Biol.* 21, pág. 319-346.