



31

2018

MEDITERRÁNEO ECONÓMICO

COLECCIÓN ESTUDIOS SOCIOECONÓMICOS

BIOECONOMÍA Y DESARROLLO SOSTENIBLE

Coordinadores:

Alfredo Aguilar
Daniel Ramón
Francisco J. Egea

 **cajamar**
CAJA RURAL



MEDITERRÁNEO
ECONÓMICO

31

**BIOECONOMÍA
Y DESARROLLO SOSTENIBLE**

Coordinadores

Alfredo Aguilar

Daniel Ramón

Francisco J. Egea

MEDITERRÁNEO ECONÓMICO

CONSEJO ASESOR

*Juan del Águila Molina
Joaquín Auriolas Martín
Horacio Capel Sáez
Francisco Ferraro García
José María García Álvarez-Coque
Jordi Nadal i Oller
Antonio Pérez Lao
Manuel Pimentel Siles*

DIRECTOR DE LA COLECCIÓN

Manuel Gutiérrez Navas

COORDINADORES [NÚM. 31]

Alfredo Aguilar, Daniel Ramón y Francisco J. Egea

MEDITERRÁNEO ECONÓMICO [NÚM. 31] BIOECONOMÍA Y DESARROLLO SOSTENIBLE

© 2018 de la edición: Cajamar Caja Rural
© 2018 del texto: los autores

Edita: Cajamar Caja Rural

www.mediterraneoekonomico.com

mediterraneo@mediterraneoekonomico.com

Diseño de la Colección: Francisco J. Fernández Aguilera

Maquetación: Beatriz Martínez Belmonte

Imagen de cubierta: x

Imprime: Escobar Impresores

ISSN: 1698-3726

ISBN-13: 978-84-95531-89-6

Depósito legal: AL-1166-2018

Fecha de publicación: mayo de 2018

Impreso en España / *Printed in Spain*

Cajamar Caja Rural no se responsabiliza de la información y opiniones contenidas en esta publicación, siendo responsabilidad exclusiva de sus autores.

© Todos los derechos reservados. Queda prohibida la reproducción total o parcial de esta publicación, así como la edición de su contenido por medio de cualquier proceso reprográfico o fónico, electrónico o mecánico, especialmente imprenta, fotocopia, microfilm, offset o mimeógrafo, sin la previa autorización escrita del editor.

PRESENTACIÓN.....	7
<i>Manuel Gutiérrez Navas</i>	
INTRODUCCIÓN.....	11
<i>Alfredo Aguilar, Francisco J. Egea y Daniel Ramón</i>	
BIOECONOMÍA Y SOCIEDAD.....	15
<i>Alfredo Aguilar Romanillos</i>	

I. INICIATIVAS EUROPEAS EN BIOECONOMÍA

UNA OPORTUNIDAD PARA LAS BIOINDUSTRIAS EN EUROPA: LA ASOCIACIÓN PÚBLICO-PRIVADA DE LA UNIÓN EUROPEA	37
<i>Ana Ruiz Sierra, Marta Campos Iturralde, Pilar Llorente Ruiz de Azúa, Paloma Mallorquín Esteban, Eleni Zika y Philippe Mengal</i>	
DESARROLLO DE LA BIOECONOMÍA EN ALEMANIA, AYER, HOY Y MAÑANA: DESAFÍOS Y PERSPECTIVAS	55
<i>Christian Patermann</i>	
PERSPECTIVAS DE UNA BIOECONOMÍA FORESTAL EN EL MEDITERRÁNEO	63
<i>Inazio Martínez de Arano, Marc Palahí, Christine Farcy, Eduardo Rojas y Lauri Hetemaki</i>	

II. PERSPECTIVAS DE LA BIOECONOMÍA EN ESPAÑA

LA BIOECONOMÍA COMO OPORTUNIDAD PARA LA ECONOMÍA ESPAÑOLA: LA VISIÓN DESDE EL OBSERVATORIO DE BIOECONOMÍA	95
<i>Manuel Lainez, María Jesús Periago, Nuria Arribas y Concepción Meneses</i>	
OPORTUNIDADES DE LA BIOECONOMÍA EN ANDALUCÍA: ESTRATEGIA ANDALUZA DE BIOECONOMÍA CIRCULAR.....	119
<i>Ricardo Domínguez García-Baquero, Judit Anda Ugarte, Carmen Capote Martín, Teresa Parra Heras, Alejandro Sanz Pagés y María del Sol Cuenca Martín</i>	
CLAMBER. LA APUESTA DE CASTILLA-LA MANCHA POR LA BIOECONOMÍA	133
<i>Javier Mena Sanz</i>	
HACIA UNA BIOECONOMÍA EN EXTREMADURA.....	153
<i>Jesús Alonso Sánchez</i>	

III. NECESIDAD DE UNA SÓLIDA BASE CIENTÍFICA Y TÉCNICA EN BIOECONOMÍA

LOS GENOMAS DE LAS PLANTAS CULTIVADAS: USOS Y DEBATES	171
<i>Pere Puigdomènech</i>	
LA BIOLOGÍA SINTÉTICA COMO MOTOR DE LA BIOECONOMÍA Y DE LA CUARTA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL	183
<i>Alberto Sánchez-Pascuala y Victor de Lorenzo</i>	

IV. BIOECONOMÍA, BIOINDUSTRIAS Y SEGURIDAD ALIMENTARIA

LAS BIOINDUSTRIAS EN EL ENTORNO DE LA BIOECONOMÍA: NECESIDADES, OPORTUNIDADES Y BENEFICIOS	203
<i>Pilar Caro y Ion Arocena</i>	
LAS BIOECONOMÍA EN EL SISTEMA AGROALIMENTARIO: SEGURIDAD ALIMENTARIA.....	219
<i>Montaña Cámara Hurtado y María Victoria Castillo Ruiz-Cabello</i>	
BIOECONOMÍA, SEGURIDAD ALIMENTARIA Y SOSTENIBILIDAD	235
<i>José Pío Beltrán</i>	

V. EJEMPLOS DE ÉXITO EN LA BIOECONOMÍA

SUBPRODUCTOS HORTOFRUTÍCOLAS PARA UNA BIOECONOMÍA CIRCULAR.....	251
<i>María Carmen Villarán, María Chávarri, Thomas Dietrich y Elena Rodríguez</i>	
VALORIZACIÓN DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA CADENA DEL ACEITE DE OLIVA ...	273
<i>Julio Berbel, Carlos Gutiérrez-Martín y José Antonio La Cal</i>	
LOS MICROORGANISMOS COMO ELEMENTOS CLAVE DE LA BIOECONOMÍA.....	291
<i>María José López, Francisca Suárez-Estrella y Joaquín Moreno Casco</i>	
CONTRIBUCIÓN DE LAS MICROALGAS AL DESARROLLO DE LA BIOECONOMÍA	309
<i>Francisco Gabriel Acién Fernández, José María Fernández Sevilla y Emilio Molina Grima</i>	
PRESENTE Y FUTURO DEL CULTIVO DE LAS MICROALGAS PARA SU USO COMO SUPERALIMENTOS	333
<i>José Luis García, Marta de Vicente y Beatriz Galán</i>	

VI. BIOECONOMÍA Y BIOENERGÍA

EL PAPEL DE LA BIOENERGÍA EN LA NUEVA BIOECONOMÍA.....	353
<i>Mercedes Ballesteros Perdices</i>	
EL BIOETANOL COMO UN EJEMPLO PARA IDENTIFICAR BARRERAS A LA BIOECONOMÍA.....	371
<i>Pablo Gutiérrez Gómez y Ricardo Arjona Antolín</i>	



PRESENTACIÓN

Manuel Gutiérrez Navas
Director de Mediterráneo Económico

Vivimos en un mundo marcado por tres circunstancias que ponen en riesgo nuestro modo de vida y el de las futuras generaciones. La limitada disponibilidad de agua, suelo y energía con los que atender los niveles de consumo creciente de una población mundial en expansión, la problemática gestión de los residuos agropecuarios e industriales resultantes, y las consecuencias sociales y económicas del calentamiento global, dibujan un escenario que nos obliga a buscar alternativas eficientes y sostenibles al paradigma de la economía basada en los combustibles fósiles y la explotación irracional del medio. Este es actualmente el mayor reto al que se enfrenta la humanidad, y como tal ya centra la agenda de gobiernos e instituciones públicas y privadas de todo el mundo. Una preocupación global, y sobradamente fundamentada, cuyo traslado a la economía real de manera definitiva sigue todavía pendiente.

Entre esas alternativas que estamos obligados a diseñar, los planteamientos de la 'bioeconomía' se presentan como una caja de herramientas multidisciplinar y colaborativa que, si bien no supone una solución ni inmediata ni definitiva, porque tal cosa no existe, sí nos marca claramente un camino. El término se ha hecho cada vez más presente en los medios de comunicación y en el debate público, y ya no es patrimonio exclusivo de los entornos técnicos y profesionales, como sucedía hace apenas unos años. A ello está favoreciendo especialmente el decidido impulso que desde las diferentes Administraciones, empezando por la Unión Europea, se está dando para llevar estos planteamientos de la teoría a la práctica, como fórmula para incrementar la competitividad de nuestro tejido productivo en el mercado global a partir de la inversión en conocimiento y tecnología, el uso inteligente y eficiente de los recursos disponibles, el diseño de estrategias empresariales tan sostenibles como rentables que demanden empleos cualificados, y la colaboración permanente entre el sistema ciencia-tecnología y los distintos agentes económicos, en el marco de lo que ha venido en llamarse 'Horizonte 2020'.

A grandes rasgos, la bioeconomía se podría definir como el conjunto de actividades económicas, intensivas en tecnología y conocimiento, que generan productos y servicios de alto valor añadido utilizando como materia prima recursos de origen biológico. En este sentido, propone un nuevo modelo productivo basado en la optimización de fuentes de energía y recursos, priorizando el empleo de aquellos de carácter renovable. Su objetivo, en definitiva, es garantizar, mediante el uso responsable del material biológico del planeta, la seguridad alimentaria, la biodiversidad y la protección del medioambiente.

Aunque todavía quede mucho por hacer, en Europa la bioeconomía comienza a ser una realidad. En conjunto genera anualmente un volumen de negocio que sobrepasa los dos billones de euros y da empleo a más de 22 millones de personas en la industria agroalimentaria, química, biotecnológica y energética. En España, por su parte, el peso específico del sector agroalimentario, la diversidad de nuestra oferta, su sofisticación, la multiplicidad de agentes implicados en red y sus condicionantes ambientales, hacen de nuestro país un entorno idóneo para el desarrollo de muchas de las premisas más avanzadas de la bioeconomía en ámbitos muy diferentes, especialmente en aquellos más dinámicos y más proclives al emprendimiento y la incorporación de la I+D+i en su modelo de negocio.

La bioeconomía es, por tanto, una de las principales respuestas de la sociedad del conocimiento a los grandes retos demográficos, alimentarios, energéticos y ambientales del siglo XXI. Indudablemente, lleva implícito un gran salto adelante de la humanidad en cuanto al uso intensivo de la tecnología en todas las fases del proceso productivo. Pero, sobre todo, ha de suponer un gran cambio en el terreno de las mentalidades, en la manera en cómo entendemos el carácter circular de la economía y cómo gestionamos los recursos de origen biológico a nuestro alcance. No obstante, se trata de un concepto amplísimo, todavía necesariamente ambiguo tanto por lo reciente de su acuñación teórica, como por su transversalidad, su alcance multisectorial y la complejidad de las fuerzas productivas que involucra en su aplicación.

Todo ello justifica sobradamente la oportunidad de este volumen de Mediterráneo Económico que presentamos, como determina la línea editorial de la colección de estudios de referencia de Cajamar, con una clara vocación divulgativa, pero en este caso también con el ambicioso objetivo, nada fácil en el caso de una disciplina en construcción, de aportar una síntesis en castellano tanto del cuerpo teórico como de los desarrollos prácticos más novedosos de la misma.

Para ello hemos contado con los mejores compañeros de viaje. Desde la creación de nuestra cabecera en el año 2002, es la primera vez que participan 54 autores en una única entrega de Mediterráneo Económico, como también es la primera vez que son tres los coordinadores de un solo volumen. Tres especialistas, Alfredo Aguilar, Daniel Ramón y Francisco J. Egea, que colaboran con Cajamar desde hace años, y con los que tenemos mucho trabajo por delante.

Un volumen en el que, por otra parte, hemos querido conectar de forma expresa el objeto de estudio, la evolución reciente y las posibilidades de futuro de la bioeconomía global, con el concepto de sostenibilidad. En la banca cooperativa, por nuestra naturaleza social y nuestra vinculación con los sistemas productivos locales y el sector agroalimentario exportador, tenemos una visión propia al respecto, por el papel crucial que la agricultura, la ganadería y las industrias asociadas tienen en la lucha contra el cambio climático y la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible que Naciones Unidas estableció en 2015, que marcarán la agenda de la sostenibilidad durante los próximos años a escala global. De hecho, no hay sectores más transversales para los 17 ODS y sus 169 metas asociadas que el sector agroalimentario y el financiero, es decir, nuestros dos sectores estratégicos. En consecuencia, el Grupo Cooperativo Cajamar participa muy activamente en el debate social al respecto a través de la Asociación Española de Banca y de la Asociación Europea de



Banca Cooperativa, así como en otros espacios de representación como Forética y Spainsif, aportando propuestas relacionadas con el nuevo escenario que se abre en términos de costes y riesgos, pero también implica nuevas oportunidades que el sector bancario ha de saber detectar propiciando un balance positivo de la transición hacia una economía baja en carbono.

De esta forma, para la banca social cooperativa, de la que Cajamar es exponente en España, el concepto de 'responsabilidad social', centrado tradicionalmente en la creación de valor compartido con el entorno, se ha visto superado y sustituido por el de 'sostenibilidad', por nuestro afán de seguir avanzando en nuestro compromiso con el territorio en el que desarrollamos nuestra actividad, y la necesidad de gestionar nuevos riesgos y abrir nuevas oportunidades desde una actividad financiera que repercute de forma social y ambientalmente positiva en la sociedad.

En este sentido, y fruto de nuestra evolución conjunta con la agricultura de vanguardia, en Cajamar estamos plenamente convencidos de las posibilidades de la bioeconomía. La oferta especializada de productos y servicios financieros, de soluciones de valor, que, como caja rural y entidad cooperativa de crédito, están dirigidos prioritariamente al sector agroalimentario, se complementa en nuestro caso con una infraestructura de innovación y transferencia del conocimiento, que trabaja desde el paradigma de la competitividad y la sostenibilidad de nuestro tejido productivo. Desde hace más de cuarenta años promovemos el desarrollo tecnológico y la innovación a través de nuestros centros de experimentación y de las numerosas colaboraciones que mantenemos con universidades, centros públicos de investigación y empresas. Además de ser el instrumento financiero del sector, actuamos como un vector de modernización más, fomentando a pie de campo la adaptación de nuevas herramientas, nuevos métodos, nuevos caminos, gracias a nuestro conocimiento directo de agricultores y empresas, y a nuestro contacto diario con técnicos e investigadores. En definitiva, gracias a nuestra presencia activa en toda la cadena de valor, desde la generación de conocimiento al consumidor.

Las condiciones agroambientales de nuestro país, la competitividad de nuestras empresas, la capacidad de innovación de nuestros investigadores y el apoyo institucional desplegado por las diversas Administraciones públicas nos hacen ser optimistas de cara al futuro. Desde Cajamar queremos desempeñar un papel cada vez más activo, financiando los nuevos proyectos empresariales y contribuyendo al debate y la transferencia de conocimientos, como hoy hacemos con la publicación de este volumen monográfico, con el objetivo común de hacer crecer y consolidar a medio plazo un sector económico potente y competitivo.



INTRODUCCIÓN

Alfredo Aguilar, Francisco J. Egea y Daniel Ramón
Coordinadores

Conceptos como bioeconomía, economía circular y otros similares aparecen regularmente en los medios de comunicación en contextos muy diferentes y con interpretaciones que dificultan su comprensión y lectura crítica. En este sentido los editores de esta obra sobre «Bioeconomía y desarrollo sostenible», hemos aceptado con satisfacción la invitación que nos hizo Cajamar de publicar un volumen sobre este tema dentro de la serie Mediterráneo Económico. Esta obra pretende llenar el vacío existente en lengua castellana sobre algunos temas candentes relacionados con el desarrollo de una bioeconomía sostenible. Para ello ha contado con la colaboración de reconocidos expertos en las respectivas áreas.

La bioeconomía plantea un paradigma consistente en una nueva forma de gestionar los recursos biológicos del planeta que sea al mismo tiempo sostenible, económicamente viable y generadora de nuevos empleos. La Unión Europea fue pionera en este abordaje con el lanzamiento en 2012 de una estrategia para una bioeconomía sostenible. Poco tiempo después, la mayoría de los países europeos, incluida España en 2016, así como numerosos otros países del resto del mundo, lanzaron sus propias estrategias en bioeconomía. Es más, en lo que respecta a nuestro país, varias Comunidades Autónomas han lanzado o tienen en marcha diversas iniciativas con objeto de promover iniciativas relacionadas con la bioeconomía sostenible en sus territorios.

Los desafíos a los que se enfrenta la humanidad en su conjunto, tales como el incremento de la población, la seguridad y la calidad alimentaria, el cambio climático y las posibles formas de adaptarse a él o de mitigar sus efectos, la degradación del medioambiente o la reducción de la dependencia energética de los recursos fósiles, entre otros, necesitan una respuesta decidida, coordinada y eficaz. La bioeconomía es un elemento clave y decisivo en la búsqueda de soluciones a estos retos. Para optimizar el impacto de la bioeconomía es necesario que sus iniciativas se coordinen con otras de índole social, político, industrial, financiero, e incluso diplomático.

La bioeconomía no es únicamente reactiva frente a los problemas existentes, sino que también puede ser fuente de nuevos bioproductos derivados de los residuos agrícolas o municipales, la mayoría de los cuales presentan nuevas propiedades y aplicaciones, son sostenibles y tienen un menor impacto medioambiental y de emisión de gases de efecto invernadero que sus equivalentes derivados del petróleo. Ejemplos que ya están disponibles son biolubricantes, bioplásticos, biocombustibles o elementos para las industrias de construcción, mobiliario y del automóvil, entre otros. No obstante,

el potencial completo de las biorrefinerías, que tienen vocación de sustituir gradualmente a las refinerías de petróleo, es inmenso y está aún por desarrollarse plenamente.

Los problemas que aborda la bioeconomía están presentes en todo el planeta. Las soluciones, sin embargo, tendrán que ser locales, adaptadas al contexto socioeconómico, al tipo de agricultura y de clima, así como al desarrollo y madurez del tejido industrial de la región o país donde se trate. Por ello es necesario, simultáneamente, comenzar a desarrollar agendas globales, promover una «biodiplomacia» que estimule la integración de la bioeconomía en los Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas.

El presente volumen consta de seis secciones temáticas donde se abordan los temas esbozados anteriormente. Están precedidas por una introducción, en la cual se analizan de forma crítica varios de los nexos e interacciones entre bioeconomía y sociedad. La primera de las cinco secciones resume tres iniciativas europeas en bioeconomía. Una de ellas describe la asociación público-privada que reúne a las bioindustrias europeas y a la Comisión Europea. Otra es un análisis del desarrollo de la bioeconomía en Alemania, país pionero en bioeconomía y las lecciones aprendidas durante estos años. La última describe y hace un balance sobre las perspectivas para una bioeconomía forestal en el Mediterráneo.

La segunda sección se centra en las perspectivas de la bioeconomía en España, tanto a escala estatal, presentando el Observatorio de Bioeconomía, como las iniciativas y estrategias en curso en varias comunidades autónomas como Andalucía, Castilla-La Mancha y Extremadura.

La bioeconomía necesita una sólida base científica y técnica para que fructifique, y este es el tema que se aborda en la tercera sección, donde se presentan dos ejemplos muy ilustrativos de investigación de excelencia y al mismo tiempo con una gran influencia en la bioeconomía. El primero trata del estudio y el análisis de los genomas de plantas cultivadas y el segundo de la biología sintética como motor de la bioeconomía.

En necesario recordar una vez más que el objetivo primario de la bioeconomía, y al que están supeditados los demás, es garantizar la seguridad alimentaria. Por eso en la cuarta sección se aborda este tema desde tres perspectivas complementarias: la de las bioindustrias, la del sistema agroalimentario y la seguridad alimentaria y la que liga bioeconomía, seguridad alimentaria y sostenibilidad.

Uno de los comentarios más frecuentes sobre la bioeconomía es que a veces se percibe como demasiado abstracta y con escasas conexiones con la vida cotidiana. Por eso hemos querido mostrar en la quinta sección ejemplos de éxito en bioeconomía. Se trata de cinco aplicaciones prácticas, actividades, iniciativas e investigaciones que permitan acercar al lector a realidades concretas. El primer ejemplo se centra en el uso de los subproductos hortofrutícolas y el segundo en la cadena del aceite de oliva. En ambos casos, se muestra cómo estos subproductos y desechos contribuyen a la bioeconomía y a la economía circular y, en definitiva, a la sostenibilidad y a dinamizar la economía. El tercer ejemplo narra cómo los microorganismos poseen una capacidad casi infinita de producir nuevas moléculas beneficiosas para uso humano, animal y vegetal. Por último, dos artículos abordan el estudio de microalgas, uno desde la perspectiva de su producción a gran escala, y el otro como uso para lo que se ha venido a llamar superfoods.



La bioenergía y los biocombustibles son temas candentes en la bioeconomía y se abordan en la sexta y última sección de este volumen con dos artículos. El primero de ellos presenta el papel de la bioenergía, mientras que el segundo utiliza el ejemplo del etanol mostrando sus posibilidades y limitaciones en la bioeconomía.

Los 20 artículos que constituyen este volumen tienen como principal objetivo estimular el debate y la discusión entre los distintos actores de la bioeconomía y acelerar la toma de decisiones conducentes a iniciativas concretas. Es necesario resaltar el carácter multidisciplinar del contenido del libro, donde se incluyen diversas áreas de conocimiento y disciplinas científicas como son, la biotecnología, genética, microbiología, química, farmacia, ingenierías y también la política y la gestión. Esto es un reflejo del alcance de la bioeconomía en la sociedad, de cómo la bioeconomía va a formar parte de la vida cotidiana en el futuro garantizando la sostenibilidad de los sistemas productivos. Nunca antes había quedado tan de manifiesto la necesidad de coordinar la planificación y la gestión política, la investigación aplicada y los sistemas de producción, dando lugar a un nuevo concepto de cadena de valor en el que se implican todos sus actores, incluyendo los consumidores, para dar impulso a un nuevo paradigma de desarrollo económico y de organización de la producción.

La bioeconomía también supone un cambio de mentalidad en el ámbito de la ciencia y la investigación. Tradicionalmente estas se han centrado en una alta especialización dentro de áreas acotadas, por ejemplo en «producción» agraria, ganadera, pesquera o forestal. En el ámbito de la bioeconomía, la ciencia adquiere un carácter colaborativo, potenciando la transferencia, de forma que el flujo de conocimiento desde las distintas disciplinas contribuye, desde cada ámbito, a objetivos comunes, como son los ya citados de eficiencia, sostenibilidad, reducción de la dependencia de fuentes de energía y de materias primas fósiles, sobre todo derivados del petróleo. En este sentido, el aprovechamiento de lo que ahora son residuos en los sistemas de producción juega un papel relevante en la bioeconomía. Los avances científicos y desarrollos tecnológicos son la base para convertir dichos residuos en nueva materia prima que puede, tanto reincorporarse a la cadena de valor de la que proviene, como servir para generar nuevas cadenas y nuevos productos que abastecerán nuevos mercados. El beneficio de este nuevo paradigma de economía es muy alto, puesto que no solo debemos tener en cuenta el valor de mercado de los bioproductos o los puestos de trabajo que se generan, sino también los beneficios ambientales, la reducción de las huellas de los sistemas de producción, la mitigación del cambio climático y el valor de los servicios ecosistémicos que se preservan mediante la adopción de prácticas más eficientes, por ejemplo en lo que respecta al uso de recursos naturales y combustibles fósiles.

El desarrollo de modelos para la evaluación del ciclo de vida (LCA) de productos, cadenas de valor, empresas o actividades económicas es una herramienta para obtener indicadores objetivos de estas afirmaciones.

Este libro dibuja un mapa de cómo se aborda la bioeconomía desde las perspectivas diferentes de las áreas de conocimiento implicadas. De esta forma el lector puede comprender el papel fundamental que juega cada una de ellas en la bioeconomía. Por ejemplo, en el ámbito de la gestión política se puede estudiar el papel fundamental de las instituciones europeas en la planificación de la bioeconomía y en la puesta en marcha de instrumentos para hacerla realidad, como ya se ha dicho

anteriormente, y se describen con detalle la puesta en marcha de partenariados público-privados como BBI o la gestión de instituciones como el European Forest Institute (EFI) han sido motores para la implementación de los principios de la bioeconomía. Desde un punto de vista más relacionado con la economía, el contenido de la obra orienta al lector sobre oportunidades para los emprendedores que se planteen crear empresas de base tecnológica o desarrollar nuevos modelos de negocio.

Sin duda existen dificultades y muchas de ellas son de carácter científico-técnico, como por ejemplo el alto riesgo que supone para un emprendedor escalar procesos desde el laboratorio o planta piloto a plantas de demostración o industriales. También supone un riesgo afrontar la producción y comercialización de nuevos bioproductos que requieren de la generación de un nuevo mercado, con la consiguiente incertidumbre sobre su aceptación por parte del consumidor y la necesidad de establecer estrategias de comunicación bien planificadas. Así, los emprendedores deberán tener un acceso a financiación suficiente de forma que les permita afrontar los primeros años del escalado industrial y la consolidación de mercados, minimizando los riesgos iniciales. Para ello las Administraciones públicas, algunas entidades de crédito y programas nacionales y europeos facilitan numerosas vías de financiación en procesos con distintas escalas de competitividad, que estimulan la I+D+i orientada a la puesta en el mercado de nuevos productos. Otras dificultades son de carácter administrativo o legal, por ejemplo, en lo que se refiere a determinados bioprocesos o a la reutilización de residuos con fines de producción de fertilizantes, energía o alimentación animal. Es por ello que la Administración pública, junto con las empresas interesadas, los centros de I+D+i y demás actores de las cadenas de valor, deben colaborar en la adaptación de las normativas para la eliminación de barreras administrativas y la adopción de medidas de control que garanticen la inocuidad de todos los procesos para la salud humana, del medioambiente y de la biodiversidad.

Por consiguiente, los actores de la bioeconomía son tanto los científicos y técnicos como los agricultores, ganaderos, pescadores, gestores de áreas forestales, los bioemprendedores, el mundo industrial en general, los sectores financieros, los líderes políticos, y sobre todo la sociedad en su conjunto. No hemos de olvidar que la bioeconomía no es ni una disciplina académica, ni una nueva tecnología, ni un sector industrial. Es todo eso y mucho más. Es, sobre todo, la interacción de todos esos elementos, apoyados por la sociedad la que está convirtiendo la bioeconomía en un nuevo movimiento. Hay incluso quien empieza a llamarla la cuarta revolución industrial. La bioeconomía plantea una nueva forma de relacionarnos los humanos con el medioambiente y una nueva dinámica que muy posiblemente continúe en las próximas generaciones. Este proceso ya está en marcha y ha comenzado en muchas partes del mundo. Este libro, es una modesta contribución hacia una nueva sociedad que asuma que, como decía Gandhi, «La Tierra provee lo suficiente para satisfacer las necesidades de cada hombre, pero no para la codicia de cada hombre».



BIOECONOMÍA Y SOCIEDAD

*Alfredo Aguilar Romanillos**

Director grupo de trabajo «Bioeconomía», Federación Europea de Biotecnología;
exjefe de Unidad Biotecnologías, Comisión Europea

Resumen

La bioeconomía tiene muchas facetas. Necesita una sólida base científico-técnica y un tejido agroindustrial dinámico e innovador para ser capaz de abordar rápida y eficazmente los nuevos retos que se le presenten. Además, la bioeconomía, al tener un abordaje interdisciplinario e intersectorial necesita interactuar con un gran número de interlocutores sociales, tanto a escala local, regional, nacional y global. El éxito de la bioeconomía dependerá, en gran parte, de la repuesta que sepa dar a las numerosas cuestiones éticas, tales como destino del suelo, reparto de los recursos hídricos, sostenibilidad de la biomasa y de los ecosistemas y medida del impacto y beneficios de la bioeconomía.

Los retos a los que se enfrenta la humanidad son globales: seguridad alimentaria, superpoblación, cambio climático, nuevas fuentes de energía, entre otros, y la respuesta debe serlo también. Es necesario reforzar el diálogo bilateral y global con objeto de acordar una agenda común que conduzca a acciones concertadas de los numerosos países que han elaborado estrategias de bioeconomía. Con objeto de alcanzar el máximo impacto sería deseable que las iniciativas en bioeconomía se incorporen a los procesos multilaterales, tales como los Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas y similares. Para ello, se necesita urgentemente el desarrollo de una «Biodiplomacia».

Abstract

The bioeconomy is multifaceted. It needs a solid scientific and technical base and a dynamic and innovative agroindustrial fabric in order to quickly and effectively address any new challenges that arise. In addition, the bioeconomy is interdisciplinary and intersectoral, meaning it must interact with great number of social partners, at the local, regional, national and global scale. The success of the bioeconomy will depend, to a great extent, on its responses to the numerous moral questions, such as land use, water resource allocation, and sustainability of the biomass and ecosystems, as well as its impact and benefits.

The challenges humanity faces are global, including food security, overpopulation, climate change, and new energy sources, and our response to these must be, too. It is necessary to reinforce bilateral and global dialogue to agree on a common agenda that will lead to coordinated action from the numerous countries which have developed bioeconomy strategies. To achieve the greatest possible impact, bioeconomy initiatives should be added to multilateral processes, such as the United Nations Sustainable Development Goals. To do this, we urgently need to promote a «Biodiplomacy».

1. Introducción

El lector, a lo largo de los capítulos que forman este volumen, podrá percibir la dimensión interdisciplinaria e intersectorial de la bioeconomía. El primer abordaje a la bioeconomía suele ser reduccionista. Incluso a veces es percibida con un cierto escepticismo, como si la bioeconomía no fuera más que un nombre nuevo para denominar una actividad conocida y familiar. Así, dependiendo de los distintos operadores, a la bioeconomía se le ha identificado

* Las opiniones expresadas en este artículo son las del autor y no pretenden representar las de ninguna institución, organismo o país mencionado en el mismo.

como una nueva versión de la biotecnología, o de la agricultura, o de la silvicultura o de muchos otros sectores que tocan la bioeconomía. Es cierto que la bioeconomía es parte y se nutre de los conocimientos y experiencias de muchas disciplinas científicas y tecnológicas, como también de diversos sectores industriales. Pero como se puede ver en numerosos ejemplos en otros capítulos de este libro, la bioeconomía trasciende las disciplinas científicas y tecnológicas, así como los sectores industriales, cuando adquiere un impacto socioeconómico y cobra una plena dimensión política con una decidida vocación transformadora de nuestras sociedades. No es pretencioso afirmar que la bioeconomía pretende ser, por una parte, una catarsis sobre la forma en que gestionamos los recursos naturales y la biosfera, y por otra intenta llamar la atención sobre la necesidad de un nuevo paradigma para gestionar los grandes desafíos que la humanidad tiene planteados en la actualidad, tales como cambio climático, seguridad alimentaria, incremento de la población, uso sostenible de los recursos naturales y preservación del medioambiente.

A partir de los datos que salen a la luz sobre aspectos aparentemente tan diferentes como el ritmo de crecimiento de la producción agrícola, uso de agua, aumento de la población, desperdicio de alimentos, etc., numerosos pensadores y líderes políticos indican que nuestro sistema lineal de producción y crecimiento económico no es sostenible a escala planetaria. Es necesario, por tanto, llevar a cabo una profunda reflexión sobre cómo gestionar y hacer compatible el uso racional y sostenible de los recursos biológicos con un incremento de la población mundial imparable, al menos en las próximas décadas, que permita, al mismo tiempo, un desarrollo económico lo más inclusivo posible. A esa reflexión la bioeconomía pretende dar respuestas que sean sólidas desde el punto de vista científico-técnico, económicamente viables, sostenibles medioambientalmente, socialmente aceptables y cuyos beneficios lleguen a la mayor parte de la población.

Este capítulo intenta resaltar la importancia de una sólida base científico-técnica y de un tejido industrial dinámico e innovador como prerequisites para que la bioeconomía tenga éxito. También se esbozan otros temas que trascienden los puramente académicos o técnicos, como pueden ser el establecimiento de una agenda común para la bioeconomía, lo que implica entre otras cosas un diálogo entre los poderes públicos, la industria, el mundo académico y la sociedad en su conjunto. También se trata la necesidad de una bioética para la bioeconomía, ya que sería un grave error tener un abordaje reduccionista. Hay numerosos temas en la toma de decisiones y en la aplicación de la bioeconomía en la sociedad, que requieren reflexiones y discusiones con contenidos éticos con el objeto de aunar consensos en la toma de decisiones. Otro tema que requerirá estudios y discusiones mucho más profundas que las que se esbozan en este artículo es el de la gobernanza de la bioeconomía. Por último, se hace una reflexión sobre lo que se ha venido en llamar *biodiplomacia*, de forma que los grandes retos del planeta sean discutidos y se tomen decisiones en los grandes foros internacionales. En resumen, este capítulo intenta modestamente esbozar, de una forma no exhaustiva y sin ninguna pretensión dogmática, algunos de los temas que aún no aparecen en los foros de discusión sobre bioeconomía con la importancia que merecen. El autor es plenamente consciente, que no están

todos los temas que merecerían ser abordados ni con la profundidad deseada. Si este artículo estimula esta discusión, habrá cumplido su función.

2. La bioeconomía necesita una sólida base científico-técnica

El concepto de bioeconomía surgió a principios del siglo XXI en la Unión Europea como la forma de proyectar a la sociedad los avances y los nuevos paradigmas generados en Biotecnología, agricultura y alimentación. El concepto pionero fue lo que en tiempos se llamó KBBE (*Knowledge-Based Bio-Economy*), o «bioeconomía basada en el conocimiento» en su versión española¹. Este nuevo concepto germinó en el seno de los programas de investigación de la Unión Europea. La novedad era que incorporaban elementos que no eran frecuentes hasta entonces, tales como impacto socioeconómico, implicación y compromiso industrial, plan de explotación de los resultados, etc. De estos ejemplos, poco a poco fue surgiendo un esbozo de estrategia política que cobró cuerpo en 2012 con la Estrategia Europea de Bioeconomía². Se establecieron como prioridades más importantes el asegurar una sólida base científico-técnica, la promoción de la innovación, la colaboración entre el mundo académico e industrial y el desarrollo de nuevas capacitaciones que favorecieran la incorporación de nuevas ideas, procesos y productos. Estas prioridades implicaban invertir más en innovación, desarrollo y actividades de demostración, pero con un abordaje nuevo, que consistía en incidir en los grandes retos que tienen nuestras sociedades: garantizar la seguridad alimentaria, gestionar los recursos naturales de una forma sostenible, reducir la dependencia de los recursos no renovables, y en particular de los recursos fósiles, mitigar y en la medida de lo posible adaptarse al cambio climático. Un aspecto igualmente crítico era que la bioeconomía fuera una fuente de nuevos puestos de trabajo y de competitividad europea.

El proceso evolutivo que ha seguido la Unión Europea desde los primeros programas de investigación, que coincidieron en el tiempo con la incorporación de España a la Unión Europea en 1986, hasta el desarrollo de una estrategia de bioeconomía con los consiguientes medios financieros y políticos para su apoyo, ha durado casi tres décadas. A lo largo de estos años se ha desarrollado un amplio consenso entre todos los sectores implicados: científicos, industriales, políticos y, por supuesto, la sociedad civil sobre los elementos claves a desarrollar en esa estrategia. Este amplio consenso ha ayudado a reforzar la estabilidad del proceso decisonal, alejando el peligro de políticas erráticas, dependiendo del color político que esté en los puestos decisionales. Aguilar *et al.* (2013) han publicado un análisis crítico de la evolución y de los cambios de estrategias y prioridades a lo largo de los primeros 30 años de los programas de investigación en Biotecnología y en Ciencias de la Vida en la Unión Europea³. El lector también puede consultar otra publicación sobre la génesis de la bioeconomía en la Unión Europea, y de una forma particular sobre el papel que jugaron los programas de investigación dirigidos

¹ COMISIÓN EUROPEA (2007).

² COMISIÓN EUROPEA (2012).

³ PATERMANN y AGUILAR (2018).

a optimizar el impacto socioeconómico de la investigación y la consiguiente movilización de los líderes políticos para diseñar una verdadera estrategia de bioeconomía en Europa⁴.

Las políticas y estrategias, si no van acompañadas de iniciativas presupuestarias y acciones concretas que catalicen las expectativas científico-técnicas y sociales, se convierten a menudo en papel mojado. Para evitar esto, en el programa Horizonte 2020 de I+D+i de la UE, que tiene una duración desde el 2013 al 2020, se han dedicado cerca de 4.000 millones de euros a promover la bioeconomía. Una gran parte de ese presupuesto está destinado al establecimiento de la Empresa Común para las Bioindustrias⁵ y el resto a la promoción de políticas y actividades de I+D+i en el área de la bioeconomía. Bell *et al.* (2018) han publicado recientemente un artículo sobre el desarrollo de la Estrategia Europea de Bioeconomía desde su creación en 2012 hasta ahora en el marco de la UE⁶. Estrechamente ligada al desarrollo de la Estrategia de bioeconomía, ha sido creación de la Empresa Común de Bioindustrias, que es la iniciativa público-privada de mayor envergadura en el mundo en el área de las bioindustrias⁷.

3. ...y de un sector agrícola e industrial dinámico e innovador

El sector industrial, junto con el sector agrícola son elementos claves para el florecimiento de la bioeconomía. La relación entre el mundo académico e industrial y agrícola es de interdependencia. Ninguno de ellos puede desarrollar una bioeconomía exitosa sin el otro. Es necesario desterrar la visión periclitada de un desarrollo lineal y en un solo sentido de la investigación: de la investigación básica a la aplicada y por último a la industria o a la agricultura. Es necesario también abandonar la idea reduccionista de que el sector académico es el único que genera nuevas fuentes de conocimiento y la industria actúa solamente como receptor y explotador de ese conocimiento. La innovación, entendida en sus dos acepciones: la de desarrollar nuevas ideas y conceptos, como la que tiene por objetivo la creación o modificación de un producto, y su introducción en un mercado, no es patrimonio exclusivo del mundo académico o de la industria.

Hoy en día la innovación, en un sentido amplio, es un concepto que deben interiorizar y practicar todos los sectores relacionados con la bioeconomía. La función de los poderes públicos es estimular iniciativas financieras que promuevan la innovación, tanto en el sector público como en el privado, así como el desarrollo de políticas coherentes que fomenten una colaboración sinérgica entre el mundo académico y los sectores productivos. No hay que olvidar, sin embargo, que es necesario seguir apoyando la investigación básica o fundamental de excelencia y al mismo tiempo promover activamente lo que se viene denominando *mission oriented research*, o investigación orientada hacia objetivos. Los países más avanzados científica y económicamente de nuestro entorno lo vienen ya aplicando desde hace tiempo con resultados muy positivos.

⁴ REGLAMENTO UE (2014).

⁵ BELL *et al.* (2018).

⁶ MENGAL *et al.* (2018).

⁷ ESTRATEGIA ESPAÑOLA DE BIOECONOMÍA (2015) Y COMISIÓN EUROPEA (2013).

4. Políticas coherentes

Casi todas las estrategias sobre bioeconomía, incluidas la de la UE y la española⁸, han mencionado explícitamente la necesidad de desarrollar unas políticas coherentes con la bioeconomía o adaptar las ya existentes. Este tema, aparentemente sencillo, se ha visto en la práctica que es uno de los escollos más importantes a la hora de maximizar el impacto de la bioeconomía. El advenimiento tardío, en comparación con otras políticas de largo recorrido, como energía, transporte, medioambiente, agrícola y otras, ha puesto en evidencia algunas fricciones entre esas políticas y las que resultan de aplicar las estrategias de bioeconomía. No es posible abordar en este capítulo los complejos aspectos de la aplicación de políticas intersectoriales, por lo que solo se darán unas pinceladas a algunos ejemplos concretos. Uno de los temas más controvertidos es el dilema con respecto a la utilización del suelo agrícola: por un lado, dedicarlo prioritariamente para la alimentación humana y animales de granja, o seguir exclusivamente las tendencias del mercado y producir plantas con la finalidad de obtener biocombustibles (principalmente, remolacha azucarera para la obtención de bioetanol o colza para biodiésel), en el caso de que estos últimos tuvieran precios superiores a los de los alimentos. En este sentido es reconfortante que, tanto en las estrategias de la UE como en la de España, así como en las de numerosos otros países, se ha dejado muy claro y de una forma inequívoca que no puede haber una dicotomía entre la producción de alimentos y la de biocombustibles. Sin duda, la que debe prevalecer, independientemente del precio del producto final en el mercado, es el uso agrícola destinado a la alimentación humana y animal. La alimentación, no puede considerarse solo como una *commodity* más, es decir como una mercancía, desprovista de cualquier valor social o ético más allá de su valor de mercado. Prescindir de la ética sería lanzar un torpedo a la línea de flotación de la bioeconomía, ya que decisiones de ese tipo serían inaceptables para amplios sectores de la sociedad. Hay que evitar a toda costa que se repitan los errores que se cometieron con la introducción de los OGM (organismos genéticamente modificados o transgénicos) en el mercado, en particular ignorar las objeciones o los intereses de los consumidores y centrarse, casi exclusivamente en los beneficios para los productores de semillas y para los agricultores.

Con el objetivo de evitar aspectos conflictivos o fricciones entre diferentes sectores, sería necesario revisar lo antes posible las normativas existentes en temas de política agrícola, medioambiental, energética, industrial, transporte y otras y confrontarlas con las aplicaciones en el terreno de la bioeconomía. En este sentido, la UE ha creado en 2013 un Observatorio de la Bioeconomía⁹. El Centro Común de Investigación (CCI), el servicio científico interno de la Comisión Europea, es el encargado de coordinar el nuevo observatorio con el fin de evaluar el progreso y medir el impacto de la bioeconomía en la Unión Europea. Así, según la Comisión, se ofrecerá apoyo a las estrategias de bioeconomía regionales y nacionales que los Estados miembros están desarrollando en la actualidad. Desde el lanzamiento de la Estrategia de Bioeconomía y del Observatorio, tanto la Comisión Europea como el CCI han publicado

⁸ COMISIÓN EUROPEA (2013).

⁹ Bioeconomy. Véase las entradas 'Bioeconomy' en la web de Horizonte 2020: <http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/h2020-section/bioeconomy>.

informes, datos estadísticos, resúmenes de proyectos, etc., que pueden ser de una gran utilidad para aquellas regiones y comunidades autónomas que están desarrollando iniciativas convergentes con la bioeconomía, así como para aquellas instituciones y organismos que estuvieran interesados en participar en proyectos comunitarios¹⁰. Por su parte, España también ha creado un Observatorio de la bioeconomía con objeto de reforzar el entorno social, político y administrativo de la bioeconomía¹¹. Un abordaje más detallado aparece en el capítulo de Lainez y colaboradores en este mismo volumen.

5. ¿Una ética de la bioeconomía o una bioeconomía ética?

Es muy posible que la bioeconomía evolucione en los próximos años hacia una integración gradual de distintas disciplinas científicas, tecnológicas y sectores industriales, junto con una sociedad comprometida y beneficiaria de esa iniciativa. Esto sería ya de por sí un modelo de éxito, ya que habría sido capaz de generar estímulos concretos en la sociedad en su conjunto para abordar de una forma estructurada y racional los grandes retos a los que se enfrenta la humanidad. No hay que olvidar, sin embargo, que el desarrollo de nuevas iniciativas en el ámbito de la bioeconomía, como en casi todas las actividades de la vida, obliga a elegir entre distintas opciones y, por tanto, a conseguir consensos y, en muchos a dilucidar sobre dilemas éticos nuevos. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) ha sido la primera en señalar que la bioeconomía lleva implícita numerosas cuestiones éticas, sobre las cuales la sociedad en su conjunto deberá manifestarse¹². Es bien sabido que la ética no es ni pretende ser objetiva, se ocupa de lo que un individuo o la sociedad en su conjunto asumen como una buena o mala acción. La perspectiva ética sobre un determinado asunto puede variar considerablemente en el tiempo, tanto a escala individual, como social. El aspecto ético de una acción, planteado a la misma persona en distintos momentos de su vida puede variar considerablemente; de ser considerada aceptable o reprobable éticamente. Igualmente, distintos grupos sociales pueden tener valoraciones éticas distintas sobre un mismo tema y la mayoría de ellas son respetables en las sociedades democráticas siempre que no afecten los derechos fundamentales ni a la dignidad de los otros. Es necesario, por tanto, considerar que los aspectos éticos en bioeconomía son tan importantes como los científicos o tecnológicos. Se presentan a continuación algunos ejemplos donde, además del debate y discusión técnica, hay fuertes implicaciones éticas:

- Destino del suelo agrícola existente y del que está destinado a otras funciones (recreativo, reservas naturales, barbecho, etc.).

¹⁰ COMISIÓN EUROPEA y ESTRATEGIA ESPAÑOLA DE BIOECONOMÍA.

¹¹ LAINEZ, PERIAGO, ARRIBAS y MENESES (2018).

¹² AGUILAR, WOHLGEMUTH y TWARDOWSKI (2017).

- Reparto de los recursos hídricos para consumo humano y animal, uso agrícola con el objetivo de producción de alimentos para humanos y animales, uso industrial, biorrefinerías, etc.
- Sostenibilidad de la biomasa existente y de los ecosistemas.
- Determinación de los impactos de la bioeconomía (actores, usuarios, beneficiarios).

No hay otra forma de adoptar iniciativas y decisiones sobre temas con un alto contenido ético que mediante la discusión pública y abierta entre todos los actores implicados en el tema. La experiencia demuestra que cualquier otro abordaje en una sociedad democrática, está condenado al fracaso, independiente de la solidez de los aspectos técnicos o científicos en juego. Es necesario, por tanto, promover y articular, desde la independencia que proporcionan los sectores públicos, este tipo de debates, con objeto de conseguir acuerdos con un amplio consenso social.

6. Impacto social de la bioeconomía

Hay unanimidad en el hecho de que la bioeconomía se dirige a abordar o mitigar algunos de los retos globales a los que se enfrentan las sociedades de hoy en día. En consecuencia, es importante no perder de vista que el objetivo final de la bioeconomía es tener un impacto social positivo y medible sobre los retos a los que se enfrenta la humanidad. Los desarrollos técnicos y los avances científicos son ciertamente críticos y, como se ha mencionado anteriormente, se necesita una sólida base de conocimiento para abordar con realismo cualquier tarea en bioeconomía. Pero no es el fin en sí mismo, es un medio, imprescindible, pero, a fin de cuentas, un medio. La pregunta clave que cada iniciativa o estrategia de bioeconomía debería hacerse regularmente es: ¿en qué medida se está contribuyendo a mejorar las condiciones de vida de los ciudadanos y a la sostenibilidad del planeta para las generaciones futuras?

La experiencia adquirida en las últimas décadas con la comercialización de los OGM es asegurarse que los beneficios económicos potenciales impacten en todos los actores sociales y no solo en los proveedores de tecnología. Las zonas rurales deberían ser las primeras beneficiadas de la bioeconomía y dejar de ser exclusivamente productores y exportadores de materias primas, en este caso biomasa. Este impacto debería ser capaz de contribuir a la revitalización de las zonas rurales y aliviar la disminución de la pérdida de población de las zonas rurales a las zonas urbanas. Uno de los elementos, entre otros, clave en este sentido sería el desarrollo en las zonas rurales de mini biorrefinerías diseñadas para crear valor añadido a la biomasa local generada de una forma sostenible. Este abordaje se está llevando a cabo en los países bálticos con mucho éxito.

La bioeconomía y la economía circular son en realidad las dos caras de la misma moneda¹³. De hecho, se trata de la misma realidad abordada desde dos perspectivas legítimas, pero diferentes. La bioeconomía ha hecho hasta ahora un mayor énfasis en los aspectos económicos, financieros y tecnológicos, mientras que en la economía circular el mayor hincapié tiene lugar sobre los aspectos de conservación del medioambiente. En estos últimos tiempos se observa, al menos en las iniciativas de la Unión Europea, una aproximación y convergencia de ambos conceptos^{14,15}. Se necesita un abordaje integrado y global de la utilización racional y sostenible de los recursos biológicos que se aleje del sistema lineal de producción y consumo predominante hoy en día.

Un tema crítico para el despegue de la bioeconomía es demostrar que, además de cumplir las expectativas de un uso más racional y sostenible de los recursos biológicos, es capaz de revitalizar y dinamizar el tejido agrícola e industrial. Contrariamente a la política de algunos gobiernos occidentales que, tras las crisis de las industrias pesadas, tales como las del carbón, acero y productos manufacturados entre otros, trataron de revitalizar sectores industriales agotados, esclerotizados y no competitivos, frente al entonces emergente mercado asiático, la bioeconomía necesitará la creación de nuevos perfiles de puestos de trabajo a distintos niveles de capacitación, desde operarios y obreros, hasta ingenieros y científicos, así como gestores de bioeconomía. Un ejemplo claro son las biorrefinerías, que se están creando por toda la Unión Europea¹⁶. Las nuevas plantas demandan en su mayoría nuevos perfiles profesionales. Es necesario que las universidades y los centros de formación profesional se anticipen a las nuevas demandas y desarrollen nuevos currículos para responder a las necesidades crecientes de nuevos empleos y nuevos perfiles profesionales. En resumen, es imprescindible desarrollar una alianza estrecha y duradera entre bioeconomía y sociedad. Solo de esta forma saldrán beneficiadas ambas.

7. Iniciativas en bioeconomía: objetivos comunes, abordajes diferentes

El Consejo de Bioeconomía alemán ha publicado una serie de documentos sobre diversos aspectos de la bioeconomía en Alemania y así como sobre el desarrollo de nuevas estrategias de bioeconomía en el mundo¹⁷. Es realmente sorprendente la explosión de estrategias de bioeconomía en numerosos países. En un poco más de cinco años, se ha pasado de no existir ninguna estrategia de bioeconomía a una situación en la que la mayoría de los países desarrollados, muchos con economías en transición, e incluso varios en vías de desarrollo han elaborado diversas iniciativas en relación con la bioeconomía. Se presenta a continuación una

¹³ AGUILAR, WOHLGEMUTH y TWARDOWSKI (2017).

¹⁴ EUROPEAN BIOECONOMY STAKEHOLDERS MANIFESTO (2017) y CIRCULAR ECONOMY (2018).

¹⁵ CIRCULAR ECONOMY (2018).

¹⁶ VAN REE (2017).

¹⁷ BIOECONOMY POLICY (2015).

lista de países con iniciativas en bioeconomía, que presumimos pueda ser incompleta debido a la continua incorporación nuevos países y regiones.

- *Instituciones supranacionales*: Unión Europea, OCDE y GFFA (*Global Forum for Food and Agriculture*).
- *Países del G7*: todos excepto Italia. Es decir: Alemania, Canadá, Estados Unidos, Francia, Japón y Reino Unido.
- *Países BRIC*: Brasil, Rusia, India y África del Sur.
- *Asia y Pacífico*: Australia, Corea del Sur, Filipinas, Indonesia, Malasia, Nueva Zelanda y Tailandia.
- *Europa*: Austria, Bélgica, Dinamarca, España, Finlandia, Francia, Irlanda, Islandia, Noruega, Países Bajos y Suecia.
- *África*: Kenia, Mozambique, Mauricio, Gana y Malí.
- *América Latina*: Colombia, México y Uruguay.

Independientemente, muchos de los países mencionados han llevado, o están procediendo a desarrollar estrategias o iniciativas específicas para varias de sus regiones, como ocurre con España, donde varias de las comunidades autónomas (CCAA) se encuentran involucradas en este proceso¹⁸. Se escapa del objetivo de este capítulo abordar todas y cada una de estas iniciativas. El Observatorio de Bioeconomía, creado a raíz de la aparición de la Estrategia Española de Bioeconomía, tiene previsto hacer seguimientos regulares del avance y situación de la bioeconomía en las distintas CCAA¹⁹.

Una ojeada rápida a las distintas bioeconomías a través del mundo muestra la gran diversidad de abordajes, tantos como los diferentes ecosistemas y modelos socioeconómicos existentes²⁰. Se observa que cada país adapta su estrategia y abordaje a su realidad medioambiental, como no podía ser de otra manera. Lejos quedan ya los días en los que algunos pretendían imponer una visión reduccionista y encorsetada de la bioeconomía, y en particular de las biorrefinerías de *one size fits all*, de un modelo igual para todos. El desarrollo de la bioeconomía viene regido por el clima, la agricultura existente, la disponibilidad de recursos hídricos y otros factores medioambientales. Es evidente que las bioeconomías del norte de Europa, basadas en la silvicultura, serán diferentes de las del centro de Europa, basadas en el desarrollo de biorrefinerías mixtas de segunda generación, es decir, que usen como fuente principal de biomasa residuos agrícolas, ricos en celulosa y hemicelulosa y plantas para uso energético. Dentro de España, a nadie se le escapa que las diferencias climáticas entre las distintas regiones y las limitaciones hídricas determinan el tipo de específico de bioeconomía a desarrollar.

¹⁸ SUSCHEM (2017).

¹⁹ LAINEZ *et al.* (2018).

²⁰ AGUILAR *et al.* (2017).

Otro aspecto que ha quedado superado por la realidad es la creencia de que el objetivo primordial de la bioeconomía es producir más biomasa por encima de cualquier otra consideración. Es cierto, que el incremento de la población mundial demanda un incremento regular y constante de la producción de alimentos. Pero a menudo se olvida que el objetivo principal, concomitante con el incremento de la producción es reducir las pérdidas de alimentos, tanto en la cadena de producción alimentaria, como en los hogares. Esto incluye, además, reutilizar como biomasa para las biorrefinerías los residuos agrícolas no alimentarios. En resumen, se trata por una parte de producir más alimentos, pero de una forma más eficaz, y al mismo tiempo de evitar los desechos alimentarios y utilizar los residuos agrícolas para bioproductos, bioenergía, etc. De esta forma, se produce una convergencia entre bioeconomía y economía circular. Egea *et al.* (2018) han publicado recientemente un artículo en el que describen un nuevo modelo de bioeconomía que se está desarrollando en el complejo agroindustrial de Almería, consistente en hacer compatible el mantenimiento de la productividad agrícola y del impacto socioeconómico, con la utilización económica y sostenible medio ambientalmente de los residuos agrícolas generados.

En otras regiones del mundo, el objetivo primario de la bioeconomía no es producir más biomasa, sino la valorización de la biodiversidad biológica. Así, en Colombia el eje de la bioeconomía se establece alrededor de la biodiversidad. No primariamente como fuente de nuevas moléculas bioactivas, debido a la enorme dificultad e inversión necesarias para identificar posibles nuevas moléculas, sino promoviendo, tanto dentro de la población colombiana como a escala internacional el valor intrínseco de la biodiversidad y la gran riqueza existente en Colombia, en particular en las zonas que han estado estos últimos cincuenta años inalteradas debido al conflicto de la guerrilla de las FARC²¹.

A pesar de los diferentes abordajes y estrategias, todas estas iniciativas alrededor del mundo convergen en un mismo objetivo: un nuevo sistema económico basado en el uso sostenible de los recursos biológicos y medioambientales, la bioeconomía²².

8. Hacia una agenda global. ¿Una biodiplomacia para el siglo XXI?

Unas cuestiones obvias que emanan tanto de los retos globales a los que se enfrenta la humanidad como del hecho de compartir el mismo planeta, son las siguientes: ¿va a seguir abordando cada región, cada país por su cuenta el tema de la bioeconomía, sin percibir ni tomar conciencia de que todos los seres humanos compartimos la misma biosfera, y en definitiva los mismos retos? ¿Cómo se puede abordar de una forma coordinada, y sobre todo más eficaz los desafíos que son comunes a toda la humanidad?

El florecimiento de numerosas estrategias e iniciativas a lo largo y ancho del mundo hay que recibirlo como una magnífica noticia, ya que indica que la mayoría de los gobiernos han

²¹ BETANCUR GIRALDO (2017).

²² AGUILAR *et al.* (2017).

comprendido la necesidad de un uso más racional de los recursos biológicos. Sin embargo, la mayoría de estas iniciativas están desconectadas unas de otras, ignorando que los retos a los que se enfrenta la humanidad son globales, afectan a toda la humanidad. Afortunadamente, la mayoría de las iniciativas en curso sobre la bioeconomía, tienen en cuenta que el sistema de producción lineal es insostenible. Si la bioeconomía ha de ser sostenible para ser aceptada socialmente, la economía circular, necesita ser económica para ser viable. Solo de esta forma se podrán abordar de una forma eficaz los retos a los que nos enfrentamos. Es necesario, además, acordar entre los distintos actores a nivel global una agenda común que compagine e integre los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas²³ con los de la bioeconomía. El desarrollo de esa agenda común requiere el desarrollo de una nueva forma de diplomacia, lo que se ha venido en llamar «biodiplomacia»²⁴. Es necesario recordar a los líderes políticos y a la sociedad en general que la biosfera, que compartimos todos los seres vivos, es un sistema termodinámicamente cerrado, en el cual los recursos son finitos, aunque a la escala humana nos pueda parecer lo contrario. Lo único que viene del exterior es la luz solar, todo lo demás, es constante a lo largo del tiempo, solo que se transforma químicamente de una forma a otra. Tomemos el ejemplo del petróleo y del carbón. Es bien sabido que ambos se formaron por restos de organismos vivos hace más de 100 millones de años. Sin embargo, desde el comienzo de la revolución industrial, hace menos de 200 años, hemos consumido, principalmente mediante la combustión, una gran parte de esos recursos fósiles y liberado a la atmósfera una cantidad ingente de CO₂ que estuvo «atrapada» durante decenas de millones de años en el subsuelo. Hemos literalmente «quemado», en solo unas pocas generaciones, lo que la tierra tardó en generar más de 100 millones de años.

El espejismo de una producción y de un crecimiento ilimitado se han topado con la cruda realidad. En bastantes aspectos de nuestra vida cotidiana se ha alcanzado lo que se ha venido a llamar «crecimiento ineconómico» (*uneconomic growth*)²⁵, en el que la «desutilidad» de lo producido excede su «utilidad» y que, en consecuencia, amplios sectores sociales o países enteros pueden enfrentarse a graves problemas de índole ecológicos y económicos. Basten un par de ejemplos de nuestra vida cotidiana para ilustrar esto: uno es el uso de plásticos, que han revolucionado las sociedades modernas desde los años 70 del siglo pasado. Sin embargo, el abuso indiscriminado y sobre todo la carencia de una estrategia de reciclaje, reutilización, y degradación, están poniendo el peligro la salud de nuestros mares. No solo en las zonas próximas a las costas, sino también en alta mar, en el océano²⁶. Otro ejemplo es el de la industria de la confección. El desarrollo de nuevas fibras sintéticas y el aumento de la producción de fibras naturales, sobre todo el algodón, han inundado el mercado con ropa que en muchos casos se considera de «usar y tirar». Gran parte de la ropa que se produce se utiliza a menudo solo unas pocas veces con el consiguiente problema de desechos, desperdicio energético, y su implicación en el aumento de emisión de gases de efecto invernadero. El envío de parte de esa ropa a países en vías de desarrollo no hace sino trasladar el problema, ya que frecuentemente la demanda

²³ OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (2015).

²⁴ AGUILAR *et al.* (2018).

²⁵ WHITACRE (2012).

²⁶ COMISIÓN EUROPEA (2018).

y necesidades de esos países no se corresponde con las donaciones efectuadas. Además, los países receptores carecen, muy a menudo, de infraestructuras adecuadas para el tratamiento y reciclaje de esos tejidos, ocasionándoles más problemas que beneficios. Es necesario recordar en este contexto, una vez más, los principios de las «3R»: *reducir, reutilizar y reciclar*. Tanto la bioeconomía como la economía circular asumen estos principios básicos como un primer paso para contribuir a un desarrollo sostenible.

En estos tiempos de cambios se necesita una percepción de la realidad de una forma más holística y menos reduccionista, que integre las distintas variables de los retos a los que se enfrenta la humanidad en su conjunto y que vaya más allá de nuestros horizontes personales y realidades concretas. Es lógico que la teoría de juegos, y en particular el «juego de suma cero», inicialmente surgido del mundo de las matemáticas en las décadas de 1940 y 1950 por von Neumann²⁷ y Nash²⁸ y extraordinariamente útil en teoría económica, se hayan introducido recientemente en las discusiones sobre la dinámica de poblaciones y en el estudio de la evolución de los seres vivos. Lo que es profundamente inquietante, es que el juego de suma cero haya cobrado actualidad al analizar las interacciones de los humanos con la biosfera. Recordemos que, en el juego de suma cero, el beneficio total para todos los jugadores del juego en cada combinación de estrategias siempre suma cero. Dicho en otras palabras: lo que uno gana, el otro lo pierde.

El concepto de juego de suma cero aplicado a la biosfera está íntimamente relacionado con dos conceptos. El primero es el dilema sobre del límite de crecimiento y el segundo sobre la «huella ecológica».

El debate sobre el límite del crecimiento va más allá de la «utilidad» o «desutilidad» del sistema productivo mencionado anteriormente. Plantea el dilema si la humanidad puede seguir creciendo ilimitadamente en términos de población, desarrollo económico y productivo, etc., o si, por el contrario, nuestro crecimiento está limitado últimamente por nuestra biosfera. Meadows *et al.* (1972) ya postularon en su libro *Los límites del crecimiento*, comisionado por el MIT y por el Club de Roma, que en el caso de un crecimiento económico y de población ilimitados, pero con unos recursos finitos, el límite de crecimiento en la tierra se haría evidente en la segunda mitad del siglo XXI, dando lugar a «una disminución rápida e incontrolable de la población y de la capacidad industrial». No es de extrañar que el informe fuera recibido con desdén y escepticismo tras su publicación, ya que, en aquellos años, no se contemplaba otra situación que la de un crecimiento sin límites. Sin embargo, un estudio llevado a cabo treinta años más tarde, confirma, en términos generales, las predicciones de 1972²⁹. Los ligeros cambios positivos observados entre las predicciones de 1972 y 2004 se deben, muy posiblemente, a las iniciativas y medidas correctoras iniciadas en la última década del siglo XX, en particular la Cumbre de Río de 1992, en la que los países participantes acordaron adoptar un enfoque de desarrollo que protegiera el medioambiente, mientras se aseguraba el desarrollo económico

²⁷ NEUMAN y MORGENSTERN (1944).

²⁸ NASH (1951).

²⁹ MEADOWS *et al.* (2004).

y social. En cierta forma, la Cumbre de Río anticipaba el concepto de bioeconomía desde la perspectiva medioambiental.

Casi todos los estudios que han aparecido en la última década al respecto tienden a confirmar que el sistema económico actual, basado en un crecimiento sin límites, no es viable a medio y largo plazo. Son muchos los factores que intervienen en este aspecto. Señalemos aquí solamente el denominado «huella ecológica». La huella ecológica es un indicador del impacto ambiental generado por la demanda humana que se hace de los recursos existentes en los ecosistemas del planeta, relacionándola con la capacidad ecológica de la Tierra de regenerar sus recursos³⁰. La «huella ecológica» es un indicador clave para la sostenibilidad, ya que evalúa el impacto sobre el planeta de un determinado modo o forma de vida y lo compara con la biocapacidad del planeta, es decir con su capacidad de regenerarse. El cálculo de la huella ecológica es complejo y a veces incompleto, ya que no siempre se dispone de todos los datos para evaluar el impacto humano sobre la biosfera ni de todos los elementos que influyen en la capacidad de la regeneración del planeta. Sin embargo, los datos obtenidos, aun teniendo en cuenta su limitación intrínseca, son de un gran valor al proporcionar medidas comparables entre distintos países y zonas de la tierra. El *Global Footprint Network* señala que desde los años 1970 la humanidad ha estado sobreconsumiendo con respecto a la capacidad del planeta. En otras palabras, se están destruyendo los recursos a una velocidad superior a su ritmo de regeneración natural³¹. El aspecto más grave son las enormes diferencias entre los países y regiones. Los datos de 2013 señalan que la humanidad en su conjunto necesitaría 1,68 planetas para mantener su nivel de consumo actual. Sin embargo, África solo necesitaría 0,82; EEUU 5,05 y Europa Occidental 3,22. A nadie se le escapa que es necesaria una acción conjunta a escala mundial para atajar estos problemas. Afortunadamente, las sucesivas conferencias sobre el clima (COP 21 en París en 2015, COP 22 en Marrakech en 2016 y COP 23 a finales de 2017 en Bonn) han servido para crear una toma de conciencia en la mayoría de los países y promover iniciativas, que aunque a algunos se les antojen insuficientes, han supuesto un antes y un después en la lucha contra el cambio climático.

Por otro lado, desde la perspectiva de la bioeconomía, el *Comunicado* del Global Bioeconomy Summit 2015 en Berlín tuvo una gran resonancia y apreciado como un evento global al recomendar, entre otras iniciativas incluir aspectos de bioeconomía en las discusiones sobre cómo alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas³². Es la primera vez que se sugiere en foros internacionales converger las agendas de bioeconomía y de los ODS.

La diplomacia de los «países-imperio» del siglo XIX ha estado basada de una forma casi exclusiva y excluyente en la supremacía de un imperio sobre el resto del mundo. No es de extrañar que este abordaje diera lugar a conflictos y guerras continuas entre las grandes potencias, que se extendieron hasta bien entrada la segunda mitad del siglo XX. Frases que hoy son difíciles de escuchar sin estremecerse, como la de Karl von Clausewitz: «La guerra es la continuación de

³⁰ REES y WACKERNAGEL (1996).

³¹ GLOBAL FOOTPRINT NETWORK (2013).

³² COMMUNIQUÉ GLOBAL BIOECONOMY SUMMIT (2015).

la política por otros medios», aparecida en su libro *De la guerra* en 1832, no reflejaban sino el pensamiento de los dirigentes de esa época. Clausewitz pensaba que la guerra moderna es un «acto político». Esta obra influyó poderosamente en el pensamiento de Napoleón, Lenin, Hitler, así como muchas generaciones de oficiales militares por todo el mundo. Esta «diplomacia de la guerra» ha tenido también una influencia poderosísima en la diplomacia civil de casi todos los países, pudiendo considerarse Kissinger, como el último de los grandes diplomáticos con una teoría propia de «Orden Mundial» en la que la diplomacia se complementa con la guerra en lugar de permanecer como una alternativa a ella³³. Con anterioridad a la publicación de Clausewitz algunos países como Francia, con uno de los cuerpos diplomáticos más sólidos del mundo, venían defendiendo la utilidad de las negociaciones sutiles y la búsqueda de acuerdos como la mejor manera de conseguir mejores resultados para su país³⁴.

Es previsible y deseable que iniciativas globales como las de COP y el GBS provoquen una reflexión en algunos líderes políticos que permita el desarrollo de una diplomacia que tenga en cuenta, además de los intereses estrictamente nacionales, otros factores, tales como la «desutilidad» en las negociaciones comerciales y el «crecimiento ineconómico», si la resultante fuera un agravamiento de la «insostenibilidad» del planeta, aunque a corto plazo la balanza comercial fuera positiva. Sería necesario crear un espacio para las discusiones entre países y regiones, en los que se abordaran las «cuestiones comunes» que afectan a la biosfera y, en consecuencia, al género humano. En las discusiones globales sobre los retos del planeta, solo habría resultados *win-win*, es decir que las dos partes salieran ganando, si ambas emprenden una cooperación y actitud conjunta y coordinada frente a los retos a los que se enfrentan nuestras sociedades de una forma holística, que huya del reduccionismo identitario y nacionalista que es la norma hoy en día. En caso contrario, si se adopta un abordaje de confrontación, es muy probable que el resultado final, no será el de un ganador y un perdedor, sino el de dos perdedores. Al no haber otro remedio que compartir la biosfera, las supuestas ganancias de una de las partes, podría afectar a agravar aún más el déficit de la huella ecológica de la Tierra y, en consecuencia, el juego de suma cero, en el que lo que uno gana, lo pierde el otro. Sin embargo, a una escala más amplia, se convertiría en un juego de «suma negativa». En este supuesto, los dos jugadores perderían por el hecho de la depleción de recursos de una forma no sostenible del planeta al ser los recursos finitos, afectarían a ambos.

En la interfase entre ciencia y sociedad, las cosas no son completamente nítidas como en las ciencias exactas y naturales. Hay muchos claroscuros y matices. Por tanto, todo intelectual debería ser crítico con las ideas contrarias a las suyas, pero, también y sobre todo con las suyas propias. En otro sitio se ha dicho: «Predecir el futuro es fácil, lo difícil es conseguir que se cumpla»³⁵. No se pretende en este corto capítulo presentar una visión apocalíptica del futuro, ni tampoco irracionalmente optimista, a pesar de que sería lo esperable y políticamente correcto. Este texto pretende, simplemente esbozar, de una forma racional y crítica, las diferentes perspectivas que basadas en la evidencia científica disponible interpretan las interacciones

³³ BERRIDGE, KEENS-SOPER y OTTE (2001).

³⁴ DE CALLIÈRES (2002).

³⁵ AGUILAR *et al.* (2018).

del ser humano con la biosfera y sus posibles consecuencias. En este contexto, es necesario mencionar, aunque sea brevemente, la teoría de Gaia formulada por Lovelock y Margulis (1974), propone que todos los organismos vivos en la Tierra, así como la materia inorgánica que les rodea, forman un complejo sistema auto regulado, capaz de mantener la vida sobre el planeta. En cierta forma, *Gaia* (del griego, 'Tierra-Madre'), vendría a ser un súper organismo que se auto repararía de las alteraciones que los seres vivos y los humanos provocan sobre el medioambiente. La teoría de Gaia ha tenido bastante más aceptación fuera de los círculos científicos que dentro. La mayor parte de los escépticos de las consecuencias adversas para la humanidad del cambio climático se escudan en la teoría de Gaia para justificar su inacción. Sin embargo, Lovelock y Margulis enunciaron su teoría bastantes años antes del comienzo de los debates sobre el cambio climático. Curiosamente, los movimientos ecologistas han dado una interpretación romántica y antropocéntrica a la teoría de Gaia, representándola como la «Madre Tierra» que cuida de los seres vivos, y lamenta lo desagradecido que son los humanos al no cuidar ni agradecer a Gaia los desvelos que tiene con nosotros.

Por otra parte, ciertos sectores defensores del crecimiento económico sin límites y sin regulaciones de ningún tipo en cuanto a emisiones de gases, etc., tratan de utilizar a intelectuales muy respetados como Pinker³⁶, indicando que nunca en la historia de la humanidad el ser humano ha estado mejor que en la actualidad (mayor esperanza y nivel de vida, disminución drástica de la mortalidad materno-infantil y de la hambruna en el mundo, etc.). Argumentan que sería un freno a la innovación y al potencial creativo del ser humano, ponerle trabas y limitaciones. Pinker viene a decir que, contrariamente a lo que a menudo se tiende a creer, cualquier tiempo pasado fue peor. Respecto a los problemas a los que se enfrenta la humanidad, degradación del medioambiente, terrorismo, desigualdades sociales y, sobre todo, según él, el peligro de la amenaza nuclear, Pinker propone el ideal de la Ilustración: el progreso de las sociedades vendrá mediante la razón, la ciencia y el humanismo.

El lector habrá percibido que en los aspectos puramente científicos y técnicos es relativamente fácil formular unas bases para una eficiente bioeconomía. Sin embargo, cuando se avanza hacia aspectos regulatorios, de propiedad intelectual, financieros, de uso del suelo y del agua, las diferencias aparecen nítidamente. De todas maneras, varias de las estrategias que están ya en marcha han sido capaces de generar un amplio consenso sobre varios de esos aspectos. El próximo reto que se presenta es acordar una agenda global que sea capaz de aunar los elementos más importantes de la bioeconomía, de la economía circular y de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, ya que es imprescindible abordar estos tres conceptos de una forma conjunta y unitaria. En la Unión Europea se están dando pasos para desarrollar una bioeconomía circular sostenible, tanto en el conjunto de la propia UE, como en varios de los Estados miembros y regiones. Queda aún mucho trabajo por delante, pero hay un amplio consenso sobre el hecho de que se avanza en la buena dirección. A escala global la situación es todavía bastante difusa por lo que es necesario el desarrollo de una «biodiplomacia», tanto en las discusiones bilaterales entre países de diferentes regiones, como en las multilaterales en los grandes foros internacio-

³⁶ PINKER (2018).

nales. En este tema no se puede ser sino optimista, y si es posible proactivo, para cooperar y contribuir al éxito de una bioeconomía que contribuya a los objetivos de desarrollo sostenible. El-Chichakli, junto con varios colegas del Consejo de Bioeconomía de Alemania, y Jim Philp de la OCDE, han lanzado cinco ideas clave para avanzar en esos objetivos³⁷. Ellos confirman que, sin prioridades aceptadas globalmente ni métodos de verificación, no es posible evaluar los efectos indirectos y compromisos sobre las diversas facetas de la bioeconomía y sostenibilidad. Proponen cinco grandes iniciativas, derivadas en gran medida de las discusiones del *Global Bioeconomy Summit* de Berlín de 2015 y recogidas en el correspondiente *Comunicado*, que se resumen a continuación:

1. La colaboración entre gobiernos e investigadores es esencial para optimizar los recursos y compartir conocimientos.
2. Es necesario desarrollar un método para medir el desarrollo de la bioeconomía y su contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.
3. Las iniciativas en bioeconomía necesitan estrechar más su relación con los procesos políticos multilaterales y con las discusiones intergubernamentales, especialmente con la agenda de los ODS 2030 y con el seguimiento de los procesos de los acuerdos de París sobre el clima y de Aichi sobre la biodiversidad.
4. Los educadores deben colaborar internacionalmente para definir los conceptos y competencias necesarias para desarrollar una bioeconomía que mejore el uso sostenible de los biomateriales en las industrias de manufactura y en los bienes de consumo.
5. Apoyo a los programas de I+D para promover colaboraciones internacionales sobre proyectos de gran impacto global.

Los diferentes actores de bioeconomía se enfrentan al reto de actuar localmente, con objetivos concretos, que sean medibles, visibles y que tengan un impacto claro y positivo en la sociedad en la que están incardinados. Al mismo tiempo, es necesario que cada acción concreta esté proyectada en una agenda más amplia, a escala regional o de país, y que, de una u otra forma, estas iniciativas interactúen recíprocamente, con las agendas globales que están empezando a esbozarse. Solo mediante la interacción en los dos sentidos, de lo local a lo global y viceversa, se podrá avanzar hacia la consolidación de una bioeconomía circular sostenible. En esta tarea deben implicarse todos los agentes implicados de una forma u otra en alguna de las diferentes facetas de los desafíos globales a los que se enfrenta la humanidad. La tarea es enorme y los retos gigantescos. Pero, no hay otra solución, no hay un plan b u otro planeta al que podamos ir. El destino de la humanidad está ligado a la Tierra. La historia analizará con la perspectiva que da el tiempo la acción del ser humano sobre la biosfera durante los siglos XX

³⁷ EL-CHICHAKLI *et al.* (2016).

y XXI. Esperemos que también describa cómo fuimos capaces de tomar medidas que impidieron a tiempo una situación irreversible. Es nuestra obligación con las generaciones futuras.

Agradecimientos

Agradezco a R. Peláez López, y a los doctores M. Cámara Hurtado, D. Ramón Vidal, F. J. Egea González y E. Aguilar Peláez sus valiosos consejos y la lectura crítica del manuscrito.

Referencias bibliográficas

- AGUILAR, A.; MAGNIEN, E. y THOMAS, D. (2013): «Thirty years of European biotechnology programmes: from biomolecular engineering to the bioeconomy»; en *New Biotechnology* (30); pp. 410-425.
- AGUILAR, A.; WOHLGEMUTH, R. y TWARDOWSKI, T. (2018): «Perspectives on Bioeconomy»; en *New Biotechnology* (40); pp: 181-184.
- BELL, J.; PAULA, L.; DODD, T.; NÉMETH, S.; NANOU, C.; MEGA, V. y CAMPOS, P. (2018): «EU ambition to build the world's leading bioeconomy-uncertain times demand innovative and sustainable solutions»; *New Biotechnology* 40; pp. 25-30.
- BERRIDGE, G. R.; KEENS-SOPER, M. y OTTE, T. G. (2001): *Diplomatic theory from Machiavelli to Kissinger*. Palgrave.
- BETANCUR GIRALDO, C. M. (2017): *Bioeconomía y sectores potenciales en Colombia*. Disponible en <https://www.dnp.gov.co/Crecimiento-Verde/Documents/ejes-tematicos/Bioeconomia/Presentaci%C3%B3n%20contexto%20Bioeconomia%20y%20sectores%2022112017.pdf>.
- BIOECONOMY KNOWLEDGE CENTRE: European Commission. Disponible en <https://biobs.jrc.ec.europa.eu/>.
- BIOECONOMY POLICY (PART I) (2015): «Synopsis and analysis of strategies in the G7»; *German Bioeconomy Council*. Berlín.
- BIOECONOMY POLICY (PART II) (2015): «Synopsis of National Strategies around the World»; *German Bioeconomy Council*. Berlín.
- CIRCULAR ECONOMY. CLOSING THE LOOP. AN AMBITIOUS EU CIRCULAR ECONOMY PACKAGE (2018): European Commission. Bruselas. Disponible en http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_en.htm.
- COMISIÓN EUROPEA (2013): «La Comisión creará un observatorio de bioeconomía»; comunicado de prensa. 14 de febrero de 2013. Disponible en http://europa.eu/rapid/press-release_IP-13-113_es.htm.

- COMMUNIQUÉ GLOBAL BIOECONOMY SUMMIT (2015): *Making Bioeconomy Work for Sustainable Development*. Berlin. Disponible en http://gbs2018.com/fileadmin/gbs2015/Downloads/Communique_final_neu.pdf.
- DE CALLIÈRES, F. (2002): *De la manière de négocier avec les souverains*; Original de 1716. Edición crítica de A. P. Lempereur. Droz.
- EGEA, F. J.; TORRENTE, R. G. y AGUILAR, A. (2018): «An efficient agro-industrial complex in Almería (Spain): Towards an integrated and sustainable bioeconomy model»; en *New Biotechnology* (40); pp: 103-112.
- EL-CHICHAKLI, B.; VON BRAUM, J.; LANG, C.; BARBEN, D. y PHILP, J. (2016): «Five cornerstones of a global bioeconomy»; en *Nature* (535); pp. 221-223.
- ESTRATEGIA ESPAÑOLA DE BIOECONOMÍA (2015): *Horizonte 2030*. Disponible en <http://bioeconomia.agripa.org/download-doc/102163>.
- ESTRATEGIA ESPAÑOLA DE BIOECONOMÍA (2016): «Plan De Actuación 2016»; *Horizonte 2030*. Disponible en: <http://bioeconomia.agripa.org/download-file/97081b0f-a181-451b-b111-371b524d2a9b/>.
- EUROPEAN BIOECONOMY STAKEHOLDERS MANIFESTO (2017): http://ec.europa.eu/research/bioeconomy/pdf/european_bioeconomy_stakeholders_manifesto.pdf.
- EUROPEAN COMMISSION (2007): «Mid-term review of the strategy on life sciences and biotechnology»; COM(2007) 175 final. Bruselas.
- EUROPEAN COMMISSION (2012): *Innovating for sustainable growth. A bioeconomy for Europe*.
- GLOBAL FOOTPRINT NETWORK (2013): *Ecological footprint of countries*. Disponible en <http://data.footprintnetwork.org/#/compareCountries?cn=all&type=EFctot&yr=2013>.
- LAINEZ, M.; PERIAGO, M. J.; ARRIBAS, N. y MENESES, C. (2018): «La bioeconomía como oportunidad para la economía española: la visión desde el Observatorio de Bioeconomía»; en AGUILAR, A.; EGEA, F. J. y RAMÓN, D., coords.: «Bioeconomía y desarrollo sostenible»; en *Mediterráneo Económico*. Almería, Cajamar Caja Rural.
- LOVELOCK, J. E. y MARGULIS, L. (1974): «Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: the Gaia hypothesis»; en *Tellus* (26)1-2; pp. 2-10.
- MANUAL SOBRE LAS BIORREFINERÍAS EN ESPAÑA (2017): *BioPlat-SusChem*. Ministerio de Economía, Industria y Competitividad. Disponible en http://www.suschem-es.org/docum/pb/2017/publicaciones/Manual_de_Biorrefinerias_en_Espana_feb_2017.pdf.
- MEADOWS, D. H.; MEADOWS, D. L.; RANDERS, J. y BEHERNS III, W.W. (1972): *The limits of growth*. Universe Book.
- MEADOWS, D.; RANDERS, J. y MEADOWS, D. (2004): *Limits to Growth. The 30-Year Update*. Chelsea Green Publishing.

- MENGAL, P.; WUBBOLTS, M.; ZIKA, E.; RÚIZ, A.; BRIGITTA, D.; PIENIADZ, A. y BLACK, S. (2018): «Bio-based Industries Joint Undertaking: The catalyst for sustainable bio-based economic growth in Europe»; en *New Biotechnology* (40); pp. 31-39.
- NASH, J. (1951): *Non-Cooperative Games*, *Annals of Mathematics* 54; pp. 286-295.
- NEMETZ, P. N. (2013): *Business and the Sustainability Challenge: An Integrated Perspective*. Nueva York, Routledge.
- OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (2015): «Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo»; Disponible en <http://www.undp.org/content/undp/es/home/librarypage/corporate/sustainable-development-goals-booklet.html>.
- OECD (2009): *The Bioeconomy to 2030: designing a policy agenda*. París. Disponible en <http://www.oecd.org/futures/long-termtechnologicalsocietalchallenges/42837897.pdf>.
- PATERMANN, C. y AGUILAR, A. (2018): «The origins of the bioeconomy in the European Union»; en *New Biotechnology* (40); pp. 20-24.
- PINKER, S. (2018): *Enlightenment now: The case for reason, science, humanism and progress*. Penguin Random Home.
- REES, W. y WACKERNAGEL, M. (1996): *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. New Society Publishers.
- REGLAMENTO (UE) N.º 560/2014 del Consejo (2014): «por el que se establece la Empresa Común para las Bioindustrias»; *Diario Oficial de la Unión Europea*. 7.6.2014. L 169/130.
- RUIZ, A.; ZIKA, E.; CAMPOS ITURRALDE, M.; MALLORQUÍN ESTEBAN, P.; LLORENTE RÚIZ DE AZÚA, P. y MENGAL, P. (2018): «Una oportunidad para las bioindustrias en Europa: La asociación público-privada de la Unión Europea»; en: AGUILAR, A.; EGEEA, F. J. y RAMÓN, D., coords.: «Bioeconomía y desarrollo sostenible»; en *Mediterráneo Económico*. Almería, Cajamar Caja Rural.
- VAN REE, R. (2017): *Biorefinery Approach in the EU and Beyond*. Workshop on EU-AU R&I Partnership on Food and Nutrition Security and Sustainable Agriculture (FNSSA). Bruselas.
- VON CLAUSEWITZ, C. (1832): *Vom Kriege*. Berlín, Ferdinand Dümmler. De la guerra. Versión en español 2014. La esfera de los libros.
- Von Neumann, J. y MORGENSTERN, O. (1944): *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton University Press.
- WHITACRE, D. M., ed. (2012): *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* (220). Nueva York, Springer.



MEDITERRÁNEO
ECONÓMICO

32

- I. Iniciativas europeas en bioeconomía
- II. Perspectivas de la bioeconomía en España
- III. Necesidad de una sólida base científica y técnica en bioeconomía
- IV. Bioeconomía, bioindustrias y seguridad alimentaria
- V. Ejemplos de éxito en la bioeconomía
- VI. Bioeconomía y bioenergía



UNA OPORTUNIDAD PARA LAS BIOINDUSTRIAS EN EUROPA

LA ASOCIACIÓN PÚBLICO-PRIVADA DE LA UNIÓN EUROPEA*

Ana Ruiz Sierra, Marta Campos Iturralde, Pilar Llorente Ruiz de Azúa, Paloma Mallorquín Esteban,
Eleni Zika, Philippe Mengal

Bio-based Industries Joint Undertaking

Resumen

La Unión Europea en su objetivo de estimular el crecimiento económico y la inversión creó, en el año 2014, bajo el marco de Horizonte 2020, la asociación Bio-Based Industries Undertaking (BBI JU). Se trata de una asociación público-privada, con sede en Bruselas, creada para la implementación de una iniciativa tecnológica conjunta de apoyo al sector de las bioindustrias en Europa. Las bioindustrias se organizan en cadenas de valor y están implicadas en una o varias etapas del proceso que va desde el suministro de biomasa hasta su transformación en productos de alto valor añadido y su comercialización. Los miembros de esta asociación son la Comisión Europea y el sector de las bioindustrias, representadas por *Bio-based Industries Consortium* (BIC). Estos miembros se han comprometido a contribuir con 3.700 millones de euros tanto en inversiones privadas como en la financiación de proyectos de investigación e innovación utilizando recursos públicos y privados. Para ello, durante el periodo 2014-2020 está prevista la publicación anual de una convocatoria de propuestas en las que consorcios constituidos por empresas, centros de investigación u otras asociaciones, presentan sus proyectos en un concurso abierto y transparente. El plan anual de trabajo es propuesto por la industria y acordado con la Comisión Europea, de acuerdo con las prioridades identificadas en su agenda de investigación e innovación (SIRA). Se trata sin duda de una oportunidad única para el crecimiento y apoyo al sector de las bioindustrias en Europa, que ayudará a superar muchos de sus retos actuales posicionándolas en una situación de liderazgo mundial.

Abstract

As part of its aim to stimulate economic growth and the consequent investment, in 2014, within the framework of Horizon 2020, the European Union established the Bio-Based Industries Joint Undertaking (BBI JU). This is a public-private partnership, based in Brussels, set up to implement a joint technological initiative to support the bioindustries sector in Europe. Bioindustries are organised into value chains and are involved in one or more steps of the process, from the supply of biomass to its transformation into high-added-value products and its commercialisation. The members of this association are the European Commission and the bioindustry sector, represented by the Bio-based Industries Consortium (BIC). These members have pledged to contribute 3,700 million euros in both private investments and as funding for research and innovation projects using public and private resources. For this, during the period 2014-2020, there will be an annual call for proposals in which consortia formed by companies, research centres, and other associations will present their projects in an open and transparent competition. The annual work plan is proposed by the industry in agreement with the European Commission, according to the priorities identified in its research and innovation agenda (SIRA). It is undoubtedly a unique opportunity for the European bioindustry sector to grow and gain support, helping it overcome many of its current challenges and positioning it as a world leader.

Uno de los principales desafíos actuales a los que se enfrenta la Unión Europea es construir una Europa competitiva, innovadora y sostenible, en la que la generación de crecimiento económico vaya de la mano de la lucha contra el agotamiento de los recursos naturales, el cambio climático y el impacto ambiental. La Estrategia Europea de Bioeconomía¹ aprobada en el año 2012 y su plan de acción, afrontan dichos desafíos y abogan por una asociación

* Las opiniones expresadas en el presente artículo son las de los autores. No pretenden reflejar las opiniones de ninguna organización o institución mencionada.

¹ COMISIÓN EUROPEA, COM(2012)60.

pública-privada para favorecer la innovación y la inversión en el sector de las bioindustrias y sus cadenas de valor, asegurando con todo ello el crecimiento inteligente, sostenible e integrador en la Unión Europea. Si se quiere evolucionar hacia una sociedad que no dependa del petróleo, es necesario consolidar un tejido bioindustrial capaz de generar productos a partir de biomasa que sustituyan a los actuales productos basados en recursos fósiles. Para ello, es esencial integrar mejor los sectores productores y transformadores de biomasa asegurando que el uso de la biomasa, tanto para la producción de productos de consumo como para fines energéticos, respeta la seguridad alimentaria y objetivos medioambientales, ofreciendo soluciones a la escasez de recursos naturales². La política industrial de la Unión Europea, descrita en su Estrategia de Crecimiento y Recuperación Económica aprobada en 2012³, confirmó la importancia estratégica de las bioindustrias para la competitividad futura de Europa y reiteró la importancia de establecer una iniciativa público-privada para este fin.

1. Empresa pública-privada para las bioindustrias: crecimiento y competitividad

Fue en este contexto, tras la adopción de la Estrategia Europea de Bioeconomía, cuando el sector público y el privado aunaron sus fuerzas para la creación de una Empresa Común (instrumento legal comunitario para la implementación de ciertas políticas de forma indirecta⁴), para la ejecución de una iniciativa tecnológica conjunta de apoyo a las bioindustrias. Esta empresa en común fue denominada *Bio-Based Industries Joint Undertaking* (BBI JU).

El objetivo de BBI JU se alcanza mediante la financiación de proyectos de investigación e innovación con el uso de recursos de los sectores, público y privado. Para tal fin, BBI JU publica anualmente un plan de trabajo y a continuación abre una convocatoria abierta y transparente para la presentación de propuestas de proyectos de investigación e innovación.

BBI JU fue creado por la Unión Europea bajo el paraguas del Programa Marco de Investigación e Innovación, conocido como «Horizonte 2020» (2014-2020). Uno de los objetivos de Horizonte 2020 es lograr un mayor impacto en la investigación y la innovación, combinando Horizonte 2020 y los fondos del sector privado dentro de asociaciones público-privadas, en ámbitos clave en los que la investigación y la innovación puedan contribuir a alcanzar los objetivos de competitividad de la Unión. También trata de estimular la inversión privada y ayudar a afrontar los retos sociales⁵.

El marco legal de BBI JU y sus estatutos de funcionamiento se crearon mediante el Reglamento (UE) N.º 560/2014 del Consejo, de 6 de mayo de 2014. En este reglamento se establece la denominada «Empresa Común para las Bioindustrias». BBI JU es un organismo

² Reglamento del Consejo 560/2014, preámbulo punto (9), página 2.

³ COMISIÓN EUROPEA, COM(2012) 582.

⁴ Tratado de Funcionamiento de la Unión Europea, artículo 187.

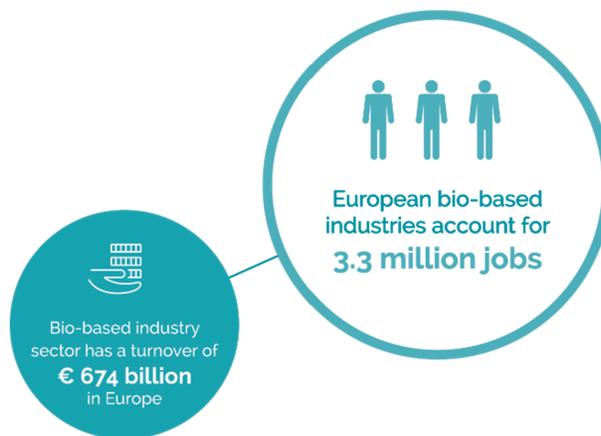
⁵ Reglamento del Consejo 560/2014, preámbulo punto (3), página 1.

europeo con personalidad jurídica propia y sede en Bruselas. Para facilitar la creación de BBI JU, la Comisión Europea se hizo cargo de su establecimiento y funcionamiento inicial hasta el año 2015, momento en el cual BBI JU adquirió la capacidad operativa necesaria para ejecutar su propio presupuesto. A fin de tener en cuenta la duración de Horizonte 2020, la duración del programa está contemplada hasta el 31 de diciembre de 2024, y las convocatorias de propuestas se efectuarán hasta el 31 de diciembre de 2020.

2. Bioindustrias: retos de un sector industrial emergente

El sector de las bioindustrias es un sector emergente que, según los datos del año 2014, generó en Europa unos 3,3 millones de puestos de trabajo y unos beneficios de más de 674 miles de millones (ver Figura 1).

Figura 1. Puestos de trabajo y beneficios en el sector de las bioindustrias (2014)



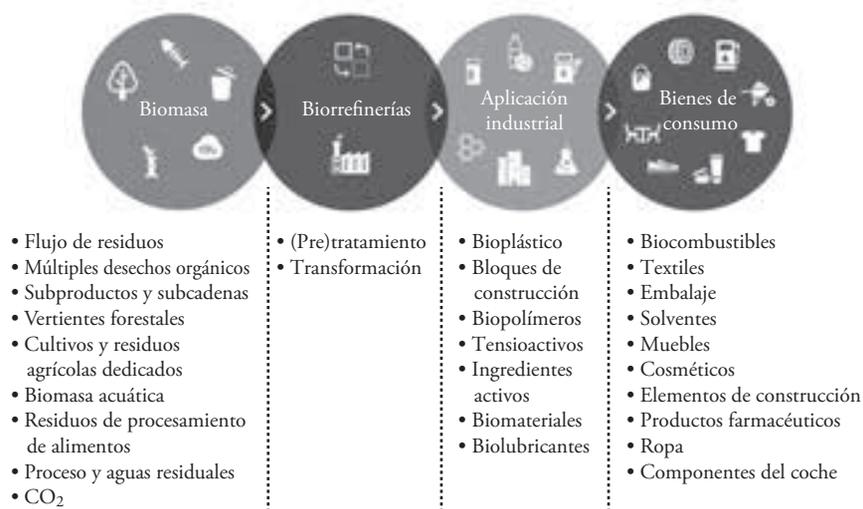
Fuente BBI JU.

En el marco de BBI JU se entienden como pertenecientes a este sector las industrias que transforman diversos tipos de biomasa tales como, cultivos y residuos agrícolas o forestales, algas, residuos de industrias agroalimentarias, o residuos orgánicos municipales. Lo pueden hacer a través de diferentes procesos bioquímicos o termo-químicos, en los que además de generar energía, se generan productos de alto valor añadido de origen biológico como plásticos, combustibles, productos químicos, materiales o proteínas (Figura 2). En este contexto, surgen las biorrefinerías, que son las plantas industriales, en las que a partir de biomasa (recursos de origen biológico) se obtienen además de energía, una gran diversidad de nuevos compuestos y materiales reciclados. Alguno de los compuestos generados, pueden comercializarse y llegar al consumidor directamente, mientras que otros son compuestos intermediarios, que se usan

para la producción de los productos finales que encontramos en el mercado como por ejemplo bolsas de plástico de supermercados, envases de productos alimentarios, juguetes, fertilizantes o partes de los automóviles. Los productos así generados (denominados en inglés *bio-based products*) suponen una alternativa más sostenible y ecológica a los que hasta ahora se obtenían utilizando directamente petróleo y/o sus productos derivados.

Como se puede ver en Figura 2, un rasgo característico de las bioindustrias es su organización en cadenas de valor de forma que participan en uno o varios de los segmentos en los que se divide la cadena de valor, desde el suministro de biomasa hasta su conversión en productos y compuestos finales para los consumidores.

Figura 2. Concepto de bioindustrias y sus cadenas de valor



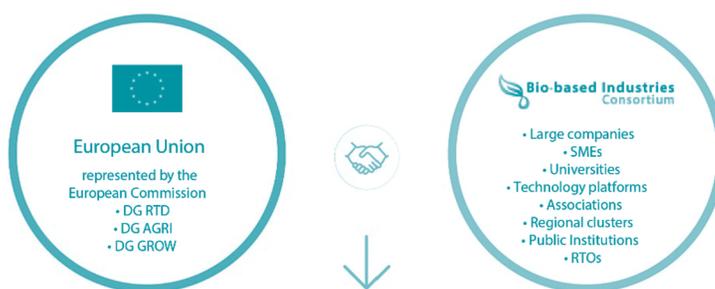
Fuente BBI JU.

3. BBI JU. Sus miembros y motivación para su creación: beneficios y oportunidades

En esta asociación público-privada los dos miembros, la Unión Europea representada por la Comisión Europea, y el sector privado industrial de las bioindustrias, representadas por la organización *Bio-based Industries Consortium* (BIC, Figura 3) decidieron participar de forma conjunta en una iniciativa tecnológica para la financiación de proyectos de investigación e innovación en el sector de las bioindustrias.

BIC es una organización sin ánimo de lucro que fue creada para representar al grupo de industrias que apoyan la iniciativa. Sus miembros representan toda la cadena del valor de las bioindustrias y entre ellos encontramos entre otros a grandes sociedades y también pequeñas y medianas empresas (pymes), asociaciones regionales, asociaciones sectoriales europeas y plataformas tecnológicas europeas. Su objetivo es garantizar y fomentar el desarrollo económico y tecnológico de las bioindustrias en Europa. Todas las partes interesadas que formen parte de la cadena del valor de las bioindustrias pueden solicitar su adhesión. BIC aplica los principios generales de apertura y transparencia en materia de adhesión, lo que garantiza una amplia participación del sector⁶. En esta organización, se integran y cooperan un rango muy amplio de sectores tales como el agrícola, forestal, agrícola-alimentario, papel y madera, producción de algas o diferentes tipos de residuos orgánicos.

Figura 3. Socios de BBI JU



Fuente: BBI JU.

La pregunta clave es: ¿por qué se creó esta iniciativa público-privada? Se trata de ir más allá de la concesión de una ayuda para la investigación e innovación, se trata de fomentar el crecimiento y la inversión de un sector industrial que tiene el interés, la intención y la capacidad de invertir en un área tecnológica específica pero que necesita del apoyo de fondos públicos para superar determinados retos y riesgos económicos, técnicos y sociales. En Europa, el sector de las bioindustrias es todavía un sector emergente y por tanto supone un riesgo importante para las empresas que quieren invertir en él. En el momento de su creación se identificó que, en algunos casos Europa era líder en cuanto a conocimiento o descubrimiento científico de determinados tecnologías o procesos, que generaban productos a pequeña escala, pero la explotación y producción a escalas mayores con vistas a su explotación comercial, ocurría fuera de Europa⁷. La fragmentación y dispersión entre los distintos actores que conforman las cadenas de valor, que en muchos casos nunca habían colaborado, la dispersión en la disponibilidad de

⁶ Reglamento del Consejo 560/2014, preámbulo punto (7), página 2.

⁷ COMISIÓN EUROPEA (2013), SWD(2013) 248 final.

biomasa, la fuerte inversión requerida para el establecimiento de biorrefinerías en el territorio o la existencia de barreras para la introducción de los nuevos productos en el mercado por no estar todavía consolidados, son algunos ejemplos de los retos a los que se tiene que someter este sector fragmentado y heterogéneo en Europa⁸.

Esta iniciativa se establece además para apoyar y afrontar determinados retos sociales y contribuir a los objetivos medioambientales que permitan un desarrollo más sostenible, tales como reducir la dependencia del petróleo, mejorar la eficiencia energética de procesos industriales, contribuir a la lucha contra el cambio climático, generar nuevas oportunidades de crecimiento para zonas rurales y crear empleo. Todos estos retos sociales y medioambientales son de una naturaleza transnacional y requieren de una estrategia y acción conjuntas a nivel europeo, por lo que el establecimiento de esta iniciativa a nivel de la UE tiene un claro valor añadido frente a actividades meramente regionales o nacionales.

4. Objetivos de BBI JU: desarrollo competitivo y sostenible del sector

De acuerdo con el Reglamento que crea BBI JU, el objetivo es el desarrollo de bioindustrias sostenibles y competitivas en Europa, basadas en biorrefinerías avanzadas que obtengan la biomasa que necesitan de forma sostenible (Figura 4).

Figura 4. Biorrefinería integrada en el territorio



⁸ COMISIÓN EUROPEA (2013), SWD(2013) 248 final.

En particular se trata de desarrollar todos los enfoques posibles. Por un lado, demostrar tecnologías que transformen la biomasa y den lugar a biomateriales, sustancias químicas y combustibles, que sustituyan la necesidad de utilizar combustibles fósiles. Por otro, desarrollar modelos de negocio que integren a los agentes económicos a lo largo de toda la cadena de valor, desde los proveedores de biomasa, hasta los consumidores finales pasando por los proveedores de tecnología, incluso mediante la creación de nuevas conexiones entre sectores. También hay que establecer biorrefinerías en el territorio que utilicen nuevas tecnologías y modelos de negocio que demuestren mejoras de coste y rendimiento a niveles competitivos con las alternativas fósiles.

El fin último es contribuir a una bioeconomía, de baja producción de CO₂, que haga un uso más eficiente de los recursos y un consumo energético más responsable, y que ayude a generar empleo y crecimiento económico, en particular en las zonas rurales.

5. La Agenda Estratégica de Investigación e Innovación de las Bioindustrias: SIRA⁹

La SIRA se publicó por primera vez en el año 2013 para establecer las prioridades y los principales retos tecnológicos y de innovación que hay que afrontar para conseguir un crecimiento competitivo y sostenible de la bioindustrias en Europa (Figura 5).

En este documento se refleja la visión de la industria (los socios de BIC) y es el marco de referencia para la preparación del plan de trabajo anual y la correspondiente publicación de convocatorias de propuestas. En esta agenda estratégica, también se establecen los resultados que la industria espera alcanzar en 2020 y 2030. Para ello ha identificado cuales son los indicadores de rendimiento (KPI, por sus siglas en inglés: *Key Performance Indicators*)¹⁰ (Tabla 1).

SIRA ha sido actualizada en 2017 para adaptarla a las nuevas ambiciones de los miembros de BIC y realidades del sector en Europa, signo de que este experimenta un rápido crecimiento con nuevos retos y prioridades. Algunas de las adaptaciones introducidas en la reciente actualización consisten en la consideración de nuevas fuentes de biomasa inicialmente no representadas, como la biomasa acuática o el CO₂ transformable mediante procesos biotecnológicos. Además, la nueva SIRA refuerza más aún la importancia de las nuevas conexiones entre las cadenas de valor tradicionales, conectando diferentes sectores y actores, y creando otras nuevas. Por ejemplo, generando nuevas cooperaciones entre sectores que tradicionalmente no han estado conectados como puede ser el sector automovilístico y el de las agroindustrias o el de los cosméticos y los residuos urbanos.

⁹ Siglas de su nombre inglés: *Strategic Innovation & Research Agenda*. BIO-BASED INDUSTRIES CONSORTIUM (BIC) (2013 y 2017), SIRA.

¹⁰ BIC (2017), SIRA.

Figura 5. Agenda de Investigación e Innovación de BIC



Fuente: SIRA.

Tabla 1. Indicadores de rendimiento (KPI) de ejecución del programa de BBI JU

KPI – Objetivo	2020
KPI 1. Número de nuevas conexiones de cooperación entre diferentes sectores y actores en el área de las bioindustrias	36
KPI 2. Número de nuevas cadenas de valor creadas	10
KPI 3. Número de contratos firmados entre BBI JU y el consorcio (número de proyectos financiados)	200
KPI 4. Número de compuestos químicos básicos (<i>chemical building blocks</i>) creados a partir de biomasa de origen europeo	5
KPI 5. Número de nuevos materiales producidos a partir de biomasa	50
KPI 6. Número de nuevos productos a disposición de los consumidores creados a partir de productos químicos o materiales producidos a partir de biomasa	30
KPI 7. Número de biorrefinerías operando a escala precomercial financiadas por BBI JU (proyectos <i>flagships</i>)	5
KPI 8. Mejora en el nivel de madurez de la tecnología-TRL en RIA: número de tecnologías validadas y mejoradas que cubren parte de la cadena de valor para producir nuevos compuestos químicos básicos, nuevos materiales, nuevos productos para los consumidores o nuevas aplicaciones	20

Fuente: SIRA. Elaboración: BBI JU.

En la SIRA actual, las prioridades de investigación e innovación se organizan en cuatro pilares, que conforman las orientaciones estratégicas que se denominan SO (*Strategic Orientations*) de las bioindustrias en Europa.

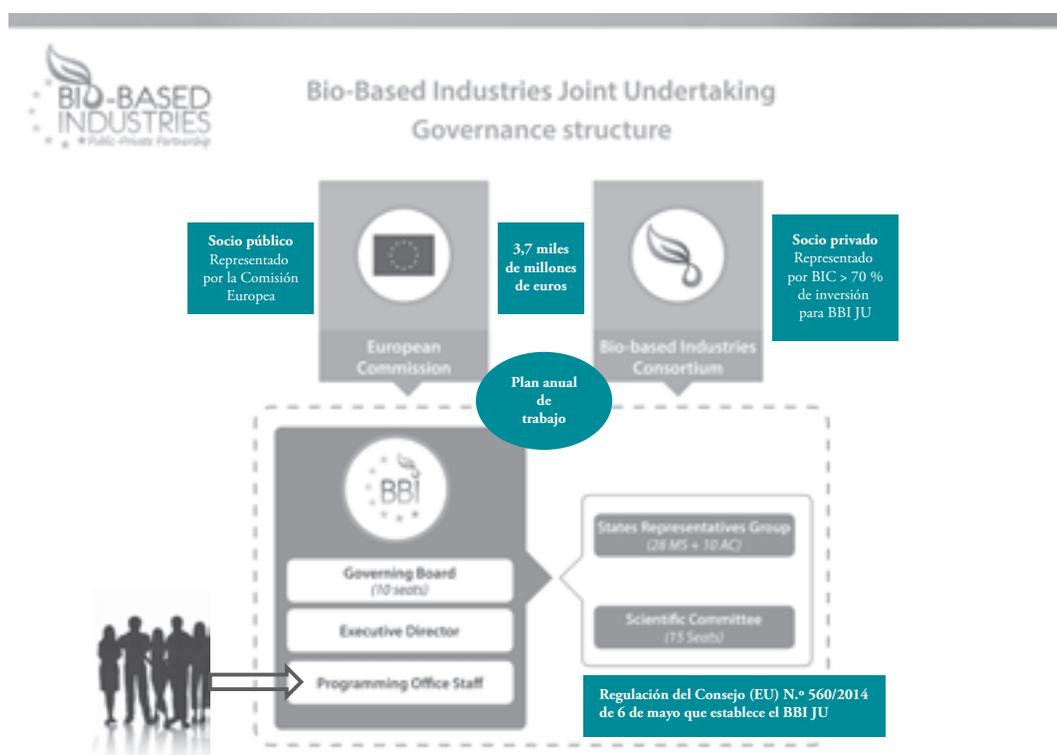
Figura 6. Orientaciones estratégicas de las bioindustrias



Fuente: SIRA.

La SO1 pretende asegurar un abastecimiento sostenible de biomasa que pueda satisfacer las necesidades de las cadenas de valor existentes y de otras nuevas que puedan desarrollarse. La misión de la SO2 es optimizar la eficiencia de los procesos aplicados en las biorrefinerías a través de investigación, desarrollo e innovación (R&D&I). En el caso de SO3 hay que desarrollar productos innovadores producidos a partir de biomasa con aplicaciones identificadas en el mercado. Finalmente, la SO4 debe acelerar la introducción de esos productos y sus aplicaciones en el mercado. Como se puede ver en la Figura 7, las orientaciones estratégicas representan los principios esenciales en la creación de las cadenas de valor, por un lado, su interconexión y por otro lado su circularidad.

Figura 7. Socios y gobernanza en BBI JU



Fuente BBI JU.

6. Gobernanza

La Oficina de BBI JU (*Programming Office Staff*) (ver Figura 7), dirigida en su funcionamiento diario y en la gestión e implementación del plan anual de trabajo por su director ejecutivo (*Executive Director*), cuenta con un órgano de decisión que es la Junta de Gobierno (*Governing Board*) con representación equitativa de los dos socios: la Comisión Europea (cinco representantes) y de BIC (cinco representantes) y cuya presidencia es rotatoria. Cada dos años se intercambia la presencia entre un miembro de la Comisión Europea y un miembro de BIC. La Junta de Gobierno es responsable de la orientación estratégica de BBI JU, aprobando entre otros documentos estratégicos el plan anual de trabajo, el presupuesto anual y el informe anual de actividad.

Además, BBI JU cuenta con el asesoramiento de dos órganos consultivos que son el Comité Científico o SC (por sus siglas en inglés: *Scientific Committee*) y el grupo de representantes de países o SRG (por sus siglas en inglés: *States Representatives Group*). El primero proporciona recomendaciones en el contenido del plan de trabajo y en el funcionamiento de

BBI JU de tipo técnico y científico y está constituido por quince miembros con experiencia multidisciplinar (biotecnología, agronómica, forestal, marina, aspectos sociales). El segundo representa los intereses de los Estados miembros e igualmente proporciona recomendaciones en el contenido del plan anual de trabajo y otros aspectos del funcionamiento de BBI JU. Está constituido por un representante (que puede tener un sustituto) de cada Estado miembro de la Unión Europea así de como los países asociados a Horizonte 2020.

7. Presupuesto disponible: fuerte compromiso de la industria

De acuerdo con el Reglamento Europeo que establece BBI JU, el presupuesto total de esta iniciativa asciende a 3.700 millones de euros, que serán invertidos durante el periodo 2014-2020. La Unión Europea se ha comprometido a contribuir con cerca de mil millones de euros (975 millones) para la cofinanciación de los proyectos elegidos tras las convocatorias de propuestas, además de para financiar los costes administrativos de la Oficina de BBI JU. BIC se ha comprometido a destinar 2.730 millones de euros, no solo para la financiación de los costes de las propuestas elegidas y de los costes administrativos de las oficinas de BBI JU, sino también para inversiones adicionales. En concreto, los miembros de BIC se han comprometido a invertir al menos 1.775 millones en estas inversiones adicionales que comprenden acciones que contribuyen a alcanzar el fin último de la iniciativa, por ejemplo, infraestructuras para mejorar la logística en el transporte de biomasa, equipamiento especializado o mejoras en plantas industriales de conversión, entre otras. No son inversiones directas para ejecutar actividades de los proyectos financiados por BBI JU. En conjunto, teniendo en cuentas todas las inversiones se puede concluir que aproximadamente, por cada euro público gastado, el sector industrial invertirá tres euros, lo que indica claramente el fin y la ambición de la iniciativa pública-privada: dedicar fondos públicos en un área donde existe un fuerte interés y compromiso de inversión privada.

8. Tipos de proyectos financiados por BBI JU

BBI JU cuenta con recursos del sector público y privado y financia los siguientes tipos de proyectos con vocación industrial¹¹: acciones de apoyo y coordinación (CSA por sus siglas en inglés: *coordination and support actions*), proyectos de investigación e innovación (RIA por sus siglas en inglés *research and innovation actions*) y proyectos de innovación (IA por sus siglas en inglés: *innovation actions*). Los proyectos IAs a su vez pueden ser plantas piloto y demostración (DEMO por sus siglas en inglés: *demonstration actions*) o plantas industriales funcionando a escala precomercial: (FLAG, denominadas *flagships* en inglés).

¹¹ BBI JU (2017).

Los CSA no son proyectos de investigación o desarrollo tecnológico propiamente dichos. Son acciones horizontales dirigidas a apoyar el desarrollo de las bioindustrias y sus cadenas de valor con diferentes medidas de apoyo que pueden incluir acciones de comunicación, normativa y cooperación, como, por ejemplo, medidas para la promoción de productos y creación de mercados, desarrollo y estudio de modelos de negocio, creación de plataformas para conectar los distintos agentes interesados o estudios para apoyar la toma de decisiones políticas. Suelen tener una duración entre uno y tres años y su presupuesto suele ser menor de un millón de euros.

Los RIA tienen como objetivo adquirir un nuevo conocimiento o explorar la viabilidad de una nueva tecnología, producto, proceso o servicio en una parte de la cadena de valor, de forma que el resultado es una cadena de valor mejorada en alguna de sus etapas. El resultado es una tecnología validada a nivel de laboratorio o el desarrollo de prototipo a pequeña escala (TRL, nivel de madurez de la tecnología, al final del proyecto 5). Suelen tener una duración de menos de cuatro años y el plan de trabajo estima que la financiación pública esté entre 2-5 millones de euros.

Los IA cubren la totalidad de la cadena de valor y tienen una duración entre 4 y 5 años. Los proyectos DEMO tienen como objetivo demostrar la viabilidad tecnológica y económica de una nueva o mejorada tecnología, producto o proceso en un ambiente operacional. El resultado es el establecimiento de una planta de producción a nivel de demostración. Puede tratarse de una nueva instalación, o de la modificación o renovación de instalaciones existentes trabajando a TRL 6 o 7 con vistas a incrementar la escala de producción como una etapa posterior. El plan de trabajo de BBI JU estima que la financiación pública solicitada sea inferior a 7 millones de euros.

Los proyectos *flagships* dan lugar a plantas industriales que funcionan a escala económicamente viable. Deben ser las primeras plantas en su género en Europa o desarrollar aplicaciones nuevas. Son proyectos que funcionan a TRL 8 y la tecnología o proceso ha tenido que ser probado con anterioridad a nivel de demostración, de forma que ya están preparados para producir compuestos a nivel comercial. El plan de trabajo de BBI JU estima que la financiación pública solicitada sea inferior a 21 millones de euros.

9. ¿Cómo funciona BBI JU en la práctica?

Cada año se prepara un plan de trabajo en el que se identifican las prioridades anuales en materia de investigación e innovación para el sector de las bioindustrias. La preparación del plan de trabajo es liderada por la industria (BIC), que conoce de primera mano las necesidades y retos que necesita afrontar la industria en el marco de la SIRA. Los miembros de BIC tienen una ventaja importante en esta iniciativa, pues participan en la definición de este plan anual de trabajo con sus ideas y retos. La Comisión Europea trabaja en colaboración con la industria, en la definición del plan anual de trabajo, para asegurar que los intereses públicos

retos sociales están bien abordados. Por su parte BBI JU, revisa su contenido para asegurar que las recomendaciones de sus órganos consultivos, el SC y el SRG son adecuadamente consideradas por los dos socios. El plan de trabajo es el documento que identifica los temas en los que se deben presentar propuestas de proyectos. Este se publica anualmente en la página web de BBI JU¹² y es el documento marco para la apertura de la convocatoria para la presentación de propuestas, para dichos tópicos. La convocatoria se publica en la página web de BBI JU y en el portal del participante de Horizonte 2020¹³ junto con una guía del participante donde se explican las reglas y condiciones de participación. El periodo para la presentación de propuestas suele durar unos cuatro meses, generalmente entre abril y septiembre. Los temas propuestos definen la temática de las propuestas, los retos a los que deben contribuir y los impactos esperados. Una vez que la convocatoria se ha cerrado, se realiza la evaluación de las propuestas con expertos externos independientes que identifican las mejores propuestas. Una vez seleccionados los proyectos a financiar, BBI JU se encarga de preparar el contrato con el consorcio que establece las bases legales para su ejecución, hacer un seguimiento de su correcta ejecución y promover que los resultados de los mismos tengan máximo impacto.

Las convocatorias siguen las reglas de Horizonte 2020: están abiertas a todo tipo de organizaciones; son competitivas y transparentes, es decir, las reglas de participación y evaluación son públicas y conocidas por adelantado; se premia es la excelencia, lo que implica que la selección se realiza en función de la calidad de las propuestas, siguiendo criterios de evaluación claramente preestablecidos, y solo las mejores propuestas son seleccionadas durante la evaluación.

Los criterios que siguen los evaluadores son similares a los aplicados en la evaluación de propuestas Horizonte 2020: excelencia (objetivos, concepto, metodología); impacto (económico, social y ambiental, innovación, empleo); e implementación (plan de trabajo y organización en paquetes de trabajo, recursos destinados a cada paquete de trabajo, experiencia del consorcio). También se evalúan aspectos específicos de BBI JU. Por ejemplo, si las propuestas consideran adecuadamente toda la cadena de valor, el plan de negocio y el nivel de madurez de la tecnología aplicadas (en IA) o en qué medida las contribuciones privadas a los proyectos, incluyendo inversiones adicionales, contribuyen a maximizar el impacto del proyecto (en IA y RIA).

Las empresas y organizaciones que participan en el consorcio reciben un porcentaje de financiación de los gastos que van a realizar para implementar el proyecto. Estos porcentajes son iguales a los que se fijan en un proyecto Horizonte 2020, con una excepción importante, en línea con la filosofía de la iniciativa, ya que las grandes empresas en las acciones de tipo RIA y CSA no reciben financiación (ratio de reembolso 0 %) de forma que su participación en un proyecto y los costes que ello les supone se considera plenamente como contribución de la industria al proyecto. Otras organizaciones dentro del consorcio pueden solicitar menos dinero que el máximo reembolsable y también se consideran contribuciones de los miembros del consorcio a los proyectos (Tabla 2).

¹² <https://www.bbi-europe.eu/about/reference-documents>.

¹³ <https://ec.europa.eu/research/participants/portal/desktop/en/opportunities/index.htm>.

Tabla 2. Porcentaje máximo de reembolso

Tipo de participante	RIA	IA	CSA
Grandes industrias	0	70	0
Pequeñas y medianas empresas	100	70	100
Organizaciones sin ánimo de lucro (universidades, centros de investigación, etc.)	100	100	100

Fuente: BBI JU.

10. BBI JU: logros y perspectivas

A fecha 1 de enero de 2018, BBI JU cuenta con 65 proyectos de investigación e innovación puestos en marcha. Es importante destacar que a mitad del programa de BBI JU, con cuatro convocatorias anuales de las ocho previstas realizadas) seis plantas industriales *flagships* están en proceso de construcción. Los primeros proyectos se iniciaron en el año 2015, tras la publicación de la primera convocatoria de propuestas en el año 2014. Estos proyectos todavía no se han acabado, los primeros lo harán al final del año 2018, por lo que todavía no se puede hablar de resultados definitivos. Sin embargo, muchos de ellos ya están generando impactos visibles en relación con el empleo, innovación, eficiencia energética en los procesos, o reducción en las emisiones de CO₂, además de nuevos productos, aplicaciones en el mercado, conexiones entre sectores que nunca habían colaborado previamente, y la creación de nuevas cadenas de valor.

De acuerdo con la evaluación realizada por la Comisión Europea a mitad de la ejecución del programa (2014-2016)¹⁴, los principales efectos positivos se deben a una mejora de la competitividad de las tecnologías desarrolladas gracias a la creación de cooperaciones entre diferentes actores a lo largo de las cadenas de valor (efecto estructurador) y a la clara movilización de los agentes interesados clave (efecto movilizador). Así mismo destaca que, aunque muchos de los proyectos solo están comenzando, es destacable la participación e inversiones del sector privado. BBI JU está consiguiendo por tanto movilizar el sector industrial en Europa y fomentar que se hagan inversiones en el territorio. Ejemplo de ello son las inversiones en actividades adicionales que las empresas y organizaciones de BIC han realizado desde el comienzo de la iniciativa en el año 2014, de los cuales 580 millones han sido ya auditados y certificados por auditores independientes (cifra de inversiones adicionales auditadas y certificadas a 31 diciembre 2017)¹⁵.

El progreso de los mencionados indicadores muestra una tendencia muy positiva en la consecución de los objetivos establecidos para el año 2020, de acuerdo con los resultados esperados reportados por los coordinadores de los proyectos. Las proyecciones a finales del año

¹⁴ COMISIÓN EUROPEA (2017)- BBI JU interim evaluation.

¹⁵ BBI JU (2017), 2016 Annual Activity Report.

2016 relativas a tan solo los 36 primeros proyectos¹⁶ muestran la creación de más de 140 nuevas conexiones entre sectores que no habían cooperado antes y de más de 80 nuevas cadenas de valor, lo que evidencia una fuerte movilización de las bioindustrias en Europa. En lo que concierne a la transición de una economía de origen fósil a una basada en el uso sostenible de la biomasa, estos primeros 36 proyectos esperan crear más de 40 compuestos químicos básicos, 100 materiales y 50 productos. Todos ellos se obtendrán a partir de biomasa, con propiedades equivalentes o mejores que sus alternativas fósiles y con un impacto medioambiental menor. A finales de 2017, BBI JU cuenta ya con el proyecto de seis biorrefinerías en Europa, habiendo superado el objetivo de cinco biorrefinerías establecido para 2020.

También es importante recalcar, cómo la iniciativa es cada vez más conocida y de interés para las empresas tanto públicas como privadas. El número de participantes y el número de propuestas enviadas por tema ha seguido una tendencia creciente. Como países líderes en cuanto a número de participantes en las propuestas destacan Alemania, España y Países Bajos en este orden (con datos de las convocatorias publicadas entre 2014 y 2016)¹⁷. BBI JU promueve que el potencial en todas las regiones de Europa sea utilizado al máximo, incrementando acciones y esfuerzos de promoción de la iniciativa en aquellos países con menos participación. La participación de pymes alcanzada hasta la fecha es también muy positiva, con un total de 292 pymes participando en los proyectos que representan el 36 % del total de participantes, superando el objetivo inicial establecido en 20 % para el programa H2020¹⁸.

BBI JU trabaja también para promover sinergias con otros instrumentos y programas que pueden ser de interés para el sector de las bioindustrias. El fin último es conseguir máxima eficiencia en el uso de los fondos públicos, alineando esfuerzos y evitando que haya solapamientos en las convocatorias publicadas. Ofrecen también oportunidades al sector de las bioindustrias otros programas, tales como los fondos estructurales y de inversión (ESIF), la iniciativa pública-privada SPIRE (*Sustainable Process Industry through Resource and Energy Efficiency*), ERA NET, iniciativas creadas por el Instituto Europeo de Innovación y Tecnología (EIT) o por el Banco Europeo de Inversiones. Como ejemplo, cabe destacar que se ha creado un grupo de trabajo con SPIRE en el que se discuten acciones para evitar redundancias en los temas publicados, para informar al público de las diferencias y similitudes de ambas iniciativas, así como para conectar a las comunidades de ambas iniciativas y promover cooperaciones entre proyectos y grupos de interés.

11. BBI JU en la práctica: algunos ejemplos de proyectos

Finalmente, a continuación se presentan una serie de ejemplos de proyectos financiados por BBI JU¹⁹. Los proyectos que se comentan solo representan una pequeña muestra de los

¹⁶ BBI JU (2017), *2016 Annual Activity Report*.

¹⁷ BBI JU (2017), *2016 Annual Activity Report*.

¹⁸ BBI JU (2017), *2016 Annual Activity Report*.

¹⁹ Información recuperada de las páginas web de los proyectos y de la de BBI JU.

proyectos puestos en marcha hasta el momento. La finalidad es mostrar las diferencias entre los tipos de acciones que financia BBI JU (CSA, RIA, DEMO y *flagships*) y que abarcan distintas cadenas de valor. Entre la selección, dos de ellos están coordinados por organizaciones españolas. Se trata de los proyectos AgriMax y NewFert. Toda la información de los proyectos que actualmente se han puesto en marcha puede encontrarse en la página web de BBI JU²⁰ así como en la propia página web de los proyectos presentados como ejemplo²¹.

El primer ejemplo es el proyecto BLOWAYS, un proyecto CSA, que tiene como objetivo explotar el potencial que tiene el conocimiento que se ha generado en el área de bioindustrias y mejorar la percepción y conocimiento del público sobre los beneficios de los productos de base biológica y sus aplicaciones. Para ello en este proyecto se desarrollan una gran variedad de técnicas de comunicación, de concienciación, de interacción con el público y de educación. Por ejemplo, se desarrollan campañas creativas de comunicación, una plataforma digital, una e-biblioteca con información relevante sobre productos, o una comunidad con todos los agentes interesados o cursos para estudiantes y formación para profesores.

El proyecto NEWFERT, es un proyecto RIA que se centra en el desarrollo de tecnologías que permiten reutilizar y valorizar residuos de origen orgánico para la recuperación de nutrientes (N, P, K), que se utilizarán como materia prima para la producción de una nueva gama de fertilizante minerales avanzados, cerrando así el ciclo de los nutrientes en la agricultura y contribuyendo al reto europeo de construir una economía circular. Fertiberia, una de las mayores empresas de fertilizantes a nivel mundial, lidera este proyecto que responde a la necesidad que tiene Europa de reducir la gran dependencia de las importaciones de las materias primas que se usan en la fabricación de fertilizantes, y reutilizar los nutrientes acumulados en los residuos.

AgriMax es un proyecto DEMO que tiene como objetivo validar, técnica y comercialmente, la producción en cascada de productos de alto valor añadido en dos biorrefinerías diseñadas para el procesado de residuos agrícolas y de la industria agroalimentaria. Los productos finales que se van a validar tienen diferentes aplicaciones, tales como envases (biopolímeros, revestimientos, estabilizantes, etc.), productos alimentarios (aditivos, saborizantes, aromas, ingredientes, etc.) o materiales agrícolas (macetas biodegradables, películas de acolchado, biofertilizantes).

Finalmente, el proyecto Exilva, es un proyecto *flagship* que pondrá en funcionamiento la primera planta a nivel mundial para la producción de MFC (microfibras de celulosa) en el mundo, con el objetivo de alcanzar una producción de al menos 1000 toneladas de MFC por año. El proyecto validará técnica y económicamente la transformación de una planta piloto a otra que funcione a nivel pre-comercial y optimizará todo el proceso. Se validarán aplicaciones de MFC en diferentes productos, tales como cremas, cosméticos, productos de limpieza, excipientes farmacéuticos o productos químicos agrícolas, en las que las MFC sustituyen a componentes de origen fósil, mejorando sus propiedades y reduciendo la huella de carbono.

²⁰ <https://bbi-europe.eu/projects>.

²¹ <http://www.bioways.eu>; <http://newfert.org/>; <http://www.agrimax-project.eu>; <http://www.h2020-exilva.com/>.

Para más información sobre los orígenes del BBI JU, su marco de referencia y su contenido, se recomienda al lector consultar los artículos publicados por la revista *New Biotechnology* (Elsevier) en su número especial de bioeconomía, en particular aquellos dedicados a los orígenes de la bioeconomía²², al contexto y desarrollo de la Estrategia Europea de Bioeconomía²³ y a BBI JU²⁴.

Agradecimientos

A Alfredo Aguilar por sus consejos durante la redacción de este artículo, y a todos nuestros compañeros de la Comisión Europea, de BIC y de BBI JU, que han hecho posible la creación de esta iniciativa y hacen posible cada día su funcionamiento.

Referencias bibliográficas

- BELL, J.; PAULA, L.; DODD, T.; NÉMETH, S.; NANOU, C.; CAMPOS, P. y MEGA V. (2018): «EU ambition to build the world's leading bioeconomy-uncertain times demand innovative and sustainable solutions»; en *New Biotechnology* (40); pp. 25-30.
- BIO-BASED INDUSTRIES CONSORTIUM (2017): *SIRA «Strategic Innovation & Research Agenda»*. Bruselas; pp. 24; 62-63.
- BIO-BASED INDUSTRIES JOINT UNDERTAKING (2017): *Guide for applicants for the Call 2017*. Bruselas; pp. 10-24.
- BIO-BASED INDUSTRIES JOINT UNDERTAKING (2017): *2016 Bio-based Industries Joint Undertaking 2016 Annual Activity Report*. Bruselas; pp. 6; 14; 31-59.
- PATERMANN, C. y AGUILAR, A. (2018): «The origins of the bioeconomy in the European Union»; en *New Biotechnology* (40); pp. 20-24.
- CONSEJO DE LA UNIÓN EUROPEA (2014): Reglamento UE N.º 560/2014 del Consejo, de 6 de mayo de 2014 por el que se establece la Empresa Común para las Bioindustrias.
- COMISIÓN EUROPEA (2012): Comunicación de la Comisión Europea, COM(2012)60, al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones «La innovación al servicio del crecimiento sostenible: una bioeconomía para Europa»; Luxemburgo.
- COMISIÓN EUROPEA (2012): Comunicación de la Comisión Europea, COM(2012)582, al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité

²² PATERMANN y AGUILAR (2018).

²³ BELL *et al.* (2018).

²⁴ MENGAL *et al.* (2018).

de las Regiones «Una industria europea más fuerte para el crecimiento y la recuperación económica»; Luxemburgo.

COMISIÓN EUROPEA (2013): Documento de trabajo de los servicios de la Comisión, SWD(2013) 248 final, «Resumen de la evaluación de impacto que acompaña al documento Propuesta de Reglamento del Consejo relativo a la Empresa Común para las Bioindustrias»; Bruselas.

COMISIÓN EUROPEA (2017): Interim Evaluation of the Bio-based Industries Joint Undertaking (2014-2016) operating under Horizon 2020, Experts Group Report (Roland Wohlgemuth, Chair; Lucia Gardossi, Reporteur; Tiina Pursula; Danuta Cichocka; Erick Vandamme; Alistair Reid); Bruselas.

DAMMER, L.; CARUS, M.; IFFLAND, K.; PIOTROWSKI, S.; SARMENTO, L.; CHINTHAPALLI, R. y RASCHKA, A. (2017): «Current situation and trends of the bio-based industries in Europe with a focus on bio-based materials»; Nova-Institute; p. 11.

ESTADOS MIEMBROS DE LA UNIÓN EUROPEA (2012): Versión consolidada del tratado de funcionamiento de la Unión Europea, artículo 186.

MENGAL, P.; ZIKA, E.; WUBBOLTS, M.; RUIZ, A.; BRIGITTA, D.; PIENIADZ, A. y BLACK, S. (2018): «Bio-based industries joint undertaking -the catalyst for the sustainable bio-based economic growth»; en *New Biotechnology* (40); pp. 31-39.



DESARROLLO DE LA BIOECONOMÍA EN ALEMANIA, AYER, HOY Y MAÑANA DESAFÍOS Y PERSPECTIVAS

Christian Patermann

Exdirector de la Comisión Europea y director general adjunto (retirado)
del Ministerio de Investigación y Educación del Gobierno alemán

Resumen

El estado actual de la bioeconomía en Alemania puede caracterizarse como políticamente excepcional y con acceso suficiente a la financiación; reconocido, respetado y dirigido por comunidades científicas y de investigación; e incluso pionero, en algunas zonas con respecto a estrategias novedosas, planes de acción, educación y mecanismos asesores. Sin embargo, la industria alemana no está todavía lista para aceptar la bioeconomía como un modelo de negocio real. Las condiciones del marco estratégico y político para una bioeconomía alemana son únicas, con un programa específico en investigación, desarrollo tecnológico e innovación, con una estrategia política y con una sólida oferta de líneas de financiación y planificación. Cuenta con un cuerpo asesor nacional influyente, el Bioökonomierat, que funciona con éxito activando muchos nuevos desarrollos, a los que se suman las estrategias regionales, planes de acción y mapas de ruta que han desarrollado específicamente algunos de los Länder. En Baviera, en el curso 2018/2019 comenzará a impartirse la primera licenciatura en Bioeconomía y Química Sostenible del mundo. Sin embargo, al contrario de lo que ocurre en otros países europeos, no existen proyectos emblemáticos con gran visibilidad. Nos encontramos, en definitiva, ante un 'modelo' nacional particular, que quizá refleje una característica de la industria alemana: es más prudente con los desarrollos innovadores y prefiere esperar un poco antes de comprometerse e implicarse en profundidad. Un fenómeno interesante que, no obstante, plantea cada vez más la pregunta de si es ésta la actitud correcta, en una época de desarrollos muy rápidos y acelerados en innovación. A este respecto, la bioeconomía resulta ser un laboratorio muy interesante para ensayar en qué medida nuestro futuro será sostenible, circular, digital y/o de base biológica, o un poco de todo.

Abstract

The present state of the Bioeconomy in the most populated and largest economic power state of the EU, Germany, can be qualified as politically impressive and financially well funded; acknowledged, respected and operated by the scientific and research communities; in some areas even a kind of trendsetter with respect to novel strategies, action plans, education and advisory mechanisms; BUT far from being accepted by the domestic industries as a real promising business model! Strategic and political framework conditions for a booming Bioeconomy in Germany are indeed unique: Germany enjoys a dedicated RTDI and general policy strategy since a decade, offering robust and solid funding and planning potentials; an influential national Advisory body, the German Bioökonomierat works very successfully, triggering many new developments, some of the largest German Länder have developed even their own regional strategies, action plans and road maps. In Bavaria in autumn of this year the first bachelor course in Bioeconomy and sustainable chemistry worldwide will be launched. However comparing the situation in a few other European countries there are no visible Flagship projects, for example in the shape of larger operational or commercial biorefining facilities. Thus we face a very particular German 'model', which might reflect a special German industrial feature with respect to the future: German industries are more cautious with new innovative developments and prefer to wait a little before really became largely engaged and involved. An interesting phenomena, which however puts more and more the question whether in a time of dramatic speedy and accelerating developments in innovation such a hesitating 'compostura' is the right one. In this respect the Bioeconomy turns out to be a very interesting lab for the future to test, to what extent our futures will be sustainable, circular, digital and/or biobased, or a tout petit de tous, un poquito de todo.

Alemania ya acordó, a finales de 2006, en una etapa muy temprana, dar un peso político a la bioeconomía y establecer las condiciones previas para su implementación. Con las políticas llevadas a cabo por el Gobierno federal y algunos *länder* alemanes, se estableció un marco para una economía viable, basado en una mezcla interesante para cumplir con las demandas

de a) sostenibilidad; b) eficiencia de los recursos a través de la circularidad (en Alemania existe desde 1997 una ley nacional sobre economía circular, *Kreislaufwirtschaftsgesetz*); c) combatir el cambio climático; y d) impulsar la innovación: un enfoque que de ninguna manera pretende ser una desviación unidimensional de la economía fósil.

Los encargados de formular políticas son conscientes de que no se debe permitir que una desviación de la dependencia tradicional del petróleo genere dependencias nuevas o incluso más fuertes y/o nuevos problemas ambientales. La transición a una economía de base biológica solo tendría éxito si se presta atención desde el principio a la protección del medioambiente, el clima y la biodiversidad. Así, ya en 2007, justo en el mismo momento en que comenzó el 7.º Programa Marco de la UE bajo la Presidencia alemana, se publicó el denominado *Cologne Paper*¹, que todavía hoy presenta una de las fuentes estratégicas más importantes para el desarrollo de la bioeconomía en Europa². Curiosamente, en ese momento las perspectivas y las posibilidades de un mayor uso de los recursos biológicos también cubrían las tecnologías sanitarias y médicas, áreas que más tarde no fueron seguidas por Bruselas y la gran mayoría de los países europeos, pero sí por Estados Unidos, la OCDE y algunas regiones individuales como Westfalia del Norte en Alemania. También vale la pena mencionar el acuerdo de coalición entre los demócratas cristianos alemanes y los liberales ya en 2009, que incluía el apoyo a la bioeconomía. Un apoyo estratégico político bastante único que podría disfrutar de Alemania, como entidad política. Por lo tanto, tampoco es de extrañar que, un año antes, se estableciera un fuerte comité asesor nacional para la bioeconomía, el *Bioökonomierat*, el primero de su tipo, que luego recomendó muy rápidamente al Gobierno federal crear una Estrategia Nacional de Bioeconomía, primero en el formato de una estrategia IDTI (Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación).

Esta *National Research Strategy BioEconomy 2030* (NFSB 2030)³ fue formulada en 2010 bajo la dirección del Ministerio Federal de Educación e Investigación (BMBF). Especificó todos los objetivos y visiones que eran relevantes en ese momento y estableció estándares que son elevados incluso a escala internacional. Casi ningún otro país abordó tan decididamente los problemas, los riesgos potenciales de la bioeconomía y su significación para el cambio estructural industrial en el sentido del crecimiento económico sostenible en una etapa tan temprana. Comprendía cinco campos temáticos de acción: (i) seguridad alimentaria mundial, (ii) producción agrícola sostenible, (iii) alimentos sanos y seguros, (iv) la aplicación industrial de recursos renovables, y (v) el aumento en el uso de la energía basada en la biomasa, que se definieron como los elementos principales de esta estrategia, además de cuestiones transversales como la cooperación internacional, el apoyo a las pequeñas y medianas empresas (pymes) y la bioeconomía como parte de una transformación social integral. Además, se destinaron 2.400 millones de euros para los años siguientes para apoyar actividades relevantes de IDTI.

¹ UNIÓN EUROPEA (2007).

² PATERMANN Y AGUILAR (2018) Y PATERMANN (2015).

³ https://www.bmbf.de/pub/National_Research_Strategy_Bioeconomy_2030.pdf.

1. Un marco político coherente para la bioeconomía

Durante este proceso institucional preparatorio, las partes interesadas en la política alemana, incluidos los miembros de las circunscripciones parlamentarias, tuvieron una idea muy importante; a saber, que establecer o construir la bioeconomía requiere políticas más coherentes que nunca. En Alemania, la bioeconomía también es, en la realidad política, un asunto de todo el Gobierno federal. Esto se hizo particularmente evidente en el NFSB 2030. Trabajando junto con colegas de los Ministerios de Agricultura, Asuntos Económicos, Medio Ambiente, Cooperación Económica y Asuntos Exteriores, se destinó un presupuesto de investigación y desarrollo de 2.400 millones de euros durante un período de seis años solo para la bioeconomía. Como se dijo anteriormente, un esfuerzo que no fue fácil, y que provocó inversiones específicas en este campo por parte de las industrias, los *länder* alemanes, etc., de al menos la misma dimensión financiera. Era muy lógico que pronto se elaborara una estrategia general de política nacional de bioeconomía en 2012 bajo la dirección del Ministerio Federal de Alimentación y Agricultura, que estableció el marco reglamentario y legislativo en su publicación de 2013⁴. Varios Ministerios federales y la Cancillería federal han estado coordinando sus medidas en un grupo de trabajo conjunto en los años posteriores, y actualmente el Gobierno federal está en proceso de revisar la estrategia de RTDI de 2010 para llevarla a nuevos niveles de expectativas más modernos, como la circularidad, la digitalización, etc.

El primer informe de progreso del Gobierno federal sobre la Estrategia Nacional de Política de Bioeconomía de agosto de 2016 confirmó que estas acciones están mostrando indicios de éxito⁵. Este informe de progreso muestra claramente cómo las medidas adoptadas por el Gobierno federal están implementando los principios de la estrategia, que proporcionan las directrices para el diseño de programas de financiación, acuerdos internacionales, conferencias nacionales e internacionales y numerosas medidas nacionales e internacionales introducidas por los respectivos ministerios.

Además, las actividades de ámbito federal han llevado a los *länder* individuales a apoyar la bioeconomía bajo sus propios programas de financiación de la investigación. *Länder*, como Rin del Norte-Westfalia o Baden-Württemberg han lanzado sus propios programas de investigación bioeconómica, incluso estrategias regionales o planes de acción. Otros como Bavaria o Saxonía-Anhalt, también brindan apoyo específico a iniciativas y redes en este campo⁶.

Los resultados de la reciente evaluación del NFSB 2030⁷ muestran que las actividades van en la dirección correcta. Un resultado central de este análisis de aproximadamente 1.800 proyectos de I + D financiados por el BMBF, una serie de estudios de caso, encuestas a partes interesadas y debates de expertos, es que la estrategia ha proporcionado importantes estímulos para el desarrollo de especialistas y competencias del personal en ciencia e industria. Una encuesta actual del panorama alemán de investigación en bioeconomía muestra que ha

⁴ <http://www.bmel.de/SharedDocs/downloads/EN/Publications>.

⁵ http://www.bmel.de/sharedDocs/downloads/Broschueren/fortschrittsbericht-bioeconomie.pdf?_blob-publicationFile.

⁶ BIOÖKONOMIERAT (2017).

⁷ Evaluación de la Estrategia Nacional de Investigación de Bioeconomía de Fraunhofer ISI (2030).

sido posible, con el apoyo adicional de los *länder*, establecer una excelente infraestructura de investigación en muchos lugares en Alemania con varios centros de investigación especializados en la bioeconomía⁸. Por mencionar solo algunos, estos incluyen: el Centro de Ciencia Bioeconómica (*Bioeconomy Science Center*, BioSC) en Rin del Norte-Westfalia; el Campus Científico de Bioeconomía Basada en Plantas (*Science Campus Plant-Based Bioeconomy*) en Halle, Universidad de Hohenheim, que por cierto ya realizó el primer Máster en Bioeconomía hace unos años; el área de Munich con la Universidad Técnica de Munich (TUM), que comenzó el primer curso de la licenciatura en Bioeconomía en Straubing Biocampus en otoño de 2018; y la Universidad de Ciencias Aplicadas Weihenstephan-Triesdorf, el Centro de Microbiología Sintética (*Center for Synthetic Microbiology*, SYNMIKRO) en la Universidad de Marburgo; el Instituto de Tecnología de Karlsruhe (*Karlsruhe Institute of Technology*, KIT); las Universidades de Stuttgart, Bielefeld y Darmstadt, el Centro de Bioeconomía Aplicada (*Center of Applied Bioeconomy*, CAB) en Osnabrück. Además, las grandes organizaciones de investigación, como Fraunhofer, la Asociación Helmholtz, la Sociedad Max Planck y la Asociación Leibniz, también están activas a través de las fronteras de los Lander. Así, en el Instituto Marburgo Fraunhofer IME opera el primer Instituto Nacional de Biotecnología de Insectos, y en Leuna otro Instituto Fraunhofer ha establecido el Centro de Química-Procesos Biotecnológicos CBI, un tipo de centro de investigación de biorrefinería general que optimiza la biorrefinería en madera y base forestal, con participación internacional. Estas organizaciones tienen muchos otros centros dedicados a actividades relacionadas con la bioeconomía y distribuidos por toda Alemania, demasiado numerosos para nombrarlos individualmente.

2. La importancia económica de la bioeconomía

La situación económica de la bioeconomía y su importancia son más difíciles de estimar. De acuerdo con el informe de progreso antes mencionado sobre la Estrategia de Política Nacional en Bioeconomía⁹, la creación de valor en el sector de la bioeconomía alemana aumentó de 115.000 millones de euros a 140.000 millones entre 2002 y 2010. Esto corresponde a una tasa de crecimiento del 22 %, mientras que la creación de valor económico general aumentó en un 16 % desde 1995 hasta 2310 millones de euros. La bioeconomía representó el 6 % de la creación de valor económico general en el sector agrícola y alimentario alemán. Más del 12 % de todos los empleados trabajaron en el sector de la bioeconomía en 2010. Sin embargo, la evaluación también muestra que las actividades clásicas, como la producción de alimentos, el procesamiento y la comercialización, así como la producción de papel y la utilización de la madera, dominan hasta ahora el sector manufacturero de la bioeconomía. El papel de los usos no alimentarios de las materias primas biológicas en campos de producción más innovadores, como los productos químicos de base biológica, aún no está claro y es difícil de captar estadísticamente, aunque su papel se ha vuelto más significativo en Alemania en los últimos

⁸ BIOÖKONOMIERAT (2017).

⁹ http://www.bmel.de/sharedDocs/downloads/Broschueren/fortschrittsbericht-bioeconomie.pdf?_blob-publicationFile.

años. Sin embargo, estos datos ya no corresponden a la realidad. Por lo tanto, en la actualidad el gobierno federal, conjuntamente con muchas partes interesadas, está elaborando un sistema innovador emergente para identificar, recopilar, analizar y controlar los datos correspondientes relevantes para una base de futuro tangible y fiable para fomentar las tendencias bioeconómicas en Alemania. Esto es paralelo a los esfuerzos en la UE y otros estados miembros para establecer los llamados observatorios nacionales para proporcionar y explicar los datos necesarios para el futuro.

Hoy en día es casi imposible nombrar los diferentes productos de base biológica y también de forma creciente los procesos, por ejemplo, para el diagnóstico, el análisis y las mediciones, que ya están en el mercado o que están en proceso. Van desde los famosos *bio-plugs* de Fischer, Fischer Dübel, o mortero de construcción sobre limpiabotas de base biológica, balones de fútbol con base biológica para el próximo campeonato mundial de fútbol a productos químicos de plataforma con base biológica, como ácidos succínico o levulínico, poliamida, rodillos para *longboards* o espumas de contención no inflamables para edificios, posos de café y otros residuos vegetales para reemplazar plásticos, neumáticos de goma biológica basados en el diente de león ruso, etc. El Instituto Nova de Colonia¹⁰ otorga cada año un premio al material biológico más innovador del año, con una lista cada vez mayor de competidores, y su portal de internet sobre industrias biológicas¹¹ se está convirtiendo en uno de los portales de bioeconomía más visitados en todo el mundo, con una importante aceptación especialmente en Asia.

Muchos, pero no todos, de estos procesos industriales de producción biológica han sido apoyados por programas de financiación promocional sistemáticos de IDTI por el Gobierno federal, en particular el BMBF, el Ministerio Federal de Investigación alemán, pero también el Ministerio de Agricultura y Alimentación a través de su influyente *Fachagentur für Erneuerbare Ressource* (FNR), Agencia Especial para Recursos Renovables, en Mecklemburgo Pomerania en el Báltico. A continuación se muestran algunos ejemplos prácticos para demostrar la viabilidad y eficiencia de estos mecanismos, las denominadas *Alianzas Estratégicas*. Los siguientes temas se han llevado a cabo con éxito durante los últimos cinco años y corresponden a grandes proyectos liderados por la industria y parcialmente cofinanciados:

- Huella de carbono cero, para sustituir los usos biotecnológicos de los desechos de alto contenido de carbono en productos químicos valiosos por microbios,
- Funcionalización de polímeros para la producción de polímeros y plastificantes de base biológica, creando nuevas funciones para fibras de polímeros, enzimas de limpieza en productos químicos, textiles y detergentes.
- Vida natural, apoyando el desarrollo de ingredientes bioactivos para alimentos y cosméticos a partir de fuentes naturales.

¹⁰ Nova Institut GmbH, Chemiepark Knapsack, Industriestraße 300, D-50354 Hürth, contact(at)nova-institut.de.

¹¹ <http://bio-based.eu/news/>.

- Proteínas tecnofuncionales a partir de residuos y productos agrícolas, para su aplicación en nuevas cadenas de alto valor técnico.

3. Déficits y eslabones que faltan

¡Pero no es oro todo lo que reluce! A pesar de estos impresionantes avances estratégicos y políticos, pero también económicos, nuevamente respaldados por el nuevo acuerdo de coalición del nuevo Gobierno alemán en febrero de 2018, que incluye también la bioeconomía para que reciba el apoyo en el capítulo de economía, hay algunas lagunas y déficits importantes que deben tenerse en cuenta en el panorama político y económico alemán de la bioeconomía.

Primero, muchos alemanes, en particular las grandes empresas químicas, invierten más en territorios extranjeros que en Alemania: BASF en España y Bélgica (ácido succínico en Montmelo, España, FDCA en Amberes), Lanxess (ácido succínico en Sarnia, Canadá), Evonik en Eslovaquia (poliamida de base biológica), etc. Y segundo, aparte de la mencionada instalación de CBP (*Chemisch Biologisches Projekt*) en Leuna por la Sociedad Fraunhofer, que se centra en el apoyo para aumentar la investigación del laboratorio a pruebas piloto, no hay grandes instalaciones de biorefinería en territorio alemán como en Francia, cerca de Pommacle o en Picardie, o en el norte de Italia o en el centro de Finlandia, cerca de Metsä. Es posible que la primera instalación comercial de biorrefinería se construya y la explote una empresa extranjera, UPM de Finlandia, cerca de Fráncfort, una decisión que se espera para finales de 2018. ¡Una situación interesante que nadie puede explicar realmente!

4. El futuro

El Gobierno alemán actual, como se ha dicho anteriormente, acordó continuar apoyando la introducción de la bioeconomía mediante referencias relevantes en el Acuerdo de Coalición entre los tres partidos gobernantes. La estrategia ITDI de 2010 se adaptará y revisará muy pronto, en particular teniendo en cuenta los nuevos desarrollos como la economía circular, una vinculación más fuerte con los logros de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, la agenda digital y el fuerte movimiento para una mejor financiación y apoyo financiero de las *start-up* relevantes de alta tecnología. En abril de 2018, la 2.ª Cumbre Mundial de Bioeconomía en Berlín ha sido uno de los primeros eventos políticos mundiales del nuevo Gobierno. Pero también hay una nueva tendencia a tener en cuenta: el *High Tech Forum*, el organismo asesor más importante del gobierno alemán para el futuro desde el punto de vista técnico y científico, ha nombrado la bioeconomía como uno de los seis temas más relevantes e importantes con los mayores potenciales de innovación para el futuro, además del ciberespacio, las plataformas y la industria digitales, la interacción con sistemas cognitivos autónomos, la medicina personalizada

y la biología y movilidad sintéticas, eléctricas, integradas o automatizadas¹². La biologización de las industrias, desde la naturaleza hasta la biología en productos y procesos, cubriendo así elementos de circularidad, potenciales de recursos biológicos, crecimiento verde y sostenibilidad, podría representar un nuevo desarrollo estratégico importante, al final vinculándose o uniéndose con las dramáticas perspectivas que la digitalización traerá a nuestras sociedades: esto evidentemente es *EL* desafío para el futuro, que sin duda será sostenible, digital, circular y de base biológica.

5. Lecciones para aprender

De los diferentes pasos mencionados anteriormente dentro del desarrollo de la bioeconomía en Alemania, uno puede concluir algunas lecciones, positivas o negativas:

1. Siempre es extremadamente útil construir un nuevo concepto sobre los apoyos políticos más amplios posibles, involucrando a los partidos políticos en un acuerdo de coalición, elaborando una estrategia nacional, estableciendo un foro nacional de asesoramiento y destinando dinero de IDTI en particular para el comienzo de una dimensión crítica;
2. Sin embargo, tales movimientos son incompletos si no hay una campaña fuerte en las industrias de movilización paralela. Por lo tanto, a pesar de las excelentes condiciones previas políticas estratégicas, Alemania aún no ha desarrollado de la misma manera que otros países europeos las infraestructuras industriales pertinentes en forma de instalaciones de biorrefinería, sino que depende en gran medida de las inversiones extranjeras.
3. En caso de que encuentre una estructura política y económica institucional federal en un país es más que necesario involucrar a las regiones y entidades locales lo antes posible y encontrar nuevas formas de cooperación, financiación y comunicación.
4. La noción de Bioeconomía debe ser lo más amplia posible para que nuevos desarrollos como la economía circular, el uso de CO₂ como recurso, el movimiento digital, la biología sintética, etc., puedan incorporarse fácilmente para desarrollar sinergias o potenciales uniendo fuerzas. En este sentido, el concepto original de hace 13 años, que se centraba en la noción amplia de conocimiento, la bioeconomía basada en el conocimiento KBBE no era en absoluto mala: la necesidad de unir fuerzas con la digitalización es el mejor ejemplo de ello hoy en día.

¹² *Innovationspolitische Leitlinien des High-Tech-Forum.*

Referencias bibliográficas

- UNIÓN EUROPEA (2007): *Route to the knowledge based Bioeconomy*. Presidencia alemana de la Unión Europea, mayo de 2007. Colonia
- PATERMANN, C. y AGUILAR, A. (2018): «The origins of the Bioeconomy in the European Union»; en *New Biotechnology* (40). pp. 20-24.
- PATERMANN, C. (2015): «10 Jahre»; en *Deutschland und europa, Einblicke*. Colonia -Rückblick-Ausblick. Rheinzeiger 2015; pp. 4-6
- BIOÖKONOMIERAT, G. (2017): «Die Bioökonomie wird vermehrt von Bund und Ländern getragen (La bioeconomía la realiza cada vez más el gobierno federal y los Lander alemanes)». Comunicado de prensa.
- EVALUACIÓN DE LA DE FRAUNHOFER ISI 2030, 22017. Disponible en http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/t/de/publikationen/Evaluation_NFSB_Abschlussbericht_pdf.
- NOVA INSTITUT GMBH: «Chemiepark Knapsack»; *Industriestraße* 300. D-50354 Hürth, [contact\(at\)nova-institut.de](mailto:contact(at)nova-institut.de)
- NOTICIAS DE BASE BIOLÓGICA: <http://bio-based.eu/news/>.
- INNOVATIONSPOLITISCHE LEITLINIEN DES HIGH-TECH-FORUM (2017): «Gemeinsam besser: Nachhaltige Wertschöpfung, Wohlstand und Lebensqualität im digitalen Zeitalter, Berlín, mayo de 2017, p. 49 (en inglés). Directrices de política de innovación del Hightech-Forum alemán»; Better in a joint manner: sustainable value creation, wealth and quality of life during the digital periods, p. 49. Berlín.



PERSPECTIVAS DE UNA BIOECONOMÍA FORESTAL EN EL MEDITERRÁNEO

Inazio Martínez de Arano^a, Marc Palahr^a, Christine Farcy^b, Eduardo Rojas^c y Lauri Hetemaki^d

^aInstituto Forestal Europeo, ^bUniversidad Católica de Lovaina y ^cUniversitat Politècnica de València

Resumen

Los bosques mediterráneos están atrapados en una sorprendente paradoja. Son extremadamente valiosos. Son una infraestructura ecológica esencial que puede ayudar a abordar los desafíos más cruciales del cambio global. Sin embargo, parece que nuestra sociedad ha perdido la capacidad de valorarlos, de insertarlos en los flujos económicos y de desarrollar un enfoque adecuado para su gestión sostenible. De alguna manera, debido a su abandono y a los altos costes de la extinción de incendios, los bosques mediterráneos se han convertido en un sumidero de recursos públicos.

El desarrollo de cadenas de valor sostenibles y complementarias, basadas tanto en bienes como en servicios, es la piedra angular de su protección y gestión, tal y como se establece en el Marco Estratégico de la FAO para los Bosques Mediterráneos. En este sentido, múltiples iniciativas innovadoras están teniendo lugar en toda la región. Expandir, replicar y adaptar la innovación, pasando de nicho a norma, es un desafío importante que requiere acción en todos los niveles y en particular: a) un entorno político favorable capaz de crear sinergias entre las políticas climáticas, industriales, urbanas y medioambientales; b) capacidades en investigación, innovación y creación de empresas; c) acceso a financiación, incluido el capital riesgo; d) un marco fuerte en materia de sostenibilidad; y e) el apoyo social, también a través de nuevos patrones de consumo. Tal como se ha debatido en este capítulo, el potencial de los bienes y servicios forestales para contribuir a la bioeconomía circular en el sur de Europa es alto, pero no sucederá *per se*.

Abstract

Mediterranean forests are caught in a surprising paradox. They are extremely valuable. They are a crucial ecological infrastructure that could help tackle the most demanding challenges of global change. However, it seems our society has lost the ability to value them, position them in the economic flow, and develop a suitable approach for their sustainable management. In some ways, due to their neglect and the high cost of putting out fires, Mediterranean forests have become a drain on public resources.

The development of sustainable and complementary value chains, based on both goods and services, is the cornerstone of their protection and management, just as is established in the FAO's Strategic Framework on Mediterranean Forests. In this vein, numerous innovative initiatives are taking place all over the region. Expanding, replicating, and adapting this innovation, transforming it from niche to norm, is a significant challenge that requires action at all levels, in particular: a) a favourable political environment able to create synergies between climate, industrial, urban, and environmental policies; b) skills in research, innovation and business creation; c) access to financing, including venture capital; d) a strong sustainability framework; and e) social support, including through new patterns of consumption. As is debated in this chapter, the potential of forestry goods and services to contribute to the circular bioeconomy in southern Europe is high, but will not just happen per se.

1. El potencial transformador de los bosques como base para una bioeconomía sostenible

El Acuerdo sobre el Clima de París y los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU ponen sobre la mesa los retos a los que se tendrá que enfrentar la sociedad en las próximas décadas. La pregunta clave ahora es cómo alcanzar estos objetivos. Este capítulo propone que

parte de la respuesta se encuentra en volver a pensar lo que los bosques pueden hacer por nuestro bienestar y cómo pueden contribuir a una economía circular de base biológica.

El objetivo de la economía circular es diseñar productos que se puedan reparar, remodelar, reciclar y reutilizar, disminuyendo el uso de materias primas y la generación de residuos. La bioeconomía propone desarrollar una nueva generación de productos y servicios de base biológica, más biodegradables, con menor huella de carbono y mejor adaptados a los flujos de la economía circular. La bioeconomía circular es, por tanto, un nuevo paradigma económico capaz de conciliar el desarrollo económico con la protección del medioambiente. Tiene el potencial de sustituir los materiales fósiles, no renovables y no biodegradables por productos renovables, reutilizables, reciclables y biodegradables, logrando sinergias positivas entre la prosperidad humana y la protección del medioambiente. Requiere aprovechar el alto potencial de los materiales lignocelulósicos, los aceites y los azúcares derivados de los residuos forestales, agrícolas y agroindustriales para producir una amplia gama de biomateriales, incluso para la construcción, la fabricación y la energía.

La sostenibilidad y el bienestar humano deben ser centrales en la bioeconomía; no deben darse por sentados. Un requisito fundamental es que la producción de productos biológicos no compita con la producción de alimentos y no tenga impactos negativos en otros servicios ambientales y sociales (biodiversidad, mitigación del cambio climático, protección contra peligros naturales, etc.). Esta es una de las razones que explican el papel central de los bosques en la bioeconomía.

Los bosques son los sumideros de carbono terrestre más grandes que existen, y son un elemento crítico de la *hoja de ruta para la descarbonización rápida* que se necesita para cumplir el Acuerdo de París (Rockstrom *et al.*, 2017). Los bosques son también la principal fuente de materiales renovables, no destinados a la alimentación humana o animal. El rápido desarrollo tecnológico permite su transformación en gama de nuevos materiales, muchos de los cuales superan a sus equivalentes fósiles en cuanto a funcionalidad y comportamiento ambiental. Los nuevos productos de ingeniería de madera y corcho, por ejemplo, pueden sustituir eficazmente al hormigón, al acero, a los plásticos y al aluminio a gran escala. Esto es de vital importancia para la mitigación del cambio climático.

Junto con la biomasa, los bosques proporcionan otros servicios ambientales y sociales que son clave para la sociedad: servicios culturales (ocio, ecoturismo, caza, salud), servicios de regulación (aire limpio, control de la erosión, mitigación del clima) y servicios de suministro (agua potable y productos forestales no madereros, como setas y bayas). A escala mundial, su valor total se ha estimado en billones de dólares, muy por encima del PIB mundial (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2011). El turismo ya representa el 10 % del PIB mundial. En muchas regiones, el turismo forestal está evolucionando de un nicho de mercado para ser un motor importante de actividad económica. Un requisito fundamental para suministrar todos estos bienes y servicios es que exista un alto grado de integridad ecológica que puede verse amenazado por prácticas no sostenibles y por el cambio climático.

En resumen, debido a su menor competencia con la producción de alimentos, el alto valor de los servicios ambientales y sociales y la gran versatilidad de sus productos, los bosques pueden considerarse la infraestructura terrestre biológica más importante y un elemento fundamental de la bioeconomía circular. Posibilitan el desarrollo interacciones positivas entre economía y ecología, entre el bienestar humano y la capacidad del planeta para sostener la vida. La bioeconomía no es una solución única, sino que habrá de adaptarse a las realidades sociales, económicas y ecológicas de cada territorio. En este contexto, es importante reflexionar sobre la mejor forma de desarrollar una bioeconomía mediterránea.

2. El contexto de una bioeconomía forestal en el Mediterráneo

La región del Mediterráneo se encuentra en un período de cambio acelerado. En los últimos 60 años, la población ha aumentado en más del doble, y se prevé que llegue a más de 600 millones para el año 2050. La mayor parte de este crecimiento se está produciendo en Oriente Medio y el Norte de África (MENA), que tiene una de las poblaciones más jóvenes y en mayor crecimiento del mundo: la población infantil menor de 15 años representa solo el 14 % de la población en Italia, pero representa el 37 % en Siria. Los países del sur y el este del Mediterráneo suponen más de la mitad de la población, mientras que en la década de 1950 representaban menos de un tercio (*Population Reference Bureau*, 2013). Además, la región acoge una población estacional muy importante; es el destino de casi un tercio del turismo mundial con más de 330 millones de visitantes internacionales en 2014 (Consejo Mundial de Viajes y Turismo, 2014).

El fuerte aumento en la demanda de alimentos, agua, vivienda y transporte en la región, no ha ido acompañado de un incremento similar en la producción de materias primas y alimento. El Mediterráneo se ha convertido en un importador neto de materias primas y bienes de consumo y alberga la mayor parte de la población mundial que vive con escasez de agua (FAO y Plan Bleu, 2013). Por otro lado, las economías de la región tienen enormes dificultades para proporcionar empleo adecuado a sus poblaciones, específicamente en las áreas rurales y a los jóvenes, como lo indican las altas tasas de desempleo (PNUMA, 2011).

El Foro Económico Mundial (FEM, 2011) ha identificado dos grandes desafíos a largo plazo para la región mediterránea: i) la escasez y fragilidad de los recursos naturales, exacerbadas por el crecimiento demográfico, nuevos patrones de consumo y el cambio climático y ii) el alto desempleo estructural, consecuencia de economías poco competitivas. El FEM sostiene que se trata de desafíos relacionados y que la región mediterránea en una comunidad con un destino compartido que debe enfrentarlos con mayor integración política y económica, puesto que ningún país puede por sí mismo controlar el resultado final. Esta interrelación es fácil de entender considerando, por ejemplo, las tendencias demográficas divergentes (p. ej.: rápido crecimiento en los países del sur, envejecimiento rápido en los países del norte) y el potencial impacto del cambio climático en los flujos de migración.

En este contexto, la bioeconomía puede ayudar a conciliar la protección del capital natural y la gestión sostenible de los recursos naturales con la creación de riqueza y empleo, creando zonas rurales dinámicas y contribuyendo a la seguridad alimentaria, hídrica y energética. Reconociendo la importancia de algunos cultivos no alimentarios, los residuos agrícolas, los desechos agroindustriales, la biomasa marina y la acuicultura, este capítulo pondrá el acento en la bioeconomía forestal. Como elemento clave que es, en un nuevo paradigma de desarrollo, debe abordarse en su dimensión regional.

3. Megatendencias globales que darán forma a la bioeconomía mediterránea

3.1. Bosques: un recurso infravalorado que requiere una gestión sostenible

Los países que bordean el Mediterráneo tienen alrededor de 85 millones de hectáreas de bosque y de 32 millones de hectáreas de otros tipos de superficie forestal (FAO, 2015). Su extensión e importancia varían considerablemente entre países. La cobertura forestal llega al 62 % en Eslovenia; por detrás encontramos Portugal con un 38 %, España con un 36 %, Italia con el 31 % y un 29 % en Francia. Turquía, presenta un 15 %, Marruecos un 11 %, un 6 % Túnez y un 1 % Jordania (Tabla 1). Las zonas forestales mediterráneas albergan unas 25.000 especies de plantas vasculares (el 50 %, especies endémicas) así como una gran biodiversidad arbórea, incluyendo endemismos, con una extraordinaria diversidad genética (290 especies de árboles autóctonos con 201 especies endémicas). Por contra, el norte y centro de Europa alberga unas 6.000 especies de plantas en total.

Los bosques mediterráneos proporcionan diversos productos forestales no madereros (corcho, plantas aromáticas y medicinales, resina, esparto, miel, piñones, setas, trufas y nueces, etc.) y servicios (captura de carbono, protección del suelo, posibilidades de ocio y turismo, purificación del agua, etc.), que son cruciales para el desarrollo socioeconómico de las zonas rurales, así como para el bienestar de las poblaciones urbanas de la región.

Contrariamente a la creencia popular, los bosques mediterráneos se han expandido rápidamente en el sur de Europa durante el siglo XX y aún lo hacen a día de hoy, aunque a un ritmo más lento. La rápida incorporación de los combustibles fósiles como principal fuente de energía en las zonas rurales ha llevado a un descenso generalizado en la demanda de leña y carbón. El éxodo rural y el abandono de la agricultura extensiva tradicional han resultado en un aumento espectacular de las áreas forestales (Figura 1). Estos bosques en expansión también están ganando biomasa, ya que la intensidad de la gestión generalmente es muy baja. A excepción de las contadas áreas dominadas por las plantaciones, la extracción de madera suele ser inferior al 50 % del incremento.

Tabla 1. Superficie de los recursos forestales en los países mediterráneos

País	Área forestal		Otras zonas forestales		Proporción de bosque med.
	Miles de hectáreas	(%)	Miles de hectáreas	(%)	(%)
España	18.173	36,0000	9.574	19,0000	21,0
Francia	15.954	29,0000	1.618	3,0000	19,0
Turquía	11.334	15,0000	10.368	13,0000	13,0
Italia	9.149	31,0000	1.767	6,0000	11,0
Marruecos	5.131	11,0000	631	1,0000	6,0
Bulgaria	3.927	36,0000	0	0,0000	4,6
Grecia	3.903	30,0000	2.636	20,0000	4,6
Portugal	3.456	38,0000	155	2,0000	4,0
Serbia	2.713	31,0000	410	5,0000	3,2
Bosnia y Herzegovina	2.472	48,0000	549	11,0000	2,9
Croacia	1.920	34,0000	554	10,0000	2,2
Argelia	1.492	1,0000	2.685	1,0000	1,7
Eslovenia	1.253	62,0000	21	1,0000	1,5
Túnez	1.006	6,0000	300	2,0000	1,2
FYROM	998	39,0000	143	6,0000	1,2
Albania	776	28,0000	255	9,0000	0,9
República Árabe de Siria	491	3,0000	35	0,0020	0,6
Montenegro	467	34,0000	277	20,0000	0,5
Libia	217	0,0010	330	0,0020	0,3
Chipre	173	19,0000	214	23,0000	0,2
Israel	154	7,0000	33	2,0000	0,2
Libano	137	13,0000	106	10,0000	0,2
Jordania	98	1,0000	51	1,0000	0,1
Egipto	70	0,0007	20	0,0002	0,1
Otros	25	4,0000	0	0,0000	0,1

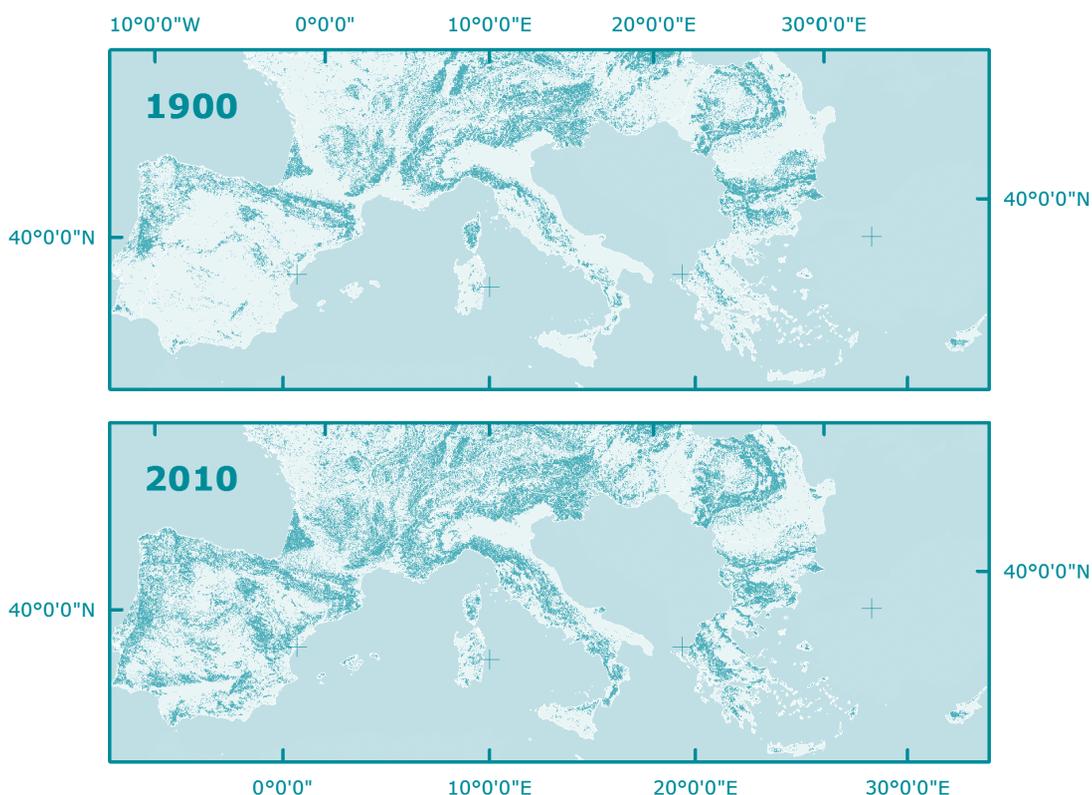
* *No todos estos bosques son de tipo mediterráneo.*

Fuente: FAO y Plan Bleu (2013).

Algunas consecuencias son claramente positivas: el aumento de la retención de carbono en la biomasa y los suelos desempeñan un papel importante en la mitigación del cambio climático y puede ayudar a restaurar la fertilidad del suelo después de siglos, a veces incluso milenios, de uso intensivo. También proporcionan hábitat para muchas especies que son especialistas forestales. Sin embargo, también hay consecuencias negativas. Las especies que dependen de paisajes abiertos (*bouçage*) están sufriendo la pérdida de hábitat, mientras que la falta de gestión conduce a una acumulación rápida de combustibles y produce estructuras forestales muy favorables a la propagación de incendios. El aumento de la continuidad de las masas forestales y de la cantidad de biomasa, junto a las condiciones climáticas favorables, explican el creciente número de mega incendios con unas consecuencias ambientales, económicas y humanas muy

graves (San-Miguel-Ayanz, Moreno y Camia, 2013). Asegurar la vitalidad y la sostenibilidad de estos bosques en expansión y protegerlos de plagas, enfermedades e incendios es un gran desafío para los silvicultores y las personas, para los que la bioeconomía puede proporcionar el motor económico necesario.

Figura 1. Expansión estimada de los bosques mediterráneos europeos desde 1900



Fuente: Fuchs *et al.* (2013). Elaboración propia.

Existen elementos comunes entre el sur y el este del Mediterráneo, pero también existen diferencias significativas. La fuerte urbanización y la mayor dependencia de los combustibles fósiles también han reducido la presión sobre los recursos forestales en los países MENA. Sin embargo, frecuentemente, bosques y pastizales contribuyen al sustento en áreas rurales con alta densidad de población. Así, los bosques pueden verse amenazados por la invasión de la agricultura, la expansión de los asentamientos y la presión humana. La acción gubernamental ha sido un factor decisivo para desacelerar (Argelia), detener (Líbano, Jordania) o incluso revertir (Marruecos, Túnez) la deforestación (Allard *et al.*, 2013). En este contexto, la bioeconomía puede ayudar a crear un mayor valor de los bosques para las poblaciones locales y circuitos

de retroalimentación positiva para la gestión sostenible, creando así riqueza y reduciendo la expansión agrícola y urbana.

3.2. Adaptación y mitigación del cambio climático con los bosques

El cambio climático es un componente principal del cambio global. Se espera un aumento de las temperaturas, una disminución de las precipitaciones, y sequías más prolongadas y frecuentes (Jacob *et al.*, 2014). Tales cambios tienen importantes implicaciones para la agricultura mediterránea, para el suministro de agua y para el funcionamiento de los ecosistemas forestales mediterráneos. El aumento de la escasez de agua, las condiciones más favorables para incendios forestales catastróficos, el cambio de distribución de especies arbóreas y la proliferación de nuevas plagas y enfermedades se encuentran entre los impactos negativos esperados (Lindner *et al.*, 2010).

La adaptación de los bosques al cambio climático está recibiendo cada vez más atención política y es un elemento importante del Acuerdo de París. Se puede plasmar en tres objetivos: atenuación del riesgo, aumento de la resiliencia y restauración del ecosistema. En términos prácticos, esto significa que se necesita una gestión adaptada para reducir la escasez de agua, desarrollar una vegetación menos propensa a los incendios y gestionar adecuadamente los niveles de evapotranspiración para regular el rendimiento hídrico en la cuenca (Raftoyannis *et al.*, 2014).

El deterioro esperado del equilibrio hídrico en las cuencas mediterráneas requerirá una mayor atención social y política al papel de las zonas forestales en cuanto a calidad y cantidad de agua disponible. Además, la adaptación asistida y la migración de especies, el dominio de las relaciones árbol-suelo-agua, la reducción del riesgo de incendios y la inclusión de la silvicultura en paisajes más amplios son aspectos críticos para una nueva generación de enfoques de gestión adaptativa que deben integrarse en la bioeconomía. Esto porque, la adaptación al cambio climático no debe ser solo sólida a nivel científico; también debe ser económicamente viable y socialmente aceptable. Los objetivos de gestión forestal, las herramientas y las estrategias de toma de decisiones deben adaptarse a las nuevas condiciones potenciales y las nuevas demandas de bienes forestales y servicios ambientales y sociales

Por otro lado, la esencia de la mitigación del cambio climático es la reducción de las emisiones de carbono o su compensación a través del aumento de los sumideros en los embalses naturales o artificiales. La contribución de los bosques se puede mejorar a través la gestión forestal, siguiendo tres enfoques complementarios:

- Aumento del carbono almacenado en las diversas reservas forestales (árboles, madera muerta, hojarasca y suelo). Esto puede hacerse a través de la expansión (espontánea

o intencionada) de las zonas forestales y, en algunos casos, limitando las intensidades de gestión para acelerar la acumulación de biomasa.

- Reducir las emisiones a través de una mayor sustitución de los combustibles fósiles y los materiales con una elevada huella de carbono por productos forestales con una huella de carbono inferior (p. ej.: madera, corcho, resinas naturales, etc.). Este enfoque se centra en la sustitución de flujos de carbono fósil a la atmósfera mediante el uso de productos forestales y requiriendo el aumento de la productividad y una gestión más intensiva.
- Incremento de las reservas temporales de carbono en productos de madera con una larga vida útil, como muebles y construcción. Esto requiere el desarrollo de cadenas de un mayor valor añadido y la implementación de políticas que favorezcan el uso de la madera y otros tipos de biomasa forestal frente a la energía o usos con una vida útil corta.

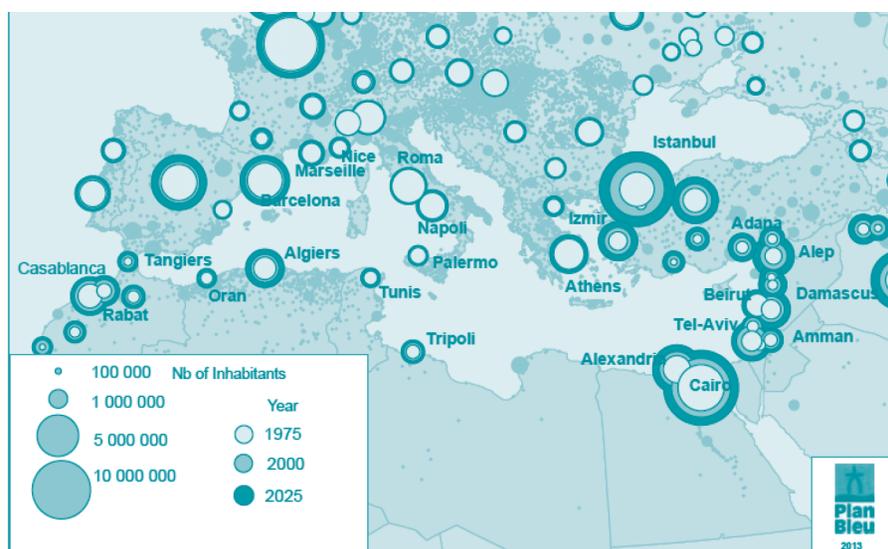
3.2.1. La globalización aumenta las presiones sobre la rentabilidad

La globalización puede referirse a la rápida difusión de ideas y estructuras de gobierno. Más frecuentemente, sin embargo, se refiere a una fuerte integración económica como consecuencia del aumento del comercio y los flujos de capital. La globalización y la aparición de nuevos actores mundiales en el sector forestal está produciendo importantes cambios en los mercados de productos forestales y las cadenas de valor asociadas. En el pasado, el precio de los productos forestales reflejaba los costes de producción locales y el equilibrio local de la oferta y la demanda. Con la globalización, los precios de los productos madereros se fijan en mercados internacionales, en función del rendimiento de los competidores más fuertes. Así, en ausencia de mercados locales cautivos, la región mediterránea carece de ventajas competitivas en productos básicos de bajo valor añadido y es, de hecho, un gran importador neto de productos de madera. Para que el sector forestal sea rentable, requiere generar alto valor añadido y hay oportunidades interesantes para innovar, como muestra la sofisticada cartera de productos de chopo o de corcho de las empresas más punteras. Mejoras en la rentabilidad también se puede lograr mediante una mejor valorización de los residuos generados por la industria forestal tradicional (p. ej.: pasta de papel y serrerías), que son muy relevantes para las regiones atlánticas orientadas a los productos básicos (*commodities*) del sur de Europa. Es importante señalar que los bosques mediterráneos son conocidos por el valor relativamente alto proporcionado por los productos forestales no madereros (Croitoru, 2007). Estos PFNM también se ven afectados por la globalización. China, por ejemplo, es el mayor productor mundial de miel y domina los mercados de exportación de piñones y resinas naturales. Crear cadenas de valor competitivas basadas en PFNM del Mediterráneo es, fundamental. En aquellos de uso alimentario establecer denominaciones de origen es clave para diferenciar sus mercados (miel, carne de ganadería extensiva, setas).

3.2.2. La urbanización cambia las percepciones y prioridades de la sociedad

El rápido aumento de las poblaciones urbanas y sus estilos de vida asociados constituye uno de los principales cambios de nuestro tiempo (Seto *et al.*, 2011). Según datos de Eurostat, las áreas urbanizadas -definidas como ciudades, pueblos y suburbios- alojan a casi tres cuartas partes (72,4 %) de la población de la UE-28, con previsiones de que este porcentaje aumente. Es difícil concebir el éxito de la bioeconomía circular si no contribuye a construir ciudades más sostenibles e implicar a su población.

Figura 2. Distribución y aumento de la población urbana en los países mediterráneos (2011)



Fuente: Naciones Unidas, Departamento de Asuntos Económicos y Sociales, División de Población, (2011).

La urbanización conduce a la expansión de las áreas construidas, que es un uso de la tierra de difícil reconversión. Este proceso de urbanización es el principal responsable de la pérdida de hábitat, la destrucción de suelos agrícolas de calidad, y produce impactos en los sistemas hidrológicos y en el clima local. Las ciudades son responsables del 80 % del consumo de energía en la UE; solo los edificios son responsables del 42 % del consumo total de energía, el 50 % de todos los usos de materiales, el 30 % de todos los residuos generados y el 35 % de todas las emisiones de carbono. Además, los estilos de vida urbanos y el desconocimiento sobre el funcionamiento de los ecosistemas y la vida rural están generando una desconexión de la naturaleza y cambios en la percepción social sobre actividades y prácticas agrícolas y forestales. La gestión forestal y los problemas forestales no se comprenden bien fuera de la pequeña comunidad forestal y, en muchos casos, existe una brecha significativa entre la realidad y el conocimiento que la sociedad tiene de ella. Tales brechas en la percepción social, generalmente

reforzadas en los sistemas educativos que reflejan estilos de vida urbanos (Pergams y Zaradic, 2008), pueden tener impactos importantes en la toma de decisiones que afectan la gestión de los recursos naturales, en la definición de políticas, enfoques e incluso marcos financieros para la bioeconomía forestal (Farcy *et al.*, 2016).

4. Rompiendo el molde: los bosques mediterráneos para una bioeconomía mediterránea

Las particularidades de la región mediterránea ofrecen la oportunidad de desarrollar una bioeconomía circular que vaya más allá de las estrategias agroalimentarias actuales. Una bioeconomía mediterránea debe actuar como catalizador para abordar desafíos fundamentales:

- Contribuir a descarbonizar y reducir la intensidad de los recursos de las economías actuales basadas en fósiles y ayudar a crear sociedades más resilientes, mediante el apoyo de la prosperidad y el bienestar. Esto requiere innovaciones tecnológicas, sociales y políticas y el desarrollo de cadenas de valor sostenibles basadas en bienes y servicios forestales.
- Revertir la situación de los bosques mediterráneos: un foco de biodiversidad a nivel mundial que ha demostrado una gran resiliencia durante milenios de uso intensivo y expansión agrícola, pero que hoy se ve amenazado por el cambio climático. Esto requiere una gestión activa para equilibrar los múltiples servicios ambientales y sociales que los bosques pueden proporcionar (p. ej.: madera, agua, pastos, extractos) de acuerdo con las necesidades y características del territorio, a la vez que se reduce el riesgo de incendios forestales.
- La visión de una bioeconomía forestal circular y mediterránea se fundamenta en cuatro elementos principales: i) reconocer la relevancia del capital natural; ii) crear paisajes resilientes; iii) reemplazar materias primas y fuentes de energías fósiles y por tanto no renovables; y iv) concienciar a la sociedad de la importancia de los servicios ambientales y sociales generados por los bosques. Para que esta visión se convierta en realidad, una buena gobernanza y unas políticas holísticas basadas en evidencia científica son cruciales para proporcionar el marco y los incentivos adecuados. De esta manera se podría conseguir que la acción humana genere ecosistemas forestales más resilientes, así como cadenas de valor forestales que contribuyan al desarrollo sostenible, mitigando el cambio climático y apoyando las comunidades rurales dinámicas.

4.1. Situación del capital natural en el centro de los sistemas económicos

El capital natural de la Tierra proporciona agua, aire, alimento y energía y es el origen de los productos biológicos que se incorporan a la bioeconomía. La biodiversidad aumenta la productividad y la resiliencia de los ecosistemas (van der Plas *et al.*, 2017) y debe ser ampliamente reconocida como una parte esencial del capital natural. De hecho, una economía fuertemente dependiente de los recursos biológicos no puede aceptar los impactos ambientales negativos que son propios de la economía lineal basada en combustibles fósiles (cambio climático, pérdida de biodiversidad, deterioro de la fertilidad del suelo, contaminación ambiental...). Es preciso volver a evaluar el uso de pesticidas, antibióticos, fertilizantes sintéticos y otros insumos perjudiciales en la agricultura y es necesario preservar la fertilidad del suelo con el máximo cuidado. La bioeconomía debe garantizar el uso sostenible de nutrientes y un uso más eficiente de los fertilizantes. Deben evitarse los impactos negativos de las producciones intensivas forestales y agrícolas (p. ej.: la expansión agrícola, la degradación del suelo, las emisiones de nutrientes y productos agroquímicos) a las masas de agua y la atmósfera. Las prácticas agrícolas regenerativas pueden reducir el CO₂ atmosférico, al tiempo que aumentan la productividad del suelo, aumentando la resistencia a las inundaciones, las sequías y la erosión (Grau *et al.*, 2013). Los residuos marinos y del suelo deben reducirse mediante políticas de cero desechos y otros enfoques de economía circular. La integración de la biodiversidad en la agricultura, la silvicultura y la pesca es, de hecho, el mensaje principal de la COP 13 del Convenio sobre la Diversidad Biológica.

El capital natural es un activo de producción al igual que lo es la mano de obra o el desarrollo tecnológico. Se debe entender su valor total para tomar decisiones políticas y de inversión adecuadas. Medir y explicar el capital natural no será fácil, ni aceptado por todos: ¿cómo se pueden integrar las múltiples dimensiones de la biodiversidad en euros, dólares o yuanes? ¿Cómo se puede poner precio a la naturaleza? Son preguntas legítimas. Sin embargo, calcular el valor no es lo mismo que poner un precio. Medir el valor del capital natural dentro del sistema y las estadísticas generales de contabilidad económica puede ayudar a abordar mejor los problemas ambientales (Helm, 2015). Métodos tales como las «verificaciones de activos de capital natural» pueden ayudar a los responsables de la toma de decisiones a comprender cómo los cambios en el rendimiento actual y futuro de los activos de capital natural afectarán el bienestar humano y la bioeconomía circular (*UK Natural Capital Asset Tool*¹).

4.2. Sustitución de productos basados en fósiles por productos biológicos

La biomasa de los bosques y otras fuentes (residuos agrícolas, de la industria agroalimentaria y forestal, del mar o residuos orgánicos) se pueden transformar en múltiples materiales para reemplazar lo que hacemos hoy en día a partir de materias primas basadas en fósiles. La

¹ <http://neat.ecosystemsknowledge.net/NCAC-tool.html> UNECE / FAO

bioeconomía abarca por tanto una amplia variedad de productos y sectores, como la construcción, los materiales de embalaje, los textiles, los plásticos, los productos farmacéuticos, los ingredientes alimentarios o la bioenergía. La combinación de la tecnología digital con la biología ofrecerá avances significativos en el futuro y nuevas oportunidades de empleo, incluyendo servicios avanzados en I+D, *marketing*, ventas, mantenimiento de maquinaria, administración y consultoría empresarial. También implementará tecnologías avanzadas para controlar y gestionar mejor los agroecosistemas, bosques y plantaciones.

Aun así, el desarrollo tecnológico no es el único factor que guía la bioeconomía, ya que existen importantes condicionantes de mercado, culturales y normativos. «La pregunta crítica no parece ser qué se puede hacer con la biomasa, sino qué se hará, a qué escala, dónde e impulsado por qué» (Hetemäki y Hurmekoski, 2016). Las respuestas serán específicas de cada región. El sur de Europa y el Mediterráneo tienen, en términos generales, sistemas de innovación menos desarrollados debido a menores inversiones en I + D, menor acceso a capital riesgo y otros esquemas de financiación inicial y una mayor brecha entre el ámbito académico y la industria (Clean Tech Group y WWF, 2017). Por otro lado, la región tiene un gran desarrollo de sectores agroalimentarios de alto valor, así como potentes industrias de ligadas a la moda, la arquitectura, el diseño de interiores, la química verde o las energías renovables, por mencionar algunas. Aprovechar las fortalezas existentes y realizar un trabajo sistemático para superar los obstáculos actuales es un requisito previo para el surgimiento de soluciones de bioeconomía de origen local, la creación de empleo y la reconstrucción del capital social en las zonas rurales.

4.3. La aparición de ciudades respetuosas con el clima

Los Objetivos de Desarrollo Sostenibles (ODS) tienen un objetivo específico (nº 11) para ciudades y comunidades sostenibles: «hacer que las ciudades sean inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles». La nueva forma de desarrollar ciudades debe basarse en un enfoque circular del consumo y movilidad en energías renovables y en una mayor dependencia de las soluciones basadas en la naturaleza, incluidos los productos de base biológica.

La construcción en madera puede reducir en gran medida la huella de carbono de los edificios durante la construcción y el uso (Sathre y O'Connor, 2010). El uso de más madera y corcho en la construcción y la modernización de viviendas supone también una gran oportunidad económica y ambiental, debido principalmente a la elevada demanda de viviendas en la región MENA. Los estilos de vida urbanos tendrán que ser más sostenibles con un mayor desarrollo de la economía colaborativa y circular a través del compartir, reutilizar, reciclar y el uso en cascada de biotejidos, bioplásticos y otros biomateriales. Además, se debe prestar más atención a las infraestructuras verdes y al papel de los bosques urbanos en el bienestar. Los bosques urbanos mejoran la calidad del aire local, sirven como islas de microclima favorable, aumentan la resiliencia de la ciudad al cambio climático, estimulan las actividades al aire libre y contribuyen a una mejor salud.

Tal transformación social debe sustentarse en la concepción común de futuros plausibles, sostenibles, deseables, científicamente sólidos y atractivos tanto para los ciudadanos rurales como para los urbanos. El desarrollo participativo de estos escenarios, a escala local, nacional e incluso global es una herramienta prometedora. Explorar futuros *plausibles y deseables* en lugar de *probables* permite abordar de mejor manera las preferencias sociales, creando la oportunidad de construir consenso o, al menos, compromisos entre grupos de actores (Costanza, 2014).

4.4. Creación de paisajes resilientes: sinergias en el nexo fuego-energía-agua

Los grandes incendios forestales son una tragedia persistente en los países mediterráneos, donde cada año arde un promedio de 500.000 hectáreas (Comisión Europea, 2015). Esta dramática situación se produce a pesar del notable desarrollo tecnológico y la disponibilidad de recursos humanos profesionales muy competentes. Las políticas actuales de extinción de incendios tienen un coste no cuantificado, que puede superar los 2.500 millones de euros anuales, solo en los países europeos. En muchas zonas de clima mediterráneo los costes de la extinción de incendios devoran los recursos necesarios para activar la gestión forestal que permitiría abordar mejor los desafíos sociales (es el caso de California, USDA Forest Service, 2015). La tendencia actual no invita al optimismo. A causa del cambio climático, mantener la eficacia actual en extinción va a requerir gastos adicionales (para el caso de Francia, véase Ministère de l'Écologie, 2010) y aun así el éxito no está garantizado. De hecho, hay un creciente consenso en la comunidad científica y los profesionales de la extinción de que el enfoque actual basado en la extinción de incendios está llegando a su límite. Son cuatro los factores que explican esta situación: 1) la expansión de bosques jóvenes no gestionados que proporcionan una alta carga de combustible y gran continuidad en el paisaje; 2) el alto número igniciones que se da en determinadas regiones debidas, principalmente a la acción humana (p. ej.: negligencia, accidentes, intencionados...), que revelan el bajo valor atribuido a los bosques; 3) una interfaz urbano-forestal que crece en extensión y complejidad por falta de planificación urbana adecuada y la expansión del bosque y 4) las condiciones climáticas favorables para la propagación rápida de incendios (p. ej.: altas temperaturas, baja humedad relativa y viento) que se verán agravadas por el cambio climático (Verkerk, Martínez de Arano y Palahí, 2018).

Por ello, se necesita un enfoque nuevo para gestionar el riesgo de incendios forestales a escala de paisaje. Las lecciones aprendidas de la ciencia y la práctica muestran que la reducción de los riesgos de incendios debe basarse en la gestión de la vegetación para reducir la carga y la continuidad del combustible a grandes escalas territoriales (FAO, 2011). La bioeconomía debe proporcionar el motor económico para que esto sea una realidad, a través de la creación de cadenas de valor de biomasa rentables. El aumento en el uso de biomasa para calentar edificios de viviendas y comerciales es la opción más factible que puede ayudar a establecer las infraestructuras y capacidades necesarias para gestionar territorios actualmente abandonados. En cierto sentido, usar biomasa como fuente de energía significa reemplazar las emisiones de carbono inútiles e incontroladas en incendios catastróficos no deseados reduciendo en paralelo

las emisiones fósiles. Además, los sistemas agroforestales pueden desempeñar un papel crucial, aumentando la retención de carbono en el suelo, reduciendo la erosión eólica, y mediante una producción diversificada y adaptada de bienes y servicios (p. ej.: madera, forraje en períodos secos, miel, plantas aromáticas, etc.). En el futuro, los usos más avanzados de la biomasa podrán complementar o reemplazar la bioenergía. Hay muchas sinergias positivas en este enfoque. Las mejores estructuras forestales para la prevención de incendios también pueden contribuir a aumentar el rendimiento hídrico y pueden tener impactos positivos en la biodiversidad, creando áreas abiertas y ecotonos que favorecen los valores del paisaje y las oportunidades de ocio. El pago por los servicios ambientales y sociales, el turismo de naturaleza y la comercialización innovadora de PFSM puede incrementar los beneficios económicos directos de los bosques gestionados. Dado que los bosques proporcionan un mayor valor, así como oportunidades de trabajo y medios de subsistencia a las poblaciones locales, la reducción de los incendios es una expectativa razonable. Los paisajes resilientes dependerán de comunidades rurales vivas que administren acertadamente en el territorio y vivan en él ayudando a gestionar el nexo *fuego-energía-agua*.

Cuadro 1. La bioeconomía como una oportunidad para afrontar los incendios forestales

La cuenca mediterránea es un foco de incendios forestales mundial y los incendios forestales en solo cinco países mediterráneos (Francia, Grecia, Italia, Portugal y España) afectan actualmente a aproximadamente 450 mil ha al año⁻¹, lo que representa un daño económico anual de aproximadamente 1.500 millones de euros. Para hacer frente a los incendios forestales, estos cinco países invierten aproximadamente 2.500 millones de euros al año en prevención y principalmente en extinción. A pesar de una disminución en el número y áreas afectadas por los incendios forestales en Europa y en todo el mundo, el daño de los incendios forestales, expresado en el volumen de madera perdido, ha aumentado durante el siglo XX. Además, se espera que esta tendencia continúe en las próximas décadas debido al cambio climático, lo que requiere replantearse cómo enfrentar de manera efectiva los incendios forestales en el futuro.

En un contexto de condiciones climáticas que favorecen los incendios forestales, los recursos forestales cambiantes, en términos de superficie, reservas y estructura, han sido un factor clave en la mayor frecuencia e impacto de los incendios forestales en la región mediterránea europea. Los recursos forestales se han expandido en gran medida en la región debido a la repoblación forestal activa y a la invasión de la vegetación natural después del abandono de las tierras agrícolas. La extracción de madera representa generalmente una pequeña fracción del incremento y los bosques mediterráneos se caracterizan generalmente por la poca gestión forestal activa. En consecuencia, los bosques jóvenes, en expansión y en gran parte no gestionados contienen altas cargas de combustible y condiciones favorables para la propagación rápida y amplia de los

incendios forestales. Las prácticas básicas de gestión forestal pueden contribuir a reducir el riesgo de incendios forestales mediante la reducción de las cargas de combustible y la alteración de la continuidad del combustible a escala de paisaje. Así pues, la gestión forestal y de incendios podría integrarse para reducir conjuntamente el riesgo de incendios forestales y suministrar madera o biomasa (de alta calidad), así como otros servicios ambientales y sociales, en el contexto del cambio global.

Las acciones humanas son la causa principal de los incendios forestales ya que la ignición se debe principalmente a quemas agrícolas descontroladas, negligencia e incendios provocados, lo que indica el bajo valor que se atribuye a los bosques. Por lo tanto, para abordar de manera efectiva el problema de los incendios forestales, se necesita un nuevo paradigma que reconozca a los bosques como un recurso valioso que proporciona importantes recursos biológicos renovables y otros servicios ambientales y sociales. Una transición hacia una bioeconomía ofrecerá oportunidades para financiar y poner en práctica estrategias de gestión a largo plazo a escala de paisaje. Los marcos políticos adecuados y los incentivos políticos son cruciales para atraer las inversiones necesarias y apoyar el desarrollo estructural de cadenas e infraestructuras de valor del Mediterráneo específicas. Estas inversiones son necesarias para financiar y desarrollar actividades de gestión forestal y de incendios sostenibles e integradas que puedan ayudar a asegurar la resiliencia de los bosques mediterráneos, y en última instancia, ayudar a la sociedad a enfrentarse al problema de los incendios forestales.

Para más información, véase Verkerk *et al.* (2018) y las referencias que incluye.

VERKERK, P. J.; MARTÍNEZ DE ARANO, I. y PALAHÍ, M. (2018): «La bioeconomía como una oportunidad para afrontar los incendios forestales en los ecosistemas forestales mediterráneos»; en *Política y Economía Forestal* (86); pp. 1-3.

5. Ejemplos del potencial de la bioeconomía de los bosques mediterráneos: qué y cómo

5.1. Mercados de construcción

Ecologizar el sector de la construcción es un desafío clave para el desarrollo sostenible (PNUMA, 2011). En Europa (UE-28) representa el 35 % de todas las emisiones de efecto invernadero, el 50 % de los materiales extraídos, el 30 % del uso del agua y genera alrededor del 40 % de todos los residuos. También es muy relevante en términos económicos, ya que contribuye en cerca de un 10 % en el PIB de la UE y emplea a 12 millones de personas

(Hurmekoski, 2017²). Al contrario que en muchas industrias manufactureras, en las últimas décadas ha habido pocas mejoras importantes en la productividad, la rentabilidad o el impacto ambiental del sector. La mejora del comportamiento a escala ambiental es ahora una de las principales tendencias que condicionarán su futuro desarrollo, junto con la necesidad de adaptarse a los cambios demográficos y a la mayor complejidad de la economía global. La construcción sostenible se está convirtiendo en una mega tendencia impulsada por la regulación sectorial y una mayor conciencia social. Requiere un mayor uso de materiales con baja energía incorporada y un mejor comportamiento ambiental, como madera, bambú o corcho, así como el uso de energías renovables para la calefacción y la refrigeración. La construcción en madera puede contribuir de forma significativa a materializar la construcción sostenible, no solo en vivienda unifamiliar sino también en edificios de uso colectivo y en edificación en altura, tanto en nueva edificación como a través de la remodelación y rehabilitación. El creciente interés por la construcción en madera en el sur de Europa está relacionado con sus propiedades mecánicas y térmicas intrínsecas, el desarrollo de nuevas tecnologías que mejoran su competitividad y a una creciente preferencia social en favor de soluciones basadas en la naturaleza. Más específicamente:

- Existe un fuerte impulso político para el desarrollo de un sector de la construcción más sostenible, generalmente como parte de la transición energética. En general, el 22 % de las regiones del sur han incluido la construcción sostenible como una prioridad en sus estrategias de especialización inteligente (29 % en la UE-28). Las regiones con importantes industrias de madera señalan específicamente la construcción de madera como la prioridad. Esta tendencia es especialmente notable en Francia e Italia, por ejemplo, por encima de España, Portugal o Grecia (Martínez de Arano *et al.*, 2018).
- La madera tiene ventajas intrínsecas. Su ligereza permite edificios seguros contra terremotos, un factor muy importante en países como Italia. Por ejemplo, reemplazar un marco de hormigón por un marco de madera reduce el peso 4,5 veces. Esto, a su vez, permite bases más ligeras y un ahorro de material. La madera almacena carbono durante largos períodos de tiempo y consume menos energía durante la producción y el procesamiento en comparación con todos los demás materiales utilizados en la construcción. Se ha estimado que cada tonelada de uso de madera que reemplaza otros materiales (hormigón, acero...) implica una reducción de 2,1 toneladas de emisiones de carbono (Sathre y O'Connor, 2010). Además, la madera tiene un buen comportamiento térmico y puede ofrecer edificios y soluciones de rehabilitación altamente eficientes, rentables y que reduzcan las necesidades de calefacción y refrigeración durante la vida útil del edificio, que son las responsables de la mayor parte de las emisiones de carbono del sector de la construcción. Tiene un excelente comportamiento en caso de incendio, ya que se derrumba bajo altas temperaturas y cuando se usa en interiores,

2. Esta sección se basa en gran medida en Hurmekoski (2017) y en sus referencias, excepto cuando se proporcionan otras citas.

puede influir positivamente en la calidad del aire interior y la salud humana (control de la humedad, acústica agradable, atmósfera que alivia el estrés).

- La aparición de nuevos productos de madera de ingeniería (PMI) como la madera laminada cruzada (X-Lam o CLT), las mejoras obtenidas en la automatización, el encolado y los fijadores, especialmente los tornillos autoperforantes, han mejorado enormemente la posibilidad de prefabricación de componentes estructurales y han hecho que la construcción de madera sea más fácil, más rápida y más flexible. La prefabricación ligera de edificios altos, los sitios de construcción en seco y el aumento de velocidad están aumentando rápidamente la competitividad de las soluciones de madera. Esto ha abierto nuevos mercados en la construcción a gran escala y de edificios residenciales y colectivos de varias plantas (p. ej.: oficinas, escuelas, hospitales, naves industriales, pabellones deportivos...) (Martínez de Arano *et al.*, 2018). En los mercados de estructuras de madera de varios pisos, las prácticas de construcción a base de madera siguen siendo, en promedio, algo más costosas en comparación con los métodos tradicionales. En el futuro, se espera que la construcción con madera tenga una mayor ventaja competitiva, especialmente si se endurecen las normativas ambientales de las viviendas.
- En Europa crece suficiente madera para transformar significativamente el sector de la construcción. Incluso una cuota de mercado teórica del 100 % de la construcción de madera de todos los edificios en Europa se traduciría en una demanda directa máxima de 200 millones de metros cúbicos de madera, es decir, el 25 % del crecimiento anual de los bosques de la UE. Por lo tanto, con suposiciones realistas, el impacto del uso creciente de la madera en los edificios en la demanda de recursos de madera es relativamente bajo en términos de biomasa, pero puede tener un gran impacto en términos de rentabilidad, aumentando la demanda de madera a mejores precios. La fabricación de productos de madera también crea residuos forestales y materias primas laterales, como virutas, serrín y corteza, que pueden utilizarse para producir paneles a base de madera, bioenergía y bioquímicos. Si proviene de la gestión forestal sostenible, como es la norma en Europa, el desarrollo de la construcción de madera puede tener impactos ambientales y sociales positivos adicionales. Si la mayor demanda incrementa el precio de la madera, ello va a provocar mayor interés de los actores en la gestión forestal y movilizándolo mayores recursos para ella (Humerkoski y Hetemaki, 2016),

Aun así, existen barreras significativas para un incremento notable del uso de la madera en la construcción. Siguiendo a Humerkoski (2016), se pueden resumir como sigue:

- El sector de la construcción tiene una gran inercia. Se considera que tiene una mayor aversión al riesgo y que está más fragmentado que otros. Se resiste a adoptar prácticas innovadoras debido a la cantidad de normas existentes, el gran capital invertido en maquinaria y la fragmentación de la cadena de valor en innumerables subcontratis-

tas de mediano y pequeño tamaño. Además, el coste de la obra es el principal factor diferencial en el mercado y esto fomenta la innovación incremental, pero bloquea la innovación disruptiva

- La construcción de madera en el sur de Europa parte de niveles muy bajos, especialmente en España, Portugal, Grecia y el sur de Italia. Tiene una presencia más fuerte en Francia y el norte de Italia, donde alcanza el 9 % de la cuota de mercado. Esto significa un ecosistema industrial más débil y una falta generalizada de percepción de la construcción de madera como una alternativa técnica y económicamente. De hecho, la arquitectura de madera se puede percibir como una curiosidad que enfatiza valores como la salud y el medioambiente en nichos de desarrollo. La ausencia de actores bien organizados también supone menor probabilidad de normativas favorables y actividades de sensibilización. En consecuencia, a corto plazo, el potencial del mercado de la construcción de madera en Europa para 2030 parece ser muy específico de cada región (con mayor potencial en los países nórdicos, seguido por Europa central e Italia septentrional, Europa occidental, incluida Francia, y finalmente el sur de Europa), y dependerá en gran medida de la normativa de la construcción ecológica, como lo demuestra el reciente aumento de la construcción de madera en el Reino Unido.

Por otro lado, la construcción de madera en el sur de Europa se basa en recursos forestales y productos de madera de ingeniería importados, por lo que tiene poco impacto en economía forestal local. Esto reduce aún más la visibilidad sectorial y representa desventajas competitivas para la industria de la madera (Martínez de Arano y Lesgourgues, 2014). Vincular la industria de la transformación de la madera a los recursos locales es una prioridad para la Estrategia italiana de bioeconomía y tiene sentido en regiones españolas como Valencia y Catalunya, que tienen importantes capacidades de diseño y transformación de la madera, pero que generalmente utilizan maderas importadas, o como Galicia, País Vasco y Castilla y León, con importantes industrias forestales, posicionadas en segmentos de relativo bajo valor. En este sentido, las maderas de conífera del sur de Europa pueden cumplir a la perfección los requisitos técnicos para los productos modernos de madera de ingeniería, si bien se requiere un esfuerzo sostenido para caracterizar los tipos de madera locales y sus productos, así como para desarrollar cadenas de suministro adecuadas, en algunos casos mejorando las capacidades tecnológicas de los aserraderos. Un mayor esfuerzo y determinación serán necesarios para desarrollar productos competitivos a partir de frondosas locales (p. ej.: eucalipto, castaños robles...). Los casos de éxito de la madera de chopo y el corcho pueden servir de inspiración.

Para superar estos obstáculos, se necesitarán acciones decisivas, especialmente en las regiones que parten con los niveles de construcción de madera más bajos. El primer paso debe ser la adaptación de la normativa que elimine barreras y costes innecesarios. Para ello, sería útil compartir y ampliar las experiencias existentes (Hetemäki *et al.*, 2017). Una regulación más estricta del comportamiento ambiental exigible a los edificios (p. ej.: eficiencia energética, circularidad...) puede hacer muy competitiva a la construcción en madera, sin discriminar

negativamente otras tecnologías y materiales eficientes, lo que podría ocurrir en el caso de ayudas directas (p. ej.: cuotas, subvenciones...) a un determinado conjunto de materiales.

5.2. Mercado textil

El sector textil es una de las industrias más grandes del mundo y la demanda de fibras textiles está creciendo rápidamente. En 2015, la producción mundial de fibras textiles fue de alrededor de 90 millones de toneladas, más del doble de los volúmenes de producción de 1990 (CIRFS, 2017). Debido al crecimiento de la población y de las clases medias, se prevé que la demanda mundial de textiles superará los 250 millones de toneladas en 2050 (Alkhagen *et al.*, 2015). Las fibras sintéticas petroquímicas (principalmente el poliéster) representan el 69 % de toda la producción textil, y el algodón un 23 % adicional (CIRFS, 2017). La moda y los tejidos son considerados el segundo mayor contaminante del mundo después del petróleo. Utilizan una cuarta parte de los productos químicos producidos en todo el mundo cada año, y se ubican justo detrás de la agricultura en el consumo de agua (Changing Markets Foundation, 2017). Los residuos de microplásticos que liberan las fibras sintéticas en el agua de lavado se han convertido en una importante fuente de contaminación ambiental.

Es necesario encarar la eliminación progresiva de las fibras textiles sintéticas y mejorar el comportamiento ambiental y la circularidad del sector textil. Debido al consumo excesivo de agua, la disponibilidad limitada de tierras cultivables y la necesidad de garantizar la seguridad alimentaria, es poco probable que el algodón pueda satisfacer esa demanda (Antikainen *et al.*, 2017).

Por lo tanto, es probable que aumente la demanda de fibras artificiales de origen forestal (MMCF). Las MMCF tienen el potencial de reemplazar tejidos sintéticos o basados en algodón en la mayoría de las aplicaciones. A partir de las diferentes tecnologías, algunos estiman que debería ser posible reemplazar toda la producción de algodón mundial (25 millones de toneladas en 2014) con entre 60 y 100 millones de metros cúbicos de madera, lo que está dentro del rango de capacidad de producción de madera europea (Uusipuu, 2017).

La MMCF más relevante hoy es la viscosa, con una cuota del 96 % (Vehvilainen, 2015). Fue creada a finales del siglo XIX se le conoce también como rayón. Es apreciada por sus cualidades ya que puede imitar el tacto del algodón, la seda, la lana o el lino y tiene una amplia gama de aplicaciones que van desde la industria de la moda hasta el mobiliario y el embalaje para el hogar. Su demanda está creciendo rápidamente. Aunque puede producirse a partir de muchos materiales lignocelulósicos, incluidos el bambú y los residuos agrícolas, actualmente se produce principalmente a partir de una celulosa de alta pureza que se obtiene de la madera. Su producción se ha más que duplicado en los últimos años hasta alcanzar 6,3 millones de toneladas en 2016, lo que representa el 3,5 % de la producción global de celulosa (FAOSTAT).

Aunque tiene ventajas sobre los tejidos sintéticos en términos de huella de carbono y sobre el algodón por su menor huella hídrica (Shen *et al.*, 2010), el comportamiento ambiental de

la viscosa puede cambiar mucho según sean los procesos industriales y de aprovisionamiento de materia prima. La viscosa tradicional (que representa el 70 % de toda la viscosa) tiene un inconveniente importante, a saber, el uso en el proceso de producción de disulfuro de carbono, un compuesto altamente tóxico, con efectos negativos bien documentados en la salud humana y el medioambiente. Además, requiere cantidades significativas de agua, por lo que un tratamiento deficiente de las aguas residuales tiene impactos ambientales muy negativos. El vertido total de aguas residuales de las fábricas asiáticas de viscosa es de aproximadamente 300 m³ por tonelada de producto final. Otros impactos negativos se producen en los procesos de teñido y acabado y como consecuencia de una mano de obra barata y normas de seguridad poco estrictas (*Changing Markets Foundation*, 2017).

En consecuencia certificar la gestión forestal sostenible y el proceso de la obtención de celulosa altamente eficiente es una condición necesaria pero no suficiente para garantizar la producción textil sostenible, ya que puede producir impactos sociales y económicos significativos durante la fabricación y el acabado de los tejidos. Esto es muy importante si tenemos en cuenta que Europa exporta la mayoría de su celulosa a China, India y otros países del sudeste asiático donde se producen viscosa y otras MMCF. Como nota positiva, están surgiendo tecnologías nuevas y más seguras (p. ej.: Spinnova), que pueden lograr mejoras medioambientales significativas a la vez que reemplazando el disulfuro de carbono con productos químicos menos peligrosos y mediante procesos de circuito cerrado (p. ej.: Lyocell, Modal).

Si bien la conversión de la capacidad actual de celulosa en las regiones atlánticas puede ser relativamente sencilla (p. ej.: el caso de Tembec en Aquitania) el desarrollo de un nuevo sector textil basado en esos recursos endógenos seguirá siendo un desafío crítico, ya que hoy en día la mayor parte de la celulosa en disolución europea se exporta a Asia para su posterior procesamiento y confección. Fuera de las regiones productoras de celulosa, los desafíos están relacionados con el desarrollo y / o la adaptación de tecnologías emergentes a las fuentes lignocelulósicas disponibles. Las marcas mundiales de moda y las capacidades de fabricación textil de primer nivel en Francia, Italia, España y Portugal podrían proporcionar el impulso necesario. Asegurar la rentabilidad requerirá también el desarrollo de nuevos productos en las fracciones de lignina y hemicelulosa que desarrollen un nuevo tipo de biorrefinería mediterránea. ¿Será viable?

6. El potencial oculto de los productos forestales no madereros

Los productos forestales no madereros (PFNM) son productos de origen biológico distintos de la madera derivada de bosques, otras zonas forestales y árboles fuera de bosques (p. ej.: frutos del bosque, champiñones, corcho, piñones, bellotas, castañas, hierbas medicinales, aceites esenciales, miel, esparto, resina, etc.). Aunque no siempre son bien conocidos, desempeñan un papel importante en las economías rurales. El último informe sobre *El estado de los bosques de Europa* reveló que el valor total de los PFNM extraídos anualmente de los bosques

Europeos alcanza los 2.300 millones de euros. Esto representa alrededor del 10 % del valor de la madera en rollo, una cifra muy significativa, teniendo en cuenta las lagunas en la recopilación de datos. Debido a las cadenas de valor de la madera relativamente más débiles, estos PFNM representan una mayor proporción de la producción forestal en el Mediterráneo, donde su relevancia va más allá ya que están estrechamente relacionados con el patrimonio cultural, el conocimiento tradicional y la identidad territorial. Además, la producción/recolección europea solo cubre una fracción de la demanda interna. La FAO estima que las importaciones de la UE-28 superan los 3.000 millones de euros en productos forestales no madereros y exporta unos 2000 millones de euros al año, lo que representa la mitad del comercio mundial (véase la Tabla 2). En este contexto, el sur de Europa es líder mundial en el suministro y comercialización de corcho, productos a base de corcho, taninos vegetales, resinas naturales y setas silvestres, y hasta hace poco era un actor clave en el suministro de resinas naturales. Sus sólidas industrias agroalimentaria, de moda y cosmética abren un extraordinario potencial para los extractos de plantas y aceites esenciales.

Algunos PFNM se han domesticado significativamente y se producen a través de una gestión forestal específica, aunque con una gama de intensidades de gestión (p. ej.: corcho, resina, así como castaña, trufas y piñón en ciertas regiones), mientras que otros, generalmente llamados productos forestales silvestres, se recogen, pero no se gestionan activamente. Este es el caso de muchas setas y bayas, pero también de algunas mieles y plantas medicinales o decorativas. Ambos tipos de PFNM tienen potencial para contribuir a la bioeconomía, aun requiriendo enfoques y estrategias muy diferentes.

Desde la perspectiva de la bioeconomía, el factor principal y diferenciador de los PFNM *salvajes* es su potencial para aportar bienestar socioeconómico y favorecer las relaciones rural-urbana más equilibradas, contribuyendo al «crecimiento inclusivo» en Europa (Profokieva *et al.*, 2017). Este potencial no debe subestimarse.

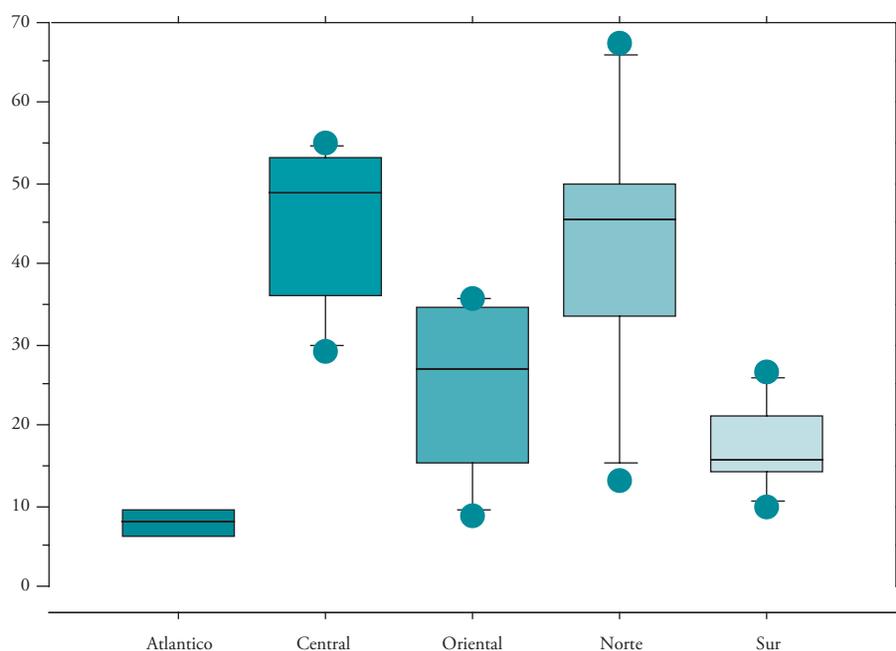
Una encuesta de hogares sobre hábitos de consumo de PFNM silvestres, respondida por cerca de 17.000 ciudadanos en la UE-28 (excepto Malta, Chipre y Luxemburgo) y que incluye Serbia, Rusia y Turquía, reveló que más del 90 % de los europeos consumió algún tipo de producto forestal silvestre durante 2015 (Lovric *et al.*, 2017). La mayoría de esto se refiere a productos comestibles, pero también a productos a base de follaje y resina. La proporción es impresionante, incluso si en algunos casos (p. ej.: setas o bayas) no es totalmente cierto que fueran productos realmente salvajes. Aún más importante, el 35 % de los encuestados rurales y el 22 % de los urbanos cogieron o cosecharon ellos mismos productos durante el año, aunque con grandes diferencias regionales, con relativamente más recolectores en la Europa nórdica y central y menos recolectores en los países del sur y Atlántico (Gráfico 1). Más del 70 % de estos recolectores van al bosque más de tres veces al año. La cantidad total recolectada se estimó en 375.000 toneladas con un valor de mercado de más de 6.000 millones de euros. En realidad, solo el 25 % de los recolectores venden una parte de los PFNM recolectados; lo habitual es la recolección para el autoconsumo. Las trufas, un producto de valor precio, son la única excepción ya que más del 50 % de los recolectores venden parte de su cosecha (Lovric *et al.*, 2017).

Tabla 2. Valores comerciales mundiales de la UE de los productos básicos que contienen (total o parcialmente) PFNM en el año 2011. En millones de euros

Productos	Procesamiento	Mundo	Desde EU-28	A EU-28	Balance EU-28
Frutas silvestres total o parcialmente	Mezcla	3.060	1.100	1.505	-405
Miel	Crudo	1.370	443	733	-290
Setas	Mezcla	1.979	424	603	-180
<i>Setas secas</i>	<i>Crudo</i>	985	51	123	-72
<i>Setas frescas y congeladas</i>	<i>Crudo</i>	565	297	345	-48
<i>Setas preparadas</i>	<i>Procesado</i>	164	60	62	-2
<i>Setas en conserva</i>	<i>Procesado</i>	85	12	61	-49
<i>Auricularia seca</i>	<i>Crudo</i>	141	3	11	-9
<i>Tremella secado</i>	<i>Crudo</i>	39	1	1	0
Trufas		22	17	12	5
<i>Trufas preparadas</i>	<i>Procesado</i>	21	17	12	5
<i>Trufas frescas y congeladas</i>	<i>Crudo</i>	1	0	0	0
Corcho		759	710	467	243
<i>Tapón de corcho</i>	<i>Procesada</i>	534	507	292	215
<i>Corcho natural</i>	<i>Crudo</i>	106	101	95	6
<i>Corcho cuadrado</i>	<i>Procesada</i>	52	45	30	15
<i>Corcho en piezas</i>	<i>Procesada</i>	67	57	50	7
Taninos		295	74	81	-7
<i>Otros taninos</i>	<i>Mezcla</i>	140	66	41	25
<i>Taninos de zarza</i>	<i>Crudo</i>	94	3	17	-14
<i>Taninos de quebracho</i>	<i>Crudo</i>	61	5	23	-18
Follaje y musgos		1.176	670	829	-160
<i>Follaje fresco</i>	<i>Mezcla</i>	870	524	637	-113
<i>Musgos</i>	<i>Crudo</i>	42	24	26	-3
<i>Follaje seco</i>	<i>Mezcla</i>	264	122	166	-44

Fuente: simplificado a partir de Profokieva *et al.* (2017).

Gráfico 1. Porcentaje de hogares que recolectaron PFMN en diferentes regiones europeas (2015)



Fuente: basándose en Prokofieva *et al.* (2017).

Los impactos positivos en la salud física y humana de las actividades al aire libre en el medio forestal están atrayendo una mayor atención y pueden tener un impacto económico significativo debido al ahorro en atención sanitaria. Además, los datos indican el gran potencial de los PFMN para activar el turismo basado en la naturaleza y generar ingresos en las zonas rurales, aprovechando las tendencias sociales existentes. Siguiendo a Prokofieva *et al.* (2017), el potencial de los PFMN se puede potenciar aún más mediante, por ejemplo:

- La creación de enfoques de *economía* experiencial donde los sentimientos y/o el entretenimiento de los consumidores son la parte central del negocio. El turismo micológico, que muestra la trazabilidad desde el bosque hasta el restaurante, los cursos de recolección de setas, etc. son la base de algunas estrategias de turismo de naturaleza. El turismo de naturaleza y cultural vinculado a los PFMN, puede contribuir en gran medida a las economías rurales, pero no siempre es así, ya que no todas las configuraciones garantizan que el valor generado se capte localmente.
- Aprovechar la tendencia actual hacia la apreciación y uso de los recursos locales, naturales, tradicionales y silvestres, potenciando un mayor uso de este tipo de productos en restaurantes, alimentos saludables, productos artesanales como bebidas, mermeladas y dulces, así como en cosméticos y medicina natural.

El aumento de los impactos socioeconómicos de los PFNM a través de las estrategias anteriores puede requerir nuevos ajustes en la cadena de suministro. En el caso de los PFNM silvestres, es particularmente relevante regular los derechos y modalidades de recolección, permitiendo la trazabilidad de los productos (extremadamente importante para los comestibles), evitando condiciones de empleo injustas y equilibrando los derechos de la población local y foránea con las necesidades de operadores más profesionalizados. Internet y las redes sociales se han convertido en canales de comercialización relevantes y una gran oportunidad para los PFNM. Aunque los enfoques directos del productor al consumidor siempre son posibles. En muchos casos el beneficio, se obtendrá mediante una mayor cooperación de los productores y/o verticalmente a lo largo de las cadenas de valor. Un ejemplo relevante es una marca de calidad para setas silvestres desarrolladas en la región española de Castilla y León que integra a los operadores agroalimentarios interesados, garantizando a los consumidores el origen geográfico, la recolección sostenible, seguridad y calidad visual/culinaria, al tiempo que establece economías de escala y aún los esfuerzos de *marketing*. La marca se construye a partir de las normativas locales de recolección y una red de puntos de venta móvil donde los recolectores pueden vender su cosecha diaria con una trazabilidad y transparencia total en la web³.

Las oportunidades que ofrecen los PFNM va mucho más allá de los mercados especializados, las actividades a pequeña escala y el patrimonio, especialmente cuando se consideran productos industriales como el corcho, la resina y otros extractos. El sur de Europa alberga algunos líderes mundiales en varios mercados. La empresa italiana SILVATEAM, con instalaciones de producción en Italia, China y América Latina, es líder mundial en castaño y otros taninos naturales para la industria del cuero que también produce aditivos para el vino, alimentación animal y otras aplicaciones industriales. Italian Vegetable Tanned Leather es una marca de calidad para la industria de la moda y la indumentaria, clave para la competitividad del cuero italiano en los mercados mundiales, que muestra cómo la relevancia de los PFNM va más allá de su valor monetario. La emblemática *Corticeira Amorim* es líder mundial en productos de corcho. Importantes inversiones en I+D han llevado a una cartera ampliada de productos que incluye tapones de botellas dirigidos a todos los segmentos del mercado, pero también paneles impresos digitalmente, suelos impermeables y resistentes a las ralladuras, mobiliario en corcho comercializado por IKEA, y productos de alta tecnología como herraduras para caballos de carreras y piezas especializadas para aplicaciones aeroespaciales. De esta forma, los residuos de la producción de tapones que tradicionalmente eran quemados para obtener energía han encontrado nuevas aplicaciones de mayor valor añadido. En los últimos años, España ha reactivado la producción de resinas naturales, reemplazando las resinas importadas de China, hasta alcanzar las 15.000 toneladas y contribuyendo a nuevas inversiones en instalaciones de procesamiento. Con más de 800.000 ha de bosques de pinos resinables, la producción de resina representa una oportunidad maravillosa para la era postpetróleo en el sur de Europa, aun a pesar del coste de la mano de obra que hoy día resulta limitante. La empresa francesa DRT, con más de 1.000 empleados, tuvo sus orígenes en el procesamiento de la que fue una muy importante producción de resina de Aquitania. Todavía produce derivados la resina, pero

³ <https://www.setasdecastillayleon.com>.

se ha expandido para incluir extractos especiales de corteza de pino, semillas de uva y hojas de olivo, mientras suministra polifenoles y productos basados en fitoesteroles a la industria de la salud, nutracéutica y cosmética en todo el mundo. Los aceites esenciales y los extractos naturales son un tesoro escondido, que ofrece muchas oportunidades para nuevas aventuras empresariales, como lo demuestra la *start-up* gallega Hifas da Terra que desarrolla extractos de hongos para aplicaciones oncológicas. La puesta en práctica de este potencial requerirá esfuerzos continuados en I+D, mayores habilidades empresariales y un mejor acceso al capital de riesgo para las nuevas iniciativas empresariales en de bioeconomía.

7. Observaciones finales: nuevos enfoques de gobernanza para construir una bioeconomía forestal mediterránea sostenible

Los bosques mediterráneos están atrapados en una sorprendente paradoja. Son extremadamente valiosos. Son una infraestructura ecológica esencial que puede ayudar a abordar los desafíos más cruciales del cambio global. Sin embargo, parece que nuestra sociedad ha perdido la capacidad de valorarlos, de insertarlos en los flujos económicos y de desarrollar un enfoque adecuado para su gestión sostenible. De alguna manera, debido a su abandono y a los altos costes de la extinción de incendios, los bosques mediterráneos se han convertido en un sumidero de recursos públicos.

El desarrollo de cadenas de valor sostenibles y complementarias, basadas tanto en bienes como en servicios, es la piedra angular de su protección y gestión, tal y como se establece en el Marco Estratégico de la FAO para los Bosques Mediterráneos⁴. En este sentido, múltiples iniciativas innovadoras están teniendo lugar en toda la región. Expandir, replicar y adaptar la innovación, pasando *de nicho a norma*, es un desafío importante que requiere acción en todos los niveles y en particular: i) un entorno político favorable capaz de crear sinergias entre las políticas climáticas, industriales, urbanas y medioambientales; ii) capacidades en investigación, innovación y creación de empresas; iii) acceso a financiación, incluido el capital riesgo; iv) un marco fuerte en materia de sostenibilidad y v) el apoyo social, también a través de nuevos patrones de consumo. Tal como se ha debatido en este capítulo, el potencial de los bienes y servicios forestales para contribuir a la bioeconomía circular en el sur de Europa es alto, pero no sucederá *per se*.

Un primer problema crítico es la necesidad de desarrollar nuevos productos basados en madera sólida, química de la madera y otros extractos de plantas para reemplazar y mejorar los actuales productos basados materias primas no renovables. Esto requiere esfuerzos continuados en I+D+i y, especialmente, un esfuerzo sistemático para reducir la brecha entre investigación e innovación, reforzando la capacidad para descubrir y estimular nuevas oportunidades de negocio, incluyendo una menor aversión al riesgo. Un marco regulatorio favorable puede

⁴ <http://www.fao.org/forestry/36306-08872a0d33c559c4f5c42304068d43763.pdf>.

estimular nuevos desarrollos a través de, por ejemplo, la contratación pública sostenible, las normas de edificación, impuestos a las emisiones de carbono, prohibición sobre determinados usos de plásticos no degradables y la eliminación de subsidios directos o indirectos a los combustibles fósiles.

Un segundo elemento esencial es garantizar el suministro de materias primas forestales en cantidad, calidad y coste (un ámbito en el que las regiones mediterráneas se enfrentan a restricciones significativas). Es necesario replantearse el tradicional enfoque de preservación estática de los espacios naturales tanto por motivos de biodiversidad, como de riesgo de incendios. La región mediterránea se caracteriza por una elevada diversidad de fuentes de biomasa lignocelulósica, en la que los residuos agrícolas y los residuos agroalimentarios se producen en cantidades muy importantes además de la biomasa forestal. Por esta razón, la bioeconomía mediterránea necesita enfocarse en especialidades de alto valor y bajo volumen, sin descartar biorefinerías de materias primas mixtas y las tecnologías de pretratamiento distribuido que permitan ciertas economías de escala. Un tercer elemento es la necesidad de un enfoque regional. Los bosques en la región del Mediterráneo, más que en otros lugares, están estrechamente integrados con los demás componentes del paisaje. Es preciso un enfoque en los «*paisajes forestales*» en lugar de en los bosques. La dimensión regional es, de hecho, necesaria para aprovechar el potencial de los productos forestales de los PFSNM y el rico patrimonio cultural de la naturaleza. También debe abordar los profundos cambios sociales y económicos inducidos por la urbanización de la sociedad y la terciarización de la economía, y el desplazamiento del centro de gravedad de las áreas rurales a las ciudades y de los bienes a los productos y servicios. Debe ser vista como una estrategia clave para las áreas urbanas, no solo para las áreas rurales, como tradicionalmente ha sido el caso. La bioeconomía circular no tendrá éxito si la población urbana no percibe la relevancia que tiene.

Desafortunadamente, las instituciones forestales trabajan generalmente en silos y con una forma tradicional de entender su cometido, que puede adjetivarse como patrimonial y tecnocrática. La parte principal de la regulación forestal en el sur de Europa se creó a principios del siglo XX, en el momento de máxima deforestación y destrucción del recurso. Una fuerte acción de gobierno, en la lógica de *comando y control*, respaldada por un sólido conocimiento científico consiguió proteger y restaurar los pocos bosques remanentes. Sin embargo, en las últimas décadas siglo, los bosques se han expandido enormemente y la sociedad ha evolucionado, demandando mayores cuotas de participación. Sin embargo, los bosques públicos todavía parecen ser *propiedad virtual* de las autoridades forestales que prescriben el conocimiento técnico no siempre contemplado las necesidades, deseos y expectativas de la población tanto local como distante. Del mismo modo, la aplicación de la ley sigue siendo el *leitmotiv* que guía la tutela sobre los bosques privados. Los tiempos actuales demandan nuevos enfoques. Se requiere más énfasis en la innovación y el emprendimiento para estimular la gestión forestal y la bioeconomía. El emprendimiento juvenil y la innovación social podrían ser particularmente inspiradores y útiles en este contexto conectando esfuerzos privados y públicos. Una visión prospectiva estratégica para la bioeconomía de los bosques mediterráneos debe estar codiseñada de forma que integre los bosques en marcos territoriales y sociales más amplios.

Referencias bibliográficas

- ALKHAGEN, M.; SAMUELSSON, Å.; ALDAEUS, F.; GIMÅKER, M.; ÖSTMARK, E. y SWERIN, A. (2015): *Roadmap 2015 to 2025. Textile materials from cellulose*. RISE-Research Institutes of Sweden.
- Allard, G. *et al.* (2013): *State of Mediterranean Forests 2013*.
- CHANGING MARKETS FOUNDATION (2017): *Dirty Fashion*. Disponible en <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17508061.2015.1082746>.
- CIRFS (2017a): *World Manifest Fibres Production, European Man Fibres Association CIRFS*. Disponible en: <http://www.cirfs.org/KeyStatistics/WorldManMadeFibresProduction.aspx>; visitado el 8 de marzo de 2017.
- CLEAN TECH GROUP y WWF (2017): «The Global Innovation Index. Global Cleantech Innovation Programme (GCIP) Country Innovation Profiles».
- COSTANZA, R. (2014): «A Theory of Socio-Ecological System Change»; en *Journal of Bioeconomics* 16(1); pp. 39-44.
- CROITORU, L. (2007): «How Much Are Mediterranean Forests Worth?»; en *Forest Policy and Economics* 9(5); pp. 536-45.
- COMISIÓN EUROPEA (2015): «Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2014»; *Informe EUR 27400 EN*. Centro de Investigación Conjunta, Instituto de Medio Ambiente y Sostenibilidad.
- FAO (2011): «Wildfire Prevention in the Mediterranean A key issue to reduce the increasing risks of Mediterranean wildfires in the context of Climate Changes»; *Documento de síntesis*. Roma.
- FARCY, C.; DE CAMINO, R. y MARTÍNEZ, I. (2015): «External Drivers of Change Challenging Forestry: Political and Social Issues at Stake»; pp. 87-106.
- GRAU, R.; KUEMMERLE, T. y MACCHI, L. (2013): «Beyond 'land sparing versus land sharing': environmental heterogeneity, globalization and the balance between agricultural production and nature conservation»; en *Current Opinion in Environmental Sustainability* 5(5); pp. 477-483.
- HELM, D. (2015): *Natural Capital: Valuing The Planet*. Yale University Press; pp. 296.
- HETEMÄKI, L. y HURMEKOSKI, E. (2016): «Forest products markets under change: review and research implications»; *Current Forestry Reports* 2(3); pp. 177-188.
- HETEMÄKI, L. *et al.* (2017): *Leading the Way to a European Circular Bioeconomy Strategy: From Science to Policy* 5; Disponible en http://www.efi.int/files/attachments/publications/efi_fstp_5_2017.pdf. <http://dx.doi.org/10.14214/df.211>.

- HURMEKOSKI, E. (2017): *How can wood construction reduce environmental degradation?* European Forest Institute. Disponible en http://www.efi.int/files/images/publications/efi_hurmekoski_wood_construction_2017_oct.pdf.
- HURMEKOSKI, E. (2016): «Long-term outlook for wood construction in Europe»; en *Dissertationes Forestales* (211); pp. 57.
- JACOB, D. *et al.* (2014): «EURO-CORDEX: New High-Resolution Climate Change Projections for European Impact Research»; en *Regional Environmental Change* 14(2); pp. 563-78.
- LINDNER, M.; MAROSCHEK, M.; NETHERER, S.; KREMER, A.; BARBATI, A.; GARCÍA-GONZALO, J.; SEIDL, R.; DELZON, S.; CORONA, P.; KOLSTRÖM, M.; LEXER, M. J. y MARCHETTI, M. (2010): «Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems»; en *For. Ecol. Manage* (259); pp. 698-709.
- MARTÍNEZ DE ARANO, I. y LESGOURGUES, Y. (2014): «South-Western European outlook»; en HETEMAKI, ed.: *Future of the European Forest-Based Sector: Structural Changes Towards Bioeconomy. What the Science can tell us* 4. European Forests Institute; pp. 110.
- MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DE L'ÉNERGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE LA MER, ed. (2010): *Rapport de la mission interministérielle «Changement climatique et extension des zones sensibles aux feux de forêts»*; pp. 190.
- NABUURS, G. *et al.* (2015): «A New Role for Forests and the Forest Sector in the EU Post-2020 Climate Targets»; *From Science to Policy* (2). European Forest Institute.
- PERGAMS, O. R. W. y ZARADIC, P. A. (2008): «Evidence for a fundamental and pervasive shift away from nature-based recreation»; en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105(7); pp. 2295-2300.
- PLAN BLEU (2008): Informa que el número de turistas que visitaron la región del Mediterráneo aumentó de 153 millones en 1990 a 228 millones en 2002.
- RAFTOYANNIS, Y. *et al.* (2014): «Perceptions of Forest Experts on Climate Change and Fire Management in European Mediterranean Forests»; *IForest* 7(1); pp. 33-41.
- SAN-MIGUEL-AYANZ, J.; MORENO, J. M. y CAMIA, A. (2013): «Analysis of Large Fires in European Mediterranean Landscapes: Lessons Learned and Perspectives»; en *Forest Ecology and Management* 294(APRIL); pp. 11-22.
- SATHRE, R. y O'CONNOR, J. (2010): «Meta-Analysis of Greenhouse Gas Displacement Factors of Wood Product Substitution»; en *Environmental Science and Policy* 13(2); pp. 104-14.
- SETO, K. C.; FRAGKIAS, M.; GÜNERALP, B. y REILLY, M. K. (2011): «A meta-analysis of global urban land expansion. expansion»; *PLoS ONE* 6(8); pp. e23777. doi: 10.1371 / journal.pone.0023777.

- SHEN, L.; WORRELL, E. y PATEL, M. K. (2010): «Environmental impact assessment of man-made cellulose fibres»; en *Resour. Conserv. Recycling* 55; pp. 260-274.
- USDA FOREST SERVICE (2015): *The rising cost of wildfire operations: effects on forest Service non fire work*. 4 August 2015.
- VAN DER PLAS, F. *et al.* (2017): «Continental Mapping of Forest Ecosystem Functions Reveals a High but Unrealised Potential for Forest Multifunctionality»; en *Ecology Letters*; pp. 31-42.
- VEHVILÄINEN, M. (2015): «Wet-spinning of cellulosic fibres from water-based solution prepared from enzymetreated pulp»; en *Publication* (1312). Tampere University of Technology.
- VERKERK, P. J.; MARTÍNEZ DE ARANO, I. y PALAHÍ, M. (2018): «The Bio-Economy as an Opportunity to Tackle Wildfires in Mediterranean Forest Ecosystems»; en *Forest Policy and Economics* (86).



MEDITERRÁNEO
ECONÓMICO

32

- I. Iniciativas europeas en bioeconomía
- II. Perspectivas de la bioeconomía en España
- III. Necesidad de una sólida base científica y técnica en bioeconomía
- IV. Bioeconomía, bioindustrias y seguridad alimentaria
- V. Ejemplos de éxito en la bioeconomía
- VI. Bioeconomía y bioenergía



LA BIOECONOMÍA COMO OPORTUNIDAD PARA LA ECONOMÍA ESPAÑOLA

LA VISIÓN DESDE EL OBSERVATORIO DE BIOECONOMÍA

Manuel Lainez^a, María Jesús Periago^b, Nuria Arribas^c y Concepción Meneses^a

^aINIA, ^bUniversidad de Murcia, ^cFIAB

Resumen

La bioeconomía va a ser la herramienta para desarrollar una política de economía circular en el sector de los recursos de origen biológico y, tal como se entiende desde la Estrategia Española de Bioeconomía, se debe sustentar en las siguientes tres premisas: 1) imponer la sostenibilidad como una condición esencial para el uso de cualquier recurso natural; 2) es imprescindible introducir elementos de eficiencia en el sistema, marcado por una economía global, con un aumento de las demandas de alimentos y de recursos biológicos, cuya producción va a estar limitada por el cambio climático; y 3) los procesos productivos y de puesta en el mercado de productos requieren de empresas competitivas que mantengan su actividad en el tiempo.

La actividad de la bioeconomía en nuestro país, tiene un peso específico mayoritario en el sector agroalimentario, y requiere disponer de nuevos conocimientos que permitan generar tecnologías que garanticen la sostenibilidad en las cadenas de valor actuales y en las nuevas que se han de generar a partir de la utilización de distintas fuentes de biomasa. Estas tecnologías deben ser aplicadas por empresas de nuestro entorno económico, para garantizar que el valor añadido derivado de los procesos productivos se quede en nuestra sociedad. Además, solo podrán implantarse en nuestro sistema económico si son aceptadas por la sociedad, y para ello los organismos de gestión tienen que autorizarlas y los consumidores deben estar dispuestos a adquirir los productos obtenidos. Por ello, desde el Observatorio de la Estrategia Española de Bioeconomía consideramos que hay que avanzar hacia un ecosistema en el que la ciencia y la tecnología, la sociedad y el sector económico trabajen juntos para superar los retos de nuestra sociedad y para que nuestras futuras generaciones sigan disfrutando de una calidad de vida, al menos, semejante a la nuestra.

Abstract

The bioeconomy will be the key tool in developing a circular economy policy in the biological resources sector and, as is understood in the Spanish Bioeconomy Strategy, it should be based on the following three premises: 1) the imposition of sustainability as an essential condition for the use of any natural resource; 2) the essential introduction of elements of efficiency into the system, marked by a global economy, with an increased demand for foodstuffs and biological resources, the production of which is going to be limited by climate change; and 3) the processes of production and the marketing of products require competitive industries that are sustainable through time.

The bioeconomy activity in our country is predominantly weighted towards the agri-food sector, and requires new knowledge that will enable technologies to be generated that guarantee sustainability, efficiency, and productivity, in the current value chains and in new ones that must be generated based on the use of different biomass sources. These technologies have to be applied by companies in our economic environment, to ensure that the added value derived from production processes remains in our society. In addition, they can only be introduced into our economic system if they are accepted by society. Therefore, management organisations must authorise them and consumers should be prepared to acquire the products obtained. For this reason, at the Spanish Bioeconomy Strategy Observatory we consider it necessary to move forward towards an ecosystem where science and technology, society and the economy work together to overcome the challenges of our society, so that future generations will be able to enjoy a quality of life that is, at least, similar to ours.

1. Introducción

El término bioeconomía es relativamente reciente. Por esta razón hay tantas definiciones como personas que trabajan en ella. De manera sencilla podríamos describirla como el conjunto de todas las actividades económicas relacionadas con la producción, transformación y

utilización, directa o indirecta, de recursos de origen biológico. Tradicionalmente englobaba la producción de alimentos, productos forestales, textiles y energía. Sin embargo, con el desarrollo de diferentes tecnologías el número de productos finales derivados han ido creciendo, y se ha añadido al concepto la obtención de extractos o compuestos activos, aplicados a la alimentación y la farmacia, o la transformación en biocompuestos diversos como podrían ser los bioplásticos o los biocombustibles. En suma, una gran cantidad de derivados que, con un mayor o menor valor añadido, pueden ponerse en el mercado.

En el marco de la Estrategia Española de Bioeconomía se ha buscado una definición más amplia adaptada a nuestro contexto socioeconómico. Así, se define como el conjunto de las actividades económicas que obtienen productos y servicios, generando valor económico, utilizando, como elementos fundamentales los recursos de origen biológico, de manera eficiente y sostenible. Su objetivo es la producción y comercialización de alimentos, así como productos forestales, bioproductos y bioenergía, obtenidos mediante transformaciones físicas, químicas, bioquímicas o biológicas de la materia orgánica no destinada al consumo humano o animal y que impliquen procesos respetuosos con el medioambiente, así como el desarrollo de los entornos rurales.

El objetivo de este capítulo es mostrar las posibilidades de la bioeconomía en nuestro país y como puede ayudar a la creación de nuevos modelos productivos que favorezcan el desarrollo económico sostenible. Para ello recogeremos el peso socioeconómico actual de los sectores que la integran y analizaremos, en un contexto global, algunos escenarios posibles para los recursos biológicos. Después repasaremos las políticas actuales y las que previsiblemente, a corto y medio plazo en el ámbito europeo, van a afectar a estos recursos, así como la evolución del comportamiento de los consumidores europeos. Esto nos dará pie a demostrar la necesidad y la oportunidad de avanzar en este conjunto de actividades económicas a través de la interacción entre la ciencia, la sociedad y las empresas. Después describiremos someramente la estrategia española de bioeconomía: el proceso de elaboración, sus elementos esenciales y la creación del Observatorio de Bioeconomía, como el instrumento que promueve su desarrollo.

2. La bioeconomía en España

El Centro Común de Investigación (JRC) de la Comisión Europea ha publicado el primer informe sobre la bioeconomía en la UE (Ronzon *et al.*, 2017). Incluye como sectores a considerar la agricultura, la actividad forestal, la pesca y la acuicultura, la transformación de alimentos, bebidas y tabaco, la producción de textiles de origen biológico, la obtención de productos de la madera y el mueble, la producción y transformación de papel y sus derivados, la producción de compuestos químicos, farmacéuticos, plásticos y gomas derivados de recursos biológicos, la producción de biocombustibles líquidos y la producción de electricidad de origen biológico.

El propio informe hace referencia a la dificultad para recopilar las estadísticas económicas y de empleo asociadas a esta actividad. Aun así, muestra la importancia de la bioeconomía

en la UE, considerando los datos del año 2014. En su conjunto, emplea aproximadamente 18,6 millones de personas y genera un valor de 2.200 millones de euros (M€), para ese año, lo que significa en torno al 9 % de toda la economía de la UE. En este conjunto la agricultura y la industria alimentaria representan tres cuartas partes del empleo del conjunto de la actividad y dos terceras partes del valor total. Utilizando los datos del informe, para ese mismo ejercicio, en España viene a suponer el 8,6 % del valor económico de la bioeconomía de la UE y el 7,1 % de las personas empleadas.

Utilizando los mismos criterios de búsqueda, pero en este caso con los datos del *Bioeconomy Knowledge Center* (EC, 2017), un año más tarde, el valor total de la bioeconomía en nuestro país, por sectores, así como el número de personas empleadas es de 192 M€ y 1,33 millones de empleados (Tabla 1).

Tabla 1. La importancia sectorial de bioeconomía en España (2015)

	Valor (M€)	%	Empleo (trabajadores)	%
Agricultura	4.3817	22,7	678.700	50,9
Pesca y acuicultura	2.556	1,3	53.035	4,0
Alimentos, bebidas y tabaco	104.998	54,5	351.315	26,4
Biotextiles	8.168	4,2	70.153	5,2
Bioproductos	9.111	4,7	28.921	2,2
Electricidad bio	0	0,0	0	0,0
Biocombustibles	1.876	0,9	3.781	0,2
Forestal	944	0,5	26.100	1,9
Papel y derivados	12.499	6,5	40.826	3,0
Madera y mueble	8.464	4,4	78.778	6,0
Total	192.434		1.331.609	

Fuente: KBC (2017).

En el proceso de elaboración de la Estrategia Española de Bioeconomía se han utilizado como referencia datos similares, aunque obtenidos directamente de informes de las diferentes administraciones sectoriales, e incluso de los propios sectores económicos. Después se han agregado hasta obtener los datos definitivos. De acuerdo con este procedimiento la bioeconomía representaría en España, en el año 2015, un 6,5 % del PIB y emplearía en torno a un 9 % de la población ocupada (Lainez *et al.*, 2017).

En el conjunto, el mayor peso económico se lo llevaría el sector agroalimentario, en el que el agrario aporta la actividad de sus cerca de 900.000 explotaciones y un 2,5 % del PIB, el sector pesquero con algo más de 5.000 empresas, casi 9.900 barcos y 0,2 % del PIB, y el sector de alimentos y bebidas casi 28.800 empresas y 2,7 % del PIB. El sector forestal, de la madera, el corcho y el papel suponen, de acuerdo con esta fuente, el 0,56 % del PIB. A estos

valores se añaden los de las empresas dedicadas a la biotecnología no sanitaria, que son 540, así como las transformadoras de biomasa en bioenergía que alcanzan la cifra de 170.

3. Escenarios para el uso de los recursos biológicos

Los recursos biológicos, que han sido utilizados mayoritariamente para la producción de alimentos para la población humana, tienen en la actualidad otros posibles usos para la producción de bienes e incluso servicios. El Comité Permanente de Investigación Agraria de la UE (SCAR) publicó un documento de prospectiva en relación con la bioeconomía (EU, 2015). En él se identifican los escenarios en los que se puede mover la oferta y demanda de materias primas de origen biológico a medio y largo plazo:

- En el caso de la demanda se hace referencia al crecimiento de la población y de las diferentes economías del mundo, que condicionan las cantidades de alimentos necesarios para su nutrición, la disponibilidad de recursos fósiles para mantener nuestro modelo económico de desarrollo, la evolución de las tecnologías para la transformación de la biomasa en bioproductos y bioenergía, así como la evolución de las biotecnologías no relacionadas con la biomasa.
- En el caso de la oferta de disponibilidad de este tipo de recursos se hace referencia al desarrollo e implantación de nuevas tecnologías en los sectores primarios, así como la posibilidad de obtenerlos del medio marino.

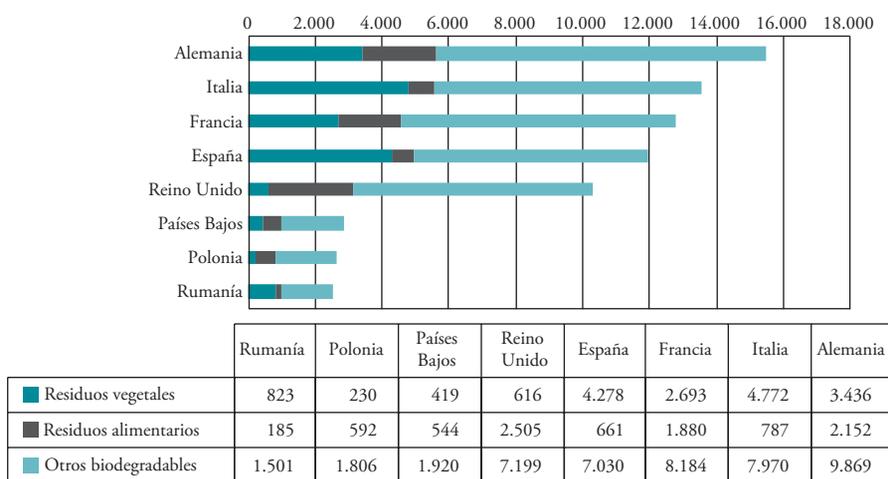
Estos escenarios están sometidos, como indican los autores, a una gran cantidad de incertidumbres, ligadas, fundamentalmente a:

- La evolución del cambio climático, que afecta tanto a la producción de recursos biológicos, especialmente en el ámbito agrario, como a las políticas que se establezcan en los principales bloques económicos del mundo en las áreas de la mitigación y de la adaptación.
- La evolución del crecimiento económico que está asociada al crecimiento de la población, a las políticas económicas implementadas tanto a escala nacional como internacional, a las diferentes crisis que puedan surgir en el futuro y a la evolución del proceso de globalización de la economía.
- La evolución de la situación geopolítica en el globo, condicionada por la disponibilidad de alimentos, energía, materias primas y agua potable en el futuro, así como la evolución de los estilos de vida y el acceso a la información global en las diferentes sociedades, que pueden ser elementos esenciales que dirijan y modulen los movimientos sociales en las diferentes regiones del mundo.

Comparando la oferta y la demanda global de recursos biológicos los autores del estudio prospectivo concluyen que nos podemos enfrentar a tres escenarios: equilibrio, en los niveles actuales de oferta y demanda, equilibrio, con aumento de la oferta y de la demanda, y desequilibrio, con una demanda superior a la oferta.

En todos estos escenarios posibles se contempla la utilización de todas las biomásas disponibles. Sin embargo, cuando observamos el balance de la biomasa en Europa, para 2012, presentado por el *Bioeconomy Knowledge Center* comprobamos que hay un excedente de biomasa que se pierde. Como muestra de esta realidad se presenta en el Gráfico 1, la biomasa residual en los países de la UE (BKC, 2017) que representan el 80 % del total.

Gráfico 1. Biomasa residual en la UE por países y por tipos (2012). En miles de toneladas



Fuente: BKC. Elaboración propia.

Aunque no hemos entrado en un análisis en profundidad de estos escenarios, por no ser el objeto específico de este trabajo, sí que se evidencian unos hechos importantes para abordar la bioeconomía, tanto en Europa como en España:

- Es segura la necesidad de producir más alimentos a escala global. Nuestra economía tiene un sector agroalimentario importante, que destina a la venta exterior una buena parte de su producción, que en la actualidad representa el 17 % de las exportaciones.
- Es previsible una mayor demanda de recursos biológicos a escala global y europea. Los sectores tradicionales agrícola, ganadero, pesquero y forestal deben contribuir a la producción, pero deben hacerlo garantizando su contribución en el futuro, a medio y largo plazo.

- Hay otros sectores, especialmente ligados al mundo marino, en los que será posible obtener biomasa en cantidades más elevadas que en la actualidad, manteniendo la sostenibilidad, por lo que es necesario sentar las bases para que esa actividad se desarrolle.
- En la actualidad, en Europa y en España, se están produciendo una cantidad importante de recursos biológicos que no se utilizan de manera integral, siendo destinados a vertederos o incinerados. La utilización eficiente de estos recursos debe ser una prioridad a medio plazo, incrementando la contribución de la bioeconomía al PIB (OCDE, 2009).

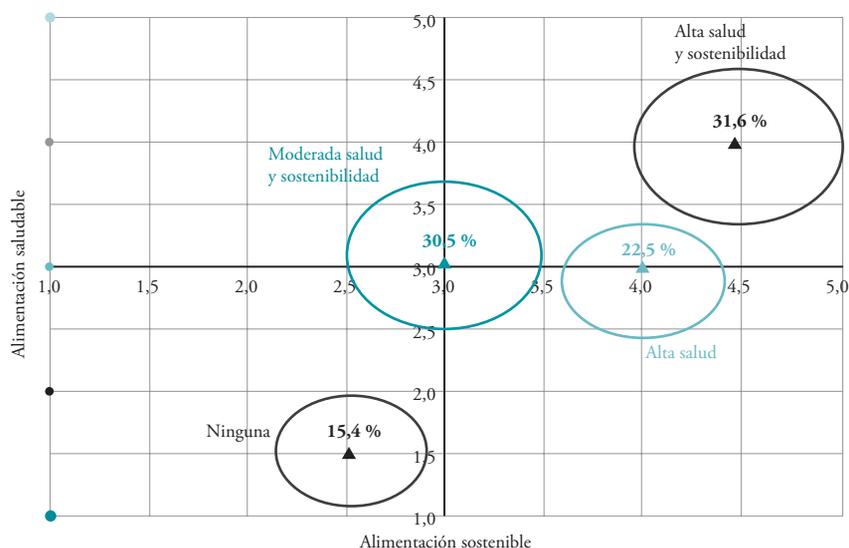
4. Orientación de la demanda y de las políticas públicas

El destino mayoritario de los productos de la bioeconomía es la alimentación humana, y su demanda está relacionada con distintos factores como son la renta *per capita* y la percepción social de diferentes cuestiones nutricionales, de salud y de medioambiente.

Tilman y Clark (2014) mostraron que la ingesta diaria de calorías sigue un crecimiento exponencial, en relación con los ingresos por persona, en los países con muy bajos niveles de renta. Sin embargo, cuando se alcanzan determinados niveles de renta la demanda tiende a estabilizarse. La evolución del consumo de proteína, medida en términos de carne consumida, en relación con la renta disponible, muestra otro patrón: el crecimiento es prácticamente lineal hasta niveles elevados de renta, disminuyendo la pendiente de la curva, pero sin llegar a la estabilidad. Estos modelos han sido utilizados a la hora de realizar las estimaciones de demanda en las próximas décadas (Hubert *et al.*, 2010; Valin *et al.*, 2014; Tilman *et al.*, 2011).

Las cuestiones ambientales y nutricionales también tienen un peso específico importante en la decisión de los consumidores (Tilman y Clark, 2014). Van Loo *et al.* (2017) mostraron la evolución de las tendencias de consumo en Europa (Gráfico 2). En una encuesta realizada a 2.783 consumidores de Alemania, Reino Unido, Bélgica y Holanda, muestran que en el 62 % de las respuestas la tendencia del consumo de alimentos viene determinada por cuestiones de sostenibilidad, de las que más de un 31 % están asociadas, además, a la salud. La salud, por sí misma, y de manera aislada, condiciona más de 22 % de las tendencias. En el resto de los casos, algo más del 15 %, ninguno de ambos aspectos condiciona el consumo. La representación gráfica de las tendencias se presenta también en el Gráfico 2. En este estudio se entiende por tendencia un concepto amplio que incluye desde la búsqueda activa de información sobre el tema en cuestión hasta la decisión final de compra asociada al mismo.

Gráfico 2. Tendencias en el consumo de alimentos en centro y norte de Europa



Fuente: Van Loo *et al.* (2017).

Podemos concluir de los párrafos anteriores que en la alimentación cabe esperar dos tipos de demanda:

- En los países emergentes, con mayores tasas de crecimiento de población, y en la mayoría de los casos económico, se va a experimentar un aumento de la demanda de alimentos, condicionada por su precio.
- En los países desarrollados la demanda no va a incrementarse y, aparecerán otras tendencias condicionantes, entre las que destacan la salud y la sostenibilidad ambiental.

Esta tendencia se constata para Europa en el Eurobarómetro. En el informe de percepciones globales de los ciudadanos del año 2017 se muestra la importancia que los ciudadanos europeos prestan a las cuestiones ambientales: el 75 % de las personas consultadas consideran que las autoridades de la UE deberían prestar más atención a estas cuestiones, mientras que solo el 10 % consideran que debería hacerse menos.

En el informe de 2016 sobre Agricultura y la Política Agraria Común (PAC) (2015), preguntados los ciudadanos por los principales objetivos que la UE debería perseguir en este ámbito, las respuestas se concentraron en: asegurar la calidad, seguridad y salubridad de los alimentos (56 %); garantizar precios razonables al consumidor (51 %); asegurar un nivel de vida a los agricultores (49 %); buscar un equilibrio entre el desarrollo rural y el entorno rural (46 %); proteger el entorno y hacer frente al cambio climático (44 %); llegar a una producción sostenible de alimentos (43 %); y garantizar el suministros de alimentos en la UE (40 %).

La opinión de los ciudadanos europeos orienta las políticas que se impulsan desde la UE y estas condicionan las decisiones estratégicas de los estados miembros, de las empresas y de las personas. Para acercarnos más a la bioeconomía en su conjunto, buscamos la referencia del informe en relación con el de cambio climático del año 2016. Los europeos consideramos este tema el tercer problema más importante a nivel global, tras el hambre y la disponibilidad de agua y el terrorismo, siendo el primero en algunos países como Suecia. En España se considera así por el 13 % de los ciudadanos consultados. Un 43 % creen que los gobiernos nacionales deben tomar medidas y un 39 % creen que deben ser las empresas y la industria.

A continuación, repasaremos someramente algunas de las políticas europeas tal y como se presentan en las distintas páginas web de la Comisión Europea:

- La política de cambio climático ha ido estableciendo objetivos a medio y largo plazo. Para el año 2020 se pretende limitar el incremento de temperaturas a 2 °C comparada con la etapa preindustrial, reducir los gases de efecto invernadero en un 20 % respecto a 1990, incrementar las energías renovables al 20 %, a un 10 % los biocombustibles renovables y la eficiencia energética en un 20 %. Las sucesivas cumbres COP21, 22 y 23 han supuesto mayores compromisos de la Comisión Europea en este ámbito. Para el año 2030 los objetivos para estos mismos ámbitos son el 40, 27 y 27 %, mientras que para el año 2050 se pretende una reducción de los gases del 80-95 %. Para conseguir estos objetivos se imponen exigencias de reducción en los sectores emisores y se promueven tecnologías neutras o negativas en su balance de CO₂.
- En política ambiental los objetivos planteados a nivel europeo son alcanzar una economía más verde, a través del crecimiento verde en un marco de sostenibilidad ambiental, proteger la naturaleza y salvaguardar la salud y la calidad de vida de las personas, con especial atención a la calidad del agua, a la calidad del aire y a los productos químicos de riesgo. En este contexto, el uso sostenible del suelo, el territorio y los ecosistemas se consideran esenciales.
- La política de economía circular también ha sido definida recientemente en un paquete que incluye como objetivos, para el año 2030, el reciclado del 65 % los residuos sólidos urbanos y reducir el enterramiento de residuos hasta un 10 %. El plan de acción reconoce el potencial de la bioeconomía para mejorar el uso de los residuos en las actuales cadenas de valor y para la creación de nuevas e innovadoras cadenas de valor. En enero de 2018, se ha lanzado la Estrategia Europea para los Plásticos, con un objetivo tremendamente ambicioso: el diseño de los plásticos y de los productos que contienen plástico deberá permitir una mayor durabilidad, la reutilización y un reciclado de alta calidad. En el año 2030, todos los envases de plástico comercializados en la UE deberán ser reutilizables o tendrán que poder reciclarse de un modo rentable (COM, 2018).

- La futura PAC también se mueve en la misma dirección. En el mes de noviembre de 2017 se hizo pública una comunicación relacionada con el futuro de la alimentación y la agricultura. Se considera a los agricultores como administradores del entorno natural, cuidando el suelo, el agua, el aire y la biodiversidad, suministradores de alimentos y de otros productos renovables a la vez que retienen carbono en el conjunto del sistema. Entiende que la futura PAC debe liderar la transición hacia una agricultura europea más sostenible. Además de sus objetivos tradicionales, esta política debe aprovechar el potencial de la economía circular y la bioeconomía para apoyar el cuidado del medioambiente y la lucha y adaptación al cambio climático (COM, 2017).
- En cuanto a la política energética y de biocarburantes, inicialmente, en el año 2020 el 10 % de todos los combustibles de cada uno de los países de la UE debía tener su origen en fuentes renovables. Esta política, que ha incentivado la construcción de biorefinerías en toda la UE, ha sido cuestionada porque la mayoría de las plantas comerciales son biorefinerías de primera generación que obtienen los combustibles de almidones, azúcares, grasas o aceites que podrían tener un destino directo para el consumo humano. Por eso, los nuevos objetivos de la UE para el año 2030 han cambiado. En noviembre del año 2017 la Comisión propuso reducir la producción de biocombustibles de primera generación de un 7 % para el año 2021 y un 3,8 % en el año 2030. Los países pueden incluso rebajar estos límites. Por el contrario, deben mantener como obligatoria la incorporación de un 1,5 % de energía sostenible en el transporte en el año 2021, llegando al 6,8 % en el año 2030. Esta cifra puede ser obtenida por biocombustibles o por electricidad renovable. En cualquier caso, los biocombustibles procedentes de biorefinerías de ulterior generación deben pasar, obligatoriamente, del 0,5 % en el año 2021 a 3,6 % en el año 2030.

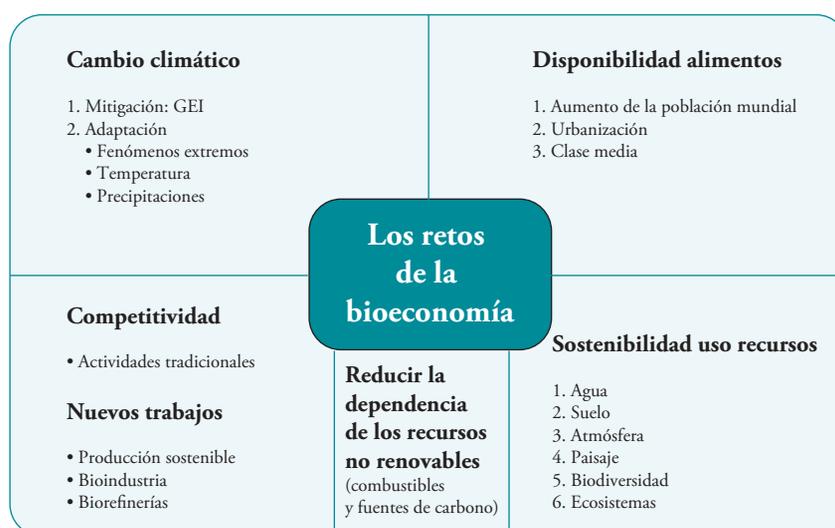
5. La necesidad de desarrollar la bioeconomía

La opinión de los consumidores es cambiante. Las políticas europeas y globales también lo son, aunque a la vista del apartado anterior, el conjunto del sector que trabaja con recursos biológicos va a tener que hacer frente a un conjunto de retos importantes. La bioeconomía, mirada en su conjunto, puede dar respuesta a todos estos retos. En este contexto vamos a analizar los retos a los que la bioeconomía puede y tiene que responder a medio y largo plazo, y que resumimos en la Figura 1. Esto nos va a indicar por qué es imprescindible desarrollar la bioeconomía.

El primer reto al que debe hacer frente es al de la producción de alimentos para una población mundial creciente. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), en sus distintas proyecciones de evolución de la población mundial, ha establecido que, en el año 2050, el mundo contará con 9.100 millones de personas. Los mayores crecimientos de población se esperan en África, Sudeste Asiático y, en menor medida,

en las economías más desarrolladas. Para alimentar esta población harán falta en torno a un 68 % más de alimentos (FAO, 2014). Además de crecimiento poblacional hay que tener en consideración que el crecimiento económico medio, modificará el comportamiento de la demanda de alimentos. Otro elemento esencial será el proceso de aumento de las clases medias, urbanización y consolidación de grandes conglomerados urbanos (Steenwerth *et al.*, 2014).

Figura 1. Los retos de la bioeconomía



Fuente: Estrategia Española de Bioeconomía. Elaboración propia.

En un mundo cada vez más globalizado, la evolución de la demanda mundial condiciona la producción de alimentos, así como el destino de las superficies de cultivo, los sistemas de producción y las tecnologías. Por ello, el primer reto de la bioeconomía va a ser producir más alimentos, pero haciéndolo con menos recursos: la disponibilidad de agua dulce de calidad es limitada y el suelo útil para la agricultura también está limitado a nivel global. No es posible pensar en deforestar o utilizar determinadas áreas húmedas del planeta para producir recursos.

El segundo reto es el de hacer frente al cambio climático. Sus consecuencias, en relación con los recursos de origen biológico son físicas y legales. Las primeras se corresponden con un aumento en la concentración de CO_2 y otros gases en la atmósfera y un cambio en los patrones de temperaturas, que en nuestras latitudes tiende a aumentar, y precipitaciones, cuyas cifras acumuladas se reducen y se concentran en el tiempo. Estas realidades obligan a los sistemas productivos a adaptarse con nuevas variedades, manejo diferente del suelo y del agua, o la vigilancia y control de plagas y enfermedades, entre otras. Por otra parte, las medidas legales vienen dadas por la obligación impuesta por los gobiernos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero: CO_2 , CH_4 , N_2O . Hasta ahora los productores de recursos biológicos, y en especial la agricultura, se consideraban dentro de los sectores difusos: no sometidos a

exigencias concretas e individualizadas para reducir emisiones. Sin embargo, la tendencia es avanzar hacia la responsabilidad individual.

La bioeconomía debe permitir que los sistemas productivos que la integran sigan manteniendo sus niveles de producción en un entorno agroclimático diferente y, a la vez, reduzcan sus emisiones. Esto es posible solo con el desarrollo y puesta en marcha de una tecnología que haga compatibles ambos objetivos.

El tercer reto es el de proteger los recursos naturales. Los sistemas de producción de recursos de origen biológico utilizan como elementos esenciales el suelo y el agua. Además, realizan su actividad en entornos naturales y paisajísticos que las administraciones exigen proteger, para garantizar el mantenimiento de la biodiversidad y los ecosistemas. El nuevo marco en el que nos movemos plantea ir más allá de la protección: exige avanzar hacia la circularidad y el uso integral y sostenible de todos los recursos.

Para superar este reto es imprescindible rediseñar los sistemas productivos y las cadenas de valor, pensando, desde el primer momento, en reducir al máximo los «inputs» utilizados y reconvertir los residuos en subproductos que abran la vía a su utilización integral, sostenible y renovable. De nuevo es necesaria tecnología que pueda lograr este objetivo.

El cuarto reto es garantizar la competitividad del conjunto de las actividades económicas ligadas a los recursos biológicos y generar nuevos puestos de trabajo. En una economía de mercado como la nuestra, y a nivel de país, necesitamos empresas que mantengan su presencia en los mercados, tanto interiores como exteriores, y lo hagan de forma continuada en el tiempo. A la vista de la evolución de la demanda, directa de los consumidores o mediada por las cadenas de distribución, los productores han de orientar su llegada al mercado compitiendo por precio o por diferenciación, que en el caso de la bioeconomía en general, y los alimentos en particular, deberán tener en consideración alegaciones nutricionales y de salud, así como garantías de sostenibilidad ambiental. Para hacer frente a este reto volvemos a necesitar de la tecnología que haga avanzar los sistemas productivos hacia la preservación de los recursos y hacia la eficiencia en el uso de todos los recursos.

El último reto es facilitar la transición de una economía basada en el uso de recursos fósiles a otra basada en la utilización de recursos renovables. La utilización de derivados del petróleo en todas las actividades económicas comporta una importante huella ambiental, en términos de CO₂. Los recursos de origen biológico pueden ser la base para elaborar cualquiera de los derivados del petróleo (Aeschelman *et al.*, 2014). En la actualidad los derivados del petróleo son más competitivos, por costes de producción. No obstante, el desarrollo de tecnologías, la diferenciación en el mercado, o la entrada en vigor de normas legales, puede hacer que determinados bioproductos, biocombustibles o bioenergía, puedan competir con los derivados de los recursos fósiles.

La OCDE (2009 y 2016) ha apoyado en numerosas ocasiones el potencial de la bioeconomía para resolver todos estos retos y, a la vez, desarrollar nuevas actividades económicas en los países que la impulsen. Para ello es imprescindible potenciar las cadenas de valor tradicionales

basadas en la utilización de recursos biológicos, siendo la más importante la cadena agroalimentaria seguida de la de los productos forestales. A continuación, deben generarse nuevas cadenas de valor, llevando al mercado productos en el ámbito de la nutrición y la farmacia, o en el de los bioproductos para el ámbito de los bioplásticos, biocomposites, cosméticos, biocombustibles o bioenergía. El desarrollo de todas estas áreas requiere aplicar un conjunto de principios esenciales al desarrollo de la bioeconomía (SCAR, 2016):

- Dar prioridad a la utilización de los recursos biológicos para la producción de alimentos, garantizando la disponibilidad de estos recursos a nivel mundial para consumo humano.
- Incluir la sostenibilidad en el desarrollo de la bioeconomía, de manera que la cantidad recolectada o extraída, en cualquier sistema o ámbito, nunca puede ser superior a la capacidad de regeneración. Se puede aplicar igualmente a la utilización de los «inputs».
- Utilización en cascada, garantizando que la biomasa se utiliza para obtener el producto con mayor valor añadido, persiguiendo la utilización integral.
- Circularidad, diseñando los procesos productivos para minimizar la producción de residuos y maximizar la reutilización y el reciclado.
- Diversificación en la utilización de los recursos y las actividades que la acompañan.

En definitiva, la bioeconomía aborda una visión global del proceso de utilización de los recursos biológicos. Engloba muchos sectores económicos y se va a desarrollar a través de todos y cada uno de ellos. La aproximación global es perfecta, y necesariamente, compatible con la necesidad de desplegar cada una de las cadenas de valor que la integran.

Una de las críticas frecuentes a la bioeconomía es la posibilidad de destinar suelos agrícolas para la producción de biomasa que pueda ser utilizada para obtención de bioproductos o biocombustibles. En nuestro país, en las condiciones actuales no parece una alternativa factible. La producción de biomasa requiere de dos elementos esenciales: temperatura y agua. En nuestras condiciones agroclimáticas cuando se cuenta con los dos recursos, además de terreno agrícola, la alternativa más rentable es la producción de frutas y hortalizas.

Mientras tanto, las cadenas de valor agroalimentaria y forestal de nuestro país producen una cantidad importante de residuos y subproductos, tanto en los eslabones iniciales de dicha cadena, en la producción agrícola y ganadera, como en el resto, en las fases de conservación, transformación y distribución agroalimentaria. Lo mismo sucede en la fase de consumo y, después en la de recogida de residuos. En la Tabla 2 se presenta un resumen de los datos recopilados en dos trabajos de estrategia sectorial (Plan de Energías Renovables 2011-2020) y de investigación (PROBIOGAS, 2010). Considerando ambos trabajos, podemos estimar en 159 millones de toneladas/año la biomasa producida, incluyendo la derivada de los cultivos

agrícolas, la actividad forestal, la industria alimentaria o la industria de la madera, del papel y del textil, los residuos animales y la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos.

Una parte de estos residuos y subproductos podrían, y deberían, ser objeto de utilización directa para el consumo humano. El Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA), en su página web diferencia entre las pérdidas de alimentos, causadas esencialmente por un funcionamiento ineficiente de las cadenas de suministro (debidas, por ejemplo, a insuficiencias en infraestructuras y logística), a la carencia de tecnología, a la falta de destrezas, conocimiento y capacidades de gestión; y al desperdicio de alimentos relacionado esencialmente con malos hábitos de compra y consumo, así como por una inadecuada gestión y manipulación de los alimentos. El desperdicio de alimentos normalmente se puede evitar. De acuerdo con esta misma fuente, en el ámbito de la UE se desperdician 179 kilos de alimentos por habitante y año, sin considerar los de origen agrícola. Entre un 30 % y un 50 % de los alimentos sanos y comestibles a lo largo de todos los eslabones de la cadena agroalimentaria hasta llegar al consumidor que podrían ser aprovechables se convierten en residuos. En el caso de España, se estima que desperdiciamos 7,7 millones de toneladas.

Tabla 2. Residuos y subproductos orgánicos disponibles como biomasa en España

Biomasa	Millones de toneladas/año
• Residuos forestales	18
• Residuos de cultivos	30
• <i>Paja, tallos, hojas, ensilados y similares</i>	
• <i>Residuos de poda</i>	
• Residuos agroalimentarios	31
• <i>Productos no comestibles: pieles, cáscaras, pulpas y pescados</i>	
• <i>Productos que no llegan al mercado</i>	
• <i>Residuos de producción de alimentos y bebidas: vino, cerveza, queso, grasas, aceites decomisos</i>	
• Residuos de madera, pulpa de papel, textiles, etc.	
• Residuos animales (estiércol y purines, camas animales y gallinazas)	6
• Residuos animales (estiércol y purines, camas animales y gallinazas)	48
• RSU (orgánicos) y lodos de depuradoras	26
Total	159

Fuente: PER 2020 (2011) y Probiogas (2011). Elaboración propia.

Considerando todo lo anterior resulta que, descontando el desperdicio, en España disponemos de algo más de 150 millones de toneladas de productos orgánicos que pueden tener diferentes usos: fertilizantes o materia orgánica para enmienda de suelos, entre otros. Pero, en ocasiones, su destino como residuos es el enterramiento e incluso la incineración. En este momento su gestión representa un coste de producción para las empresas que los generan, cualquiera que sea la fase de la cadena de valor agroalimentaria o forestal. Su valorización y

transformación en productos comercializables tiene un doble interés: dejar de ser un coste de producción y contribuir a reducir la huella ambiental, tanto en términos de CO₂ como de agua.

La bioeconomía genera otra oportunidad muy importante para el conjunto de nuestro medio rural y costero. Todas las actividades que hemos descrito en este apartado se desarrollan en el territorio en el que se produce, se extrae o se transforma la materia orgánica: las explotaciones agrícolas, ganaderas y forestales, las empresas agroalimentarias, los entornos costeros y los centros de gestión de residuos. Es una actividad difícilmente deslocalizable, por el coste asociado que lleva el transporte de las materias primas. Por tanto, las actividades económicas asociadas a la bioeconomía son impulsoras del desarrollo en el medio rural y en la interacción entre las áreas rurales y las urbanas. En paralelo surgirán empresas proveedoras de nuevos servicios para estas nuevas actividades, tanto en el ámbito de la producción y comercialización como en el de la garantía de la sostenibilidad.

En última instancia, también se considera como bioeconomía toda la actividad relacionada con el uso de los entornos, paisajes, ecosistemas y sistemas productivos que la propia actividad trata de proteger y estimular. Por ello, el turismo rural asociado también se ha de integrar como un bien o un servicio más a considerar.

6. Las tecnologías asociadas a la bioeconomía

En la cadena de valor agroalimentaria la bioeconomía se va a traducir en una mejora de la eficiencia en los procesos productivos, organizativos y logísticos. La incorporación de nuevas tecnologías, ligadas al desarrollo de diversas áreas del conocimiento, va a permitir compatibilizar productividad y sostenibilidad. En este contexto identificamos tres grandes grupos de ámbitos científicos y tecnológicos:

- La biología y la biotecnología. El conocimiento en estos campos va a impulsar el desarrollo de nuevos materiales vegetales y animales. Combinando las herramientas clásicas de mejora con otras nuevas, como la secuenciación de genomas completos, la bioinformática, la biotecnología o la edición de genes, se van a lograr superar limitaciones ligadas a la eficiencia en el uso de agua u otros inputs. También se va a poder mejorar la resistencia a plagas y enfermedades que, asociadas a prácticas de control integrado, bioseguridad y vacunaciones, van a permitir reducir la utilización de productos fitosanitarios y zoonosanitarios.

En este campo es previsible un desarrollo importante en el estudio de la microbiota del suelo o del aparato digestivo de los animales. El conocimiento de la diversidad y actividad de los sistemas microbianos de estos entornos repercutirá en la eficiencia de la utilización de los fertilizantes, el agua, los nutrientes e ingredientes del pienso, o en la mejora de la respuesta del sistema inmune de las plantas o de los animales.

Estas mismas tecnologías, así como la nanotecnología, van a ser aplicadas también en todo el proceso de transformación agroalimentaria, con la finalidad de obtener alimentos más sanos y seguros.

- El desarrollo de la agricultura, la ganadería o la industria de precisión será otro elemento esencial en los próximos años. Son evidentes las ventajas de aplicar los *inputs* en el momento preciso, para conseguir la máxima eficacia, y en la cantidad estrictamente necesaria. El resultado son procesos productivos eficientes en el uso de todo tipo de recursos, y sostenibles, al evitar la pérdida de cantidades que van al medio. La mecanización, la automatización y la robótica permitirán ajustar las dosis de *inputs*, además de mejorar la productividad y la seguridad en el trabajo. Pensemos en algo que es hoy ya una realidad: evitar la deriva en la utilización de productos fitosanitarios o reducir drásticamente el empleo de antimicrobianos. Todo esto ya es posible, y va a seguir teniendo cada vez más presencia en este sector.
- Las herramientas de apoyo a la toma de decisión en el conjunto del sistema agroalimentario, en lo que podríamos llamar revolución de la industria 4.0 en este sector, es otra de las vías de mejora tecnológica. Consiste en el desarrollo de sistemas basados en los datos, con dos aproximaciones:
 - La captura de datos internos de las explotaciones e industrias, a partir de sensores colocados en el suelo, las plantas, los animales, la cadena de producción, las mezclas de producto o las imágenes captadas con cámaras en puntos fijos, colocadas en drones o en vehículos autónomos, que van a informar en continuo de la realidad de los puntos productivos. Estos datos también pueden ser externos a la actividad incluyendo fichas climáticas, imágenes satelitales, información de oferta, de demanda o de precios en diferentes mercados que afectan a una cadena de valor.
 - El estudio de toda esa información mediante tecnologías de análisis de datos, sean o no *big data*, que nos van a permitir avanzar, mediante el uso de algoritmos, desde la descripción de lo que está pasando en los negocios agroalimentarios (analítica descriptiva) a la fase de estimar lo que puede ocurrir con los cultivos, animales o productos transformados en el futuro (analítica predictiva), hasta la recomendación de que se debe hacer ahora para conseguir el mejor resultado en el futuro (analítica prescriptiva).

La bioeconomía, en el sistema agroalimentario, tal y como la hemos descrito, y con las tecnologías y herramientas de gestión consideradas, es aplicable a todos los alimentos que se llevan al mercado, con independencia de los valores añadidos con los que se oferte al consumidor final: sirve a la agricultura convencional y a la agricultura orgánica, a la agricultura periurbana y a la especializada, a los canales de distribución mayoritarios o a los canales cortos.

Sin ninguna duda, la combinación de estas tres áreas de conocimiento e innovación van a permitir, igualmente, el desarrollo del sector forestal. Quizá habría que insistir en un ámbito que en ocasiones se cuestiona: la necesidad de realizar un manejo productivo de los recursos forestales. La experiencia demuestra que allí donde se hace gestión forestal, con criterios de sostenibilidad, se incrementa la biomasa, y por tanto el secuestro de carbono, se garantiza una actividad económica y la preservación de las masas forestales. Tal y como se señala desde la iniciativa «Juntos por los bosques», la madera y el corcho constituyen los materiales más ampliamente disponibles para la transición hacia la bioeconomía, capaces de sustituir en la construcción, la industria química o energética, las materias primas no renovables. El uso de la biomasa de origen forestal es una oportunidad única para la reducción del riesgo de incendios, la creación de empleo, la mitigación del cambio climático y la reducción de la dependencia energética exterior (Juntos por los bosques, 2017).

La utilización del medio marino se ha centrado, hasta casi nuestros días, en la industria de la pesca extractiva. En las últimas décadas se ha desarrollado la acuicultura, y en los últimos años la extracción de algas con diferentes finalidades (obtención de principios activos, alimentación animal o alimentación humana). Sin embargo, para un país como España que cuenta con casi 6.000 km de costas, las posibilidades de generación de actividad económica en este medio son mucho más elevadas, siendo este otro de los objetivos de la bioeconomía.

Tal y como ha recogido la Comisión Europea en su iniciativa de «Crecimiento Azul» (Bluegrowth, 2016), se trata de desarrollar una estrategia de política marítima integrada para un crecimiento inteligente, sostenible e integrador, basado en el conocimiento, la ordenación y la vigilancia. Están pendientes de desarrollar, utilizando entre otras los tres grandes grupos de tecnologías descritas en los párrafos anteriores, además de la acuicultura, el turismo costero, la biotecnología marina (entendida como la exploración y explotación de los organismos marinos con objeto de crear nuevos productos), la energía oceánica (para explotar el potencial de las mareas y las olas y las diferencias de temperatura y de salinidad) o la explotación minera de los fondos marinos (para garantizar el abastecimiento, especialmente cuando el reciclaje y la reutilización no sean suficientes).

En el ámbito de la industria química, asistiremos a un aumento en el empleo de recursos renovables, no competitivos con la alimentación humana, teniendo también en cuenta los residuos o subproductos o la biomasa algal, como materia prima de esta actividad. Como señala la OCDE (2016), en un futuro, cuando los recursos fósiles jueguen un papel menor en el suministro de energía y productos químicos, la única fuente renovable de carbono en cantidades abundantes será la biomasa. Entonces, la transformación de biomasa en productos, energía o combustibles, en biorrefinerías, ofrecerá una posibilidad de producción sostenible. Mientras tanto, hoy hay varios modelos de biorrefinerías cuya viabilidad debe ser analizada. Considerando el previsible beneficio ambiental y el riesgo asociado a la inversión se concluye que es necesario un apoyo público.

En este momento la mayor parte de estas biorrefinerías utilizan tecnologías que combinan el sometimiento de la biomasa a elevadas presiones, junto con la utilización de enzimas y fer-

mentación con cultivos microbianos para degradar los distintos componentes de estos recursos (ligninas, hemicelulosas, celulosas y proteínas) hasta convertirlos compuestos básicos (ácidos grasos de cadena corta). Otra vía de aproximación al uso de estas tecnologías son los procesos termoquímicos, en los que se combinan temperatura y catalizadores diversos, biológicos o no, para potenciar las reacciones químicas. Destaca en este ámbito la hidrólisis enzimática.

Tratando de sistematizar todas las rutas de conversión de la biomasa, y su futuro, recogemos la opinión de Paredes (2015), que agrupa las tecnologías en biológicas (digestión anaerobia, fermentación, hidrólisis enzimática), mecánicas (densificación, extracción, prensado), químicas (transesterificación) y termoquímicas (carbonización, combustión, gasificación, pirólisis). Señala, asimismo, que los principales caminos tecnológicos para la investigación en materia de biomasa incluyen combustión, gasificación, cogeneración, pirólisis, transesterificación, fermentación-hidrólisis y digestión anaerobia.

Al final, a partir de esos productos básicos, y por distintas rutas, se pueden conseguir numerosos bioderivados como carburantes, plásticos, fibras, detergentes, pinturas, cosméticos, aceites, lubricantes, materiales de construcción, así como productos químicos básicos que puedan ser ingredientes o compuestos activos, como enzimas o microorganismos, para la industria farmacéutica, la industria alimentaria o la alimentación animal. Y, por supuesto, biocarburantes y electricidad.

El mismo autor analiza la posibilidad de generar electricidad a partir de la biomasa e indica que las tecnologías más habituales, y en continuo desarrollo, son la combustión directa, co-combustión y cogeneración. No obstante, la producción directa de electricidad a partir de biomasa está supeditada a la existencia de un suministro estable y al mantenimiento de un régimen tarifario de venta determinado. En ese contexto tecnologías como la cogeneración o la co-combustión se presentan como prometedoras.

Es imprescindible hacer una mención expresa a la tecnología muy desarrollada en otros países europeos, y muy poco en España, para la gestión de residuos agrarios e incluso transformación de cultivos energéticos: digestión anaerobia para la obtención de un gas rico en metano (biogás).

7. Elementos esenciales para el desarrollo de la bioeconomía

La bioeconomía que ya existe en nuestro país debe seguir evolucionando y desarrollándose, especialmente en los ámbitos y con las perspectivas que, de acuerdo con los escenarios más factibles analizados, nuestra sociedad va a requerir. Parece evidente que para hacer realidad la bioeconomía del futuro vamos a precisar de tres ingredientes fundamentales, que son sus elementos esenciales: tecnología, demanda, y empresas innovadoras.

Las tecnologías que hemos mencionado en los apartados anteriores son imprescindibles para conseguir la sostenibilidad y la eficiencia en las cadenas de valor tradicionales y para

hacer, primero posible y después viable, la creación y consolidación de otras nuevas cadenas de valor. La actualización de las tecnologías tradicionales, y la puesta a punto de otras nuevas, requiere, como condición «sine qua non» que haya generación del conocimiento, tanto básico como orientado.

Hemos mencionado muchas áreas del conocimiento conectadas con la bioeconomía. Por hacer referencia a alguna de ellas podemos mencionar la biología fundamental, la genómica, la biotecnología, la ecología, la física, la química física, la nanotecnología, las tecnologías de transformación, bioquímica o termoquímica, la física, la química, la automatización, la robótica, así como las tecnologías de la información y la comunicación. Todo ello además de las ciencias sociales asociadas a la economía, la sociología y la organización. En definitiva, el desarrollo de la bioeconomía está ligado, necesariamente, a la generación del conocimiento en muchos ámbitos de la ciencia. Por ello es necesario invertir en investigación, tanto de vanguardia como orientada a los retos que, progresivamente, vayan surgiendo en nuestra sociedad.

La demanda de productos de la bioeconomía está asegurada en el caso de los alimentos y, parcialmente, en los biocombustibles e incluso en los bioplásticos. Sin embargo, en los productos más novedosos necesitamos una respuesta positiva por parte de los consumidores. Deben estar dispuestos a comprarlos y a pagar su coste, si este fuese más elevado que otros productos similares procedentes de procesos productivos tradicionales menos sostenibles. Esto requiere la aceptación por nuestra sociedad de las tecnologías y los procesos necesarios para obtenerlos y ponerlos en el mercado y, en su caso, el reconocimiento de los valores añadidos que comportan.

Llegados a este punto, la opinión de la sociedad es clave. Primero, debemos comprender lo que es la bioeconomía y sus objetivos en términos económicos, sociales y ambientales. Asumido ese reconocimiento, la sociedad, y especialmente los consumidores, necesitan tomar decisiones de compra incorporando los valores añadidos asociados a los productos que tienen su origen en estas actividades. Además, las tecnologías necesarias para aplicar el conocimiento a la solución de problemas concretos deben ser aceptadas. La sociedad debe conocer que es necesario utilizarlas, con todas las precauciones necesarias, para hacer realidad la bioeconomía.

Veamos dos ejemplos: en la actualidad es posible producir PEF (polietilen furanoato), un polímero de base biológica que puede ser utilizado en la elaboración de botellas de bioplástico, envases alimentarios, calzado o ropa deportiva. Su obtención se ha basado tradicionalmente en una ruta que requiere un catalizador con dificultades de manejo por su actividad corrosiva entre otras. Recientemente, se ha descubierto un nuevo catalizador cuya base es el platino (Motagamwala, 2018). Las dos opciones tienen un coste asociado a la producción, que debe ser asumido. El otro ejemplo afecta a los procesos de fermentaciones para obtener los ácidos grasos de cadena corta, a partir de residuos sólidos urbanos fermentables. En determinados casos, su eficiencia puede mejorar sensiblemente incorporando modificaciones puntuales en los genes de los microorganismos que intervienen en la digestión de la biomasa. Las herramientas para hacerlo pueden ser la edición o de la incorporación de genes. Esto implica asumir la necesidad de utilizar estas nuevas biotecnologías.

El último componente de la bioeconomía son las empresas capaces de interpretar la demanda actual y potencial de estos nuevos productos y de integrar en un proceso productivo unas tecnologías en proceso de desarrollo, obteniendo un beneficio económico de su actividad. En resumen, empresas innovadoras, que precisan de esas tecnologías disruptivas o, al menos, diferentes a las convencionales presentes en el mercado. La fuente del conocimiento para estas actividades está en los centros y en los consorcios de investigación, en los que se vislumbran nueva información o procesos que pueden resolver limitaciones o hacer más eficientes las transformaciones anteriores. Estas empresas deben estar en una relación estrecha con los proyectos de investigación, con las plataformas tecnológicas y con los lugares en los que se presentan resultados científicos; deben participar en proyectos destinados a incorporar el conocimiento. En definitiva, deben mantener una colaboración estrecha con la investigación, como única vía posible para innovar de forma pionera en estos campos.

8. La Estrategia Española de Bioeconomía

En el año 2014 se inició el proceso de elaboración de la Estrategia Española de Bioeconomía. En dicho documento se recoge la definición de bioeconomía, expuesta en la introducción de este artículo.

Los elementos esenciales de la estrategia son la utilización de recursos renovables, con el objetivo fundamental de satisfacer las necesidades de alimentación de una población creciente, a nivel mundial, en el contexto del cambio climático y de la necesidad de aplicar criterios de eficiencia y sostenibilidad. También recoge, como principio esencial, trabajar sobre la base de interacción y colaboración entre la ciencia, la economía y la sociedad.

Las líneas estratégicas del documento van dirigidas a promover el desarrollo de la bioeconomía a través de las siguientes vías:

- La investigación pública y privada y la inversión de las empresas en innovación en el área de la bioeconomía.
- El refuerzo del entorno social, político y administrativo de la bioeconomía.
- La mejora de competitividad y el desarrollo del mercado de la bioeconomía.
- El desarrollo de la demanda de nuevos productos.
- El apoyo a la expansión de la bioeconomía.

La estrategia se impulsa a través de planes de acción anuales centrados en desarrollar actividades en los cinco ámbitos mencionados. El impulsor de dicho plan es el Observatorio de la Estrategia Española de Bioeconomía.

En este periodo inicial de puesta en marcha de la estrategia se ha trabajado en diferentes ámbitos. Los más significativos han sido:

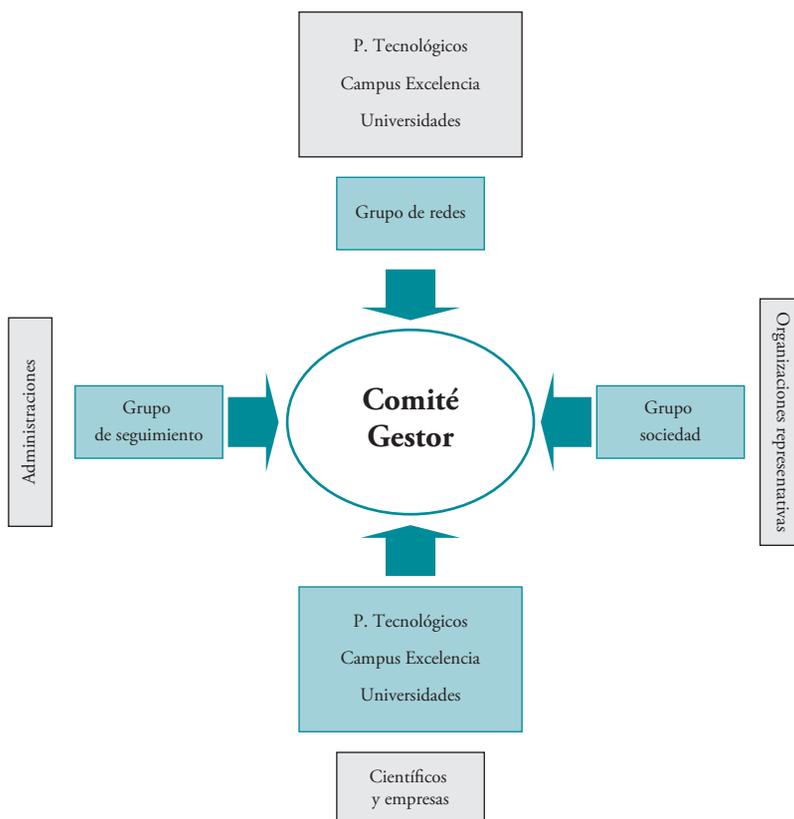
- Mantener la bioeconomía dentro de los retos del Plan estatal de I+D+i, especialmente en su revisión 2017-2020. El documento final del Plan se aborda la bioeconomía de forma global, integrando todos los retos económicos y sociales asociados al sector agroalimentario, marino y marítimo y de los bioproductos, y estableciendo claramente que es una herramienta para avanzar hacia la economía circular. En este contexto, la Unión Europea avanza en la misma dirección, en investigación y en innovación, tanto en su paquete de trabajo dentro de H2020 como en las ideas que surgen para el 9.º Programa Marco de Investigación.
- Se ha realizado, con el apoyo de la Federación Española de Ciencia y Tecnología (FECYT), un análisis de la percepción social de la bioeconomía en España. Las conclusiones son variadas, destacando entre ellas el escaso conocimiento de lo que hay detrás de la bioeconomía, el interés que despierta para los sectores vinculados a la producción de recursos biológicos, las dudas que su puesta en marcha provoca en determinados colectivos implicados activamente en la defensa del entorno, y la necesidad de mejorar la información y la comunicación respecto a este tema, reconociendo el papel de las administraciones relacionadas con la ciencia, la tecnología y la agricultura y alimentación para liderar el proceso.
- Varias comunidades autónomas han iniciado el trabajo para desarrollar sus propias iniciativas en el área de la bioeconomía: Andalucía, Aragón, Asturias, Castilla y León, Extremadura, Región de Murcia y Comunidad Valenciana están trabajando en sus propias estrategias.
- Tanto la administración central como las comunidades autónomas que están trabajando en este ámbito se han organizado sesiones de formación para dar a conocer lo que hay detrás de la bioeconomía y las posibilidades de financiación de sus actividades.
- La bioeconomía española está integrada en las iniciativas europeas e internacionales. Por ejemplo, en el Panel de la Bioeconomía de la UE, hay cuatro españoles que garantizan la visión española.

9. El Observatorio Español de Bioeconomía

Un elemento esencial de dinamización de la bioeconomía en España es el Observatorio Español de Bioeconomía, constituido formalmente a mediados del año 2017. Es un instrumento de apoyo y cooperación para el desarrollo de la Estrategia Española de Bioeconomía y está integrado por treinta y ocho miembros pertenecientes a diferentes administraciones, central, regional y local, a áreas de investigación y empresas pertenecientes en la estructura

de la bioeconomía, a campus universitarios y plataformas tecnológicas relacionadas con esas mismas áreas y a organizaciones sociales que incluyen representantes sectoriales, sindicatos, ONG o entidades de crédito. Su estructura se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Estructura y organización del Observatorio Español de la Bioeconomía



Fuente: Estrategia Española de Bioeconomía. Elaboración propia.

10. Consideraciones finales

Las estrategias políticas que, en materia agroalimentaria, energética, ambiental y climática, han sido lanzadas para discusión, y en algunos casos acordadas, en el marco de la UE llevan a los sectores económicos relacionados con la utilización y gestión de los recursos biológicos a modificar las condiciones de producción, manejo y utilización de las materias primas y de su relación con el entorno. Por otra parte, la sociedad europea, y por tanto también las políticas, exige garantizar un uso adecuado del conjunto del capital natural del que disponemos. Y todo ello hay que hacerlo en un contexto de globalización de nuestras actividades económicas y de la opinión de la sociedad.

La bioeconomía agrupa a todas las actividades relacionadas con el uso de los recursos biológicos, aportando una visión global e integrada de su utilización, en la que la generación del conocimiento y su aplicación por las empresas, teniendo en consideración la opinión de la sociedad, nos llevarán a responder a las políticas y a los retos sociales con herramientas que garanticen la utilización sostenible y eficiente de aquellos.

La bioeconomía se va a desarrollar con mayor o menos rapidez en todo el mundo. Consideramos que, en un país como España, en la que las actividades ligadas a los recursos biológicos representan el 6,5 del PIB y el 9 % de la población activa, debemos ser pioneros en su impulso y desarrollo.

Referencias bibliográficas

- AESCHELMAN, F. y CARUS, M. (2015): «Bio-based Building Blocks and Polymers in the World»; *Capacities, Production and Applications: Status Quo and Trends towards 2020*. Nova Institut. Disponible en <http://nova-institute.eu/>. Acceso 15 enero 2018.
- BKC (2017): «Bioeconomy Knowledge Centre»; <https://biobs.jrc.ec.europa.eu/> (acceso diciembre 2017-enero 2018).
- COM (2017): «Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, The European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. The Future of Food and Farming»; https://ec.europa.eu/agriculture/sites/agriculture/files/future-of-cap/future_of_food_and_farming_communication_en.pdf (acceso 22.01.2018).
- COM (2018): «Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, The European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Una estrategia europea para el plástico en una economía circular»; <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52018DC0028> (acceso 22.01.2018).
- EC: «Bioeconomy Knowledge Center»; <https://biobs.jrc.ec.europa.eu/topic/biomass> (acceso 20.01.2018).
- ESTRATEGIA ESPAÑOLA DE BIOECONOMÍA: Ministerio de Economía y Competitividad; <http://agripa.org/>.
- EU SCAR FORESIGHT (2015): «Sustainable Agriculture, Forestry and Fisheries in the Bioeconomy: A Challenge for Europe»; <https://scar-europe.org/> (acceso 10.12.2017).
- HUBERT, R.; ROSEGRANT, M.; VAN BOEKEL, M. y ORTIZ, R. (2010): «The Future of Food: Scenarios for 2050»; en *Crop Science* (50); pp. S33-S50.
- JUNTOS POR LOS BOSQUES (2017): <http://juntosporlosbosques.ingenierosdemontes.org/> (acceso 15.01.2018).

- LAINEZ, M.; GONZÁLEZ, J. M.; AGUILAR, A. y VELA, C. (2018): «Spanish strategy on bioeconomy: Towards a knowledge based sustainable innovation»; en *N Biotechnol.* 25(40[Pt A]); pp. 87-95.
- MOTAGAMWALA, A.; WANGYUN, W.; SENER, C.; MARIN ALONSO, D.; MARAVELIAS, C. y DUMESIC, J. A. (2018): «Toward biomass-derived renewable plastics: Production of 2,5-furandicarboxylic acid from fructose»; *Science Advances* 4(1); eaap9722.
- OECD (2010): «The Bioeconomy to 2030: Designing a Policy Agenda»; *OECD International Futures Project*. Francia, París, OECD.
- OCDE. Growing a sustainable Bioeconomy Bio-production for the biennium 2015-2016. DSTI/STP/BNCT(2016)1 (<http://www.oecd.org/>) (acceso 10.01.2018).
- PAREDES, J. P. (2015): «Investigación en materia de bioenergía para la industria energética»; en *Opción* (31, 4); pp. 709-716.
- PLAN DE ENERGÍAS RENOVABLES (2011-2020): <http://www.idae.es/file/9712/download?token=6MoeBdCb> (acceso 14.01.2015).
- PROBIOGAS (2010): «Cuantificación de materias primas para producción de biogás. Desarrollo de sistemas sostenibles de producción y uso de biogás agroindustrial en España»; *Proyecto Singular y Estratégico*. Disponible en <http://www.probiogas.es/> (acceso 08.09.15).
- RONZON, T.; LUSSEY, M.; KLINKENBERG, M.; LANDA, L.; SÁNCHEZ LÓPEZ, J.; M'BAREK, R.; HADJAMU, G.; BELWARD, A.; CAMIA, A.; GIUNTOLI, J.; CRISTOBAL, J.; PARISI, C.; FERRARI, E.; MARELLI, L.; TORRES DE MATOS, C.; GÓMEZ BARBERO, M. y RODRÍGUEZ CEREZO, E. (2017): «Bioeconomy Report 2016»; *JRC Scientific and Policy Report*. EUR 28468 EN.
- TILMAN, D.; BALZER, C.; HILL, J. y BEFORT, B. (2011): «Global food demand and the sustainable intensification of agriculture»; en *PNAS* 108(50); pp. 20260-20264.
- TILLMAN, D. y CLARK, M. (2014): «Global diets link environmental sustainability and human health»; en *Nature* (515); pp. 518-522.
- VALIN, H.; SANDS, R. D.; VAN DER MENSBRUGGHE, D.; NELSON, G.; AHAMMAD, H. *et al.* (2014): «The future of food demand: understanding differences in global economic models»; en *Agricultural Economics* (45, 2014); pp. 51-67.
- VAN LOO, E. J.; HOEFKENS, C. y VERBEKE, W. (2017): «Healthy, sustainable and plant-based eating: Perceived (mis)match and involvement-based consumer segments as targets for future policy»; en *Food Policy* (69); pp. 46-57.



OPORTUNIDADES DE LA BIOECONOMÍA EN ANDALUCÍA

ESTRATEGIA ANDALUZA DE BIOECONOMÍA CIRCULAR

Ricardo Domínguez García-Baquero^a, Judit Anda Ugarte^a, Carmen Capote Martín^a,
Teresa Parra Heras^a, Alejandro Sanz Pagés^a y María del Sol Cuenca Martín^b

^aConsejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural y ^bTragsatec Andalucía

Resumen

La bioeconomía supone un nuevo modelo productivo que permite dar respuesta a los retos sociales y económicos siendo una pieza angular en la consecución de un crecimiento inteligente, sostenible e integrador para Europa. Por ello, la Unión Europea, muchos de sus Estados Miembros y sus regiones han desarrollado estrategias para el impulso de este movimiento económico de vital importancia. La bioeconomía se erige actualmente como un modelo necesario, en el que los sistemas productivos se combinan con la innovación y el conocimiento para dar lugar a una amplia gama de procesos, productos e industrias que tienen la vocación de ser el motor de las regiones.

Por su parte, la Junta de Andalucía adoptó la decisión en julio de 2016 de formular una Estrategia Andaluza de Bioeconomía que permita contribuir al crecimiento sostenible y la competitividad de la región. En lo referente a esta estrategia, se centra en el desarrollo del conjunto de actividades que conforman los tres segmentos básicos de las cadenas de valor de los bioproductos, específicamente, la producción de biomasa, su procesado tecnológico y los mercados de consumo, con la necesidad esencial de construir una estrategia que involucre a todos los actores de la cuádruple hélice: los centros de conocimiento, las administraciones, las empresas y la ciudadanía).

Mediante esta estrategia, la visión de Andalucía se sitúa frente a la construcción de una región diversificada y sostenible en la que la bioeconomía supone un vector de desarrollo alineado con el bienestar humano, la equidad social, la adaptación al cambio climático y una menor dependencia de recursos externos.

Abstract

The bioeconomy represents a new productive model that allows us to respond to social and economic challenges and it is an essential element in the achievement of smart, sustainable, and inclusive growth in Europe. For this reason, the European Union, many Member States, and regions have developed strategies for boosting this vitally important economic movement. The bioeconomy is currently held up as a necessary model, where productive systems are combined with innovation and knowledge to originate a wide range of processes, products, and industries that can become the driving force in regions.

For its part, in July 2016, the Regional Government of Andalusia decided to draw up the Andalusian Circular Bioeconomy Strategy to contribute to the sustainable growth and competitiveness of the region. This Andalusian Circular Bioeconomy Strategy focuses on developing the set of activities that constitute the three basic segments in bioproduct value chains, specifically, the production of biomass, its technological processing, and consumer markets, as well as the essential need to construct a strategy involving all the actors of the quadruple helix.

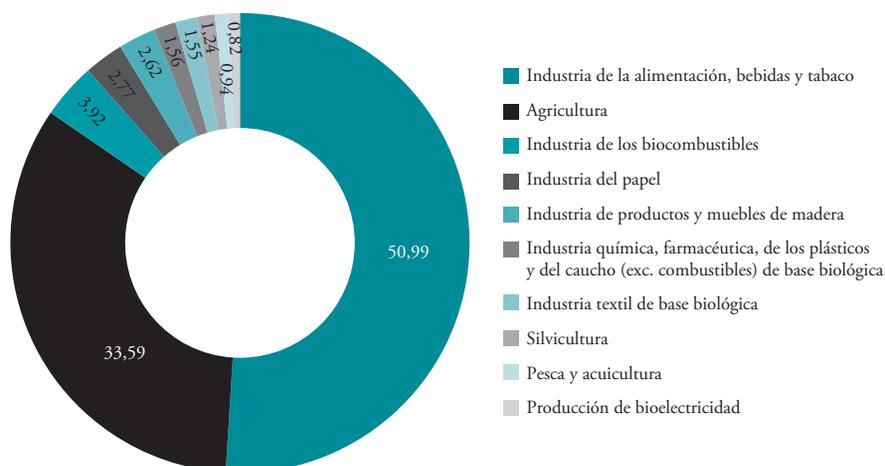
Through this strategy, Andalusia focus on building a diverse and sustainable region where the bioeconomy supposes a development vector aligned with human well-being, social equity, adaptation to climate change, and a reduced dependence on external resources.

1. El concepto de la bioeconomía

En la Estrategia Andaluza de Bioeconomía Circular comprendemos la bioeconomía como el modelo económico basado en la producción y el uso de recursos biológicos renovables y su transformación sostenible y eficiente en productos biológicos, bioenergía y servicios para la sociedad (Gráfico 1). En esencia, esta definición se encuentra alineada con la aportada por la

Estrategia Europea que engloba los sectores de la agricultura, la silvicultura, la pesca, la producción de alimentos y del papel y la pasta de papel a parte de las industrias química, biotecnológica y energética¹. Además, la bioeconomía nace con un carácter multidisciplinar englobando conocimientos de las ciencias de la vida, la ecología, las ciencias sociales, la biotecnología, la nanotecnología, la agronomía, la ciencia de los alimentos la ingeniería y las tecnologías de la información y la comunicación.

Gráfico 1. Volumen de negocio por áreas de actividad en Andalucía



Fuente: datos suministrados por el Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía e incluidos en la Estrategia Andaluza de Bioeconomía Circular. Elaboración propia.

Actualmente, la importancia de la bioeconomía en Europa se dimensiona en base a dos indicadores; el número de puestos de trabajo de los sectores de la bioeconomía y la facturación². Según el informe del Centro Común de Investigación (CCI), la bioeconomía dio empleo a 18,6 millones de personas en la UE 28, lo que representó el 8,5 % de la mano de obra total de la UE en 2014. En términos de facturación, la bioeconomía en la UE-28 generó aproximadamente 2,2 billones de euros. A escala regional, la bioeconomía alcanzó una facturación de aproximadamente 28.000 millones de euros, generando empleo para más de 290.000 personas (Tabla 1).

Su importancia no solo radica en términos cuantitativos, también es necesario señalar que la bioeconomía tiene el potencial de afianzar el vínculo entre la población y su entorno, este hecho es fundamental en Andalucía. El 37 % de la población andaluza vive en el medio rural que ocupa el 90 % del territorio regional. Por ello, Andalucía presenta un medio rural vivo y con grandes posibilidades de desarrollo acompañado de un potente sector primario generador de recursos biológicos con aplicaciones en bioeconomía.

¹ ESTRATEGIA EUROPEA DE BIOECONOMÍA (2012).

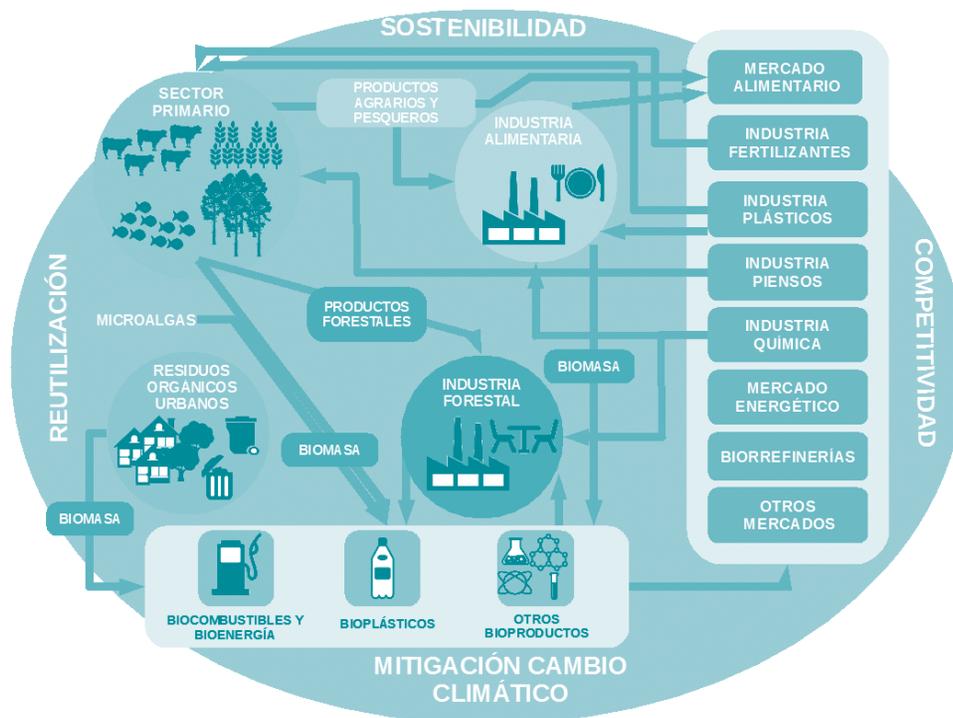
² BIOECONOMY REPORT (2016).

Tabla 1. Evolución por sectores del volumen de negocio de la bioeconomía en Andalucía.
En millones de euros

Subsector	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Agricultura	9.207	9.754	9.373	8.348	10.569	9.537
Silvicultura	430	429	459	421	332	351
Pesca y acuicultura	297	267	277	260	271	267
Industria de la alimentación, bebidas y tabaco	13.432	13.092	13.235	13.646	13.901	14.479
Industria textil de base biológica	458	477	433	375	381	441
Industria de productos y muebles de madera	962	951	836	767	724	744
Industria del papel	772	810	913	931	969	787
Industria química, farmacéutica, de los plásticos y del caucho	359	393	388	408	428	442
Industria de los biocombustibles	276	334	452	1.241	1.344	1.114
Producción de bioelectricidad	75	86	178	188	235	232
Total	26.267	26.592	26.545	26.584	29.154	28.394

Fuente: datos proporcionados por el Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía (IECA) e incluidos en la Estrategia Andaluza de Bioeconomía Circular. Elaboración propia.

Figura 1. Representación de los principales sectores de la bioeconomía y sus principios motivadores



Fuente: Estrategia Andaluza de Bioeconomía Circular.

Por tanto, podemos afirmar que el concepto de bioeconomía surge para dar respuesta a los retos del futuro; los sectores productivos primarios han de encarar el abastecimiento de una población mundial creciente que garantice un reparto justo de alimentos y favorecer la mitigación de los efectos del cambio climático. La dependencia de combustibles fósiles ha de reducirse para asegurar la preservación del medioambiente y en consecuencia garantizar el proceso de cambio hacia un modo de vida sostenible. Esta transición tiene como motor central la innovación; los desarrollos tecnológicos serán fundamentales para permitir el aprovechamiento eficiente de los recursos naturales y de los subproductos obtenidos a lo largo de las diferentes cadenas de valor productivas.

2. Marco facilitador de la Estrategia Andaluza de Bioeconomía Circular

En la Unión Europea, la entidad responsable de impulsar los factores estratégicos de la bioeconomía es la Comisión Europea. La Estrategia Europea de Bioeconomía, publicada en 2012, desde su formulación promueve el establecimiento de un nuevo concepto de producir y consumir recursos biológicos mediante su plan de acción para la conciliación de la seguridad alimentaria y el uso adecuado de los recursos del medioambiente³. Actualmente dicha estrategia se encuentra bajo revisión para dar respuesta a la velocidad de cambio del concepto de la bioeconomía, algunas cuestiones señaladas por la Comisión Europea apuntan a que se ha producido una satisfactoria movilización de fondos para la bioeconomía y una acogida adecuada por los Estados miembros aunque es necesario avanzar hacia marcos regulatorios estables, coherencia entre administraciones y el desarrollo de nuevos indicadores que den respuesta a un seguimiento más preciso de la bioeconomía.

Aparte de la Estrategia Europea de Bioeconomía, en el ámbito comunitario existe un número de iniciativas relevantes para el desarrollo de las bioindustrias, siendo de especial importancia la Empresa Común de Bioindustrias, un partenariado público privado entre la Comisión Europea y el Consorcio de Bioindustrias para el desarrollo de la bioeconomía en Europa, el Observatorio Europeo de Bioeconomía que permite, entre otras tareas, hacer un seguimiento de los avances producidos en este sector⁴.

A su vez, en el ámbito nacional la Estrategia Española de Bioeconomía, adoptada a finales de 2015, focaliza su objetivo en la producción y comercialización de alimentos, productos forestales, bioproductos y bioenergía en procesos que sean respetuosos con el medio y con el desarrollo de los entornos rurales⁵. La Estrategia nacional pivota sobre el sector público como responsable de dinamización del sector para la coordinación de la estrategia, los sectores productivos y tecnológicos bioeconómicos y el sistema de investigación, desarrollo, innovación y

³ ESTRATEGIA EUROPEA DE BIOECONOMÍA (2012).

⁴ MENGAL *et al.* (2018).

⁵ ESTRATEGIA ESPAÑOLA DE BIOECONOMÍA (2015).

formación (I+D+i+F), encargado de generar el conocimiento necesario para el desarrollo de la bioeconomía, considerando por tanto a todos los actores del sector.

Focalizándonos en el nivel regional, Andalucía prioriza el crecimiento sostenible y la competitividad de la región basada en nuevos modelos productivos, tal y como está previsto en los documentos estratégicos transversales aprobados, como la Agenda por el Empleo, la Estrategia de Innovación RIS3 y la Estrategia Industrial de Andalucía 2014-2020.

Entre otros trabajos realizados desde la Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural que han servido como experiencias para el desarrollo regional de la bioeconomía, se encuentra la experiencia de Andalucía como Región Modelo Demostrativa de Química Sostenible⁶; en este proyecto se ha recibido asesoramiento y apoyo técnico en la definición de un nuevo concepto de industria que incorpora la valorización de residuos y el aprovechamiento de recursos en el núcleo de sus actividades.

Otros documentos transversales de importancia para el desarrollo de la bioeconomía en el ámbito regional incluyen el Plan Andaluz de Investigación, Desarrollo e Innovación - PAIDI 2020⁷; Programa Operativo FEDER de Andalucía para el periodo 2014-2020 y el Programa de Desarrollo Rural (PDR)⁸. Además, la creación y puesta en funcionamiento de grupos operativos de innovación en el sector agrario ha constituido una prioridad estratégica que contribuye a la creación de conexiones entre el medio rural, las administraciones y la red de conocimiento de la región. Estas agrupaciones funcionales y temporales tienen una estructura flexible que permite la agrupación eficiente de los interesados en la innovación para determinadas aplicaciones, como por ejemplo iniciativas de carácter bioeconómico.

3. Alcance de la Estrategia Andaluza de Bioeconomía Circular

La Estrategia Andaluza de Bioeconomía Circular⁹ clasifica su alcance en dos ámbitos diferenciados; los sectores productores de la biomasa y los sectores que emplean dicha biomasa para la obtención de productos y servicios. Por lo tanto, el alcance integra los usos tradicionales de la biomasa (que no son alimentarios), así como la transformación de dicha biomasa en energía o productos de valor añadido incluyendo el aprovechamiento de CO₂ para la producción de biomasa algal. Dicho esto, la vocación andaluza se focaliza en los ámbitos menos desarrollados que requieran un impulso institucional a través de la realización de medidas concretas que aseguren su fase inicial y su consolidación. Además, en la Estrategia Andaluza de Bioeconomía Circular el alcance incluye la producción de bioproductos, que en consecuencia contribuya a la apertura a nuevos mercados y la continuidad de las acciones de sostenibilidad que rigen el concepto de bioeconomía (Figura 2).

⁶ Existen dos informes disponibles del proyecto en <http://www.juntadeandalucia.es/organismos/agriculturapescaeydesarrollorural/areas/politica-agraria-comun/desarrollo-rural/paginas/model-demonstrative-region-sustainable-chemistry.html>.

⁷ PLAN ANDALUZ DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN 2020 (2015).

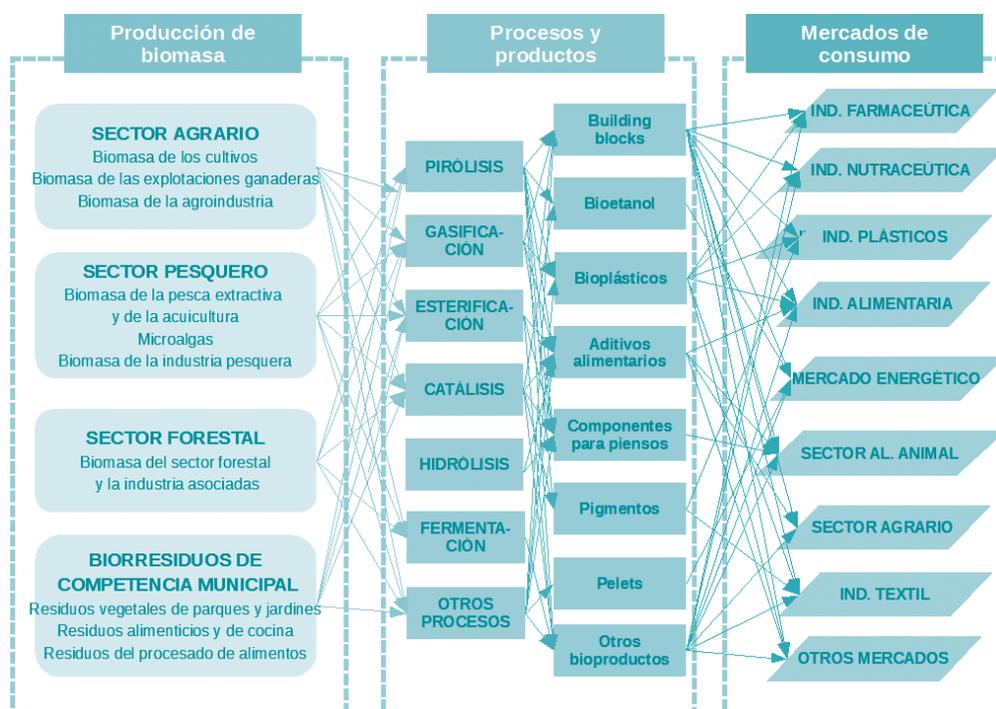
⁸ PROGRAMA DE DESARROLLO RURAL (2015).

⁹ BOJA Núm. 136 del 18 de julio de 2016. Documento Estrategia Andaluza de Bioeconomía, datos elaborados por el IECA (2017).

De cara a una gestión eficiente del alcance, los segmentos identificados comprenden:

- *Producción de materia prima biológica o biomasa*, que constituye el inicio de las cadenas.
- *Procesado tecnológico*, que transforma las materias primas en productos de mayor valor añadido.
- *Mercados de consumo* de los bioproductos que se obtienen.

Figura 2. Segmentos de la bioeconomía según la Estrategia Andaluza de Bioeconomía Circular: producción de biomasa, procesos y productos y mercados de consumo implicados



Fuente: Estrategia Andaluza de Bioeconomía Circular.

4. Caracterización de los ámbitos y sectores de actividad de la bioeconomía en Andalucía: las piezas necesarias para el desarrollo de la bioeconomía

La bioeconomía es un cambio urgente y necesario para garantizar la sostenibilidad de producción y consumo de bienes y servicios. Para este cambio, los elementos clave son la presencia de recursos biomásicos, una amplia red de conocimiento e industrias transforma-

doras que garanticen la llegada al mercado de los bioproductos asistidos por una coordinación interadministrativa eficiente.

Desde el punto de vista de la producción de recursos, la biomasa producida en Andalucía proviene de forma principal del sector agrario y asciende hasta casi 8 millones de toneladas al año. Es necesario señalar que hasta el 40 % de esta biomasa tiene su origen en el sector del olivar y los invernaderos. Por otra parte, la biomasa agroindustrial genera cerca de 6,8 millones de toneladas al año y la biomasa forestal residual alcanza las 320.000 toneladas¹⁰. Por último, es importante resaltar que los biorresiduos urbanos, los descartes de pesca y el cultivo de algas, suponen fuentes menos empleadas de biomasa, pero con diversas posibilidades y aplicaciones en el ámbito de la bioeconomía.

La actividad agraria constituye una fuente de riqueza clave en el medio rural andaluz. El Valor Añadido Bruto (VAB) agrario andaluz representa en torno al 4,2 % en el Producto Interior Bruto (PIB) total andaluz en 2015¹¹. Además de los términos de generación de riqueza es necesario considerar los datos de superficie agraria útil que ascienden hasta los 4,4 millones de hectáreas dónde se emplazan alrededor 242.000 explotaciones agrarias que representan el 24 % del total español y alrededor de 1,8 % de las explotaciones Unión Europea¹².

Entre los principales sectores, como se ha mencionado anteriormente se encuentra el sector del olivar que ocupa un área de 1,4 millones de hectáreas siendo los restos de poda la fuente principal de biomasa con un potencial del 23 % de la biomasa generada por la actividad agraria andaluza¹³.

También es necesario señalar la potencialidad de los hortícolas en la región con 35.000 hectáreas invernadas que generan el 15 % de la biomasa agrícola andaluza. Estos hortícolas se concentran en zonas de invernaderos situadas principalmente en la provincia de Almería (84 % de la superficie invernada), la costa en Granada (8,4 %) y la comarca de Vélez-Málaga (2,4 %)¹⁴. Debido a la relevancia de este tipo de cultivos que destaca en el ámbito de la bioeconomía y la economía, las Consejerías de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural y de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio pusieron en marcha un plan en materia de gestión de restos vegetales en la horticultura. Este plan se encuentra incorporado con las actuaciones en materia de bioeconomía, ya que permite dar una solución a los restos producidos en invernaderos. Su *leitmotiv* es el de avanzar hacia un modelo productivo sostenible y en sintonía con la protección de medioambiente mediante un conjunto de medidas dirigidas hacia la gestión y reducción de los restos vegetales provenientes de invernaderos, la investigación, formación y transferencia de resultados y la gobernanza administrativa necesaria para construir un modelo sostenible para este tipo de producción agraria.

¹⁰ MAPAMA (2012).

¹¹ CONSEJERÍA DE EMPLEO, EMPRESA Y COMERCIO (2016).

¹² INE (2013).

¹³ CAPDER (2015).

¹⁴ CAPDER (2016) y EGEA *et al.* (2018).

Ligada a esta actividad agraria se encuentra un potente sector agroindustrial con alrededor de 7.000 empresas que representan el 20 % del total de industrias andaluzas. Este sector tiene un tejido constituido principalmente por pymes que generan una fuente de empleo vital para el territorio rural andaluz¹⁵. Algunas medidas relacionadas con la bioeconomía han sido incorporadas en el Plan Estratégico de la Agroindustria, tales como la operación 7.10 para el fomento de la innovación en bioeconomía y economía circular. Como ejemplo para dimensionar este sector, la agroindustria del olivar procesa de media unos 5,8 millones de toneladas de aceituna a partir de la cual se obtiene el hojín, alperujo, el hueso y el orujillo, elementos con un fuerte potencial para el desarrollo de bioindustrias.

En lo referente al sector ganadero andaluz, se cifran aproximadamente 22.000 explotaciones con orientaciones productivas principalmente de ovino, caprino y otros herbívoros (32,7 %), seguidos de bovinos y porcinos. Así mismo otra fuente de biomasa está constituida por el sector pesquero, con un valor añadido bruto próximo a los 327 millones de euros genera una producción y una industria de transformación de vital importancia en Andalucía.

Por otra parte, uno de los sectores estratégicos para Andalucía en lo referente a la producción de biomasa es el cultivo de algas. La temperatura media de la región sumada a las horas de sol anuales de Andalucía, dar lugar a las condiciones ideales para el cultivo de algas. Si bien es cierto que esta práctica se lleva practicando desde hace siglos en países como Japón, su demanda creciente se debe a sus propiedades alimentarias, su versatilidad de aplicaciones y sus requerimientos de cultivo. En términos productivos el sector de las microalgas alcanzó las 6,27 toneladas cuyas aplicaciones incluyen cosmética, alimentación y biocombustibles y depuración de aguas residuales entre otras¹⁶.

A parte de los sectores mencionados anteriormente hay que tener en cuenta el potencial de la industria química para contribuir al desarrollo de la bioeconomía ya que puede tener un impacto positivo en la conversión hacia industrias químicas sostenibles. Esta industria en Andalucía emplea a unas 7.100 personas y genera una cifra de negocios de 6.600 millones de euros generados principalmente por la producción de compuestos básicos de química orgánica, fertilizantes y jabones. Este sector se encuentra extendido por todo el territorio, especialmente en las provincias de Sevilla y Granada, pero se estructura principalmente en torno a dos polos industriales (Campo de Gibraltar y Bahía de Huelva) que cuentan con el apoyo de dos asociaciones (la Asociación de Grandes Industrias Campo de Gibraltar y la Asociación de Industrias Químicas Básicas y Energéticas de Huelva, AGI y AIQBE respectivamente).

Entre esta gran diversidad de sectores, cabe destacar otro sector relevante para la bioeconomía como es el sector bioenergético. En concreto Andalucía está a la vanguardia del uso de la biomasa con fines térmicos con un total de 27.000 instalaciones y 11 plantas de carburantes siendo la comunidad líder de producción de biocombustibles y de la generación eléctrica a partir de biomasa sólida y cogeneración contando con centrales con una potencia instalada de

¹⁵ PLAN DE LA AGROINDUSTRIA (2017).

¹⁶ De acuerdo al Documento de la ESTRATEGIA ANDALUZA DE BIOECONOMÍA (2017).

257 MW. Además, la generación eléctrica a partir de biogás genera unos 30 MW de potencia que se incorporan en su mayoría a la red eléctrica¹⁷.

Además de los recursos, las capacidades necesarias para la implantación de estos nuevos modelos de negocio, sostenibles y eficientes, requieren específicamente de la innovación. Tradicionalmente, la biomasa ha sido transformada para su aprovechamiento en alimentación animal, compostaje, industria textil, y como fuente de energía térmica. Hoy en día estas aplicaciones tradicionales, han de combinarse con la innovación para obtener productos de alto valor añadido. Para ello Andalucía cuenta con diez Universidades públicas, 2.000 grupos de investigación y 25.000 investigadores, además de varios Campus de Excelencia Internacional y centros tecnológicos. En concreto, la biotecnología (entendida como la aplicación tecnológica que emplee sistemas biológicos o sus partes para la modificación de productos y procesos) tiene un peso importante en el desarrollo y la innovación referidos al ámbito de la bioeconomía. Se puede decir que en nuestro caso se considera como un área de desarrollo transversal y multidisciplinar que resulta clave para los diferentes ámbitos de interés de la bioeconomía. Andalucía cuenta con un sector biotecnológico de primer orden; el gasto interno en actividades biotecnológicas de I+D alcanzó en Andalucía el valor de 184 millones de euros, siendo el crecimiento interanual respecto a 2014 del 8,98 %¹⁸.

5. Análisis de situación de la bioeconomía en Andalucía: objetivos para una transición económica eficiente

Gracias a los estudios llevados a cabo por la Estrategia Andaluza de Bioeconomía Circular y otras iniciativas con influencia en este ámbito, Andalucía se considera una región avanzada cuyas capacidades y desafíos han sido identificados para la elaboración de estrategias que den respuesta a las áreas de mejora identificadas y permitan maximizar las oportunidades del potencial regional.

En lo relativo a la generación y disponibilidad de recursos biomásicos, Andalucía cuenta con importantes sectores generadores de biomasa si bien la mayoría de sus usos se dirigen al aprovechamiento energético. Por otra parte, nos encontramos ante una oportunidad debido a la presencia de un consolidado sector biotecnológico que puede buscar nuevas posibilidades para el aprovechamiento de la biomasa y su integración como materia prima en determinadas cadenas de valor. En este ámbito es necesaria la caracterización en profundidad de la biomasa disponible y conocer qué potenciales productos pueden tener un encaje en el mercado para facilitar la transición de las industrias andaluzas hacia la bioeconomía.

Las infraestructuras y la logística asociadas a esta biomasa no suponen factores limitantes para el desarrollo de la bioeconomía si bien es cierto que es necesaria su adecuación a las nuevas

¹⁷ AGENCIA ANDALUZA DE LA BIOENERGÍA (2016).

¹⁸ https://www.citandalucia.com/sites/default/files/actividades_biotecnologicas_de_id_en_andalucia-_2015.pdf.

cadenas de valor de bioproductos. De igual modo, es necesario estudiar las posibles simbiosis o sinergias industriales para los futuros desarrollos logísticos, así como la proximidad de zonas de transformación de biomasa y zonas de producción, así como la presencia de centros de acopio adecuados para determinadas cadenas de valor.

Los procesos industriales de transformación y la capacidad productiva de bioproductos constituyen elementos esenciales para el desarrollo de la bioeconomía. En concreto, nuestra región presenta diferentes modelos de bioindustrias, pero es necesario generar modelos de negocio sostenibles para las bioindustrias que se basen en industrias agroalimentarias existentes para maximizar su eficiencia. En la Estrategia Andaluza de Bioeconomía Circular, cobran especial relevancia los potenciales mercados de destino para los bioproductos, los usuarios finales han de participar y conocer las posibilidades que ofrece la bioeconomía mediante acciones vertebradas por parte del conjunto de agentes y actores de estos nuevos modelos productivos. La certificación de bioproductos, una regulación y promoción adecuadas son necesarias para la implantación eficiente de los estos nuevos productos y servicios.

Todo ello ha de verse apoyado de modo transversal por un sólido sistema de I+D+i+F dónde la generación de conocimiento y su transferencia han de sustentar los nuevos modelos productivos. Esta innovación ha de aportar soluciones reales a las necesidades detectadas y constar de los recursos requeridos para la generación de desarrollos tecnológicos *ad hoc* para la bioeconomía. Además, los instrumentos financieros presentes para el desarrollo de la bioeconomía han de adaptarse a los requerimientos específicos de la bioindustria con el fin de potenciar la inversión en bioeconomía. Es clave el aprovechamiento de los recursos europeos, nacionales y regionales en materia de bioeconomía, así como la creación de marcos para la colaboración público-privada que aseguren negociaciones mutuamente beneficiosas para sus participantes.

Por último, es necesario señalar que es necesaria un diálogo y cooperación entre los diferentes agentes del sector que permita la colaboración eficiente y la identificación de sinergias para la elaboración de iniciativas conjuntas. A su vez la cooperación interadministrativa ha de velar por el establecimiento de marcos regulatorios que faciliten la extensión de la bioeconomía por medio de la coherencia y la estabilidad. Por último, pero no por ello menos importante, la comunicación al conjunto de la sociedad de las oportunidades de la bioeconomía, así como su urgencia y necesidad es la tarea más importante para lograr una implicación real en este camino de transición.

Ante esta situación, el objetivo principal de la Estrategia Andaluza de Bioeconomía Circular es claro; contribuir al crecimiento y desarrollo sostenibles en Andalucía impulsando actuaciones dirigidas al fomento de la producción de recursos y procesos biológicos renovables. Para la consecución de este objetivo existen tres objetivos estratégicos; incrementar la disponibilidad de biomasa sostenible para su aprovechamiento mediante tratamientos innovadores, aumentar el número de bioindustrias y biorrefinerías en Andalucía e incrementar los mercados y el consumo de bioenergía. Esto se conseguirá mediante el establecimiento de líneas estratégicas y medidas concretas desarrolladas mediante grupos de trabajo que abarcan la producción de biomasa, la transformación, el conocimiento y la Administración.

Dos de las acciones más relevantes englobadas en la estrategia se centran en la dinamización del sector. La primera, comprende el impulso de creación de un clúster de bioeconomía en Andalucía para agrupar a todos los actores implicados en este sector de alta transversalidad temática y funcional. La segunda acción a remarcar es la consolidación de un observatorio permanente a nivel regional que permita realizar un seguimiento sobre el desarrollo de bioeconomía en la región, así como detectar las necesidades y fomentar la competitividad del sector bioeconómico en Andalucía.

6. Conclusiones

La Estrategia Andaluza de Bioeconomía Circular debe favorecer la transición hacia un modelo económico basado en el óptimo aprovechamiento de los recursos biológicos, que mejore la competitividad y sostenibilidad de los sectores involucrados, generando empleo de calidad en un marco de igualdad social, a través del impulso del talento y la generación de conocimiento mediante la investigación, desarrollo tecnológico e innovación como motores del proceso de cambio, con especial atención al ámbito rural andaluz.

Figura 3. Representación gráfica de los recursos de biomasa, capacidades industriales y sector del conocimiento necesarios para el desarrollo de la bioeconomía en Andalucía



Fuente: elaboración propia.

La región posee los recursos y capacidades necesarios para el desarrollo de la bioeconomía debido a la presencia de tres factores claves; una abundante producción de biomasa, la presencia de un sector industrial desarrollado y una extensa red de conocimiento. Por ello, tenemos la responsabilidad común de perseguir un cambio en la cultura productiva regional que promueva un desarrollo sostenible conectando la economía y la ecología.

Referencias bibliográficas

- AGENCIA ANDALUZA DE LA ENERGÍA (2016): *La biomasa en Andalucía*. Disponible en https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/documentos/la_biomasa_en_andalucia_noviembre_2016.pdf.
- COM (2012) 60 final. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones «La innovación al servicio del crecimiento sostenible: una bioeconomía para Europa».
- CONSEJERÍA DE AGRICULTURA, PESCA Y DESARROLLO RURAL (2017): *Plan Estratégico para la Agroindustria de Andalucía Horizonte 2020*.
- CONSEJERÍA DE AGRICULTURA, PESCA Y DESARROLLO RURAL Y CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE Y ORDENACIÓN DEL TERRITORIO (2016): *Líneas de actuación en materia de gestión de restos vegetales en la horticultura en Andalucía. Hacia una economía circular*.
- CONSEJERÍA DE AGRICULTURA, PESCA Y DESARROLLO RURAL (2015): *Plan Director del Olivar*.
- CONSEJERÍA DE AGRICULTURA PESCA Y DESARROLLO RURAL (2015): *Programa de Desarrollo Rural*.
- CONSEJERÍA DE ECONOMÍA Y CONOCIMIENTO (2015): *Plan Andaluz de Investigación, Desarrollo e Innovación 2020*.
- CONSEJO DE GOBIERNO (2016): «Acuerdo de 12 de julio de 2016, por el que se aprueba la formulación de la Estrategia Andaluza de Bioeconomía»; *BOJA* (136); 18 de julio de 2016.
- EGEA, F. J.; TORRENTE, R. G. y AGUILAR, A. (2018): «An efficient agro-industrial complex in Almería (Spain): Towards an integrated and sustainable bioeconomy model»; *New Biotechnology* 40; pp: 103-112.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (2013): *Encuesta sobre la estructura de las explotaciones agrícolas*.
- MENGAL, PH.; WUBBOLTS, M.; ZIKA E.; RÚIZ, A.; BRIGITTA, D.; PIENIADZ, A. y BLACK, S. (2018): «Bio-based Industries Joint Undertaking: The catalyst for sustainable bio-based economic growth in Europe»; en *New Biotechnology* (40); pp. 31-39.

MINISTERIO DE AGRICULTURA, PESCA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE (2012): *Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3)*.

SECRETARÍA DE ESTADO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN. MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD (2015): *Estrategia Española de Bioeconomía. Horizonte 2030*.



CLAMBER

LA APUESTA DE CASTILLA-LA MANCHA POR LA BIOECONOMÍA

Javier Mena Sanz

Biorrefinería de I+D+i Clamber

Resumen

La Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha desarrolló el Proyecto «Castilla-La Mancha Bio-Economy Region» con el objetivo de convertir a esta región en el referente del sur de Europa dentro de la investigación relacionada con el aprovechamiento de la biomasa. Con una inversión de 16,1 millones de euros y con una cofinanciación FEDER se realizó: una adquisición de conocimiento mediante Compra Pública Precomercial con el objetivo de valorizar los residuos orgánicos generados en CLM; y la construcción de una biorrefinería a escala demostrativa. La Biorrefinería de I+D+i CLAMBER es la primera biorrefinería tecnológicamente avanzada a escala demostrativa en España, diseñada y construida para que aquellas empresas u organismos que tengan desarrollado un bioproceso novedoso de valorización de biomasa húmeda fermentable (purines, lactosuero, lodos, etc.) o biomasa lignocelulósica (restos de poda, paja residual, etc.) a escala laboratorio puedan realizar experimentos de escalado en un tamaño muy cercano al industrial para determinar su viabilidad técnica y económica. En definitiva, se minimizan enormemente los costes necesarios para desarrollar industrialmente una idea. En la actualidad, en la Biorrefinería de I+D+i CLAMBER se están desarrollando dos proyectos europeos con financiación competitiva: BIOREGIO y URBIOFIN.

Abstract

The Regional Government of Castile-La Mancha developed the Project Castilla-La Mancha Bio-Economy Region (CLAMBER) with the aim of making this region a benchmark in southern Europe for biomass-use-related research. A 16.1 million euro investment and ERDF co-financing was used to: acquire knowledge through Pre-commercial Public Procurement with the aim of adding value to the organic waste residues generated in Castilla-La Mancha; and construct a demonstration-scale biorefinery. The CLAMBER R&D&I Biorefinery is the first technologically advanced demonstration-scale biorefinery in Spain, designed and built so that those companies and organisations that have developed a new bioprocess for adding value to fermentable, wet biomass (slurry, whey, sludge, etc.) or lignocellulosic biomass (cuttings from prunings, residual straw, etc.) at laboratory scale, can carry out scaled experiments at very close to industrial size to determine the technical and economic feasibility. In short, the costs necessary for developing an idea industrially are greatly reduced. Currently, the CLAMBER R&D&I Biorefinery is developing two European projects with competitive funding: BIOREGIO and URBIOFIN.

1. Introducción

El proyecto 'Castilla-La Mancha Bio-Economy Region' (CLAMBER) nace como respuesta a dos necesidades principales, desarrolladas en los apartados siguientes: la de una fuente renovable de energía y de materiales, y la de plantas de demostración e industriales donde investigar y transformar esa materia prima renovable en productos comerciales.

1.1. Necesidad de bioeconomía

Actualmente, vivimos en una sociedad con una economía basada en materiales de origen fósil, pero el aumento de su precio, los problemas medioambientales ocasionados por su uso y sus reservas limitadas han hecho iniciar una actividad económica más sostenible y más respetuosa con el medioambiente, emergiendo así una economía basada en la biomasa: la bioeconomía.

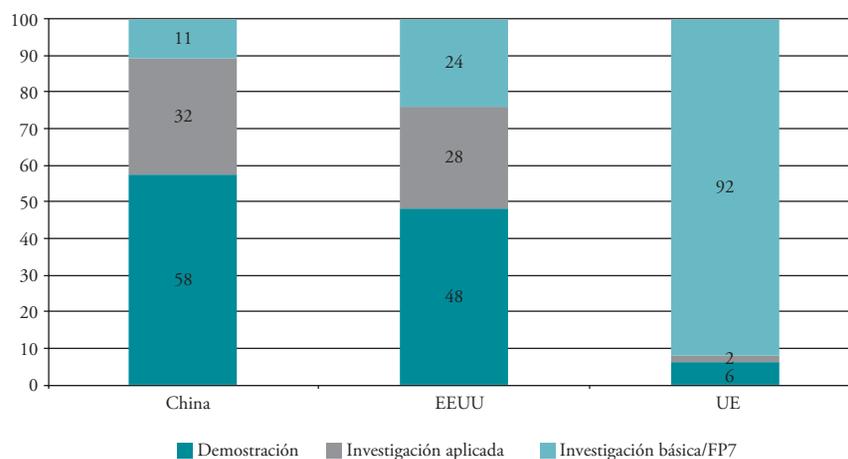
1.2. Necesidad de investigación a escala de demostración

El ser humano es capaz (o debería serlo) de prever la escasez de recursos y buscar con antelación otras alternativas con el fin de evitar el descenso en el crecimiento que podría provocar dicha escasez. Para minimizar los efectos que pueden darse debido a la transición de un recurso a otro, es necesario investigar con anterioridad sobre el aprovechamiento eficaz del nuevo recurso.

Además, para que esta investigación sea fructífera y se desarrolle a escala industrial, es necesario realizar un escalado de los conocimientos adquiridos en el laboratorio. La realización de experimentos a escala demostrativos permite obtener datos fiables de los procesos para determinar su viabilidad técnica y económica. No obstante, esta escala requiere una importante inversión sin que exista garantía de obtener beneficios por la venta de los productos finales. Por eso a esta fase se la conoce como «valle de la muerte». Existen ayudas a la investigación que reducen el riesgo para las empresas pero, si se compara la inversión de la Unión Europea en proyectos de demostración con respecto a otras regiones (Gráfico 1), se observa que Europa necesita invertir más en investigación demostrativa. Esta situación se quiere revertir con la entrada del Programa Horizonte 2020.

Con respecto al ámbito nacional, en 2013 se encontraban algunas instalaciones en las que era posible realizar algunas operaciones de valorización de biomasa de manera unitaria y, además, la escala de estas instalaciones era pequeña ya que se encontraban ubicadas en organismos públicos de investigación (universidades o CSIC). Como ejemplo de esas instalaciones, cabe destacar la planta de pretratamiento de biomasa, mediante tratamiento por explosión de vapor, ubicada en CIEMAT (Madrid) y la planta de CENER en Navarra, que prioriza las rutas termoquímicas, aunque también contempla las biológicas. En el ámbito europeo, existían varios centros de investigación que disponían de equipos biotecnológicos a escala demostrativa, pero casi ninguno situado al sur de Europa, hecho que demandaba el sector biotecnológico de esta región, concretamente la Asociación Española de Bioempresas (ASEBIO).

Gráfico 1. Comparativa internacional sobre las proporciones de investigación básica, aplicada y demostrativa en el año 2010. En porcentaje



Fuente: National Scientific Board, Digest, NSF (2011) y OECD (2011).

1.3. ¿Por qué Castilla-La Mancha?

Castilla-La Mancha (CLM) dispone de un sector primario muy potente, donde se genera una gran cantidad de biomasa residual. En 2016, el 6,6 % del producto interior bruto (PIB) provenía del sector primario, mientras que la media española era del 2,3 % (INE, 2016).

CLM concentra el 12,6 % de las explotaciones agrícolas españolas y el 17,2 de la Superficie Agrícola Útil (SAU). Es la región vinícola más grande del mundo con 445.249 ha en 2015, el 47 % del total nacional. Otro cultivo muy importante es el olivar, donde en 2015 se dedicaron al mismo 371.045 ha, un 16 % del total nacional (MAGRAMA, 2016).

Con respecto a la ganadería, CLM dispone del 8 % de las unidades de ganado mayor (UGM) nacionales. En el 2013, CLM aportó a la producción española el 35,8 % de las gallinas de puesta, el 20 % de las gallinas para carne, el 14,7 % del ganado ovino, el 14,3 % del caprino y el 11,1 % del porcino (MAGRAMA, 2016).

La industria alimentaria ligada al sector primario supone la mayor aportación a la producción industrial de la región, un 30 % del sector, valor que supera ampliamente la media nacional del 18 %. Los subsectores más importantes en términos de ventas son en este orden: 1) fabricación de bebidas (2.096 millones); 2) cárnicas (1.868 millones); 3) lácteos y derivados (947 millones) y 4) alimentación animal (408 millones).

Esta potente actividad agroalimentaria lleva asociada una gran generación de biomasa residual (Tabla 1), que potencialmente supone una gran fuente de recursos para la generación de bioproductos.

Tabla 1. Biomasa residual disponible en CLM para digestión

Residuo	t/año	Residuo	t/año
Purín de cerdo	1.545.616	No conformes frutales no cítricos	1.325
Estiércol de vaca	890.133	Transformación hortalizas	28.471
Gallinaza	618.835	Transformación tubérculos	379
Restos de otras especies	1.043.121	Transformación cítricos	0
Materias primas matadero de carne	81.293	Transformación frutales no cítricos	1.078
Materias primas matadero avícola	14.829	Bagazo - industria cervecera	97.290
Materias primas de estabulación	27.876	Alperujo 2F	235.240
Harinas C2	0	Alpechín 3F	52.038
Lodos de EDARI – cárnica	15.799	Materias primas industria del vino	414.180
Lodos de EDARI - láctea	10.989	Materias primas industria de la sidra	0
Lactosuero	478.598	Materias primas industria azucarera	77.091
Materias primas de lácteos y otros	1.190	Paja de cereal	3.447.943
Materias primas de pescado	27	Lodos EDARI - transformación de vegetales	3.734
Lodos de EDARI pescado	22	Cultivos energéticos	5.660
Excedentes hortalizas	4.146	Glicerina	23.780
Excedentes cítricos	0	Materias primas DDGS (bioetanol)	16.130
Excedentes frutales no cítricos	56	Materias primas pulpa remolacha (bioetanol)	0
No conformes hortalizas	83.336	Gran distribución	34.281
No conformes tubérculos	4.768	Bares y restaurantes	26.870
No conformes cítricos	0	Hoteles	2.098

Fuente: Probiogas (2011).

Según el proyecto PROBIOGAS, el potencial anual de generación de residuos fermentables para la producción de biogás en CLM asciende a 9,3 millones de toneladas aproximadamente. Adicionalmente, en la Tabla 2, se recoge el potencial de biomasa de CLM en lo que a residuos procedentes de los sectores agrario y forestal y sus industrias de transformación se refiere. El potencial energético en términos de energía primaria supera un millón de tep (toneladas equivalentes de petróleo) (AGECAM 2002)¹.

¹ AGECAM (2002).

Tabla 2. Biomasa residual disponible para la recuperación energética

Residuos biomásicos valorizables energéticamente		t/año	
Agrícolas	Herbáceos	Paja cereales	649.939
		Tallo y zuro maíz	221.908
		Residuo campo girasol	258.473
		Subtotal	1.130.320
	Leñosos	Poda vid	621.437
		Poda olivar	354.982
		Poda frutales	60.172
		Descepe	109.807
		Subtotal	1.146.398
		Forestales	Leña, ramas, copas...
	Subtotal	121.416	
Industrias madera	Aserraderos (20.1)	66.895	
	Tableros (20.2)	3.525	
	Construcción (20.3)	115.946	
	Envases (20.4)	8.961	
	Otros y corchos (20.5)	2.629	
	Muebles (36.1)	49.973	
	Subtotal	247.929	
Industrias agroalimentarias	Bagazo cerveceras	25.000	
	Orujo uva	105.000	
	Orujillo aceituna	38.000	
	Subtotal	168.000	
Total		2.814.063	

La gran cantidad de biomasa residual proveniente del sector agroalimentario y forestal de CLM y la gran extensión de terreno donde desarrollar cultivos, tanto amiláceos y azucarados como lignocelulósicos, hacen de CLM una región idónea en la que potenciar la bioeconomía.

Si se suman todas las necesidades expuestas en los apartados anteriores: la necesidad de desarrollar la bioeconomía para utilizar la biomasa como sustituto de la materia prima fósil y la necesidad de desarrollar proyectos a escala demostrativa, sobre todo en el sur de Europa, y las unimos a las capacidades de CLM, se determina claramente la causa de por qué se ha desarrollado el Proyecto CLAMBER en esta región.

2. Proyecto CLAMBER

El proyecto CLAMBER fue y sigue siendo un ejemplo de inversión pública en bioeconomía. Es la más clara apuesta por la bioeconomía que ha realizado una región española. Fue

desarrollado entre 2013 y 2015 por la Junta de Comunidades de CLM (JCCM), a través del Instituto de la Vid y el Vino de CLM (IVICAM), que luego, a mediados de 2015, pasaría a formar parte del Instituto Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario y Forestal de CLM (IRIAF), con una actuación muy destacada de la Dirección General de Desarrollo, Estrategia Económica y Asuntos Europeos. Por lo tanto, fue un proyecto que desarrollaron conjuntamente la Consejería de Agricultura, Medio Ambiente y Desarrollo Rural y la Consejería de Economía, Empresas y Empleo, puesto, tal y como la propia palabra «bioeconomía» lo indica, es un concepto transversal y que afecta a ambos sectores.

A pesar de las recomendaciones europeas de aquel momento, CLM, así como el resto de comunidades autónomas españolas, no había hecho todavía una apuesta estructurada para el desarrollo de una bioeconomía en el territorio. Consecuentemente, el desarrollo basado en la bioeconomía estaba en una etapa temprana y ante un escenario de alto riesgo, sobre todo si las empresas decidían lanzarse al mercado de manera independiente. Para evitar lo ocurrido en el sector productor de biocarburantes o biocombustibles en España, concretamente de biodiésel, que atraviesa actualmente una situación crítica tras un período de auge durante 2007-2010, CLM decidió desarrollar su Estrategia en Bioeconomía apoyándose plenamente en el proyecto CLAMBER y posteriormente continuar con la economía circular, íntimamente ligada a la bioeconomía, desarrollando la primera Ley de Economía Circular de una comunidad autónoma en España, cuya fase de consultas se realizó a finales de 2017 y cuya publicación está prevista realizarla en 2018.

El proyecto tuvo un presupuesto inicial de 20 millones de euros, aunque la Junta de Comunidades de CLM (JCCM) ejecutó finalmente un gasto de 16,1 millones de euros aproximadamente. Con respecto a la financiación, el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) consideró, dentro de los criterios de selección de operaciones del Programa Operativo de Investigación, Desarrollo e Innovación para el beneficio de las empresas - Fondo Tecnológico 2007-2013 (MINHAFP, 2011)², que el proyecto CLAMBER se enmarcaba dentro de los contemplados para la creación de redes de cooperación entre empresas y centros públicos de investigación, valorando fundamentalmente la calidad organizativa de la actuación y la coherencia de sus objetivos a la vista de nivel de desarrollo tecnológico, el carácter innovador de la propuesta y su viabilidad técnica (Tema Prioritario 03 - Transferencia de tecnología y mejora de redes de cooperación). Igualmente, consideró los criterios de selección de operaciones del tema Prioritario 04 (Ayuda a la Investigación y Desarrollo tecnológico) de los Proyectos de Investigación Aplicada Colaborativa, en base al nivel científico-tecnológico del proyecto. Por lo tanto, aprobó una co-financiación del 80 % mediante Fondos Europeos de Desarrollo Regional (FEDER) del Programa Operativo Fondo Tecnológico, aportando la propia JCCM el otro 20 % restante, una cantidad que, teniendo en cuenta la crisis que se estaba dando en aquella época, supuso un gran esfuerzo inversor por parte de la región.

² MINISTERIO DE HACIENDA Y FUNCIÓN PÚBLICA (2011).

El MINECO no solo aportó una cofinanciación, sino que también puso a disposición de CLM, en virtud de un contrato de asesoría técnica, todo el conocimiento y todo el personal investigador que el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) atesoraba en materia de biotecnología. Finalmente, y aunque no aportaron una cofinanciación como tal, hay que destacar el papel de las empresas biotecnológicas, representadas por ASEBIO, que fueron inductoras y promotoras, mostrando su apoyo tanto en las primeras fases del proyecto como en la actual, una vez que la biorrefinería está comenzando con su operación. La etapa de Proyecto acabó formalmente en diciembre de 2015, dando paso a la denominada Biorrefinería de I+D+i CLAMBER, siguiendo con el desarrollo de la bioeconomía en CLM y estando al servicio de las empresas.

2.1. *Objetivo*

El principal objetivo del proyecto CLAMBER fue «situar a CLM en el centro de la nueva Estrategia Europea para la Bioeconomía». Este objetivo englobaba los siguientes objetivos específicos:

- Construir una biorrefinería tecnológicamente avanzada a escala de demostración para la investigación en la producción de bioproductos innovadores de alto valor añadido y biocombustibles a partir de biomasa.
- Crear un polo tecnológico en la región para activar sinergias con las empresas tanto productoras de la biomasa como usuarias de los bioproductos y fomentar la creación y la explotación de nuevos nichos de mercados.
- Revitalizar la economía local y revertir la demografía negativa que caracteriza las áreas rurales.
- Crear un sistema de cooperación público-privado eficiente, orientado al avance científico-tecnológico y motor de iniciativas de alcance europeo e internacional.

2.2. *Actuaciones del proyecto CLAMBER*

CLM, como ya se ha comentado anteriormente, disponía de una gran cantidad de biomasa pero el conocimiento y el número de instalaciones necesarias para valorizarla eran limitados. Para revertir esta situación y cumplir con los objetivos del proyecto, se realizaron dos actuaciones principales: una compra de conocimiento y la construcción de una biorrefinería a escala demostrativa.

2.2.1. Compra de conocimiento

Se emitió una serie de licitaciones bajo la modalidad de Compra Pública Precomercial (CPP) por valor de 8,6 millones de euros para la realización de proyectos de I+D cuyos objetivos eran la selección de materias primas óptimas, la mejora y desarrollo de nuevos bioprocesos, el desarrollo de nuevos bioproductos y otros temas más transversales como la investigación socioeconómica, nuevos modelos de negocio, logística, y otros retos tecnológicos. Por tanto, alineadas con la Estrategia Europea de Investigación presentada en el Programa Horizonte 2020, las licitaciones publicadas englobaban los servicios de investigación, desarrollo e innovación para la utilización integral de diferentes residuos que suponen un reto en CLM.

Para garantizar el acceso a soluciones tecnológicas avanzadas e innovadoras y para fomentar la cooperación público-privada con empresas dedicadas a la I+D, se eligió la CPP como instrumento de contratación, pues, por sus características, permite primar la calidad técnica y la innovación antes que el precio y la adjudicación a varios licitadores (si presentasen propuestas diferentes para valorizar un residuo). Además, se dispone de una mayor flexibilidad a la hora de alcanzar el fin último. De esta manera, CLAMBER quiso sumarse a los esfuerzos del MINECO para que las compras que realizan las distintas administraciones públicas españolas contribuyan al fomento del desarrollo tecnológico de las empresas.

Se presentaron 60 propuestas, a partir de las cuales se desarrollaron 39 estudios de viabilidad, que conllevaron finalmente la ejecución de 19 proyectos de I+D, que llevaban incluso a la ejecución de experimentación a escala planta piloto. En cada una de las fases de adjudicación y en el seguimiento de los proyectos, se contó con la asistencia técnica del CIEMAT. A continuación, se presenta un pequeño resumen de esos proyectos:

1. Biomasa lignocelulósica:

- a) *Residuos leñosos*. Adjudicatario: Fundación Universidad Alcalá. Objeto: obtención de biochar, bio-oil y biocombustibles a partir de residuos leñosos.
- b) *Residuos herbáceos*. b.1) Adjudicatario: Biopolis. Objeto: obtención de bioplásticos a partir de restos de lavanda una vez recuperado el extracto. b.2) Adjudicatario: Neol. Objeto: obtención de aceite rico en ácidos grasos poliinsaturados omega-3 a partir de la paja de trigo.
- c) *Cultivos lignocelulósicos*. Adjudicatario: Neol. Objeto: obtención de aceite rico en ácidos grasos poliinsaturados omega-3 a partir de los residuos leñosos de la camelina.
- d) *Biomasa no fermentable (lignina)*. Adjudicatario: Natac/Alvinesa. Objeto: obtención de un ingrediente funcional con características antioxidantes a partir de sarmientos y raspones de la vid.

2. Biomasa oleaginosa: *cultivos y residuos*. Adjudicatario: Camelina Company España. Objeto: aprovechamiento integral del cultivo de la camelina para la obtención de alimento animal y extracto para el sector nutracéutico a partir de la cascarilla y la harina del grano y biocombustibles y bioplásticos a partir del aceite.
3. Biomasa residual agroalimentaria:
 - a) *Residuos vinícolas*. a.1) Adjudicatario: Natac. Objeto: obtención de aceite funcional, compuestos con alto poder antioxidante y otros compuestos bioactivos a partir de las piquetas, pepitas y hollejos de uva. a.2) Adjudicatario: Ainia. Objeto: obtención de aceite de semilla, polifenoles, biotransformados para el sector agro, fibra/proteína de uva y biogás a partir de hollejos, semillas y lías de uva.
 - b) *Alperujo*. Adjudicatario: Innovaoleo. Objeto: obtención de oleocantal, hidroxitirosol, y otros compuestos minoritarios para la industria cosmética y nutracéutica a partir del alperujo de la cornicabra.
 - c) *Lactosuero*. Adjudicatario: Biopolis. Objeto: obtención de lactulosa, polihidroxialcanoatos (PHA) y ácido d-láctico para el sector nutracéutico y para la producción de bioplásticos.
 - d) *Residuos cárnicos*. Adjudicatario: Biogas Fuel Cell. Objeto: producción de biogás, biodiésel y biofertilizantes a partir de residuos cárnicos.
 - e) *Aguas residuales de alta carga*: e.1) Adjudicatario: Alvinesa. Objeto: obtención de ingredientes funcionales para la nutrición animal, fertilización y sector nutracéutico a partir de vinazas. e.2) Adjudicatario: Biomasa Peninsular. Objeto: obtención de compost, biogás, hidrógeno y ácidos grasos volátiles a partir de vinazas.
4. Biomasa residual ganadera y no agroalimentaria:
 - a) *Estiércoles*. a.1) Adjudicatario: Ainia. Objeto: obtención de fertilizantes granulados, biogás, hidrógeno y ácidos grasos volátiles a partir de estiércoles. a.2) Adjudicatario: Purines Almazán. Objeto: obtención de biochar, biosyngas, biocombustibles y fertilizantes a partir de camas de pollo y purín de cerdo.
 - b) *Fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU)*. Adjudicatario: Biomasa Peninsular. Objeto: obtención de compost, biogás, hidrógeno y ácidos grasos volátiles a partir de la FORSU procedentes del sector hostelero.
 - c) *Lodos de depuradora*. Adjudicatario: Ainia. Objeto: obtención de fertilizantes granulados, biogás, hidrógeno y ácidos grasos volátiles a partir de lodos de depuradora.

- d) *Glicerina*. Adjudicatario: Tecnalia. Objeto: obtención de glicerina purificada y de carbonato de glicerol para la producción de biopolímeros a partir de la glicerina procedente de la producción de biodiésel.
- e) *Valorización no energética del biogás*. Adjudicatario: Biopolis. Objeto: obtención de bioplásticos a partir del biogás producido en una planta de digestión anaerobia de purines, estiércoles y gallinaza.

Puesto que no fue una ayuda, sino una compra, el IRIAF es actualmente el propietario del 50 % del conocimiento generado en cada uno de los proyectos. Además, una vez finalizados dichos proyectos, CLAMBER sigue colaborando con muchos de los adjudicatarios e incluso varios de ellos son socios en proyectos de financiación competitiva que se están desarrollando actualmente. Por lo tanto, con esta herramienta, CLAMBER, además de adquirir conocimiento, ha sentado las bases de las futuras líneas de investigación dentro de la biorrefinería.

2.2.2. Construcción de una biorrefinería a escala demostrativa

La segunda actuación del Proyecto CLAMBER fue la construcción de una biorrefinería a escala demostrativa.

La Biorrefinería de I+D+i CLAMBER está situada en Puertollano, junto al Complejo Petroquímico de Repsol. Se utilizó una parcela de 19.000 m², donde se urbanizaron 5.130 y, dentro de los cuales, se construyó una nave de 1.700, donde 1.400 se dedican a albergar los equipos de la biorrefinería y 600, en dos plantas, para recepción, oficinas y laboratorio. En la Figura 1 se observa una fotografía del edificio principal.

Es la primera biorrefinería tecnológicamente avanzada a escala de demostración en España, diseñada y construida para que aquellas empresas u organismos que tengan desarrollado un bioproceso novedoso a escala laboratorio puedan realizar experimentos de escalado en un tamaño muy cercano al industrial para determinar su viabilidad técnica y económica, así como optimizar los parámetros de operación para el posterior diseño y construcción de la planta a escala industrial. En definitiva, se minimizan enormemente los costes necesarios para desarrollar industrialmente una idea.

Desde el comienzo del Proyecto CLAMBER, la biorrefinería se diseñó para desarrollar e investigar procesos eminentemente biológicos, dejando a un lado los tratamientos termoquímicos de la biomasa puesto que ya existía en España otra instalación pública, el CENER, donde desarrollarlos y, a instancias del MINECO, se buscó la complementariedad antes que la competencia.

Figura 1. Edificio principal de la biorrefinería de I+D+i CLAMBER



La Biorrefinería de I+D+i CLAMBER dispone de dos líneas de investigación principal:

1. Valorización de residuos lignocelulósicos (sarmientos de la vid, ramón de olivo, restos de poda, paja residual, etc.).
2. Valorización de biomasa húmeda fermentable (purines, lactosuero, fangos de depuradora, harinas cárnicas, etc.).

Adicionalmente, también se previó una línea de investigación para valorizar biomasa oleaginosa cuya construcción se acometerá en futuras ampliaciones de la planta.

La diferencia fundamental de la Biorrefinería de I+D+i CLAMBER con respecto al resto de plantas en Europa son principalmente las siguientes:

- Otras instalaciones obtienen bioproductos a partir de fuentes de carbono comerciales (glucosa, fructosa, etc.), que suponen un coste muy elevado; o cultivadas (caña de azúcar, maíz, remolacha, etc.), que plantean conflictos éticos relacionados con cultivos destinados a la alimentación, deterioro del suelo, uso de fertilizantes y problemas derivados de monocultivos extensos. En contraposición, la Biorrefinería de I+D+i CLAMBER dispone de un sistema de pretratamiento basado en un sistema de explosión a vapor (*steam explosion*), que trabaja en continuo, que es capaz de tratar una tonelada al día (con posibilidad de triplicar su producción si trabaja a tres turnos) y que permite la obtención de bioproductos de elevado valor añadido a partir de residuos leñosos y herbáceos (restos de poda, sarmientos, paja de cereal, etc.), mucho más baratos, abundantes y que no entran en competencia con la producción de alimentos.

Por ejemplo, de estos residuos podría obtenerse bioetanol, plásticos biodegradables o productos químicos de base, a partir de los que se producirían otros más complejos.

- Otra característica diferenciadora es el tamaño relevante de sus instalaciones, en la que se realizarán los procesos de investigación a un escalado casi industrial. La Biorrefinería de I+D+i CLAMBER cuenta, por lo tanto, con un gran potencial de impacto socio-económico y de posicionamiento de CLM en el campo de la biotecnología internacional. Por ejemplo, dispone de un fermentador de 20 m³, que supera en un 25 % el volumen del mayor fermentador que se pueda encontrar en otras instalaciones europeas parecidas.

La Biorrefinería de I+D+i CLAMBER está concebida como una planta flexible y modular, por lo que podrá ser susceptible de futuras ampliaciones y así seguir albergando gran diversidad de bioprocesos. Las distintas unidades de proceso que conforman actualmente la planta CLAMBER son las siguientes:

Unidad de acondicionamiento y pretratamiento de biomasa lignocelulósica

En esta unidad se acondicionan los restos de poda, tanto leñosos como herbáceos, procedentes de la industria agroalimentaria y forestal (vid, olivo, paja de cereal...) para poder ser utilizados en unidades posteriores. Este tipo de biomasa contiene lignocelulosa, que es uno de los principales componentes de las plantas. De la lignocelulosa se desean obtener los azúcares que serán transformados por diferentes tipos de microorganismos en diversos bioproductos. Sin embargo, estos azúcares forman parte de complejas estructuras inaccesibles, por lo que el objetivo de esta unidad es realizar los tratamientos necesarios para liberar los azúcares y así poder ser transformados en bioproductos. En la Figura 2 se observa una fotografía de dicha unidad.

Unidad de Fermentación

La Biorrefinería de I+D+i CLAMBER dispone de un tren de fermentación donde se pueden realizar experimentos de producción de bioproductos de interés a partir de la transformación microbiana (fermentación) de los azúcares procedentes de la anterior unidad a diferentes escalas: 3, 30, 300, 3.000 y 20.000 litros de capacidad, siendo este último equipo, como ya se ha comentado anteriormente, un factor que diferencia a la Biorrefinería de I+D+i CLAMBER con respecto a otras plantas piloto existentes en Europa, al tratarse de volúmenes de escala casi industrial. En la Figura 3 se observa una foto de dicha unidad.

Figura 2. Unidad de acondicionamiento de biomasa lignocelulósica



Figura 3. Unidad de fermentación



Unidad de purificación

Esta unidad está destinada a la purificación y concentración de los productos obtenidos en la unidad de fermentación. Dispone de dos sistemas de separación sólido-líquido: centrifugación y microfiltración. En la Figura 4 se observa una foto de dicha unidad.

Figura 4. Unidad de purificación y concentración



Planta de digestión anaerobia

Se dispone de una unidad de digestión anaerobia modular, autónoma y transportable donde los residuos orgánicos húmedos fermentables (purines, lactosueros, FORSU, subproductos alimentarios no destinados a consumo humano regulados por la Normativa Sandach, etc.) sufran, por medio de microorganismos y en ausencia de oxígeno, una descomposición de la materia orgánica que contienen, obteniendo dos productos: biogás, que puede utilizarse para producir energía eléctrica o para otros usos no energéticos, y digestato de materia orgánica, para la obtención de abonos y biofertilizantes. En la Figura 5 se observa dicha unidad.

Figura 5. Unidad de digestión anaerobia



Depuradora

La depuradora de la Biorrefinería de I+D+i CLAMBER está formada por humedales artificiales. En los humedales crecen y se desarrollan diferentes tipos de vegetales, animales y microorganismos adaptados a condiciones de inundaciones temporales y/o permanentes. En este tipo de ecosistema se desarrollan también determinados procesos físicos y químicos capaces de depurar el agua ya que eliminan grandes cantidades de materia orgánica, sólidos en suspensión, nitrógeno, fósforo e incluso productos tóxicos, generando, en los momentos de poda de las plantas acuáticas, una nueva biomasa que puede volverse a alimentar a la biorrefinería y que de otra manera se vertería al cauce público. Este sistema de depuración de aguas también será fruto de estudio e investigación en CLAMBER. En la Figura 6 se observan dos fotos de la depuradora.

Figura 6. Depuradora



2.3. Impacto

El proyecto CLAMBER se considera estratégico para la región de CLM, ya que apuesta por el desarrollo de un sector emergente con perspectivas de gran dimensión y largo alcance, cuyos resultados tienen gran potencial en el contexto internacional. Se estima que cada euro invertido en la investigación y la innovación en bioeconomía financiadas por la UE generará diez euros de valor añadido en los sectores bioeconómicos en 2025. Pero el impacto que el proyecto CLAMBER podría alcanzar no se limita únicamente al ámbito económico, sino también en los ámbitos social, medioambiental y tecnológico, además de incrementar la capacidad innovadora de la región tanto en su ámbito público como privado. A continuación, se explica el potencial impacto asociado a los resultados esperados.

2.3.1. Resultados esperados

Fomentar la bioeconomía en la región de Castilla-La Mancha era y sigue siendo el objetivo principal del proyecto CLAMBER y primer resultado esperado. La obtención de los resultados deseados daría a Castilla-La Mancha una proyección internacional muy positiva pudiendo convertirse en uno de los polos de referencia de la bioeconomía, además de impactar positivamente a nivel científico-tecnológico y socioeconómico en la región.

La explotación de estos resultados directos proporcionaría a corto-medio plazo otros resultados indirectos en términos de proyección internacional, ya que se promovería el desarrollo de un centro de referencia, posicionando al IRIAF como responsable de la definición e implementación de la estrategia de bioeconomía de la región, y referente claro en términos internacionales. Por un lado, el IRIAF asegurará la formación y entrenamiento de operarios en los bioprocesos industriales o tecnologías propuestos, así como la gestión de biomasa o la comercialización de bioproductos. Por otro lado, fomentará las interconexiones de este nuevo sector de la biorrefinería con el tejido industrial de la región mediante la creación de clústeres que a su vez buscarán sinergias con otros clústeres de energía internacionales. De esta forma se

espera favorecer la translación de conocimiento al tejido industrial, salvando el hueco existente hoy en día en la cadena de valor de la innovación dentro de esta área.

La obtención de los resultados deseados en CLAMBER daría a CLM la posibilidad de convertirse en uno de los polos de referencia de la bioeconomía, ya que no existen referentes en España y son muy escasos a nivel europeo. En lo que concierne a Europa, existen algunos ejemplos de biorrefinerías en funcionamiento que puedan ser comparables al proyecto ambicioso que se propone en CLAMBER.

2.3.2. Impacto en la región

La explotación de los resultados científico-tecnológicos obtenidos durante el desarrollo de CLAMBER impactará de forma muy positiva tanto al IRIAF, como al tejido industrial y científico de la región. Por otro lado, la consecución del objetivo último del proyecto, que es la implementación de la bioeconomía en CLM como modelo económico basado en el sector de la biorrefinería, supondría un importante cambio que repercutiría favorablemente sobre los indicadores socio-económicos de la región, además de proyectarla a nivel internacional.

A continuación se enumeran los principales beneficios socio-económicos para el IRIAF y la región de CLM:

- a) Atracción de empresas y centros de investigación nacionales e internacionales que deseen experimentar en la planta.
- b) Alternativas para la gestión y valorización de residuos así como el cultivo de tierras abandonadas.
- c) Impulsión y atracción del tejido empresarial que desee invertir en las nuevas oportunidades que ofrece la bioeconomía, mediante acceso a los resultados de los proyectos: bioprocesos y/o bioproductos.
- d) Aumento de empleo directo e indirecto así como fomento del carácter emprendedor.
- e) Innovación de sectores tradicionales, incrementando su competitividad y capacidad de concurrir con los países europeos más innovadores en el nuevo reto europeo de la bioeconomía.
- f) Creación de un sistema de cooperación público-privado eficiente, orientado al avance científico-tecnológico y motor de iniciativas de alcance europeo e internacional.
- g) Creación de un polo tecnológico en la región para activar sinergias con las empresas tanto productoras de la biomasa como usuarias de los bioproductos y fomentar la creación y la explotación de nuevos nichos de mercados. En este sentido se considera de fundamental importancia establecer una colaboración con el cluster petroquímico existente en la región.

De la misma manera, se pueden destacar ciertos impactos de carácter medioambiental, puesto que CLAMBER supone la incorporación de nuevas formas de energía renovables en CLM y en España, lo que puede contribuir al cumplimiento de los compromisos adquiridos internacionalmente relativos al cambio climático. De hecho, si las expectativas de CLAMBER en cuanto a la producción de biocombustibles se cumplieren, no solo se podría posicionar CLM entre los primeros puestos en el uso de las energías renovables sino que podría contribuir a alcanzar los porcentajes exigidos por la Directiva 2009/28/EC (20 % de combustibles producidos de forma sostenible y un 10 % en el caso del transporte), que actualmente están por debajo del umbral exigido (13,8 % y 4,7 % respectivamente).

Otros beneficios medioambientales de alcance son la contribución a la seguridad en la provisión de energía al disminuir la dependencia de combustibles fósiles y utilizar cada vez más materias renovables, y la disminución de la generación de gases de efecto invernadero al apostar por biocombustibles de segunda generación, en cuya producción se utilizan residuos que de no ser valorizados podrían emitir este tipo de gases.

3. Actualidad de la biorrefinería de I+D+i CLAMBER

La JCCM tiene como objetivo alcanzar la autofinanciación de la Biorrefinería de I+D+i CLAMBER en los próximos años mediante proyectos con financiación competitiva y contratos con empresas.

En la actualidad, en la Biorrefinería de I+D+i CLAMBER se están desarrollando dos proyectos europeos con financiación competitiva:

- El Proyecto BIOREGIO, de la convocatoria INTERREG EUROPE de 2016, con un presupuesto total de 1,3 millones de euros y que tiene un periodo de ejecución desde enero de 2017 hasta diciembre de 2021. Es un proyecto donde CLAMBER colabora con la Viceconsejería de Medio Ambiente y se basa en compartir con otras regiones europeas las políticas de gestión y las buenas prácticas en materia de valorización de la biomasa.
- El Proyecto URBIOFIN de la convocatoria JTI-BBI-2016, con un presupuesto total de 15 millones de euros y que tiene un periodo de ejecución desde junio de 2017 hasta junio de 2021. CLAMBER tiene un presupuesto de 1,3 millones de euros, trabaja con socios como Urbaser, Cimat, Imecal, Ainia, Biomasa Peninsular, Universidad de Wageningen, Novozymes, etc. y se basa en la valorización de la fracción orgánica de los RSU para obtención de productos de alto valor añadido, en concreto, dentro del CLAMBER, para la producción de PHA de cadena corta y de cadena media, ambos precursores de los bioplásticos.

Adicionalmente, se están llevando a cabo varios trabajos contratados por empresas para la investigación y escalado de procesos fermentativos de diferentes residuos.

La JCCM es consciente de la dificultad de alcanzar esa autofinanciación, así que la está apoyando de una manera notable mediante los fondos propios de la JCCM, con los que en el año 2018 ha dotado a la Biorrefinería de I+D+i CLAMBER de un presupuesto total de aproximadamente 1,4 millones de euros. Con estos presupuestos se desarrollan los proyectos ya comprometidos y se realizan nuevas inversiones con el fin de ampliar la oferta tecnológica de CLAMBER.

Referencias bibliográficas

- AGECAM (2002): «La biomasa en Castilla-La Mancha»; *Jornada IDAE CCOO*.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (2016).
- MINISTERIO DE HACIENDA Y FUNCIÓN PÚBLICA (2011): *Programa Operativo de Investigación, Desarrollo e Innovación para el beneficio de las empresas - Fondo Tecnológico 2007-2013*.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIOAMBIENTE (2016): *Anuario de Estadística*.
- NATIONAL SCIENTIFIC BOARD, DIGEST, NSF (2011): *Key Science and Engineering Indicators (2010)*.
- OECD (2011): *Research & Development Statistics*. <http://cordis.europa.eu/erawatch>.
- PROBIOGAS (2011): *Desarrollo de sistemas sostenibles de producción y uso de biogás agroindustrial en España*.
- SUBDIRECCIÓN GENERAL DE FRUTAS Y HORTALIZAS, ACEITE DE OLIVA Y VITIVINICULTURA. DIRECCIÓN GENERAL DE PRODUCCIONES Y MERCADOS AGRARIOS. MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE (2016): *Potencial de producción vitícola en España*.



HACIA UNA BIOECONOMÍA EN EXTREMADURA

Jesús Alonso Sánchez

Consejería de Economía e Infraestructuras-Junta de Extremadura

Resumen

El desarrollo de la bioeconomía en Extremadura supone una oportunidad de generación de actividad económica, empleo y puesta en valor de los conocimientos y recursos en investigación e innovación de la región. El desarrollo de nuevas actividades empresariales en los sectores tradicionales, su diversificación y la creación de una nueva arquitectura empresarial en base a los sectores de la bioeconomía fortalecerá, sin dudas, las capacidades empresariales. La retención de talento regional y la sostenibilidad del medio rural y de las ciudades podrán verse favorecidas por la generación de nuevos puestos de trabajo cualificados.

A la par que impulsar el crecimiento socio-económico de la región, con el desarrollo en bioeconomía Extremadura asume y manifiesta su compromiso para concertar su modelo económico con los retos internacionales en la lucha contra el cambio climático y el desafío de alcanzar una alimentación saludable, nutritiva y sostenible para sus ciudadanos y el conjunto de la humanidad. En el marco de su «Estrategia de Economía Verde y Economía Circular», quiere desarrollar su propia «Estrategia de Bioeconomía», que recogiendo la singularidad social, territorial y estructural de la región, optimice su desarrollo agroalimentario, forestal, biotecnológico y energético en base a la generación de conocimiento de su sistema de ciencia, tecnología e innovación y su tejido productivo. Todo ello, con el fin ulterior de contribuir a su desarrollo socio-económico, revitalizar de forma activa su población y acometer con esperanza un futuro de una región que no precisa de transformación sostenible, puesto que en su desarrollo siempre lo ha sido.

Abstract

Bioeconomy development in Extremadura is an opportunity to generate economic activity and employment, adding value to the research and innovation knowledge and resources in the region. The development of new business activities in traditional sectors, their diversification, and the creation of a new business architecture based on the bioeconomy sectors will undoubtedly strengthen the capacity for entrepreneurship. The retention of regional talent and the sustainability of both the rural environment and cities will be favoured by the generation of new jobs for a qualified workforce.

At the same time as promoting socioeconomic growth in the region, with the development of bioeconomy Extremadura accepts and expresses its commitment to establishing its economic model according to the international challenges in the fight against climate change and the challenge of achieving a healthy, nutritious, and sustainable diet not only for its citizens, but the whole of humanity. As part of its "Green Economy and Circular Economy Strategy", the region wants to develop its own "Bioeconomy Strategy", that by including the social, territorial, and structural uniqueness of the region, optimises the development of its food industry, forestry, biotechnology and energy sectors, based on generating knowledge in science, technology and innovation, and its productive fabric. This is all undertaken with the ultimate goal of contributing to its economic and social development, actively revitalising its population, and looking forward to the future in a region that does not need sustainable transformation, as its development has always been thus.

1. La bioeconomía en el modelo económico de Extremadura

En abril de 2010, la Asamblea de Extremadura aprobó, por unanimidad, el «Pacto Social y Político de Reformas para Extremadura»¹. Se trata de un documento base firmados por sindicatos y patronal que persigue modificar la estructura económica de la región y sentar las bases de la nueva economía reorientando el rumbo de la región, incidiendo en los sistemas productivos, el mercado laboral, la educación, la gestión de los recursos naturales y la estructura

¹ http://www.extremadura.ccoo.es/comunes/recursos/10/doc16670_Pacto_Politico_y_Social_de_Reformas_para_Extremadura.pdf.

administrativa. En su preámbulo, el Pacto ya pone de manifiesto los recursos naturales vitales de Extremadura que son imprescindibles para el desarrollo de la nueva economía. De forma explícita, declara la oportunidad que ofrece la bioeconomía a las empresas extremeñas para el desarrollo de un amplio rango de negocios, aplicando innovaciones basadas en la conversión de diferentes tipos de biomasa en diversas fibras y compuestos químicos, y en innovaciones basadas en procesos biológicos.

1.1. La bioeconomía en el marco de la Estrategia de Investigación e Innovación para la Especialización Inteligente de Extremadura

Durante 2013, la región extremeña elaboró, pactó y aprobó la «Estrategia de Investigación e Innovación para la Especialización Inteligente de Extremadura» (RIS3 de Extremadura²), que surge como condición *ex ante* del Programa Operativo FEDER 2014-2020, en la que se comunica a la Unión Europea las prioridades, áreas, y sectores en las que desea especializarse de manera inteligente. El patrón de «Especialización Inteligente de Extremadura» (ver Figura 1) sintetiza un proceso de priorización en torno a los activos de la región, sus recursos en I+D+i, sus retos, ventajas competitivas y potencial de excelencia sobre la transformación económica que se pretende articular. Esta visión consensuada busca posicionar Extremadura como un espacio para la innovación con dos prioridades fundamentales a las que debe contribuir la actividad científico tecnológica del tejido socio económico regional en el horizonte 2020, «la gestión sostenible de los recursos naturales y el cuidado del medioambiente mediante un modelo económico bajo en carbono» y «el desarrollo de tecnologías para la calidad de vida, que transformen las características geodemográficas de la región en fuentes de oportunidad», lo que evidencia implícitamente la incorporación de la bioeconomía en la región.

El concepto de bioeconomía lo podemos encontrar de manera implícita en los diferentes capítulos y/o apartados de la RIS3 de Extremadura, por ejemplo en su «Diagnóstico Regional», donde se menciona de manera destacada la biodiversidad medioambiental, la capacidad de la región para un desarrollo socioeconómico que asegure la sostenibilidad ambiental, con especial potencialidad en los sectores agroindustrial y de energías renovables. Del mismo modo, el análisis DAFO pone de manifiesto el potencial de la bioeconomía en el conjunto de fortalezas y oportunidades identificadas. Así, al menos seis de las diez fortalezas identificadas y seis de las doce oportunidades se asocian fácilmente a la bioeconomía (Tabla 1).

Asimismo, las cinco áreas de excelencia identificadas en el marco de la RIS3, son susceptibles de ser abordadas desde la perspectiva de la bioeconomía. Para ello, es preciso analizar los dominios científico-tecnológicos asociados a las áreas de especialización y asegurar la pertinencia de todos ellos en relación al concepto de bioeconomía.

² <http://www.fundecyt-pctex.es/estrategia/ris3extremadura.pdf>.

Figura 1. Patrón de Especialización Inteligente de Extremadura



Fuente: Estrategia RIS3 Extremadura. Junta de Extremadura.

Tabla 1. Fortalezas y oportunidades identificadas en la RIS3 Extremadura relacionadas con bioeconomía

FORTALEZAS
1. Alta calidad de materias primas y productos regionales.
2. Condiciones climatológicas favorables para el desarrollo de ciertas actividades económicas como: turismo y producción de energías renovables.
3. Rico patrimonio natural y cultural.
4. Potencial de la región en sectores con un amplio recorrido para la innovación: sobre todo agroalimentación, energías renovables, gestión de recursos naturales y TIC.
5. Liderazgo nacional en la producción de electricidad con tecnología solar y liderazgo europeo en la producción de algunos productos agrarios, como tomate, pimentón y tabaco.
6. Imagen exterior asociada a un concepto amplio de calidad de vida y a productos agroalimentarios de alta calidad.
OPORTUNIDADES
1. Potencial innovador de sectores tradicionales.
2. Alimentación, energía y medioambiente son sectores en tendencia, por su conexión con los grandes retos del planeta, y por tanto, con grandes posibilidades de innovación basadas en recursos y capacidades locales.
3. Demanda por parte de países desarrollados alineada con la oferta agroindustrial y turística de Extremadura.
4. Oportunidad de conectar nuestro sector clave, el agroalimentario, con energía, alimentación, salud y ocio y tiempo libre.
5. Gran potencial de la especialización en gran animal: como alimento, como paciente o como modelo.
6. La nueva Estrategia Europa 2020 primará el campo de las energías renovables.

Fuente: Estrategia RIS3 Extremadura. Junta de Extremadura.

1.2. La bioeconomía en el marco de la Estrategia de Economía Verde y Circular

En julio de 2016, el presidente de la Junta de Extremadura, en el Debate del Estado de la Región, anunció la predisposición a elaborar una «Estrategia de Economía Verde y Circular»³ (EEVC). El marco de impulso a la misma fue coordinado entre las diferentes Consejerías y sometido a un proceso de concertación social por el Consejo de Gobierno. Sindicatos y patronal (UGT, CCOO y la CREEX) firmaron con la Junta de Extremadura el acuerdo para la construcción de la estrategia y su adhesión a la misma. El 6 de abril de 2017, la Asamblea de Extremadura celebró un debate monográfico sobre la EECV Extremadura 2030, donde se aprobaron más de trescientas propuestas para incorporar al proceso de elaboración de la estrategia, con aportaciones de los diferentes grupos políticos con representación.

Comenzó así un proceso informativo, participativo y de adhesión a la EEVC Extremadura 2030 destinado al resto de instituciones, asociaciones, colectivos, empresas y ciudadanía en general. La Federación de Municipios y Provincias de Extremadura (FEMPEX), las diputaciones provinciales, la Universidad de Extremadura, unos ochenta ayuntamientos, veinticuatro mancomunidades y los grupos de acción local se han adherido formalmente a la EEVC. Hasta diciembre de 2017 más de cien asociaciones, ochenta y cinco centros educativos, ciento diez empresas y cerca de seiscientos ciudadanos se han comprometido con la misma, convirtiéndose en impulsores de la EECV Extremadura 2030 en la región.

La Junta de Extremadura ha decidido así emprender la transición singular hacia un modelo productivo regional capaz de generar riqueza y empleo en base a sus fortalezas en recursos naturales. Es una acción comprometida con los retos globales de cambio climático, pérdida de biodiversidad, desertificación, falta de agua, inseguridad alimentaria, fuentes alternativas de producción de energía, sobreexplotación de recursos, contaminación y residuos, amenaza de guerras, injusticia, desigualdades o dificultad de acceso a la educación, entre otros. Con la EEVC, Extremadura se hace referente y se alinea con el conjunto de iniciativas internacionales como son los «Objetivos de Desarrollo Sostenibles» y el «Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente» (PNUMA), las estrategias europeas sobre «Economía Circular y Bioeconomía», el proyecto EUROPA 2030, la estrategia EUROPA 2020 y el programa HORIZONTE 2020. A nivel nacional se alinea con la actual «Estrategia Española de Bioeconomía» y las distintas actuaciones legislativas del «Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos y el Programa Estatal de Prevención de Residuos 2014-2020».

La EEVC orienta así el desarrollo sostenible de Extremadura en el horizonte 2030, alineando el conocimiento y los recursos naturales, materiales y humanos en base al progreso de una sociedad y una economía verde y circular. Una Extremadura donde los recursos naturales supongan una fuente permanente de nuevas oportunidades para la población extremeña mediante la puesta en valor de forma sostenible de sus recursos naturales, la generación de iniciativas empresariales verdes y el emprendimiento y nuevos empleos en base a la producción respetuosa de bienes y servicios.

³ http://extremadura2030.com/wp-content/uploads/2017/03/marco_070617_vf_sin-anexos.pdf.

Para ello, la Estrategia coordina de forma transversal las diferentes políticas públicas y áreas de gobierno de la Junta de Extremadura, recogiendo veintiséis planes y estrategias, actualmente en vigor, relacionados con el desarrollo socioeconómico, el empleo y la industria, que conforman las fuentes y referencias regionales para el desarrollo de la EEVC Extremadura 2030.

Con los principios expuestos, no es difícil imaginar el encaje de la bioeconomía en la EEVC. Así, dentro de sus objetivos estratégicos, la EEVC Extremadura 2030 hace una espacial referencia a la bioeconomía al apostar por convertir Extremadura en un laboratorio internacional de referencia en investigación e innovación en torno a la economía verde, la bioeconomía, la economía circular y la lucha contra el cambio climático. Del mismo modo, dentro de los objetivos funcionales de la EEVC Extremadura 2030, se persigue fomentar la bioeconomía, impulsando la competencia e internacionalización de las empresas que trabajan en el ámbito de los recursos de origen biológico incorporando a la bioeconomía como una parte esencial de la actividad económica regional.

2. El entorno socioeconómico para la bioeconomía

Con una superficie de 41.658 km² y una densidad de población de 26,1 habitantes/km², los 1.087.778 extremeños representan el 2,3 % de la población nacional (INE, 2016)⁴. Desde el año 2011, la población extremeña presenta una tendencia decreciente. La mitad de los habitantes de Extremadura están empadronados en municipios menores de 30.000 habitantes, un alto porcentaje en comparación con la media nacional del 16,7 %, el 9,42 % de los habitantes residen en municipios con población inferior a los 1.000 habitantes y el 28,03 % de la población en municipios de más de 50.000 habitantes⁵.

En cuanto al mercado de trabajo, a finales de 2017 fueron 369.300 las personas ocupadas en Extremadura, 218.100 hombres y 151.200 mujeres. Al analizar la ocupación por sectores económicos (Tabla 2) queda de manifiesto el gran peso de la agricultura, que con cerca del 14 % triplica el porcentaje de este sector a nivel nacional. Durante los últimos seis años se ha producido un descenso continuado del desempleo registrado, desde las 135.398 personas en 2011 hasta las 123.900 personas en 2017, manteniendo la región aún una elevada tasa de desempleo del 25,12 %⁶.

⁴ INE (2016).

⁵ PECERO, PÉREZ, VELASCO, NAVARRO y FERNÁNDEZ (2017).

⁶ INE (2017).

Tabla 2. Ocupación por sectores económicos en Extremadura y España en 2017

Sectores	Ocupados (miles)		Ocupados (%)	
	Extremadura	Nacional	Extremadura	Nacional
Agricultura	51,2	820,7	13,86	4,32
Industria	32,7	2.711,3	8,85	14,27
Construcción	22,6	1.143,7	6,12	6,02
Servicios	262,8	14.322,7	71,16	75,39

Fuente: *Encuesta de Población Activa*. INE.

En el año 2016, el Producto Interior Bruto (PIB) a precios de mercado en Extremadura fue de 17.902 millones de euros (M€), con un tasa de variación interanual del 2,5 % y una estructura porcentual del 1,6 % del PIB total del estado (Tabla 3).

Tabla 3. Producto Interior Bruto a precio de mercados, empleo y remuneración por sectores de actividad

	PIB (x1000€)	PIB (%)	Empleo (x1000)	Remuneración (x1000€)
Agricultura, ganadería, silvicultura y pesca	1.323.124	7,39	23,4	231.161
Industrias extractivas; industria manufacturera; suministro de energía eléctrica, gas, vapor y aire acondicionado; suministro de agua, actividades de saneamiento, gestión de residuos y descontaminación	2.288.944	12,79	29,4	886.209
<i>De las cuales: industria manufacturera</i>	<i>1.179.992</i>	<i>6,59</i>	<i>23,4</i>	<i>631.514</i>
Construcción	1.221.475	6,82	22,7	560.313
Comercio al por mayor y al por menor; reparación de vehículos de motor y motocicletas; transporte y almacenamiento; hostelería	2.845.078	15,89	68,7	1.549.875
Información y comunicaciones	298.931	1,67	3,1	99.862
Actividades financieras y de seguros	613.042	3,42	5,7	320.223
Actividades inmobiliarias	1.708.918	9,55	1,0	23.058
Actividades profesionales, científicas y técnicas; actividades administrativas y servicios auxiliares	703.883	3,93	22,1	500.466
Administración pública y defensa; seguridad social obligatoria; educación; actividades sanitarias y de servicios sociales	4.633.111	25,88	93,7	3.702.092
Actividades artísticas, recreativas y de entretenimiento; reparación de artículos de uso doméstico y otros servicios	607.400	3,39	20,1	382.213
Valor añadido bruto total	16.243.906	90,74		
Impuestos netos sobre los productos	1.658.320	9,26		
Total	17.902.226	100,00	289,9	8.255.472

Fuente: *Encuesta de Población Activa*. INE.

En el trienio 2014-2016, la agricultura ganadería y silvicultura han ganado terreno como actividad económica, pasando de representar el 6,3 % en 2014 al 7,4 % del PIB regional, muy superior al 2,3 % nacional. Por otro lado, las industrias manufactureras se mantienen estables en el 6,6 % del PIB. Estos altos porcentajes están en consonancia con la distribución de la población en el territorio.

En 2016, la superficie agraria útil en Extremadura alcanzaba 2.425.122 ha en 61.227 explotaciones (INE, 2016)⁷, de las cuales el 56,7 % tienen una superficie entre 1 y 10 ha. De las tierras laboradas (954.350 ha), el 67,2 % son cultivos herbáceos, el 3,6 % corresponden a explotaciones frutales, el 22,5 % están dedicadas a explotaciones olivareras y el 0,7 % a viñedos. Pero además, la región cuenta con una capacidad hidráulica de 14.000 hm³, con una agricultura en regadío de 200.625 ha (INE, 2016)⁷ que representan el 26,5 % de las explotaciones, siendo líderes en la producción de frutales, como la cereza y la ciruela, el arroz o el tomate de industria.

Según el anuario de alimentos de MERCASA⁸ el valor de la producción final agraria extremeña en 2016 fue de 2.200 millones de euros contribuyendo en 1.968 millones de euros la producción final vegetal y el 852 millones de euros la producción final ganadera.

El tomate de industria, en 2016, superó la cifra de 1,7 millones de toneladas, siendo la principal producción agraria de la región. Le siguieron las producciones de maíz con 584.000 toneladas, arroz con 167.000 toneladas, trigo con 159.000 toneladas y cebada y alfalfa, con aproximadamente 100.000 toneladas cada una. Las principales producciones frutales fueron la ciruela con 92.000 toneladas, cerezas con 25.000 toneladas y melones con 24.500 toneladas. Las producciones de aceitunas de mesa alcanzaron las 93.600 toneladas y la producción de aceite de oliva fue de 44.100 toneladas. La producción de vino y mostos en 2016 fue de 3.727.000 hectolitros.

En cuanto a ganadería, Extremadura es la comunidad autónoma con mayor número de cabezas de ganado ovino, alcanzando en 2016 la cifra de 3,5 millones de ejemplares, que representan el 21,92 % de la cabaña nacional⁹. A finales de 2016 la producción de corderos alcanzaba los 817.143 ejemplares, las ovejas de aptitud cárnica 2.113.272 ejemplares y las ovejas de orientación lechera 141.363 ejemplares. En cuanto a ganado caprino, Extremadura ocupa la tercera posición, tras Andalucía y Castilla-La Mancha, con 298.362 cabezas que representan el 9,66 % de la cabaña caprina nacional. A finales de 2016, la producción de chivos ascendía a 58.237 cabezas, las cabras con aptitud lechera 147.161 cabezas y las cabras con aptitud cárnica 53.278 cabezas.

La cabaña ganadera bovina extremeña representa el 13,2 % de la cabaña nacional¹⁰. A finales de 2016, 833.250 ejemplares fueron registrados en la encuesta de ganados bovino del MAPAMA, siendo aproximadamente 200.000 ejemplares los animales menores de doce

⁷ INE (2016).

⁸ MERCASA (2017).

⁹ MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE (2016).

¹⁰ MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE (2016).

meses destinados a sacrificio, 58.020 hembras entre uno y dos años destinadas a reposición, 3.658 hembras mayores de dos años destinadas al ordeño y 426.542 hembras mayores de dos años de orientación cárnica.

A finales de 2016, la cabaña de porcino en Extremadura ascendía a 1.438.088 cabezas: 492.134 lechones, 189.733 cerdos de 20 a 49 kg, 609.598 cerdos de cebo y 137.442 cerdas reproductoras¹¹. Si bien a nivel nacional, el censo de cerdos ibéricos en 2016 suponía aproximadamente el 10,8 % del censo total del porcino, en Extremadura representa el 96 % de su cabaña ganadera de porcino y el 43,7 % de la cabaña de porcino ibérico nacional, siendo líderes en la producción de estos ejemplares.

Durante al año 2016, se sacrificaron en Extremadura 1.060.000 cabezas de ganado bovino, ovino, caprino y porcino con una producción de carne total de 110.653 toneladas de estas especies. Fueron también sacrificadas más de 40 millones de aves de corral con una producción superior a las 75.000 toneladas (MAPAMA, 2016)¹². La producción láctea en 2016 fue de 29,2 millones de litros de leche de vaca y 37,8 millones de litros de leche de cabra y ovejas, destinadas principalmente a la elaboración de quesos (MERCASA, 2017)¹³.

En 2016, un total de 2.631 productores agrícolas tenían inscritas superficies ecológicas de cultivos en Extremadura, alcanzando la cifra de 81.788 ha: 9004 hectáreas de tierras arables, 40.299 ha de pastos permanentes y 32.486 ha de cultivos permanentes. Son de resaltar las 39.572 ha de dehesa y las 28.282 ha de olivar. En ganadería, 165 productores ganaderos y 102 explotaciones estaban registradas, destacando 57 explotaciones de ovino, 14 de caprino y 18 explotaciones de caballar. Así mismo, estaban inscritas 106 industrias relacionadas con la producción vegetal y quince industrias relacionadas con la producción animal, destacando 43 almazaras, 33 industrias de elaboración y conservación de frutas y hortalizas y 18 industrias de elaboración de otros productos alimenticios de origen vegetal¹⁴.

En cuanto a los cultivos para la producción de energía renovables, en al año 2016 estaban censadas 28 explotaciones con superficies entre 50 a 100 ha, con una superficie total de 1.412 ha. Según la Agencia Extremeña de la Energía (2016), en Extremadura se puede extraer de bosques, dehesas y montes 663.400 toneladas al año de biomasa forestal verde aprovechable, y dispone de un potencial de 1.653.929 toneladas al año de residuos procedentes de biomasa de origen agrícola. En la región, la superficie disponible para cultivos energéticos de origen leñoso y herbáceo podría alcanzar 1,8 millones de toneladas anuales. Así, el potencial existente de biomasa en Extremadura excede los 4 millones de toneladas anuales. Sin embargo, En 2015, la utilización de biomasa en Extremadura fue de aproximadamente 370.000 toneladas, procedentes en un 45 % de otras comunidades autónomas, para una producción de 572 GWh; 257 GWh para usos térmicos en la industria y 288 GWh para usos eléctricos. El sector de la biomasa en la región está en expansión debido al incremento de su competitividad en relación a

¹¹ MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE (2016).

¹² MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE (2016).

¹³ MERCASA (2017).

¹⁴ CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RURAL, POLÍTICAS AGRARIAS Y TERRITORIO. AGRICULTURA ECOLÓGICA (2016).

los combustibles fósiles. Para su desarrollo es preciso incrementar la producción de biomasa de calidad en la región, la capacidad logística para el aprovechamiento de los recursos estacionales y mejorar los canales de recolección, transporte y distribución de los recursos autóctonos¹⁵.

Extremadura posee un rico patrimonio natural de gran valor ecológico y diversidad biológica. El 30,6 % de su territorio está bajo algún tipo de protección ambiental dentro de las denominadas áreas protegidas (Tabla 4), acaparando la mayor superficie las denominadas «Zonas de Especial Protección de Aves» (ZEPA), siendo un destino turístico para los amantes de la ornitología y naturaleza en general

Tabla 4. Distribución de las áreas protegidas en Extremadura

	Superficie (ha)	Porcentaje
Extremadura	4.168.021,60	100,0
Zonas de Especial Protección de Aves (ZEPA)	1.089.232,90	26,1
Lugares de Importancia Comunitaria (LIC)	828.949,17	19,9
Espacios Naturales Protegidos (ENP)	314.110,89	7,5
Red Natura 2000 (ZEPA + LIC)	1.257.787,05	30,2
Áreas Protegidas (ZEPA + LIC + ENP)	1.276.288,09	30,6

Fuente: Dirección General de Medio Ambiente. Junta de Extremadura.

3. Biotecnología e incubadoras de alta tecnología

Con un 0,2 % de la actividad nacional en biotecnología y una ejecución de 2,5 M€, la actividad biotecnológica en Extremadura es la más baja de todas las comunidades autónomas¹⁶. Esta actividad está dividida a partes iguales entre empresas y sector público. No deja de sorprender la baja utilización de los procesos biotecnológicos en esta comunidad autónoma, a pesar de la alta generación en este campo por los centros de investigación y la gran cantidad de activos en materias primas procedentes de recursos forestales y agroindustriales que podrían revalorizar sus producciones. Por ello, desde la administración regional se está impulsando un proyecto de creación de las llamadas «incubadoras de alta tecnología» diseñadas para el fomento de la innovación y la transferencia de la tecnología a las microempresas y que se concibe como un instrumento fundamental para promover el crecimiento inteligente, sostenible e integrador que la Unión Europea persigue para los próximos años. El proyecto integra un conjunto de líneas de acción destinadas a conseguir un objetivo único: la contribución al desarrollo del tejido productivo regional, a través del incremento de la tasa de supervivencia de las microempresas, motivada por la incorporación de la I+D+i en su actividad habitual.

¹⁵ AGENCIA EXTREMEÑA DE LA ENERGÍA (2016).

¹⁶ INE (2016).

Así, durante el año 2108 la administración regional pondrá en funcionamiento dos de estas incubadoras de alta tecnología que se sumarán al conjunto de actuaciones de incubación realizadas por el Parque Científico-Tecnológico de Extremadura.

La primera de ellas, ubicada en la ciudad de Mérida estará enfocada hacia proyectos de bioeconomía y economía circular. Su objetivo se orientará hacia la incubación de proyectos empresariales orientados al aprovechamiento biotecnológico de la biomasa de productos agrarios y forestales y subproductos agroalimentarios a partir de bioprocesos para la generación de productos de alto interés económico, no energético.

La incubadora contará con infraestructura tecnológica que permita el desarrollo, escalado y prototipado de nuevos ingredientes, nutracéuticos y alimentos funcionales relacionados con la cadena de valor de la agroindustria. Para la incubación de las empresas se desarrollará una metodología de incubación y aceleración de proyectos empresariales, proporcionando una completa oferta de servicios avanzados que permitan, de forma eficaz, crear y llevar a mercado nuevos productos y procesos de alto valor añadido. Sustentada por el ecosistema de los centros de investigación y una red de empresas que traccionen e inviertan en las iniciativas incubadas, los proyectos tendrán un acompañamiento de la administración regional favoreciendo la colaboración público-privadas para mejorar la eficiencia del modelo de atracción, incubación y aceleración de iniciativas emprendedoras.

La segunda incubadora estará en Cáceres, en el ámbito de las Ciencias de la Salud, y se basará en la coordinación de las infraestructuras de investigación y servicios preexistentes en la ciudad de Cáceres (Centro de Cirugía de Mínima Invasión, Facultad de Veterinaria, Hospital), de forma que las empresas de base tecnológica relacionadas con estos sectores, puedan desarrollar sus actividades de I+D+i, así como la producción de bienes y servicios. Está previsto que la incubadora sea gestionada por un ente público-privado participado por Ciudad de la Salud y fondos privados de capital-riesgo.

4. La ciencia y la tecnología como pilar de la bioeconomía extremeña

Extremadura cuenta con una importante capacidad de generación de conocimiento y tecnologías en el ámbito de la bioeconomía que radica principalmente en su Universidad, el Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura (CICYTEX), el Centro Tecnológico Agroalimentario de Extremadura (CTAEX) y el resto de centros tecnológicos y de investigación, a los que se suman las empresas de la región que trabajan en este ámbito y que conforman el Sistema Extremeño de Ciencia, Tecnología e Innovación (SECTI).

El 40,31 % de las prioridades científico tecnológicas activas en el SECTI están relacionadas con actividades de los ámbitos anteriores. Por dominios científico-tecnológicos, los de más peso específico en los ámbitos de la economía verde, la bioeconomía y la economía circular

son química, bioquímica y biotecnología, agronomía y ganadería, y biología y ecología, que concentran respectivamente el 67,3, 42,3 y 25 % de las prioridades científico tecnológicas relacionadas en el ámbito en cuestión. Por otra parte, los dominios de ecodiseño y nuevos materiales y agronomía, biología y ecología presentan una importante intensificación en bioeconomía y economía circular, ya que las prioridades científico tecnológicas activas relacionadas con dicho ámbito suponen el 66,7 y 54,2 % respectivamente, en relación con la totalidad de prioridades científico técnicas encuadradas en estos dominios.

Cerca de 800 personas ejercen actividad de investigación y desarrollo tecnológico en las diferentes áreas de biotecnología en los sectores público y privado en Extremadura (Tabla 5), destacando el área agroindustrial y la agricultura y ganadería. El sector público representa el 66 % de las actividades en este ámbito, frente al 34 % del sector privado. La alta generación de conocimiento de los grupos de investigación que componen las distintas áreas de la bioeconomía y la fortalece de los sectores empresariales en este ámbito ofrece excelentes oportunidades para el desarrollo de colaboraciones público-privadas, generación de nuevas actividades económicas, empleo altamente cualificado generación de empleo y diversificación de las actividades empresariales.

Tabla 5. Por áreas de la bioeconomía: grupos de investigación y personal investigador en los sectores público y privado dedicados a actividades de I+D

Sector Área	Público			Privado*	Total
	Grupos	Personal	Investigadores	Personal	Personal
Agricultura y ganadería	10	105	75	53	158
Biocombustibles	2	27	20	5	32
Derivados farmacia y nutrición	6	75	53	15	90
Energía renovable	2	26	19	58	84
Industria alimentaria	11	111	84	90	201
Otros servicios rurales	11	99	74	25	124
Productos forestales	3	42	30	13	55
Química industrial	4	32	24	8	40
Total	49	517	379	267	784

* Estimación en base a las convocatorias de I+D empresarial.

El SECTI está articulado en la «Ley de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación de Extremadura» 10/2010, de 16 de noviembre, y conformado por el conjunto de entidades públicas y privadas que interactúan para generar, promover, desarrollar y aprovechar actividades de I+D+i en el ámbito de la comunidad autónoma.

En la misma Ley, se establece el Plan Regional de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación, como el instrumento de planificación, gestión y ejecución de la Junta de Extremadura en materia de I+D+i. En el año 2017, mediante Decreto 91/2017 de 20 de

junio, se aprobó el VI Plan Regional de I+D+i 2017-2020 que ahonda en el fortalecimiento del SECTI, la cultura científica y su convergencia con el conjunto del Estado a partir de la excelencia investigadora, la intensificación de recursos para la formación y estabilización del personal dedicado a la investigación y el desarrollo de una estructura empresarial competitiva estructurada a partir de la I+D+i en un sistema racional y sostenible en el marco de la Ley de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación en Extremadura.

Dentro de las líneas estratégicas y prioritarias de interés regional, el VI Plan identifica la bioeconomía dentro de la línea estratégica asociada al modelo de desarrollo económico de Extremadura, en base a la capacidad de generación de conocimiento en el ámbito de la bioeconomía y la economía circular, así como por la necesidad de realizar esfuerzos para la generación de conocimiento vinculado con la producción y transformación de productos de origen biológico, tanto en los sectores tradicionales ya asentados y desarrollados como en aquellos nuevos que surgen para plantear alternativas a los derivados del petróleo y que permitirán la creación de puestos de trabajo asociados a las nuevas cadena de valor.

Así se establecen como sectores de especial atención en este ámbito el sector agroalimentario. Este, debe estar integrado por las actividades de producción primaria de la agricultura y ganadería y las actividades de elaboración y transformación que contribuyan a incrementar la eficiencia y la competitividad del conjunto del sistema productivo en base a la intensificación de las producciones y la incorporación de la digitalización en los procesos, a la par que debe garantizar siempre la seguridad alimentaria, cualidades nutricionales de los alimentos y el uso sostenible de los recursos y la biodiversidad de los ecosistemas.

En el sector forestal da especial relevancia a las actividades destinadas a la gestión sostenible de los recursos forestales que contribuyan al equilibrio entre la producción de biomasa y la preservación de la biodiversidad, favoreciendo el desarrollo de actividades económicas relacionadas con la transformación de la madera, el corcho y la obtención de bioenergía y bioproductos a la par que preservan el patrimonio natural de los ecosistemas, especialmente la dehesa, la gestión de espacios protegidos o la regeneración de la biodiversidad autóctona que favorecen el turismo de naturaleza o el agroturismo.

El sector biotecnológico pretende situar a la bioeconomía en el ámbito de la economía circular. Para ello busca el incremento de recursos renovables procedentes de residuos, subproductos y derivados de los sectores agroalimentario y forestal que serán transformados con el desarrollo de bioprocesos en bioproductos de alto valor añadido, incidiendo tanto en sectores tradicionales como el agroalimentario y forestal, como en nuevos sectores que puedan desarrollarse, como el biotecnológico, bioenergía, biomateriales o la biomedicina.

En el sector de la energía, mediante los procesos de producción y transformación de la biomasa, se busca contribuir a limitar la dependencia de los combustibles fósiles, especialmente del petróleo, mediante la utilización de biomasa renovable utilizada para la obtención de bioproductos y procesos bioenergéticos. El objetivo será la generación de bioproductos alternativos a los derivados del petróleo y la generación eléctrica, térmica y de biocarburantes.

Para dar respuesta a su desarrollo, el VI Plan Regional de I+D+i 2017-2020 establece un conjunto de recursos públicos para favorecer e impulsar los procesos de investigación e innovación en torno a la bioeconomía, economía verde y circular y sus actividades, potenciando los dominios científicos y tecnológicos asociados mediante el impulso de la I+D empresarial y el fortalecimiento de sus grupos de investigación.

5. Estrategia regional de bioeconomía

La Unión Europea publicó su «Estrategia de Bioeconomía» en 2012 y España ha diseñado su propia estrategia 2016-2030, con el fin de facilitar el desarrollo de la bioeconomía sostenible y tecnologías asociadas en el país con el horizonte puesto en el año 2030, manteniendo la producción de alimentos y, a la vez, desarrollando y posicionando en el mercado una amplia gama de productos de alto valor añadido a partir de materias primas de origen renovable.

Implicados de forma activa con los objetivos de ambas estrategias, europea y española, y dentro del marco de desarrollo de la «Estrategia Extremadura 2030», durante el año 2017 la región inició el diseño de una «Estrategia Extremeña de Bioeconomía» que, recogiendo la singularidad social, territorial y estructural de la región, pretende optimizar su desarrollo agroalimentario, forestal, biotecnológico y energético en base a sus agentes de ciencia y tecnología y su tejido productivo.

Así, la bioeconomía se presenta como un conjunto de actividades económicas que utilizará como elementos fundamentales los recursos de origen biológico para producir alimentos y energía de una forma sostenible que sirvan de soporte para el conjunto del sistema económico. Estas actividades, al ligarse estrechamente a la «Estrategia de Economía Verde y Circular», conllevará aparejadas tanto el desarrollo de los entornos rurales, donde los sectores agroalimentario y forestal tienen un papel fundamental, como los entornos urbanos industrializados capaces de dar respuestas a las necesidades tecnológicas y de personal cualificado para el desarrollo de nuevas actividades empresariales.

La Comunidad de Extremadura, con su puesta en marcha y desarrollo, manifiesta y asume un elevado compromiso para concertar un modelo económico sostenible con los retos internacionales para la remisión de los efectos del cambio climático y el desafío de alcanzar una alimentación saludable expresado en el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS2), denominado «Hambre, seguridad alimentaria, mejora de la nutrición y agricultura sostenible», a la par que se compromete con el impulso al crecimiento socioeconómico de la región.

La estrategia estará fundamentada y fortalecerá la RIS3 de Extremadura, con el fin de promover un crecimiento inteligente, sostenible e integrador en la región a través de la priorización en torno a sus activos, retos, ventajas competitivas y el potencial de excelencia que tiene Extremadura respecto a otras regiones europeas. Especialmente se pretenden atender las relacionadas con la gestión sostenible de los recursos naturales y la protección del medioam-

biente, mediante un modelo económico bajo en carbono y la aplicación de las tecnologías para la calidad de vida, que transformen las características geodemográficas de la región en fuentes de oportunidad.

La «Estrategia Extremeña de Bioeconomía» será diseñada con la clara voluntad de promover la cooperación en todos los ámbitos y en un marco amplio, posibilitando la integración de las diferentes estrategias territoriales o locales, facilitando la coordinación y promoviendo el desarrollo de la bioeconomía tanto desde la perspectiva económica como social.

La elaboración de esta nueva estrategia se realizará en base al diálogo social, en el marco de un proceso participativo que implicará a los diferentes órganos de la administración regional, la Universidad de Extremadura, los centros tecnológicos y de investigación, sectores y organizaciones empresariales y sociales. Para su elaboración y redacción deberán ser consideradas las opiniones de los investigadores y las personas expertas en materia de agricultura, industria, tecnología y medioambiente, así como representantes del sector agrario, ganadero, forestal, agroalimentario, tecnológico, industrial y energético, organizaciones de consumidores y ambientalistas que puedan contribuir a un marco estratégico y ámbito de actuación acordes a la singularidad de la región.

La Estrategia Regional de Bioeconomía deberá establecer las grandes líneas de actuación a desarrollar en los sectores tradicionales de nuestra economía, así como servir de impulso para el desarrollo de una nueva arquitectura empresarial que surja de los retos socio-económico de la propia estrategia.

El ámbito de actuación de la estrategia deberá estar conformado por todas las actividades que puedan contribuir al desarrollo económico y que utilicen recursos de origen biológico para la generación de alimentos, productos forestales, bioproductos y bioenergía de manera eficiente, sostenible y respetuosa con el medioambiente. Aunque existen sectores preponderantes en el marco de esta estrategia, su desarrollo actuará a buen seguro sobre el conjunto de sectores económicos de la región. La bioeconomía y determinadas tecnologías innovadoras, aplicadas a los sectores productivos de origen biológico, se conciben como un instrumento que puede contribuir a la mitigación del cambio climático y a una nutrición saludable basada en la producción de más alimentos a la vez que se reduce el desperdicio alimentario. En este sentido, los avances que se están produciendo en el ámbito de las ciencias agrarias, alimentarias, la biotecnología y la química, y los que seguirán incorporándose en los próximos años con el soporte tecnológico e innovador de otros ejes como la ingeniería, la organización, las tecnologías de la información y la comunicación o la logística, pueden mejorar la capacidad de los sectores productivos de Extremadura.

Durante la elaboración de la estrategia se definirán los objetivos estratégicos para el desarrollo de la bioeconomía regional para poder alcanzar una mayor competitividad de nuestro tejido productivo en base a la generación de conocimiento y desarrollos científicos y tecnológicos. Del mismo modo, tras un análisis de situación del ecosistema en bioeconomía

se deberán establecer las medidas para su desarrollo, los recursos disponibles y necesarios para su ejecución y la evaluación de su impacto en la economía regional.

Tomando como referencia los marcos de la estrategia europea y española de bioeconomía, la estrategia extremeña priorizará mantener la bioeconomía como una parte esencial de nuestra actividad económica regional, adaptando a sus singularidades económicas y territoriales determinados objetivos hasta convertirlos en operativos:

1. Generar actividad económica, impulsando la bioeconomía regional a partir de consorcios público-privados en investigación e innovación que generen conocimientos y desarrollos científicos y tecnológicos de nuevos bioproductos y bioprocesos y mejoren la disponibilidad de recursos financieros que faciliten su puesta en desarrollo y acceso a los mercados internacionales.
2. Impulsar una nueva arquitectura empresarial en base a la creación de empresas de base tecnológica mediante la incubación de proyectos empresariales orientados al desarrollo de nuevos productos y procesos biotecnológicos a partir de los recursos biológicos regionales.
3. Fortalecer los grupos de investigación del SECTI dedicados a la generación de conocimiento científico y su aplicación en el desarrollo de tecnologías e innovaciones de los sectores de la bioeconomía.
4. Generar nuevos puestos de trabajo, empleo cualificado y retención del talento regional mediante el desarrollo de procesos formativos reglados que permitan la capacitación laboral y el desarrollo de nuevas actividades empresariales sostenibles basadas en los sectores de la bioeconomía.
5. Impulsar el desarrollo de la economía circular en el tejido productivo, favoreciendo las actividades económicas de revalorización de los productos y subproductos procedentes de las actividades agroindustriales.
6. Impulsar una agricultura y una agroindustria regional medioambientalmente sostenible hacia la producción de alimentos y nuevos alimentos saludables, nutritivos y seguros.
7. Promover el desarrollo económico en el medio rural y la diversificación de las actividades productivas y/o la creación de nuevos mercados que permitan la revalorización y uso de los recursos de origen biológico.
8. Influir sobre la revalorización y el desarrollo sostenible de la biomasa forestal y subproductos para la generación de bioproductos y bioenergía.

Referencias bibliográficas

- AGENCIA EXTREMEÑA DE LA ENERGÍA (2016): «Visión general del sector de la biomasa energética en Extremadura»; Jornadas Aprovechamiento de la Biomasa en las Comarcas de Sierra de Gata y Las Hurdes. Valverde del Fresno, 2 de diciembre de 2016.
- CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RURAL, POLÍTICAS AGRARIAS Y TERRITORIO. AGRICULTURA ECOLÓGICA (2016): <http://www.juntaex.es/con03/agricultura-ecologica>.
- INE (2016): *Encuesta sobre la estructura de las explotaciones agrícolas 2016*.
- INE (2016): *Estadística sobre el uso de biotecnología. Resultados definitivos*. Resultados por comunidades y ciudades autónomas.
- INE (2016): *Padrón municipal 2016*.
- INE (2017): *Encuesta de Población Activa* (trimestre 4/2017).
- MERCASA (2017): *Alimentación en España 2017*. Extremadura; pp. 504-509.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE (2016): *Encuestas de efectivos de ganado ovino y caprino*.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE (2016): *Encuestas de efectivos de ganado bovino*.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE (2016): *Resultados de la encuesta nacional de ganado porcino*.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE (2016): *Resultados definitivos por provincias y comunidades autónomas de años anteriores (censo exhaustivo)*.
- PECERO, M. J.; PÉREZ, M. C.; VELASCO, I. J.; NAVARRO, M. J. y FERNÁNDEZ, A. (2017): «Situación Socioeconómica de la Comunidad Autónoma de Extremadura»; *Memoria Anual 2016*. Consejo Económico y Social de Extremadura.



MEDITERRÁNEO
ECONÓMICO

32

- I. Iniciativas europeas en bioeconomía
- II. Perspectivas de la bioeconomía en España
- III. Necesidad de una sólida base científica y técnica en bioeconomía
- IV. Bioeconomía, bioindustrias y seguridad alimentaria
- V. Ejemplos de éxito en la bioeconomía
- VI. Bioeconomía y bioenergía



LOS GENOMAS DE LAS PLANTAS CULTIVADAS

USOS Y DEBATES

Pere Puigdomènech

Centre de Recerca en Agrigenòmica (CSIC-IRTA-UAB-UB)

Resumen

Uno de los cambios tecnológicos más importantes que han aparecido en Biología en los últimos años ha sido el desarrollo de nuevas tecnologías de secuenciación del ADN. Estas han permitido obtener genomas enteros con una gran facilidad y con un bajo coste. De esta forma se han ido obteniendo progresivamente los genomas de las plantas de mayor interés por su uso en los programas de investigación o en agricultura. Ello ha permitido conocer el contenido en genes de estas especies y compararlos entre ellos, pero también analizar la variabilidad interna de los genomas en el interior de las especies. Esta variabilidad es la base necesaria para todo proyecto de mejora de plantas y su conocimiento está permitiendo comprender muchos de los caracteres que son importantes en las plantas cultivadas, en particular durante su domesticación desde los inicios de la agricultura.

Las nuevas tecnologías de secuenciación de genomas y su análisis bioinformático están permitiendo desarrollar nuevas aproximaciones para llevar a cabo programas de mejora de plantas de forma más rápida y dirigida. A ello se suma el desarrollo de metodologías que permiten introducir genes que no existen en las poblaciones vegetales existentes o modificarlos de una forma más precisa. Se trata de la producción de plantas modificadas genéticamente o de la edición de los genomas. Las plantas resultantes de estas aproximaciones se están usando en diferentes partes del mundo, aunque han dado lugar a debates importantes, sobre todo en Europa. Todo ello ofrece oportunidades que pueden intervenir en el desarrollo de la nueva bioeconomía, tanto en la incorporación de nuevas especies a los usos agrícola como la posibilidad de encontrar nuevos usos a las plantas cultivadas que deberán producirse sin interferir en la producción de alimentos que debe seguir siendo una prioridad esencial en el próximo futuro.

Abstract

One of biology's most significant technological changes over recent years has been the development of new DNA sequencing technologies. These enable entire genomes to be obtained both easily and cheaply. In this way, the genomes of plants of the greatest interest for use in research programmes or agriculture have been progressively sequenced. This has not only allowed us to discover what is in the genes of these species and make comparisons between them, but also to analyse the internal variability of the genomes of individual species. This variability is the necessary basis for any plant improvement project, and this knowledge enables us to understand many of the characteristics of cultivated plants that have been important, particularly during their domestication at the beginning of agriculture.

New genome sequencing technology and bioinformatic analysis of the data gathered is allowing us to develop new approaches to plant improvement programmes that are faster and more directed. To this is added the development of methods that allow us to introduce other genes into existing plant populations, or modify them in a more specific way. This is the production of genetically modified plants, or genome editing. The plants resulting from these approaches are already being used in various parts the world, even though they have been the cause of much debate, most notably in Europe. These advances offer opportunities for the development of the new bioeconomy, both through the incorporation of new species for agricultural use and the possibility of finding new uses for cultivated plants, which should be produced without interfering in the production of foodstuffs, something that must still be a key priority in the short-term future.

1. Introducción

Nuestra agricultura se basa en un reducido número de especies vegetales que fueron seleccionadas en un período que comenzó hace más de 10.000 años en diferentes partes del mundo y que posteriormente han sido transportadas por todo el planeta. Se trata de poco

más de un centenar de entre los centenares de miles de especies de plantas que existen. Las razones de ello son diversas y en parte se están descubriendo actualmente gracias al uso de las técnicas moleculares que se han desarrollado en los últimos cuarenta años y, en particular, gracias a la obtención de las secuencias completas de los genomas que han ido apareciendo desde el año 2001. Este conocimiento está siendo muy útil para esclarecer las características que permiten el cultivo de las especies de interés agrícola y los usos que hacemos de ellas. Sin duda, nos debería servir para tratar de resolver el conjunto de problemas que la agricultura tiene planteados en el próximo futuro.

La domesticación de las plantas es un largo proceso que se efectuó en diferentes partes del planeta en un período que comienza hace unos 12.000 años. Se supone que, debido a los cambios en el clima que se produjeron en aquel tiempo, los grupos humanos tuvieron que buscar nuevas maneras para sobrevivir. Durante este tiempo, inicios del Neolítico, comenzaron a practicarse de forma sistemática el conjunto de prácticas que conocemos como agricultura y ganadería. Para que estas prácticas puedan tener éxito, en aquel tiempo y ahora, es necesario seleccionar unas semillas que tienen unas características específicas y plantarlas en la temporada siguiente esperando tener la mejor cosecha posible. Deben, por una parte, presentar una buena facilidad para su cultivo y por otra, dar lugar a productos que sean adecuados para la alimentación humana. En nuestro lenguaje actual ello significa seleccionar caracteres genéticos que permitan responder a las necesidades de la alimentación de las actuales poblaciones humanas. Ello no significa únicamente disponer de alimentos en cantidad suficiente sino también que sean seguros y aceptables para las sociedades que tienen unas bases culturales muy diversas. En nuestra sociedad tecnificada del siglo XXI, nuestras exigencias no han cambiado esencialmente de las que dieron lugar a la agricultura hace 12 milenios. Nuestros problemas se presentan a una escala global, pero tenemos unas herramientas de una potencia extraordinaria que estamos debatiendo como utilizar. Algunas de las más nuevas y poderosas son las que se basan en el uso de la secuencia de los genomas de las plantas.

2. Los genomas de plantas

En el año 1998 se publicó la primera secuencia de ADN de un fragmento del genoma de una planta¹. Esta publicación fue el primer fruto de la colaboración de un consorcio internacional para secuenciar el genoma completo de una planta. Era un proyecto que nació tras la publicación del genoma de la levadura y que se hizo en paralelo al del genoma humano. El genoma en cuestión era el de la planta modelo *Arabidopsis thaliana* que se encontraba entre los más pequeños conocidos, unas veinte veces menor que el genoma humano. El genoma se completó en el año 2001, mucho antes de lo previsto. Ello fue debido a la aceleración en la eficiencia de las técnicas de secuenciación lo que ha sido una constante desde entonces. La secuencia del genoma de *Arabidopsis* permitió por primera vez tener una visión de conjunto de

¹ BEVAN *et al.* (1998).

lo que constituye el ADN de una planta, tanto de los genes que contiene como de las regiones situadas entre ellos.

Un 35 % del genoma de *A. thaliana* son genes que codifican para proteínas. El resto son mayoritariamente fragmentos de ADN que se repiten a veces miles de veces en el genoma. Identificar los genes no es siempre fácil e incluso en un genoma de tamaño reducido, de unos 140 millones de nucleótidos, y de buena calidad como el de Arabidopsis, es un trabajo que produce novedades de forma continuada. En su última versión se han identificado 27.655 fragmentos que tienen las características esperadas para los genes. De la anotación de genes que está publicada se deduce que dos tercios de ellos pueden ser correlacionados con algún tipo de función biológica o molecular. Hay también unos 5.000 elementos móviles o transposones que son secuencias que pueden moverse a diferentes regiones del genoma. La secuencia del genoma de una planta es una referencia importante para quienes se interesan por el estudio de cómo la información genética evoluciona y cómo se expresa en las diversas funciones de la planta, uno de los temas centrales de la biología actual. Un genoma de referencia es aquel que se obtiene de un individuo o de un conjunto homogéneo de individuos. Sin embargo uno de los aspectos más interesantes del estudio de los genomas es su variabilidad en el interior de una especie, que debería permitir identificar aquellos caracteres específicos de poblaciones concretas, lo que es de gran importancia para la mejora de las especies cultivadas.

Por esta razón se emprendió ya hace unos años la secuenciación de mil un genomas de Arabidopsis². Esto ha sido posible por el desarrollo durante los últimos años de nuevas técnicas de secuenciación masiva que permiten la obtención de datos de secuencia con una rapidez creciente y un coste muy inferior. En contrapartida se cuestiona frecuentemente la calidad de los datos que se obtienen. El coste del almacenamiento de la enorme cantidad de datos obtenidos y el control de su calidad son cuestiones que deben afrontarse en el próximo futuro a la vista de la evolución de la tecnología y del uso de los datos de la genómica, no solo en investigación, sino como herramienta para los programas de mejora de plantas.

Tras la publicación del genoma de Arabidopsis se comenzaron otros proyectos más complejos. El siguiente fue el proyecto de secuenciación del genoma del arroz, cuyo genoma es unas tres veces mayor que el de Arabidopsis. Es interesante que cuando se publicó el primer borrador en 2002 sus autores fueron un equipo de investigadores chinos que se adelantaron a un consorcio internacional que publicó un genoma de calidad en 2005³. Tras el arroz han ido siguiendo los genomas de las especies de mayor interés ya sea por su interés científico, porque pueden permitir responder con ventaja a alguna cuestión de interés para la investigación o por su interés para la agricultura. Existen diversas bases de datos que agrupan los datos de los genomas de plantas como es el caso de *Phytozome*⁴ en la que a fines de 2017 se refieren unos noventa genomas de especies distintas de plantas. En España un consorcio de catorce grupos de investigación públicos y privados emprendió la secuenciación completa del genoma del

² THE ARABIDOPSIS GENOME INITIATIVE (2000).

³ GOFF *et al.* (2002).

⁴ <https://phytozome.jgi.doe.gov/pz/portal.html>.

melón, una especie de importancia agronómica que pertenece a un grupo de especies de interés para la agricultura. Es un buen ejemplo de relación evolutiva entre especies cultivadas dentro del género de las cucurbitáceas. Los resultados fueron publicados en 2012⁵.

3. La variabilidad genómica

La riqueza de información genómica que se está obteniendo permite un estudio comparativo entre los genomas de diferentes especies y también entre los genomas de la misma especie. Del mismo se están obteniendo resultados valiosos para la comprensión de la evolución de las especies y para la mejora de las plantas. Uno de los resultados que han aparecido de estas comparaciones es la enorme variabilidad del tamaño y la estructura de los genomas vegetales, algo que los distingue de los genomas de animales hasta ahora analizados. El genoma de plantas más pequeño hasta ahora publicado es el de una planta carnívora, *Utricularia gibba*, que, con 82 millones de pares de bases es casi la mitad del genoma de *Arabidopsis* pero en el que se han anotado unos 28.000 genes, una cifra similar en las dos especies. En el otro extremo se han publicado borradores de genomas de coníferas con tamaños en las decenas de miles de millones de nucleótidos y con un número similar de genes al de las demás especies vegetales. El número de secuencias repetidas varía enormemente en estos casos y el significado evolutivo de estas variaciones ha sido objeto de discusión.

La variabilidad en los genomas se ha observado también en el interior de las especies vegetales. El desarrollo de las técnicas de secuenciación de ADN ha permitido por ejemplo, lanzar el anteriormente mencionado programa de los mil y un *genomas* de *Arabidopsis*⁶ o que en una sola publicación se presenten más de 1.000 genomas de arroz⁷. Esta variabilidad puede ser también estructural, siendo el caso más estudiado, el del maíz. Esta es una de las especies cultivadas con mayor riqueza de información genética que se corresponde con el interés económico de la especie cuya semilla híbrida es la que representa un mayor valor económico a escala mundial. Se trata de un genoma que es el producto de una antigua hibridación entre dos especies. Posee un tamaño similar al genoma humano y presenta una elevada variabilidad. De hecho al comparar las secuencias de distintas variedades de maíz se ha constatado que en algunos casos hasta dos tercios del genoma pueden cambiar de una variedad a otra. Se conservan también muestras antiguas de granos de maíz que han permitido estudiar de forma experimental algunas de las etapas que llevaron del teosinte, el precursor silvestre del maíz, hasta la especie que se domesticó y cultivó de forma extensa en la América central y que ha sido la base de la alimentación de sus poblaciones.

Sin llegar a los grandes cambios estructurales que se pueden observar en una especie como el maíz, también se estudian en las especies cultivadas las variaciones que ocurren a lo largo de todo el genoma. De la misma forma que los humanos compartimos el genoma que nos

⁵ GARCÍA-MAS *et al.* (2012).

⁶ <http://1001genomes.org/>.

⁷ HUANG (2012).

define como especie, pero que las variaciones que se dan a lo largo del mismo son la base que nos hace diferentes a unos de otros, en las plantas las variaciones que ocurren a lo largo del genoma explican las diferencias de variedades que se dan en una especie. Para la agricultura la existencia de esta variabilidad genómica permite entender las características diferentes que presentan las distintas variedades que se cultivan. Y esta variabilidad es la base de la mejora genética que está en el origen de la inmensa mayoría de los actuales cultivos agrícolas.

Las leyes de la genética fueron descubiertas hacia finales del siglo XIX por Mendel a partir de su trabajo en guisantes. A principios del siglo XX estas leyes comenzaron a ser aplicadas a los cultivos vegetales dando lugar a una nueva disciplina científica: la mejora genética vegetal. Desde entonces las variedades cultivadas en la mayoría de los campos de las naciones desarrolladas son producto de programas de mejora que se han propuesto obtener variedades que den lugar a mejores rendimientos de las cosechas, que sean más resistentes a enfermedades, o que den productos de mejor calidad. Uno de los ejemplos que se destacan de la aplicación sistemática de la mejora genética son las variedades de cereales que estuvieron en la base la llamada «Revolución Verde» que se produjo por variedades que comenzaron a obtenerse en los años anteriores a la Segunda Guerra Mundial y que se aplicaron tras ella. Fueron programas de mejora realizados mediante proyectos humanitarios y que se aplicaron de forma abierta permitiendo que países del centro y el sur de América y de Asia del sur resolvieran en aquel momento los problemas más acuciantes de abastecimiento de cereales. Con ello se alejaron, aunque fuera temporalmente, las predicciones de grandes problemas de hambre que desde el siglo XVIII habían sido predichos con el crecimiento de la población. Para tener éxito en sus programas, la mejora genética necesita imperativamente disponer de la mayor y mejor variabilidad genética de las especies con las que se trabaja. Por esta razón la conservación de colecciones de semillas de las especies cultivadas ha sido un esfuerzo que se ha realizado a nivel mundial. Es un esfuerzo costoso desarrollado en centros públicos, no siempre en entornos fáciles. Las aproximaciones de la genómica están sirviendo para identificar y clasificar esta variabilidad y proporcionar herramientas moleculares que permiten que la mejora se realice de forma más rápida y eficaz.

La herramienta que actualmente se utiliza en mayor medida para ayudar la mejora genética se basa en los llamados polimorfismos de nucleótidos únicos (SNP en el argot científico). Se trata de variaciones puntuales que se dan a lo largo del genoma y que se pueden heredar de una generación a otra permitiendo la identificación de las variedades vegetales. También se pueden generar mutaciones puntuales a lo largo de la vida de los individuos por la acción de agentes mutagénicos de naturaleza química o física o por errores en la maquinaria de replicación del mensaje genético. Si se dispone de una colección de secuencias de genomas de una especie cultivada se puede tratar de encontrar SNP que están ligados a caracteres agronómicos de interés. Cuando estos se conocen pueden ser muy útiles, ya que son fáciles de analizar en poblaciones de plantas y permiten detectar aquellos individuos que contienen un carácter determinado, lo que permite acelerar de forma significativa los programas de mejora. El caso más favorable es cuando se conoce que un SNP es el causante directo de un carácter determi-

nado. Esto significa que una variación del genoma es la responsable de que un gen tenga una actividad que se corresponde con un carácter de la planta, lo que se denomina un fenotipo.

Para muchos de los caracteres genéticos interesantes no se conoce una relación sencilla con variaciones genómicas o SNP. Muchos de ellos no dependen de una variación genómica única sino de conjuntos de ellas. Se han desarrollado aproximaciones estadísticas para buscar correlaciones entre caracteres genéticos y variaciones en el genoma. Una de estas aproximaciones son los llamados GWAS (*Genome-wide association study*) en el que se trata de identificar SNP que correlacionan con caracteres de interés. Estas aproximaciones, de naturaleza estadística, pueden llevar a la identificación de las secuencias genómicas responsables de caracteres incluso cuando no se trata de genes únicos sino de colecciones de estos. Con ello se pueden obtener marcadores moleculares para caracteres complejos que pueden utilizarse para la mejora. De esta forma en los últimos años se ha desarrollado una aproximación llamada «mejora asistida por el genoma» que trata de utilizar la secuenciación de genomas para orientar la mejora. Ya se está utilizando en algunas especies y puede ser un recurso importante para el estudio de especies y caracteres complejos.

4. Creación de nueva variabilidad

La base de cualquier programa de mejora de plantas cultivadas es disponer de poblaciones con una variabilidad genética lo más amplia posible en relación con los caracteres que se desea introducir en los cultivos. Es por esta razón que la conservación de amplias poblaciones con la mayor diversidad biológica posible ha sido identificada como una prioridad global y que se han puesto en marcha bancos que mantienen colecciones de semillas lo más amplias posible. La conservación de la diversidad genética de las especies cultivadas, como la conservación de la diversidad de especies salvajes, son objetivos compartidos a nivel internacional. A veces se trata de programas costosos y por ello es importante identificar aquellas variedades que vale la pena conservar y también encontrar vías para que esta variabilidad llegue a aquellos que la pueden utilizar para resolver problemas agronómicos en diferentes partes del planeta. En este tema se presenta, como en tantos otros, la tensión entre el uso restringido de poblaciones útiles para la mejora genética por aquellos obtentores que pueden hacer llegar las semillas mejoradas a los agricultores, es decir, empresas privadas, o un uso compartido con acceso a todos aquellos que piensen obtener nuevas variedades. En los años posteriores a la Segunda Guerra Mundial se diseñó un sistema de protección de las obtenciones vegetales, la convención UPOV, que trata de proteger a aquellos que han realizado el esfuerzo de mejora, mientras que deja abierto el acceso de las variedades a nuevos obtentores. A principios del siglo XXI el sistema UPOV está en discusión en relación con la aplicación del derecho general de patentes a las variedades vegetales.

Esta discusión es más compleja cuando se trata de variabilidad inducida por los investigadores utilizando diferentes medios. Los genomas no son entidades estáticas sino que son el objeto continuado de procesos de producción de variabilidad, lo que denominamos también

producción de mutaciones. Se obtienen de forma continua por diferentes vías: los errores que la maquinaria de replicación del ADN introduce durante la división celular, la acción de radiaciones ionizantes como los rayos UV o de mayor frecuencia, o la acción de sustancias químicas que tienen efecto mutagénico. Estos mecanismos actúan de forma espontánea sobre todos los organismos vivos y son los que van produciendo cambios en las bases genéticas de todos ellos. La selección natural, que es la que da lugar a la evolución de las especies, actúa sobre poblaciones con una base genética heterogénea y cambiante, lo que permite la supervivencia de los más adaptados a las condiciones existentes. De manera similar, la selección que efectúa la mejora genética actúa sobre poblaciones existentes que necesitan de una variabilidad que está producida por los mecanismos de mutagénesis. Esta variabilidad se va expresando en las recombinaciones de genomas que se dan cuando se cruzan unas variedades con otras. A mediados del siglo XX los resultados de la investigación permiten la comprobación de estas ideas y ello abre la puerta a la posibilidad de que se actúe sobre los genomas de las especies produciendo nueva variabilidad.

Partiendo de esta idea, en la segunda mitad del siglo XX se pusieron en marcha programas para generar mutaciones en los genomas de las plantas y producir nueva variabilidad. Para ello se expusieron semillas de plantas a radiaciones ionizantes o a sustancias químicas de acción mutagénica persiguiendo acelerar el proceso que ocurre de forma espontánea. Estos programas dieron lugar a una nueva variabilidad genética que ha sido empleada de forma significativa en la mejora de especies cultivadas. De estos experimentos se pudo observar que la radiación o los mutágenos químicos producen cambios en el ADN al azar. El trabajo del mejorador ha consistido en encontrar aquellas mutaciones que dan lugar a caracteres nuevos y transferirlas a las variedades cultivadas. Las herramientas de la genómica están permitiendo acelerar este proceso.

5. La transformación genética

La mutagénesis es un procedimiento para introducir variabilidad nueva en genes que ya existen en una especie. Sin embargo puede resultar interesante introducir genes que sean completamente nuevos en una especie cultivada. Si en los genomas de las poblaciones existentes de una especie no existe ningún gen que corresponda a un carácter deseado, ni ninguno que sea similar a él y pueda mutar, puede ser imposible resolver esta cuestión. En el año 1983 se publicaron dos trabajos en revistas de gran impacto científico en los que se demostraba que era posible incorporar en el genoma de una planta fragmentos de ADN que han sido previamente aislados en el laboratorio y manipulados de forma que una vez transferidos al genoma de la planta funcionaban como un nuevo gen⁸. Mediante este procedimiento el nuevo gen podía proceder de una especie cualquiera o incluso ser sintético. Esta aproximación dio lugar a las denominadas plantas transgénicas.

⁸ HERRERA-ESTRELLA *et al.* (1983) y BARTON *et al.* (1983).

Desde aquel momento se pusieron en marcha distintos proyectos para introducir en las poblaciones de las especies vegetales más cultivadas nuevos caracteres que eran de interés para los agricultores y que se podían basar en fragmentos de ADN de alguna especie conocida. Se trataba, por ejemplo, de producir variedades de maíz resistentes al taladro, un insecto que puede producir pérdidas en regiones en las que puede atacar a esta especie. Para ello se aisló un gen que codifica una proteína que es tóxica para el insecto y es inocua para los mamíferos y que está presente en el genoma de la bacteria *Bacillus thuringiensis*. Este gen, convenientemente modificado como gen vegetal en el laboratorio, fue transferido al maíz. Se demostró que de esta forma las plantas transgénicas que lo contenían estaban protegidas contra el insecto. Desde aquel momento se han cultivado millones de hectáreas en el mundo con este tipo de modificaciones genéticas. En Europa solo se cultiva una de estas modificaciones en España.

Las primeras plantas transgénicas se cultivaron de forma extensiva en el año 1994. Antes de ello se habían aprobado en los Estados Unidos y la Unión Europea regulaciones que permitían el uso de estas plantas modificadas genéticamente siempre que se evitaran riesgos para la salud humana y animal y para el medioambiente. Transcurridos más de veinte años no parece que estas plantas hayan producido ningún tipo de problema sanitario ni medioambiental. Sin embargo no han evitado la existencia de conflictos en contra de su uso por parte de organizaciones de diferentes tipos, como por ejemplo algunas que defienden modelos particulares de la agricultura. Uno de los argumentos que se esgrime en contra de las plantas transgénicas es el anteriormente referenciado y que asume que pueden presentar algún tipo de riesgo para la salud humana y animal o para el medioambiente. En particular se destaca que la modificación genética que se produce ocurre al azar en el genoma lo que puede dar lugar a efectos no previstos. En general esta posibilidad se elimina realizando múltiples experimentos de modificación genética para escoger aquellas plantas que tienen las características esperadas sin efectos colaterales negativos. La aprobación de estas plantas implica un análisis del riesgo basado en datos de la estructura molecular de la modificación, de la composición de los productos del cultivo, de su posible toxicidad o alergenicidad y de experimentos de campos para analizar el comportamiento agronómico de las variedades transgénicas. Recoger este conjunto de datos es costoso y produce una de las mayores barreras al uso de las plantas transgénicas en el mundo, sobre todo en Europa.

6. La edición genómica

En los últimos años ha aparecido una nueva forma de modificar los genomas de las plantas de forma más precisa y predecible. Se trata del desarrollo de tecnologías que permiten cortar el ADN en lugares muy precisos del genoma, en algunos casos lugares únicos. Se trata de diferentes sistemas que están basados en nucleasas, enzimas que rompen el ADN, que están guiadas a un lugar preciso del genoma. Los sistemas de guía pueden ser proteínas que reconocen una secuencia precisa, por ejemplo las llamadas proteínas de dedos de zinc, o proteínas diseñadas a partir de sistemas utilizados por hongos patógenos de plantas que utilizan un código capaz

de reconocer secuencias precisas del DNA. Estos sistemas son conocidos como *Zinc-finger nucleases* o TALENS. Más recientemente se ha desarrollado con éxito el sistema conocido como CRISPR-Cas9 que combina el reconocimiento de secuencias precisas del genoma utilizando un ARN guía y una nucleasa denominada Cas9. Ello ha dado lugar a que se desarrollen procedimientos que conocemos como de edición genómica⁹.

Estos sistemas, como hemos dicho, producen un corte en un lugar muy preciso del genoma. Cuando esto ocurre actúan los mecanismos de reparación del ADN que tienen una eficiencia relativa, lo que da lugar frecuentemente a mutaciones en el lugar del corte. El resultado final es que la acción de la nucleasas acaba creando una mutación en un lugar preciso del genoma. El proceso puede hacer también en presencia de fragmentos cortos de ADN que durante la reparación sustituyen a la secuencia en el lugar que se ha cortado. Esto da lugar a una sustitución de una secuencia de ADN por otra. Finalmente la acción del sistema de edición puede realizarse en presencia de un fragmento de ADN que contiene un nuevo gen que se desea insertar en el lugar de corte predeterminado. Estas tres posibilidades se han utilizado en plantas, abriendo nuevas posibilidades para producir mutaciones en lugares precisos del genoma, sustituir fragmentos de ADN por otros deseados o insertar fragmentos de DNA en lugares concretos. Otra característica del sistema CRISPR-Cas9 es que la edición puede realizarse en diferentes lugares del genoma de forma simultánea, con lo que se pueden producir mutaciones en decenas de genes al mismo tiempo.

La edición genómica ha despertado un gran interés para quienes trabajan en la genética molecular de las plantas y en mejora genética, ya que introduce la posibilidad de actuar de forma precisa en un lugar del genoma. Ha abierto también el debate sobre si las plantas que han sido modificadas mediante los procedimientos de la edición genómica deben considerarse como transgénicas. De ser así tendría importantes consecuencias, ya que para poder aprobarse su uso como alimentos o para su cultivo, las plantas editadas deberían pasar por los largos y costosos procedimientos que se requieren para las plantas transgénicas. También en Europa implica que los alimentos que contuvieran este tipo de plantas deberían ser etiquetados, lo que probablemente disminuiría el interés de los consumidores. A principios del año 2018, en los Estados Unidos ya se ha decidido que no van a requerirse los procedimientos previstos para las plantas transgénicas en los casos de las plantas que han sido editadas en alguno de sus genes. Mientras tanto en Europa la discusión sigue sin que se hayan tomado decisiones por el momento.

7. La genómica de plantas y la bioeconomía

De lo dicho anteriormente se puede deducir que el conocimiento de la secuencia de genomas completos de plantas ha abierto una gran variedad de posibilidades para sus posibles usos en agricultura y en otras posibles aplicaciones. Es lo que definimos como biotecnología

⁹ VOYTAS y GAO (2014).

vegetal. Se trata, entre otras, del uso directo de la genómica para descubrir genes de interés, de la mejora genética asistida por la secuenciación completa de los genomas, o de la edición genómica. Estas aproximaciones pueden servir para acelerar las aproximaciones de mejora, comprender y utilizar los caracteres multigénicos y abrir nuevos usos de las especies vegetales cultivadas, o incorporar nuevas especies a los grandes cultivos facilitando el proceso que en otras especies se realizó durante la domesticación de vegetales en los inicios de la agricultura. A ello se añaden las posibilidades que abren las técnicas de edición genómica para crear nuevos tipos de variabilidad genética. A más largo plazo podemos pensar en el uso de la llamada biología sintética que propone crear nuevas funciones biológicas mediante la combinación de genes de diferentes procedencias, incluyendo algunos que no existen en los organismos vivos actuales. Se trabaja en ello sobre todo en microorganismos pero también existen proyectos en plantas.

Estas perspectivas de futuro deben ponerse en perspectiva con las demandas que pueden darse en el futuro. La agricultura es la base esencial de la producción de alimentos y ello hace que un objetivo prioritario de la mejora genética sea conseguir mantener los niveles de alimentación allí donde ya es aceptable, reducir las bolsas millonarias de malnutrición y hambre que todavía existen en el mundo y afrontar el aumento de la población que se irá produciendo durante al menos los próximos treinta años. Al mismo tiempo, los ciudadanos demandan que esta alimentación tenga los máximos niveles de seguridad y responda a la exigencia de contribuir a la salud de las poblaciones en entornos culturales, e incluso religiosos, que prescriben diversas formas de alimentarse. Junto a ello sabemos que la agricultura, incluyendo la ganadería, es uno de los agentes principales de producción de gases que tienen efectos sobre el clima. Al mismo tiempo los cambios que observamos en el clima están ya teniendo efectos sobre la producción agrícola.

La agricultura, junto con la ganadería y la pesca, es la actividad que nos proporciona aquello que necesitamos para nuestra alimentación, pero actualmente es también la fuente de fibras como el algodón o el lino que utilizamos para el vestido, o de materiales de origen forestal para la producción de pasta de papel o materiales de construcción. Esta producción tiene una importancia económica comparable a la de la producción de alimentos. La agricultura es también la fuente de productos naturales que se utilizan en la industria y en particular en farmacia o cosmética. En el futuro estamos esperando que la agricultura provea de todos estos materiales, probablemente en proporción superior a la actual, y que vuelva a recuperar la función en la producción de carburantes cuando la leña o el carbón vegetal eran la fuente principal de energía para los hogares y el transporte. Para todo ello será imprescindible utilizar plantas que utilicen los recursos de forma eficiente y que representen una variabilidad mayor que la actual para responder a la diversidad de demandas y el cultivo en entornos muy diferentes. Es en este contexto que la enorme información que provee la genómica puede encontrar su uso.

Los debates en torno a los usos de la biotecnología son muy diversos¹⁰. Como anteriormente se indicó, tienen que ver con los posibles riesgos que se podrían presentar para la salud o el medioambiente de algunas modificaciones genéticas. Para evitarlos se aprobaron regulaciones

¹⁰ THE ROYAL SOCIETY (2009) Y EASAC (2013).

en diferentes países cuya aplicación es objeto de debate. También se debaten las condiciones en las que se puede acordar derechos de propiedad intelectual a genes, sus elementos, las construcciones que se hacen con ellos, los genomas modificados o las variedades de plantas que se producen con ellas. Estas discusiones tienen impacto en los agentes que investigan, desarrollan y comercializan las semillas mejoradas. La concentración que se ha producido en las empresas de semillas es posiblemente una consecuencia del nuevo entorno regulatorio existente y al mismo tiempo un origen de debate para aquellos que se preocupan del control que pueden tener sobre un recurso que es esencial para la vida humana. Desde un punto de vista global, las discusiones sobre la ocupación del suelo, el uso de recursos con el agua en primer lugar, y cómo se equilibra la producción de alimentos con los otros usos de las plantas cultivadas es otro de los grandes debates que existen y que se presentarán en los próximos años.

Referencias bibliográficas

- BARTON, K. A.; BINNS, A. N.; MATZKE, A. J. y CHILTON, M. D. (1983): «Regeneration of intact tobacco plants containing full length copies of genetically engineered T-DNA, and transmission of T-DNA to R1 progeny»; en *Cell* (32); pp. 1033-43.
- M. BEVAN, I.; BANCROFT, E.; BENT, K.; LOVE, P.; PIFFANELLI, H.; GOODMAN, C.; DEAN, R.; BERGKAMP, W.; DIRKSE, M.; VAN STAVEREN, W.; STIEKEMA, L.; DROST, P.; RIDLEY, S. A.; HUDSON, K.; PATEL, G.; MURPHY, H.; WEDLER, R.; WAMBUTT, T.; WEITZENEGGER, T.; POHL, N.; TERRY, J.; GIELEN, R.; VILLARROEL, R.; DECLERCK, M.; VAN MONTAGU, A.; LECHARNY, M.; KREIS, N.; LAO, T.; KAVANAGH, S.; HEMPEL, P.; KOTTER, K. D.; ENTIAN, M.; RIEGER, M.; SCHOLFER, B.; FUNK, S.; MULLERAUER, M.; SILVEY, R.; JAMES, A.; MONFORT, A.; PONS, P.; PUIGDOMÈNECH, A.; DOUKA, E.; VOUKELATOU, D.; MILIONI, P.; HATZOPOULOS, E.; PIRAVANDI, B.; OBERMAIER, H.; HILBERT, A.; DUESTERHOEFT, T.; MOORES, J.; JONES, T.; ENEVA, K.; PALME, V.; BENES, S.; RECHMAN, W.; ANSORGE, R.; COOKE, C.; BERGER, M.; DELSENY, G.; VOLCKAERT, H. W.; MEWES, C.; SCHUELLER y CHALWATZIS, N. (1998): «The EU Arabidopsis Genome Project. Analysis of 1.9 Mb of contiguous sequence from chromosome 4 of Arabidopsis thaliana»; en *Nature* (391); pp. 485-488.

- GOFF, S. A.; RICKE, D.; LAN, T. H.; PRESTING, G.; WANG, R.; DUNN, M.; GLAZEBROOK, J.; SESSIONS, A.; OELLER, P.; VARMA, H.; HADLEY, D.; HUTCHISON, D.; MARTIN, C.; KATAGIRI, F.; LANGE, B. M.; MOUGHAMER, T.; XIA, Y.; BUDWORTH, P.; ZHONG, J.; MIGUEL, T.; PASZKOWSKI, U.; ZHANG, S.; COLBERT, M.; SUN, W. L.; CHEN, L.; COOPER, B.; PARK, S.; WOOD, T. C.; MAO, L.; QUAIL, P.; WING, R.; DEAN, R.; YU, Y.; ZHARKIKH, A.; SHEN, R.; SAHASRABUDHE, S.; THOMAS, A.; CANNINGS, R.; GUTIN, A.; PRUSS, D.; REID, J.; TAVTIGIAN, S.; MITCHELL, J.; ELDREDGE, G.; SCHOLL, T.; MILLER, R. M.; BHATNAGAR, S.; ADEY, N.; RUBANO, T.; TUSNEEM, N.; ROBINSON, R.; FELDHAUS, J.; MACALMA, T.; OLIPHANT, A. y BRIGGS S. (2002): «A draft sequence of the rice genome (*Oryza sativa* L. ssp. japonica)»; en *Science* (296); pp. 92-100.
- HERRERA-ESTRELLA, L.; DEPICKER, A.; VAN MONTAGU, M. y SCHELL J (1983): «Expression of chimeric genes transferred into plant cells using a Ti-plasmid-derived vector»; en *Nature* (303); pp. 209-213.
- HUANG, X.; KURATA, N.; WEI, X.; WANG, Z. X.; WANG, A.; ZHAO, Q.; ZHAO, Y.; LIU, K.; LU, H.; LI, W.; GUO, Y.; LU, Y.; ZHOU, C.; FAN, D.; WENG, Q.; ZHU, C.; HUANG, T.; ZHANG, L.; WANG, Y.; FENG, L.; FURUUMI, H.; KUBO, T.; MIYABAYASHI, T.; YUAN, X.; XU, Q.; DONG, G.; ZHAN, Q.; LI, C.; FUJIYAMA, A.; TOYODA, A.; LU, T.; FENG, Q.; QIAN, Q.; LI, J. y HAN, B. (2012): «A map of rice genome variation reveals the origin of cultivated rice»; en *Nature* (490); pp. 497-501.
- THE ARABIDOPSIS GENOME INITIATIVE (2000): «Analysis of the genome sequence of the flowering plant *Arabidopsis thaliana*»; en *Nature* (408); pp. 796-815.
- THE ROYAL SOCIETY (2009): «Reaping the benefits. Science and the sustainable intensification of Agriculture»; en *The Royal Society*. Londres; p. 86.
- VOYTAS, D. F. y GAO, C. (2014): «Precision genome engineering and agriculture: opportunities and regulatory challenges»; en *PLoS Biol.* (12); pp. 1-6.



LA BIOLOGÍA SINTÉTICA COMO MOTOR DE LA BIOECONOMÍA Y DE LA CUARTA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL

Alberto Sánchez-Pascuala y Víctor de Lorenzo
Centro Nacional de Biotecnología (CSIC)

Resumen

La bioeconomía se presenta como el más prometedor (y sostenible) abordaje socioeconómico a la hora de dejar atrás la dependencia productiva con el petróleo. Su desarrollo se encuentra íntimamente ligado a la industria biotecnológica, la cual está siendo profundamente revolucionada por las metodologías de la biología sintética. La aplicación de novedosas herramientas biotecnológicas, junto al abaratamiento de técnicas moleculares fundamentales (síntesis y secuenciación de ADN), ha posibilitado la aceleración de todas las secciones que comprenden la cadena productiva biotecnológica (consumidores, investigación y producción). Como resultado de esta situación, la bioeconomía se está desplazando de un escenario teórico a un mercado real de producción, en el cual el campo de la biología sintética posibilita la manufactura de diferentes productos altamente demandados (biocombustibles y bioplásticos) independientemente de la disponibilidad de petróleo. Por otra parte, la implementación a gran escala de los abordajes de biología sintética está generando nuevas inquietudes sociales. Los asuntos en materia de regulación y bioseguridad que envuelven a esta revolución biotecnológica conciernen a toda la sociedad, presentándose como objetivo prioritario para su adecuada convivencia una correcta normalización y divulgación científica.

Abstract

The bioeconomy is the most promising (and sustainable) socio-economical approach in order to leave behind the dependency on oil products. Its development is closely related to the biotechnological industry, which is being deeply revolutionized by synthetic biology methodologies. The implementation of novel biotechnological tools, together with the affordability of capital molecular techniques (DNA sequence and synthesis) have allowed the boosting of all the elements that comprise the biotech supply chain (customers, research and production). As a result of this scenario, the bioeconomy is moving from a conceptual position to the real market, providing an overall picture in which the synthetic biology field is allowing manufacturing of different high demanded products (biofuels and bioplastics) in a fashion independent of oil availability. On the other hand, Large-scale implementation of synthetic biology approaches generates novel societal concerns. The regulation, biosafety and biosecurity issues involved in this biotech revolution concern the entire society, presenting as a key objective for a suitable harmony a correct normalization and scientific popularization.

1. Introducción: la bioeconomía como único futuro

La bioeconomía, según define la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), comprende la aplicación del conocimiento biotecnológico en la potenciación de la producción primaria, la salud y la industria. La bioeconomía, como abordaje macroeconómico, se plantea como la única salida viable y sostenible al actual sistema de producción basado en el consumo de combustibles fósiles.

Durante el desarrollo de la primera Revolución Industrial quedó claro que el empleo de madera (fuente renovable, limitada por la deforestación) no iba a ser suficiente para cubrir los requerimientos energéticos demandados por la industria. Ante esta situación, el desarrollo

tecnológico optó por la utilización de combustibles fósiles (fuentes no renovables, dependientes de reservas) como el carbón y el petróleo¹. Décadas de convivencia con estas materias primas han generado una economía global fuertemente dependiente, ligando su viabilidad únicamente a la disponibilidad de petróleo². Esta escasa resiliencia genera un modelo productivo insostenible a medio-largo plazo al estar económicamente afectado por la disponibilidad de una materia prima no renovable (susceptible a cambios bruscos en su valor de mercado) y medioambientalmente nociva debido a las emisiones de CO₂ en su combustión.

Con todo lo mencionado, la única manera de generar una economía global viable a largo plazo pasa por sustituir la «economía del petróleo» por la «bioeconomía»³. Este nuevo sistema será el encargado de sostener en un futuro la industria química y de combustibles, actualmente copada por los combustibles fósiles, mediante el empleo de fuentes renovables de origen biológico. La investigación y desarrollo (I+D) que en su día propició la eficiente implementación de una industria basada en el petróleo, ha dado lugar a un gran progreso en los campos de la ingeniería y la química. Sin embargo, estas ramas de conocimiento van a necesitar ser fuertemente complementadas para el desarrollo de la mencionada bioeconomía. En este punto, la biología sintética se posiciona como un pilar fundamental para tal propósito⁴. De hecho, el abandono del petróleo como la materia prima fundamental para procesos químicos es uno de los pilares de la así llamada «Cuarta Revolución Industrial»⁵, que pone el énfasis en la economía circular (cero residuos) y la deslocalización y automatización de todas las cadenas de producción.

2. Biología sintética: el combustible necesario para el progreso de la bioeconomía

La bioeconomía, por definición, se encuentra íntimamente ligada al desarrollo biotecnológico. A su vez, la biotecnología está sufriendo una importante revolución, liderada por la aparición de un nuevo campo denominado biología sintética. Esta disciplina emerge gracias a la convergencia, de la ingeniería, de las diferentes biociencias y las tecnologías de la información. En las últimas décadas se ha generado un enorme conocimiento biológico que ha venido acompañado de una acumulación de gran cantidad de datos. El mayor ejemplo está encabezado por las denominadas «ómicas», que integran disciplinas como la genómica o la proteómica, encargadas de estudiar en su totalidad las funciones e interacciones comprendidas por los genes y proteínas de un organismo⁶. Este tipo de tecnologías vienen acompañadas de la generación de una gran cantidad de información que, en última instancia, han permitido desentrañar la complejidad biológica de multitud de sistemas vivos, llegando a comprender

¹ PHILP (2018).

² MILLER y SORRELL (2014).

³ KIRCHER (2012).

⁴ FLORES BUESO y TANGNEY (2017).

⁵ SCHWAB (2017).

⁶ DE LORENZO y SCHMIDT (2018).

cómo funcionan cada una de las partes que los componen (genes, proteínas). De esta manera ha sido posible establecer una analogía entre un sistema vivo (por ejemplo, una bacteria o una célula eucariota) y una máquina, comprendiendo su funcionamiento mediante el conocimiento de los elementos que la componen (proteínas *vs.* engranajes). La biología sintética surge entonces como una evolución de la clásica ingeniería genética, abandonando el enfoque tradicional de experimentación mediante «ensayo y error», de cara a adoptar el punto de vista de la ingeniería. El conocimiento funcional de la maquinaria celular permite a la biología sintética la ingeniería de sistemas biológicos complejos con nuevas funciones, todo ello desde una perspectiva racional y sistemática. En otras palabras, al igual que se aplicaría en la construcción de un automóvil, la biología sintética permite mediante el conocimiento de las partes el diseño de un sistema biológico con un fin determinado. A su vez, esta rama de la biología persigue la caracterización de estos elementos biológicos, permitiendo su estandarización como si de tornillos de una maquinaria se tratase. Este abordaje de diseño racional es especialmente atractivo de cara a obtener un determinado producto de interés, situando a la biología sintética como una herramienta clave en multitud de sectores enmarcados en la bioeconomía⁷.

3. Dando forma a la bioeconomía desde la I+D en biología sintética

3.1. El apoyo económico institucional como clave para el desarrollo del binomio biología sintética-bioeconomía

La posición privilegiada que ocupa la biología sintética dentro del marco de la bioeconomía ha quedado reflejada en multitud de programas institucionales de financiación. La Unión Europea (UE) ha demostrado en los últimos años su marcado compromiso a la hora de fomentar la I+D involucrada directamente en la estrategia bioeconómica. Dicho camino comenzó con la convocatoria *Cell Factory* dentro del 5.º Programa Marco (1998-2002), llegando a nuestros días con la creación de la «Estrategia Europea en Bioeconomía» (2012) ampliamente recogida en la hoja de ruta del Programa Horizonte 2020 (2014-2020)⁸. Todo este esfuerzo por parte de la UE se ha visto acompañado desde otras partes del planeta, siendo un ejemplo notable el papel jugado por los Estados Unidos de América (EEUU) donde en 2006 fue creado con carácter innovador el *Synthetic Biology Engineering Research Center* (SynBERC), ahora conocido como *Engineering Biology Research Consortium* (EBRC), un centro de investigación multidisciplinar focalizado en la comercialización de productos derivados de la actividad de la biología sintética –National Academy of Engineering and National Research Council⁹–.

⁷ POLIZZI (2013).

⁸ PATERMANN y AGUILAR (2018).

⁹ NASEM (2013).

3.2. Acelerando los procesos de I+D en búsqueda de una bioeconomía más competitiva

Las iniciativas de financiación como las anteriormente citadas están permitiendo a la biología sintética el desarrollo y perfeccionamiento de tecnologías fundamentales para la investigación pública e industrial, tales como:

- *Secuenciación de ADN.* La biología sintética, desde su perspectiva de ingeniería siempre ha tomado como pilar básico el conocimiento de la secuencia exacta de nucleótidos que componen los diferentes elementos genéticos bajo estudio (p. ej.: cromosomas). En la actualidad, la secuenciación de ADN se presenta como un claro ejemplo en cuanto a la democratización de las técnicas de biología molecular se refiere. Lejos quedan los tiempos en que un proyecto de secuenciación de ADN, como por ejemplo la secuenciación del genoma humano (2004), solo era posible gracias a la colaboración económica y la unión de esfuerzos entre diferentes instituciones¹⁰. El desarrollo de nuevas técnicas como la secuenciación de última generación (*Next-Generation Sequencing*, NGS) y la aún más novedosa secuenciación de tercera generación (*Third-Generation Sequencing*) han permitido un abaratamiento en costes y esfuerzos sin precedente en la industria¹¹. Para ser más precisos, la aplicación de estas nuevas tecnologías ha supuesto a día de hoy un abaratamiento en costes de unas 10.000 veces en comparación con el desempeñado durante la secuenciación del genoma humano en 2004¹². El abaratamiento en la secuenciación de ADN aumenta la accesibilidad de esta técnica a diferentes niveles, acelerando los procesos de I+D y permitiendo a la industria la incorporación de dichas técnicas en sus sistemas de producción y control de calidad.
- *Síntesis y ensamblado de ADN.* Las ya citadas «ómicas» han permitido delimitar las funciones de diferentes elementos biológicos dentro de las células. Por ejemplo, es posible concretar el número de genes necesarios para completar la síntesis de un determinado producto por parte de una bacteria. Las técnicas clásicas de biología molecular permitían el intercambio de dichos genes entre diferentes organismos mediante un simple método de «copia y pega». Sin embargo, en la actualidad ya no es necesario recurrir a este abordaje, siendo posible sintetizar «a la carta» la secuencia de ADN que contenga los genes de interés, y modificarla a nuestro antojo según deseemos. Durante la presente década la síntesis *de novo* de ADN ha sufrido un enorme avance en lo que a fidelidad y coste se refiere. La implementación de la síntesis de ADN basada en microchips ha permitido a la industria la miniaturización y automatización del proceso. Siguiendo este camino, es posible sintetizar en la actualidad fragmentos de ADN con un tamaño considerable de nucleótidos, de gran fidelidad y con un coste

¹⁰ GREEN, WATSON y COLLINS (2015).

¹¹ SHENDURE y JI (2008) y BLEIDORN (2016).

¹² HAYDEN (2014).

100 veces inferior al encontrado en las primeras fases de desarrollo de la técnica. Por si fuera poco, el desarrollo de técnicas automatizadas robustas de ensamblaje de ADN *in vitro* permite, mediante la unión de estos fragmentos, la producción de cadenas con más de 2.000 pares de bases de longitud¹³. Ejemplo de todo ello es la posibilidad de sintetizar a día de hoy, y de forma completa, el cromosoma de diferentes microorganismos (p. ej.: levaduras y bacterias)¹⁴. Tales avances permiten a la I+D e industria verse únicamente limitados por el conocimiento presente hasta la fecha, y no por la metodología y el coste, pudiendo optar por sintetizar a voluntad el ADN necesario de cara a mejorar los procesos deseados.

- Herramientas de manipulación genética. El alto grado de conocimiento alcanzado a la hora de asociar gen y función hace posible focalizar el diseño experimental hacia determinadas modificaciones de la secuencia de ADN. Una de las ramas más potentes en biología sintética ha sido la encargada de desarrollar metodologías que faciliten la manipulación del ADN de forma precisa y controlada, deleccionando, insertando o modificando la secuencia de nucleótidos a nuestro antojo¹⁵. El año 2013 marcó un antes y un después en lo que a edición genética se refiere, dándose a conocer el enorme potencial de la tecnología CRISPR/Cas9¹⁶. Descubierta como un sistema de defensa contra la infección de virus en bacterias¹⁷, el sistema CRISPR/Cas9 ha sido adaptado como un sistema eficaz y preciso de manipulación genética, demostrando su utilidad en multitud de organismos, incluyendo al ser humano¹⁸. Su bajo coste y simplicidad han revolucionado la era de la ingeniería genética, haciendo accesible a la I+D e industria la manipulación precisa del ADN de sus organismos de interés.
- Modelado *in silico* de sistemas biológicos complejos. El desarrollo de modelos matemáticos predictivos robustos se presenta como una potente herramienta en el campo de la biología sintética. El modelado *in silico* de determinadas funciones celulares, como rutas metabólicas o circuitos genéticos, permiten el diseño racional de complejos sistemas biológicos¹⁹. La capacidad de poder predecir informáticamente determinadas funciones biológicas supone un gran adelanto en términos de economía experimental, reduciéndose en coste y tiempo el trabajo necesario en el laboratorio. Este abordaje supone una aceleración en los ciclos de I+D, permitiendo a su vez a la industria nutrirse de una forma más rápida de los diferentes avances científicos, haciendo más competitivo el sector bioeconómico.

Apoyándose en estos avances tecnológicos clave, la biología sintética tiene el potencial de revolucionar los ciclos de producción biotecnológicos (Figura 1). Al igual que otras industrias,

¹³ KOSURI y CHURCH (2014).

¹⁴ ANNALURU *et al.* (2014) y GIBSON *et al.* (2010).

¹⁵ MARTÍNEZ-GARCÍA y DE LORENZO (2017).

¹⁶ MALI, ESVELT y CHURCH (2013).

¹⁷ BARRANGOU (2015).

¹⁸ CYRANOSKI (2016).

¹⁹ COVERT, KNIGHT, REED, HERRGARD y PALSSON (2004) y McADAMS y SHAPIRO (1995).

la biotecnológica depende de una fuerte interconexión entre sus diferentes etapas de desarrollo. El fin último de todo proceso industrial pasa por la entrega al consumidor de un producto, y para llegar a la obtención de este, es necesaria la consecución exitosa de una fase de investigación y producción. Esta última, especialmente en el caso de la industria biotecnológica, presenta dos actores principales: la clásica industria biotecnológica y las emergentes industrias *start-up* (industrias emergentes). Estas industrias *start-up* buscan escapar del encorsetado tejido clásico de producción. Focalizan su negocio en sectores innovadores, de carácter creativo (y por tanto diferencial), que persiguen simplificar procesos más complejos de la industria clásica manejando un capital de riesgo elevado. Esta filosofía ha resultado de gran atractivo en diferentes procesos relacionados con la biología sintética, generando una marcada innovación, de la cual se han nutrido tanto los procesos de investigación como aquellos de producción más clásicos²⁰.

En resumen, la biología sintética está transformando los clásicos ciclos de producción biotecnológicos, implementando una serie de métodos destinados a mejorar los costes, velocidad y viabilidad de sus procesos (Figura 1):

- El modelado *in silico* ha permitido reducir los experimentos de «ensayo y error» considerados como abordaje básico con anterioridad. Su optimización ha permitido la reducción en los tiempos de I+D, permitiendo a la par evaluar la viabilidad de proyectos que debido a su alto riesgo podrían ser descartados en una industria biotecnológica más clásica y conservadora.
- La perspectiva de ingeniería que guía a la biología sintética tiene como premisa la caracterización de los elementos funcionales que la componen (p. ej. los genes). A su vez, se persigue el tratamiento de estos como elementos estandarizados, tendiéndose a la unificación de los mismos en diseño, nomenclatura y descripción. Dicho sistema permite la creación de grandes colecciones de componentes genéticos estandarizados, que facilitan su intercambio, posibilitando la reutilización y optimización de estos para diferentes propósitos²¹. Este ambiente de trabajo repercute en una importante aceleración de los procesos de I+D, facilitando las estrategias a seguir en las industrias de producción al tratarse de componentes genéticos bien caracterizados.
- La aparición de numerosas empresas biotecnológicas especializadas, en muchos casos de tipo *start-up* o *spin-off*, ha permitido desvincular a la I+D de diferentes procesos de manufactura, como la síntesis y secuenciación de ADN (DNA-Script, 2017 y CIB-CSIC, 2018). Este desacoplamiento de funciones ha permitido la creación de nuevas empresas con un importante nicho de negocio, a la par que la investigación puede centrarse exclusivamente en la innovación y no en la producción.
- El proceso de estandarización perseguido por la biología sintética hace a esta disciplina susceptible de automatización y escalado²². El resultado de este diseño repercute en una

²⁰ FLORES BUESO y TANGNEY (2017).

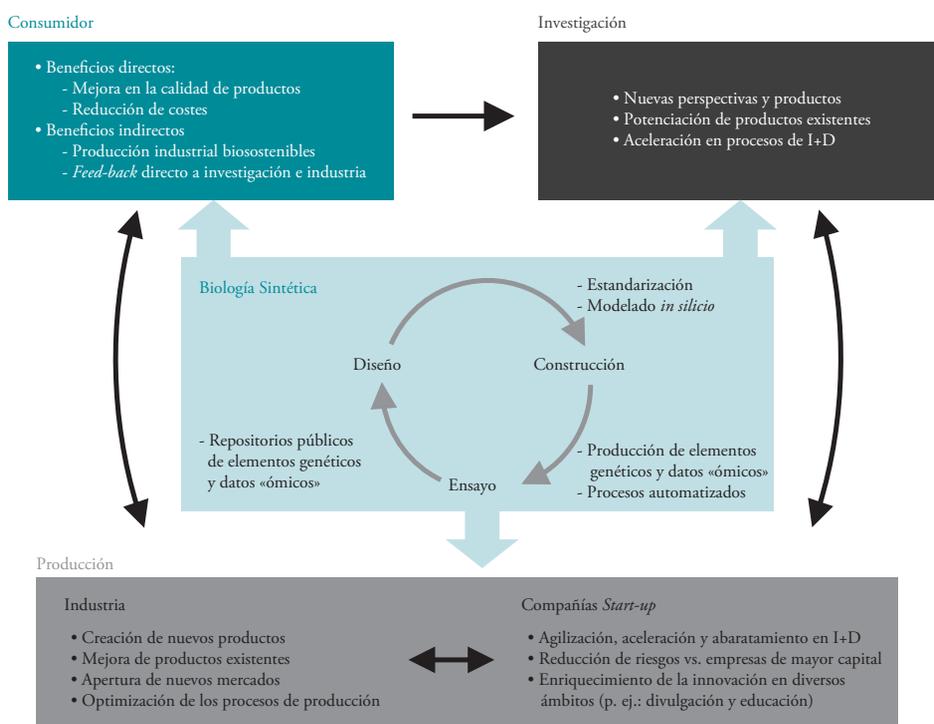
²¹ SILVA-ROCHA *et al.* (2013) y MYERS *et al.* (2017).

²² LORENZO y SCHMIDT (2018).

importante reducción de los ciclos de I+D, facilitando al mismo tiempo el escalado de sus resultados a un mayor volumen de producción industrial²³.

Con todo ello, es posible dibujar multitud de sinergias entre la biología sintética y los diferentes elementos de la industria biotecnológica, entendiendo esta como uno de los principales pilares de la bioeconomía (Figura 1). Al contrario de lo que cabría esperar, el desarrollo de la biología sintética no se centra única y exclusivamente en la aceleración de los procesos de I+D, sino que potencia a su vez los elementos productivos y por consiguiente el resultado que llega al consumidor.

Figura 1. Sinergias entre el espacio de la biología sintética y el tejido productivo bioeconómico



* El ciclo de producción biotecnológico se encuentra íntimamente interconectado. Las flechas dispuestas a lo largo de esta figura designan el flujo de influencia existente entre los diferentes sectores del mercado biotecnológico. Cada caja coloreada comprende un diferente sector, enumerándose en cada uno de ellos las características que les otorga relevancia. En el centro de la imagen aparece reflejada la biología sintética y su propio ciclo de desarrollo (diseño-construcción-ensayo), describiéndose los hitos que han resultado relevantes en el desarrollo de la industria biotecnológica.

²³ CHECK HAYDEN (2014).

4. ¿De qué es capaz la biología sintética? Reformulando la industria tradicional basada en el petróleo

Si la bioeconomía pretende sustituir a la industria tradicional basada en el petróleo, esta debe asumir totalmente sus competencias. En la actualidad, el petróleo se sitúa como una fuente esencial a la hora de conseguir combustible, químicos y materiales. La bioeconomía, mediante un enfoque basado en biología sintética de vanguardia, persigue obtener todos esos bienes partiendo de fuentes biológicas renovables. Si bien este último enfoque no se ha implementado aún de forma global, a continuación, se muestra cómo el campo de la biología sintética está afrontando el desafío de desterrar la dependencia del petróleo en dos campos clave: la producción de combustibles y la creación de compuestos plásticos.

4.1. Los biocombustibles como solución a largo plazo

El petróleo es una fuente de energía poderosa a la par que limitada, localizada y no renovable. Las reservas de esta materia prima son cada vez más escasas y de peor calidad, lo que encarece su utilización de forma continuada²⁴. La mayoría de la maquinaria que nos rodea emplea derivados de este combustible fósil para operar, como son el queroseno en aeronáutica, o la gasolina y el diésel en automoción. Reconvertir todo este aparataje para emplear otra fuente de energía alternativa supondría un esfuerzo insostenible. La solución a esta problemática pasa por la creación de combustibles capaces de trabajar en esta maquinaria ligeramente adaptada, con la salvedad, de obtenerse a partir de fuentes de energía biológicas renovables.

La historia de los biocombustibles es larga, siendo el bioetanol y biodiésel los más empleados y desarrollados hasta la fecha. En ambos se parte de materia vegetal para su manufactura, siendo en la mayoría de los casos cultivos destinados *ex profeso* para tal fin. Dicha realidad ha suscitado en la opinión pública la controversia entre el cultivo alimentario *vs.* el cultivo para biocombustibles, acrecentada por las numerosas hambrunas desarrolladas en los últimos años (Somalia, 2011 y Sudán del Sur, 2017)²⁵. Junto al componente ético-social se presenta la gran dificultad técnica para obtener estos biocombustibles, necesitando para ello de complejas fermentaciones y tratamientos químicos²⁶. Así, la utilización de estos biocombustibles no se plantea como algo opcional, sino como una obligatoriedad, especialmente si tenemos en cuenta la proyección a largo plazo del petróleo²⁷.

Como cabría esperar, la biología sintética tiene algo que aportar al respecto, añadiendo una perspectiva diferente a la producción de biocombustibles. Un ejemplo extraordinario de esta táctica es el trabajo publicado por Bokinsky y colaboradores, en el que se describe como

²⁴ MILLER y SORREL (2014).

²⁵ NASEM (2014).

²⁶ PEÑA-CASTRO *et al.* (2017) y VICENTE *et al.* (2007)..

²⁷ MILLER y SORREL (2014).

la bacteria *Escherichia coli* se modificó genéticamente con el fin de producir precursores para la síntesis de gasolina, gasoil y queroseno. Este trabajo presenta a esta bacteria como una biorrefinería viviente que es capaz de expresar por sí sola todos los elementos necesarios para transformar materia vegetal en biocombustibles, sin necesidad de llevar a cabo complejos procesos de purificación y fermentación (Figura 2a). La celulosa es un biopolímero compuesto exclusivamente por moléculas de glucosa, y a su vez, es la biomolécula con más presencia en la Tierra, al ser el componente esencial de las paredes vegetales. Este microorganismo, gracias a su manipulación genética, es capaz de expresar las enzimas necesarias para degradar esta celulosa en azúcares libres (unidades de glucosa). A su vez, la ingeniería genética realizada sobre *E. coli* le permite emplear estos azúcares para crecer y producir los precursores de biocombustibles. Este abordaje permite acumular en una misma célula lo que en la actualidad reúne una completa biorrefinería: degradación de biomasa y producción de biocombustibles²⁸.

Ejemplos como el anterior demuestran el gran potencial que tiene la biología sintética en el campo de la producción de biocombustibles y, por ende, en la bioeconomía. Todos estos abordajes se encuentran aún en fase de experimentación, pero una vez superen las limitaciones propias de la innovación, serán una fuerte herramienta para olvidar nuestra dependencia hacia los combustibles fósiles²⁹.

4.2. Bioplásticos, y biopolímeros generados mediante biología sintética

La presencia de plásticos en nuestra vida cotidiana se hace más que patente cuando miramos a nuestro alrededor. La mayoría de estos compuestos son producidos a partir del petróleo, con las problemáticas asociadas ya mencionadas. Por si esto no fuera suficiente, su tasa de degradación es ínfima, acumulándose en el medioambiente con unas consecuencias nefastas³⁰. Así pues, la sustitución de la industria plástica tradicional por una de bioplásticos de origen biológico y biodegradables se muestra como un asunto capital de cara a garantizar su presencia y sostenibilidad.

Al igual que en el caso de los biocombustibles, la producción de bioplásticos en la actualidad se encuentra soportada por fuentes de origen vegetal (p. ej.: almidón de maíz)³¹. En el caso de los bioplásticos provenientes del ácido poliláctico o PLA, su producción se basa en la fermentación de biomasa vegetal para obtener ácido poliláctico. Este monómero se polimeriza y purifica posteriormente mediante complejos procesos que envuelven altas temperaturas, disolventes y metales pesados³². De nuevo, la biología sintética se plantea como una herramienta para facilitar procesos como los mencionados anteriormente. Por ejemplo, ya se han generado bacterias de la especie *E. coli* cuyo metabolismo se ha redirigido y modificado para producir

²⁸ BOKINSKY *et al.* (2011).

²⁹ HOLLINSHEAD, HE Y TANG (2014).

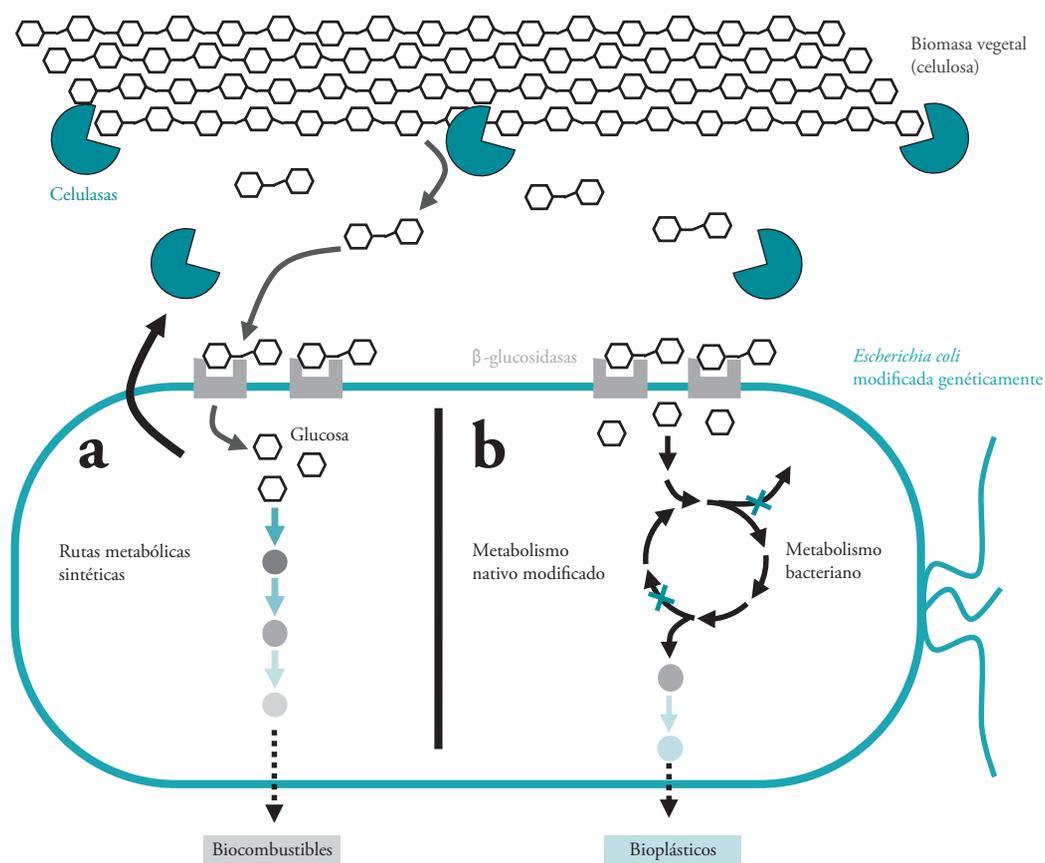
³⁰ O'CONNOR, GOLSTEIJN Y HENDRIKS (2016).

³¹ CHEN *et al.* (2016).

³² MEHTA, KUMAR, BHUNIA Y UPADHYAY (2005).

PLA a partir de glucosa de forma eficiente, evitando complejos tratamientos de polimerizado y purificación (Figura 2b)³³.

Figura 2. Microorganismos como biofactorías



* La imagen ejemplifica los diseños que la biología sintética ha explorado para la generación de biocombustibles y bioplásticos. Las bacterias modificadas genéticamente producen enzimas celulasas (señaladas en verde) y β-glucosidasas (señaladas en gris) que permiten descomponer la celulosa que compone la biomasa vegetal en unidades de glucosa. a) La introducción de rutas metabólicas sintéticas permite transformar la glucosa en diferentes precursores de biocombustibles. b) La modificación del metabolismo nativo de la propia bacteria (p. ej.: eliminando actividades mediante delección de genes metabólicos), junto con la introducción de genes productores de biopolímeros, permite canalizar los intermediarios del metabolismo de glucosa con el fin de incrementar la producción de bioplásticos.

Los bioplásticos PLA son una interesante alternativa en el mercado, pero tal y como ocurre con los plásticos provenientes del petróleo, la existencia de otros bioplásticos con diferentes propiedades (p. ej.: elasticidad y resistencia) se hace necesaria en una futura bioconversión de

³³ JUNG y LEE (2011).

la industria³⁴. La biología sintética también ayuda a dar respuesta a esta demanda, centrando sus esfuerzos en la producción de bioplásticos como los polihidroxialcanoatos o PHA. Estos poliésteres lineales son producidos en la naturaleza mediante la fermentación de azúcares y lípidos por parte de bacterias. Los microorganismos acumulan estos polímeros en su interior con la intención de obtener una reserva de carbono para periodos de escasez³⁵, siendo uno de sus grandes exponentes la especie *Cupriavidus necator*³⁶. Diferentes grupos de investigación, haciendo uso de biología sintética, están tomando como inspiración los genes de producción de PHA que se encuentran en bacterias como *C. necator*³⁷ y *Pseudomonas putida*³⁸. Haciendo uso de esta información genética es posible modificar bacterias más manejables industrialmente como *E. coli*, consiguiendo microorganismos biofactoría con una importante producción de bioplásticos tipo PHA³⁹. Estos polímeros se pueden incluso funcionalizar biológicamente para dotar a los materiales resultantes de propiedades más allá de sus meras características físicas⁴⁰.

5. Biología sintética, bioeconomía y sociedad

Por último, y no menos importante, es necesario remarcar la trascendencia que tiene la comunicación entre todas las partes interesadas en el desarrollo de la bioeconomía. Los científicos no pueden obviar la repercusión que sus trabajos tienen en la sociedad, siendo de vital importancia la correcta difusión de sus resultados ante la opinión pública y los organismos reguladores. Un entorno de correcta comunicación y divulgación, entendiéndolo siempre desde un enfoque bidireccional entre ciencia y sociedad, es la única opción para desarrollar todo el potencial que la biología sintética puede ofrecer para el desarrollo bioeconómico.

5.1. Regulación y bioseguridad

En la actualidad, la mayoría de expertos consideran que las regulaciones legales y la proyección de riesgos en lo relativo a la biología sintética pueden ser cubiertos por los ya existentes en materia de ingeniería genética. A medio plazo, se asume que el empleo de biología sintética no supone un riesgo ni genera nuevas cuestiones en lo que a bioseguridad se refiere⁴¹. No obstante, es necesario una constante vigilancia y una evaluación de leyes en consonancia con los avances científicos.

En términos de bioseguridad, se debe hacer hincapié en la dicotomía que este término presenta en castellano (*biosafety vs. biosecurity*). Entendiendo bioseguridad como *biosafety* en

³⁴ ARRIETA, SAMPER, ALDAS y LÓPEZ (2017).

³⁵ ACKERMANN, MÜLLER, LÖSCHE, BLEY y BABEL (1995).

³⁶ VANDAMME y COENYE (2004).

³⁷ FEI, CAZENEUVE, WEN, WU y WANG (2016) y BATCHA, PRASAD, KHAN y ABDULLAH (2014).

³⁸ TORTAJADA, DA SILVA y PRIETO (2013).

³⁹ LEONG, SHOW, OOI, LING y LAN (2014).

⁴⁰ BELLO-GIL *et al.* (2017).

⁴¹ EPTA (2011).

inglés, se hace referencia a la serie de políticas y prácticas desarrolladas con el fin de proteger al trabajador y medioambiente de sucesos fortuitos y accidentales. En este caso la principal problemática es la falta de una apropiada formación, junto a una correcta concienciación, que resalte lo crítico de trabajar en un ambiente de laboratorio⁴². Estas cuestiones son especialmente importantes en un entorno multidisciplinar como en el que se desarrolla la biología sintética, siendo necesaria una mayor atención en términos de bioseguridad para aquellos profesionales más ajenos al trabajo en laboratorio con organismos vivos (p. ej.: ingenieros computacionales o químicos sintéticos).

Por otro lado, el término bioseguridad como *biosecurity* en inglés, hace referencia al control del material biológico e información para obtener este con el fin de prevenir una posesión indebida y/o un uso malintencionado (p. ej.: liberando agentes vivos al medioambiente). En lo que respecta a la normativa de la UE, se asume que la regulación actual en términos de bioseguridad es suficiente para afrontar los desafíos emergentes del uso de la biología sintética⁴³. Al tratarse de una disciplina de vanguardia, es necesario a su vez realizar un seguimiento cercano de sus actividades y productos, siendo relevante el papel que en la UE desarrolla el *Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks* (SCENIHR 2015). Esta institución aconseja una serie de medidas de cara a garantizar una continua seguridad y protección en cuanto a bioseguridad se refiere, haciendo a la vez especial hincapié en la proporcionalidad de estas, a fin de no comprometer la seguridad ni tampoco el dinamismo investigador. El SCENIHR propuso en 2015 como puntos de partida para una biología sintética segura: (i) caracterizar detalladamente los elementos biológicos en estudio a la par que del desarrollo de herramientas computacionales para predecir las propiedades emergentes de los mismos; (ii) optimizar y estandarizar los métodos de comunicación con los agentes asesores de riesgos en materia de modificaciones y herramientas genéticas; (iii) incentivar al uso de organismos modificados genéticamente (OMG) cuya funcionalidad y seguridad hayan sido contrastadas; (iv) asegurarse que los métodos de evaluación de riesgos y los avances en biología sintética evolucionan de forma paralela; y (v) apoyar el intercambio de información relevante sobre elementos, dispositivos y sistemas biológicos con los agentes asesores de riesgo. El cumplimiento de estas directrices, asumiendo la organización estandarizada que deben cumplir los elementos biológicos generados mediante biología sintética, asegura un entorno de bioseguridad que no sacrifica el progreso.

A fin de concluir este apartado que atañe a la bioseguridad, no debemos olvidar cómo el desarrollo de la biología sintética ha permitido la democratización de multitud de técnicas moleculares. El ya mencionado abaratamiento y accesibilidad que han sufrido técnicas como la secuenciación, síntesis y manipulación de ADN generan un escenario novedoso en el cual ya no es necesaria la posesión de un laboratorio sofisticado para realizar biología sintética. Esto puede presentarse como una extraordinaria situación de cara a hacer más accesible la ciencia a la sociedad, pero a la par facilita el empleo malicioso de estas técnicas. Teniendo en cuenta todo

⁴² SCHMIDT *et al.* (2009).

⁴³ EPTA (2011).

ello, expertos como Schmidt y Giersch⁴⁴ sostienen que deben supervisarse aspectos como: (i) controlar la difusión de secuencias de ADN que permitan la síntesis de cromosomas y toxinas procedentes de conocidos patógenos; (ii) hacer un control de los clientes de tecnologías de síntesis de ADN para evitar usos inapropiados; y (iii) controlar la distribución de equipamiento y sustancias necesarias para la síntesis de oligonucleótidos.

5.2. Los lazos entre sociedad y biología sintética: normalizar la bioeconomía

Pocas dudas quedan sobre el beneficioso papel que debe adquirir la bioeconomía a la hora de combatir los grandes retos a nivel global que se plantean. A su vez, ha quedado claro el enorme potencial que presenta la biología sintética como plataforma tecnológica en el desarrollo de la bioeconomía. Sin embargo, existe una gran problemática en cuanto a la reacción adversa que presenta una gran parte de la sociedad frente a la utilización de la tecnología de OMG, especialmente en la UE. Esta confrontación puede impactar negativamente en el desarrollo de la biología sintética y, por ende, ralentizar la aplicación de una potente bioeconomía.

Teniendo en cuenta todo lo mencionado, debe ser prioritario en las agendas de las diferentes instituciones públicas de investigación la creación de proyectos multidisciplinares que faciliten el intercambio de opiniones ciencia-sociedad. Profesionales de la investigación con amplios conocimientos en divulgación se muestran clave de dicha estrategia. A su vez, no debe olvidarse la demanda de profesionales que la biología sintética requerirá en un futuro, siendo la educación de los jóvenes un objetivo prioritario. Competiciones de biología sintética como el iGEM (www.igem.org), en el que diferentes equipos de estudiantes se enfrentan para desarrollar un proyecto científico corto e innovador, acerca a los más jóvenes a esta disciplina a la par que se refuerza el diálogo con la opinión pública.

Por último, debe destacarse el enorme grado de expansión que está alcanzando la biotecnología gracias a la biología sintética, permitiendo a esta última introducirse en industrias hasta entonces ajenas a su actividad. Un gran ejemplo de esta exótica expansión es la creación de *start-up* que aúnan en un mismo proyecto los conceptos «fácil de usar», «biología sintética» y «hazlo tú mismo en casa». Proyectos como Amino Labs (www.amino.bio) y Bento Labs (www.bento.bio) han desarrollado sencillos kits con los que realizar sencillos experimentos de biología sintética desde la propia casa, suponiendo una novedosa fuente de negocio a la par que educativa y divulgativa.

⁴⁴ SCHMIDT y GIERSCH (2011).

6. Conclusiones

Durante el desarrollo del presente capítulo ha sido posible demostrar la estrecha relación existente entre la biología sintética y la bioeconomía. Desde un punto de vista holístico, es posible definir la relación de ambos términos como una sinergia en expansión. El desarrollo de la bioeconomía se encuentra estrechamente relacionado al sector biotecnológico. Dicho sector ha sido impulsado en la actualidad gracias al enfoque tomado de la ingeniería y adoptado por la biología Sintética, que sirve finalmente como la herramienta tecnológica idónea para la evolución de la bioeconomía.

La innovación que define a la biología sintética como campo de investigación ha permitido el desarrollo de multitud de técnicas que han revolucionado las ciencias moleculares. Unido a estos avances, encontramos el cambio de filosofía que ha supuesto la biología sintética para las biociencias, definiendo a los organismos vivos como máquinas cuyas partes (o piezas) puede ser entendidas, estandarizadas y reutilizadas con el fin de obtener un beneficio concreto. Todo ello ha permitido que la biología sintética potencie directamente todos los sectores del tejido productivo biotecnológico, desde el consumidor al productor, evitando ceñirse en exclusiva a la previsible I+D.

La bioeconomía se cimienta en la utilización de fuentes biológicas renovables como pilar fundamental de la industria del futuro. Es la única salida viable a la dependencia nociva que presenta el uso del petróleo y sus derivados. Ejemplos como los citados para la producción de biocombustibles y bioplásticos definen a la biología sintética como una herramienta primordial en la implementación de una bioeconomía real.

Un cambio tan profundo a nivel global como el perseguido por la bioeconomía no puede prescindir de un enfoque social responsable. Sus herramientas esenciales, como la biología sintética, deben contar con una vigilancia adecuada y proporcionada en materia de bioseguridad. Esta supervisión debe realizarse garantizando en todo momento la protección social, sin por ello limitar o penalizar los avances científicos. Encontrar el balance perfecto entre riesgo e innovación dependerá en gran medida del éxito en políticas de educación y divulgación, siendo estas últimas un elemento clave a la hora de hacer a la sociedad participe del éxito y desarrollo de la estrategia en bioeconomía.

Referencias bibliográficas

ACKERMANN, J. U.; MÜLLER, S.; LÖSCHE, A.; BLEY, T. y BABEL, W. (1995): «Methylobacterium rhodesianum cells tend to double the DNA content under growth limitations and accumulate PHB»; en *Journal of Biotechnology* (39); pp. 9-20.

- ANNALURU, N.; MULLER, H.; MITCHELL, L. A.; RAMALINGAM, S.; STRACQUADANIO, G.; RICHARDSON, S. M.; DYMOND, J. S.; KUANG, Z.; SCHEIFELE, L. Z.; COOPER, E. M.; CAI, Y.; ZELLER, K.; AGMON, N.; HAN, J. S.; HADJITHOMAS, M.; TULLMAN, J.; CARAVELLI, K.; CIRELLI, K.; GUO, Z.; LONDON, V.; YELURU, A.; MURUGAN, S.; KANDAVELOU, K.; AGIER, N.; FISCHER, G.; YANG, K.; MARTIN, J. A.; BILGEL, M.; BOHUTSKI, P.; BOULIER, K. M.; CAPALDO, B. J.; CHANG, J.; CHAROEN, K.; CHOI, W. J.; DENG, P.; DICARLO, J. E.; DOONG, J.; DUNN, J.; FEINBERG, J. I.; FERNÁNDEZ, C.; FLORIA, C. E.; GLADOWSKI, D.; HADIDI, P.; ISHIZUKA, I.; JABBARI, J.; LAU, C. Y.; LEE, P. A.; LI, S.; LIN, D.; LINDER, M. E. *et al.* (2014): «Total synthesis of a functional designer eukaryotic chromosome»; en *Science* (344); pp. 55-8.
- ARRIETA, M. P.; SAMPER, M. D.; ALDAS, M. y LÓPEZ J. (2017): «On the Use of PLA-PHB Blends for Sustainable Food Packaging Applications»; en *Materials (Basel)* 10.
- BARRANGOU, R. (2015): «The roles of CRISPR-Cas systems in adaptive immunity and beyond»; en *Current Opinion in Immunology* (32); pp. 36-41.
- BATCHA, A. F.; PRASAD, D. M.; KHAN, M. R. y ABDULLAH, H. (2014): «Biosynthesis of poly(3-hydroxybutyrate) (PHB) by *Cupriavidus necator* H16 from jatropha oil as carbon source»; en *Bioprocess and Biosystems Engineering* (37); pp. 943-51.
- BELLO-GIL, D.; MAESTRO, B.; FONSECA, J.; DINJASKI, N.; PRIETO, M. A. y SANZ, J. M. (2017): «Poly-3-hydroxybutyrate Functionalization with BioF-Tagged Recombinant Proteins»; en *Applied and Environmental Microbiology*; doi:10.1128/aem.02595-17.
- BLEIDORN, C. (2016): «Third generation sequencing: technology and its potential impact on evolutionary biodiversity research»; en *Systematics and Biodiversity* (14); pp. 1-8.
- BOKINSKY, G.; PERALTA-YAHYA, P. P.; GEORGE, A.; HOLMES, B. M.; STEEN, E. J.; DIETRICH, J.; LEE, T. S.; TULLMAN-ERCEK, D.; VOIGT, C. A.; SIMMONS, B. A. y KEASLING, J. D. (2011): «Synthesis of three advanced biofuels from ionic liquid-pretreated switchgrass using engineered *Escherichia coli*»; en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (108); pp. 19949-54.
- CHECK HAYDEN, E. (2014): *The automated lab*. *Nature* 516; pp. 131-2.
- CHEN, Y.; GEEVER, L. M.; KILLION, J. A.; LYONS, J. G.; HIGGINBOTHAM, C. L. y DEVINE, D. M. (2016): *Review of Multifarious Applications of Poly (Lactic Acid)*. *Polymer-Plastics Technology and Engineering* (55); pp. 1057-1075.
- CIB-CSIC (2018): <https://www.cib.csic.es/es/spin-offs>.
- COVERT, M. W.; KNIGHT, E. M.; REED, J. L.; HERRGARD, M. J. y PALSSON, B. O. (2004): «Integrating high-throughput and computational data elucidates bacterial networks»; en *Nature* (429); pp. 92-6.

- CYRANOSKI, D. (2016): «CRISPR gene-editing tested in a person for the first time»; en *Nature* (539); pp. 479.
- DE LORENZO, V. y SCHMIDT, M. (2018): «Biological standards for the Knowledge-Based BioEconomy: What is at stake»; en *New Biotechnology* (40); pp. 170-180.
- DNA-SCRIPT. (2017): <https://labiotech.eu/dna-script-dna-synthesis-fundraising/>.
- EPTA. (2011): «Briefing Note N.º 1, Synthetic Biology»; European Parliamentary Technology Assessment.
- FEI, T.; CAZENEUVE, S.; WEN, Z.; WU, L. y WANG, T. (2016): «Effective recovery of poly-beta-hydroxybutyrate (PHB) biopolymer from *Cupriavidus necator* using a novel and environmentally friendly solvent system»; en *Biotechnology Progress* (32); pp. 678-85.
- FLORES BUESO, Y. y TANGNEY, M. (2017): «Synthetic Biology in the Driving Seat of the Bioeconomy»; en *Trends in Biotechnology* (35); pp. 373-378.
- GIBSON, D. G.; GLASS, J. I.; LARTIGUE, C.; NOSKOV, V. N.; CHUANG, R. Y.; ALGIRE, M. A.; BENDERS, G. A.; MONTAGUE, M. G.; MA, L.; MOODIE, M. M.; MERRYMAN, C.; VASHEE, S.; KRISHNAKUMAR, R.; ASSAD-GARCÍA, N.; ANDREWS-PEANNKOCH, C.; DENISOVA, E. A.; YOUNG, L.; QI, Z. Q.; SEGALL-SHAPIRO, T. H.; CALVEY, C. H.; PARMAR, P. P.; HUTCHISON, C. A.; 3RD, SMITH, H. O. y VENTER, J. C. (2010): «Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome»; en *Science* (329); pp. 52-6.
- GREEN, E. D.; WATSON, J. D. y COLLINS, F. S. (2015): «Human Genome Project: Twenty-five years of big biology»; en *Nature* (526); pp. 29-31.
- HAYDEN, E. C. (2014): «Technology: The \$1,000 genome»; en *Nature* (507); pp. 294-5.
- HOLLINSHEAD, W.; HE, L. y TANG, Y. J. (2014): «Biofuel production: an odyssey from metabolic engineering to fermentation scale-up»; en *Frontiers in Microbiology* (5); pp. 344.
- JUNG, Y. K. y LEE, S. Y. (2011): «Efficient production of polylactic acid and its copolymers by metabolically engineered *Escherichia coli*»; en *Journal of Biotechnology* (151); pp. 94-101.
- KIRCHER, M. (2012): «The transition to a bio-economy: emerging from the oil age»; en *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* (6); pp. 369-375.
- KOSURI, S. y CHURCH, G. M. (2014): «Large-scale de novo DNA synthesis: technologies and applications»; en *Nature Methods* (11); pp. 499-507.
- LEONG, Y. K.; SHOW, P. L.; OOI, C. W.; LING, T. C. y LAN, J. C. (2014): «Current trends in polyhydroxyalkanoates (PHAs) biosynthesis: insights from the recombinant *Escherichia coli*»; en *Journal of Biotechnology* (180); pp. 52-65.
- MALI, P.; ESVELT, K. M. y CHURCH, G. M. (2013): «Cas9 as a versatile tool for engineering biology»; en *Nature Methods* (10); pp. 957-63.

- MARTÍNEZ-GARCÍA, E. y DE LORENZO, V. (2017): «Molecular tools and emerging strategies for deep genetic/genomic refactoring of *Pseudomonas*»; en *Current Opinion in Biotechnology* (47); pp. 120-132.
- MCADAMS, H. H. y SHAPIRO, L. (1995): «Circuit simulation of genetic networks»; en *Science* (269); pp. 650-6.
- MEHTA, R.; KUMAR, V.; BHUNIA, H. y UPADHYAY, S. N. (2005): «Synthesis of Poly(Lactic Acid): A Review»; en *Journal of Macromolecular Science (part C 45)*; pp. 325-349.
- MILLER, R. G. y SORRELL, S. R. (2014): «The future of oil supply»; en *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical & Engineering Sciences* (372); pp. 20130179.
- MYERS, C. J.; BEAL, J.; GOROCHOWSKI, T. E.; KUWAHARA, H.; MADSEN, C.; MCLAUGHLIN, J. A.; MISIRLI, G.; NGUYEN, T.; OBERORTNER, E.; SAMINENI, M.; WIPAT, A.; ZHANG, M. y ZUNDEL, Z. (2017): «A standard-enabled workflow for synthetic biology»; en *Biochemical Society Transactions* (45); pp. 793-803.
- NASEM. (2013): *Positioning Synthetic Biology to Meet the Challenges of the 21st Century: Summary Report of a Six Academies Symposium Series*. Washington (DC), National Academy of Engineering and National Research Council, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24872969>.
- NASEM. (2014): *The Nexus of Biofuels, Climate Change, and Human Health: Workshop Summary*. Washington (DC), Institute of Medicine, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24783310>.
- O'CONNOR, I. A.; GOLSTEIJN, L. y HENDRIKS, A. J. (2016): «Review of the partitioning of chemicals into different plastics: Consequences for the risk assessment of marine plastic debris»; en *Marine Pollution Bulletin* (113); pp. 17-24.
- PATERMANN, C. y AGUILAR, A. (2018): «The origins of the bioeconomy in the European Union»; en *New Biotechnology* (40); pp. 20-24.
- PENA-CASTRO, J. M.; DEL MORAL, S.; NUNEZ-LÓPEZ, L.; BARRERA-FIGUEROA, B. E. y AMAYA-DELGADO, L. (2017): «Biotechnological Strategies to Improve Plant Biomass Quality for Bioethanol Production»; en *BioMed Research International*; pp. 7824076.
- PHILP, J. (2018): «The bioeconomy, the challenge of the century for policy makers»; en *New Biotechnology* (40); pp. 11-19.
- POLIZZI, K. M. (2013): «What is synthetic biology?»; en *Methods in Molecular Biology* (1073); pp. 3-6.
- SCHMIDT, M.; GANGULI-MITRA, A.; TORGENSEN, H.; KELLE, A.; DEPLAZES, A. y BILLER-ANDORNO, N. (2009): «A priority paper for the societal and ethical aspects of synthetic biology»; en *Systems and Synthetic Biology* (3); pp. 3-7.

- SCHMIDT, M. y GIERSCH, G. (2011): «DNA Synthesis and Security»; En CAMPBELL, M. J., ed.: *DNA Microarrays, Synthesis and Synthetic DNA*. Nova Publishers; pp. 285-300.
- SCHWAB, K. (2017): *The fourth industrial revolution*. Nueva York. Crown Business.
- SHENDURE, J. y JI, H. (2008): «Next-generation DNA sequencing»; en *Nature Biotechnology* (26); pp. 1135-45.
- SILVA-ROCHA, R.; MARTÍNEZ-GARCÍA, E.; CALLES, B.; CHAVARRIA, M.; ARCE-RODRÍGUEZ, A.; DE LAS HERAS, A.; PAEZ-ESPINO, A. D.; DURANTE-RODRÍGUEZ, G.; KIM, J.; NIKEL, P. I.; PLATERO, R. y DE LORENZO, V. (2013): «The Standard European Vector Architecture (SEVA): a coherent platform for the analysis and deployment of complex prokaryotic phenotypes»; en *Nucleic Acids Research* (41); pp. D666-75.
- TORTAJADA, M.; DA SILVA, L. F. y PRIETO, M. A. (2013): «Second-generation functionalized medium-chain-length polyhydroxyalkanoates: the gateway to high-value bioplastic applications»; en *International Microbiology* (16); pp. 1-15.
- VANDAMME, P. y COENYE, T. (2004): «Taxonomy of the genus *Cupriavidus*: a tale of lost and found»; en *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* (54); pp. 2285-9.
- VICENTE, G.; MARTÍNEZ, M. y Aracil, J. (2007): «Optimisation of integrated biodiésel production. Part I. A study of the biodiésel purity and yield»; en *Bioresource Technology* (98); pp. 1724-33.



MEDITERRÁNEO
ECONÓMICO

32

- I. Iniciativas europeas en bioeconomía
- II. Perspectivas de la bioeconomía en España
- III. Necesidad de una sólida base científica y técnica en bioeconomía
- IV. Bioeconomía, bioindustrias y seguridad alimentaria**
- V. Ejemplos de éxito en la bioeconomía
- VI. Bioeconomía y bioenergía



LAS BIOINDUSTRIAS EN EL ENTORNO DE LA BIOECONOMÍA

NECESIDADES, OPORTUNIDADES Y BENEFICIOS

Pilar Caro y Ion Arocena
Asociación Española de Bioempresas-ASEBIO

Resumen

Las sociedades avanzadas se enfrentan actualmente a grandes retos ante un escenario de recursos naturales limitados y finitos, y cambio climático, para el abastecimiento seguro de alimentos, productos y energía, además de la creación de empleos y crecimiento en zonas rurales y desindustrializadas.

La implementación de soluciones provenientes de la biotecnología, a través de su bioindustria, y el desarrollo de las cadenas de valor relacionadas, así como la aparición de nuevos agentes como las biorrefinerías, se han convertido en un elemento clave en el desarrollo de la bioeconomía, la generación de empleo y el estímulo del desarrollo rural, al ofrecer modelos de crecimiento más sostenibles y respetuosos con el medioambiente mediante la generación de tecnologías y procesos más sostenibles y eficientes para el desarrollo de nuevos materiales y (bio)productos, y el abastecimiento suficiente de alimentos seguros, saludables y de calidad. Sin embargo, esta transición hacia nuevos modelos de desarrollo y crecimiento más sostenibles desde la perspectiva social, económica y medioambiental requiere que el apoyo y la promoción a estos desarrollos se fije como una prioridad a largo plazo.

Este capítulo busca vislumbrar las oportunidades de la biotecnología y su sector industrial en el contexto del desarrollo de la bioeconomía, e identificar las barreras y recomendaciones para su desarrollo e implementación efectiva. Lo anterior depende en gran medida de la aceptación en el mercado de los productos biotecnológicos y de la existencia de un contexto social y regulatorio que lo posibilite y promueva. Así mismo, es necesario mejorar las capacidades del tejido innovador español, mediante la colaboración del sistema de ciencia y tecnología con las entidades públicas y privadas españolas, para convertir al sector español en un referente mundial de economía sostenible dentro de Europa.

Abstract

Advanced societies currently face major challenges in a scenario of limited and finite natural resources, and climate change, with regard to the secure supply of foodstuffs, products, and energy, in addition to the creation of employment and growth in rural and deindustrialised areas.

Implementing biotechnology solutions, via bioindustries, and developing the related value chains, as well as the appearance of new elements such as biorefineries, have become key elements in bioeconomy development and employment generation, as well as stimulating rural development, by offering more environmentally conscious and sustainable growth models through more sustainable and efficient technologies and processes for developing new materials and (bio)products, and the supply of sufficient secure, healthy, and high-quality foodstuffs. However, this transition towards new, more sustainable development and growth models from the social, economic, and environmental perspective, needs the support and promotion of these developments to be set as a long-term priority.

This chapter seeks to glimpse the opportunities of biotechnology and its industrial sector in the context of bioeconomy development, and identify the barriers and recommendations for its development and effective implementation, which depend, to a large extent, on the market's acceptance of biotechnology products and the existence of a social and regulatory context that enables and promotes these, as well as improving the capabilities of Spanish innovation, through science and technology collaborating with public and private organisations in Spain, to transform Spain into a global benchmark of sustainable economy within Europe.

La humanidad se enfrenta a grandes retos para mantener los parámetros de calidad de vida en un escenario de cambio climático y una población mundial en ascenso. El documento *La innovación al servicio del crecimiento sostenible: una bioeconomía para Europa*¹ expone e identifica los retos trascendentales para nuestra civilización que tienen que ver con cuestiones

¹ COM (2012) 60 final.

clave para el desarrollo y crecimiento ante las nuevas condiciones y retos. Algunos de ellos son la adopción de medidas para la gestión sostenible de los recursos naturales, la reducción de la dependencia de los recursos no renovables, la atenuación del cambio climático, la creación de puestos de trabajo y el desarrollo de la industria, manteniendo la competitividad europea. El cumplimiento de estos grandes retos sociales de carácter global requiere del compromiso y la colaboración por parte de todos los agentes para la puesta en práctica de estrategias claramente definidas, en cuanto al tipo de actuaciones y plazos, que contribuyan a impulsar modelos productivos más respetuosos con el medioambiente².

La bioeconomía engloba a las entidades y organismos que desarrollan un conjunto de actividades económicas mediante las cuales se utilizan de manera sostenible los recursos renovables de origen biológico y sus flujos de residuos. Se busca su conversión en productos con valor añadido, como alimentos, piensos, bioproductos, bioplásticos, biocombustibles, biofertilizantes y/o bioenergía. Así, la bioeconomía, y el tejido industrial y científico que le da soporte, aparece cada vez más como una pieza fundamental para el futuro desarrollo económico y social, al integrar la utilización óptima de los residuos producidos por el sector primario, la población y la industria con la producción industrial de (bio)productos de valor añadido que pueden sustituir a los derivados del petróleo, así como con el desarrollo de una alimentación segura, promoviendo y asegurando el uso sostenible de los recursos y limitando su impacto medioambiental.

La Comisión Europea ha apostado fuertemente por la transición y adopción de nuevas formas de producción, consumo y transformación hacia un escenario de cero residuos en Europa³, mediante la adopción de un paquete de medidas para ayudar a las empresas y los consumidores europeos en su evolución hacia un modelo de economía más sólido y circular, donde se utilicen los recursos de modo más sostenible⁴. Estas medidas persiguen extraer el máximo valor y uso de todas las materias primas, productos y residuos, fomentando el ahorro energético y reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero, al cerrar el círculo de los ciclos de vida de los productos a través de un mayor reciclado y reutilización, lo que aporta beneficios tanto al medioambiente como a la economía.

Estos nuevos modelos que presentan la posibilidad de una gestión sostenible de los recursos suponen una revolución de la forma en que la sociedad obtendrá fuentes vitales de alimentos, energía y carbono. Reducirán de forma significativa el proceso de dependencia del petróleo y de otras fuentes de energía tradicionales, acoplándose a las nuevas necesidades sociales y condiciones ambientales. Se trata pues de una verdadera revolución de los sistemas productivos, los mecanismos de implementación y colaboración y las estructuras económicas.

El posicionamiento temprano de España en la generación de crecimiento sostenible en base al conocimiento, y el liderazgo en iniciativas que fomentan la economía circular y la bioeconomía, será un elemento clave para el continuo desarrollo de nuestra industria y su

² SECRETARÍA DE ESTADO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN. MINEICO y MAPAMA (2015).

³ COM (2014) 398 final.

⁴ COM (2015) 614 final.

posicionamiento nacional e internacional de una manera competitiva. En este contexto, la biotecnología se ha consolidado como la herramienta que aúna el conocimiento de diferentes disciplinas científicas y tecnológicas capaces de aportar a los sistemas de producción soluciones eficaces y compatibles con el medioambiente. La biotecnología y su industria aportan ciertas ventajas y beneficios que incrementan su competitividad frente a otros procesos o sectores convencionales, que tienen que ver con cuestiones como el impacto medioambiental, el consumo de recursos y la generación de residuos⁵. De hecho, los avances logrados en los últimos años en el campo de la biotecnología han puesto de manifiesto el potencial que esta ofrece para la fabricación de productos y biomateriales de interés general de una manera más sostenible, respetuosa y eficiente, al posibilitar la reducción en el consumo de recursos (materias primas, energía, agua, fertilizantes) por una mayor utilización de materias primas renovables, así como residuos y subproductos de otros procesos de producción, reduciendo así su generación y su impacto medioambiental, y el incremento en el reciclaje de los mismos. En este sentido, también ha promovido el desarrollo de tecnologías limpias de origen biológico que permiten la sustitución de procesos químicos de producción por otros nuevos basados en tecnologías enzimáticas, que conllevan un menor consumo de energía y una menor emisión de gases de efecto invernadero (GEI), al tiempo que permiten una mayor reutilización y aprovechamiento de la materia prima, aumentando así el valor de la cadena de producción, y, por tanto, el rendimiento del proceso.

Al mismo tiempo, la biotecnología también es capaz de aportar soluciones específicas en otros sectores mediante: i) el desarrollo de tecnologías y productos eficaces y compatibles con el medioambiente en los sistemas de producción agraria y alimentaria, como es el desarrollo de variedades mejor adaptadas a distintas zonas de cultivo (en cuanto a rendimiento y costes de cultivo, requerimientos hídricos, tolerancia a distintos tipos de estrés abiótico, y/o eficiencia en el uso de fertilizantes); ii) el diseño de nuevos métodos de control biológico y protección frente a patógenos de diversa naturaleza; iii) la mejora de las características funcionales, sensoriales y nutricionales de los alimentos; y iv) el desarrollo de tecnologías, procesos y materiales que permiten la optimización del procesado y la conservación de los alimentos. Todo ello conlleva una utilización de los recursos naturales, mejor y más efectiva, un mayor rendimiento en la producción, y el desarrollo de nuevos productos de interés social, con propiedades más saludables o atractivas para el consumidor. De esta forma se mejora la salud y la nutrición de los consumidores y se minimiza el impacto ambiental, al reducir la merma y desperdicio de los recursos y materia prima.

Por todo lo expuesto, la biotecnología agroalimentaria e industrial se posicionan como una de las principales alternativas para una producción de alimentos seguros y funcionales, y de tecnologías, materiales, productos y energía más limpios y sostenibles, constituyendo el núcleo central de la bioeconomía.

Así, las bioindustrias establecen las bases que harán posible esta transformación, proveyendo de tecnología y herramientas que permitan el desarrollo de productos y procesos basados

⁵ FEDIT (Centros Tecnológicos de España). Observatorio Químico del MITYC, actual Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital (diciembre de 2008).

en materias primas renovables con efectos ambientales neutros o positivos, un pronunciado desarrollo económico local y una buena percepción social. Una realidad orientada a generar innovación en el ámbito de la producción y el uso sostenible de biomasa.

Desde el punto de vista de la industria, el que la balanza se incline hacia los procesos y tecnologías obtenidos a través de la biotecnología frente a procesos tradicionales para la implementación de soluciones procedentes de la bioeconomía y las cadenas de valor relacionadas, depende principalmente de factores económicos como los costes de producción o la aceptación en el mercado de los productos de base biológica o bioproductos. Aunque también es necesario el desarrollo del estado de la técnica, la garantía de un suministro sostenible de materia prima, y la conciencia de los consumidores y los gobiernos sobre la necesidad de considerar como factores económicos el impacto medioambiental, el consumo de recursos y la generación de residuos. La sostenibilidad, por tanto, se presenta como una cuestión clave, haciendo de la biotecnología un elemento esencial, ya que aporta ciertas ventajas y beneficios que incrementan su competitividad frente a otros procesos convencionales en términos de eficiencia económica, social y medioambiental.

La biotecnología y el apoyo a las bioindustrias son elementos claves para afrontar los grandes retos que tiene el planeta con objeto de evitar llegar a un punto de no retorno. Para ello es necesario establecer esquemas fiables y estables de transferencia de este conocimiento y generar economía y riqueza en torno a esas soluciones. En España, contamos con 2.800 grupos de investigación trabajando en áreas relacionadas con este campo⁶ y con 2.982 empresas que realizan actividades relacionadas con la biotecnología o en las que la biotecnología es una actividad principal y/o exclusiva⁷, lo que demuestra que España posee un sector de la I+D comprometido e innovador, y con grandes capacidades de desarrollo. Estos retos a los que se enfrenta la sociedad y nuestro tejido empresarial solo pueden ser abordados con el impulso de modelos de desarrollo más sostenibles, que requieren de una mayor interrelación e implementación de la ciencia del conocimiento, de los agentes implicados en la cadena de valor, y la promoción de la investigación de calidad e innovadora en el sector, tanto en el entorno público como en el privado.

Se abre así un escenario donde cobran especial relevancia nuevos agentes, como es el caso de las biorrefinerías. Estas infraestructuras se posicionan como un instrumento clave para contribuir al establecimiento de un verdadero sector productivo basado en la bioeconomía, en el que se articule la conversión de las biomasas en bioproductos, contribuyendo así a la transición hacia la economía circular y la bioeconomía a la par que se evita la penalización asociada a la generación y/o vertido de residuos de origen biológico⁸. El desarrollo de las biorrefinerías integradas supone un gran avance y permitirá aumentar la competitividad de estos bioprocesos al instaurar nuevos conceptos empresariales que den respuesta a la creciente demanda por parte de muchos sectores de la población y del sector privado, mediante la generación de

⁶ Secretaría de Estado de I+D+i, CARMEN VELA (2017).

⁷ ASEBIO (2017).

⁸ BIOPLAT y SusCHEM-España (2017).

innovaciones tecnológicas y soluciones sostenibles, que lleven implícito el ahorro energético y de recursos, a la vez que procuran la protección del medioambiente. Aunque todavía existen obstáculos importantes que requieren de un enorme esfuerzo y compromiso en investigación básica y del estado de la técnica para su desarrollo e implementación.

La investigación, el desarrollo y la consecuente implantación comercial de la bioeconomía y sus productos en el mercado europeo constituyen una parte fundamental de los objetivos y prioridades de la UE en materia de crecimiento, inversiones, agenda social e innovación industrial, con la consiguiente oportunidad que generan para la creación de empleos locales y la integración social. Esta capacidad de dar respuesta a retos sociales tan interrelacionados como la seguridad alimentaria, la escasez de los recursos naturales, la dependencia de los recursos fósiles y el cambio climático hacen de la biotecnología una herramienta clave para la implementación de nuevos modelos que sustenten el desarrollo de la bioeconomía, con un especial foco hacia la industria altamente innovadora que se desarrolla dentro o en relación con esta área.

1. Barreras para el desarrollo de la innovación desde la industria

En el contexto socioeconómico actual, la bioeconomía está siendo impulsada por una multitud de factores ya comentados, como es el caso del crecimiento demográfico, las cuestiones medioambientales, la diferenciación de productos y las oportunidades de reducción de costes. Las barreras detectadas para el desarrollo de la biotecnología, en general, y en este ámbito de la bioeconomía en particular, son muy numerosas. De la capacidad que se tenga para superarlas dependerá su éxito de implantación y, por ende, su impacto económico y social. En nuestro caso, la I+D+i española en biotecnología se encuentra en su camino con numerosas barreras de diversa índole⁹ que impiden su adecuado desarrollo y que se detallan a continuación.

1.1. Barreras económicas

Uno de los principales problemas del desarrollo de estas innovaciones y su implantación es la reducida disponibilidad de financiación. En España, los recursos destinados a la I+D+i son ligeramente superiores al 1 % del PIB (1,19 %)¹⁰, muy lejos del objetivo del 3 % marcado por la Agenda de Lisboa, observándose también objetivos de financiación de la I+D+i privada por debajo de lo esperado, (46 % alcanzado sobre el total, frente al 66 % del objetivo de Lisboa)¹¹.

Además, la introducción o el desarrollo de nuevas tecnologías y procesos, así como el desarrollo comercial de un producto en biotecnología en las empresas, particularmente en las pymes, requiere de fuertes inversiones de capital que generalmente necesitan de unos largos

⁹ FEDIT (2008).

¹⁰ FECYT (2016).

¹¹ OBSERVATORIO SOCIAL DE 'LA CAIXA' (2017).

plazos para ser rentabilizadas. Todo ello conlleva un elevado grado de incertidumbre que dificulta aún más el acceso a la financiación, con la consiguiente ralentización o paralización de los desarrollos previstos.

Para hacer frente a esos costes económicos las empresas necesitan disponer de diferentes fuentes de financiación en general, y de capital-riesgo en particular. La transferencia de la investigación básica a la producción industrial es especialmente sensible, ya que requiere inversiones notables cuando aún el riesgo tecnológico y de mercado es elevado. Se necesita un enfoque integrado de financiación de la I+D+i que cubra la cadena de valor completa, de forma que la investigación se convierta en productos comercializables y crecimiento económico. Este empuje de la industrialización y comercialización puede mejorarse aún más mediante mecanismos *market pull* como, por ejemplo, mediante el establecimiento de mecanismos de compra/contratación pública, la discriminación positiva de precios a corto plazo o las normativas de etiquetado (por ejemplo, «producto de base biológica o *ecolabel*»), o el establecimiento de una serie de medidas encaminadas a incentivar las inversiones a la producción y comercialización, tales como incentivos fiscales o facilidades crediticias. En el mismo sentido, otra idea interesante sería la de favorecer desde la Administración Pública la utilización por industrias y consumidores de productos que cumplan unos criterios de sostenibilidad establecidos y socialmente aceptados.

1.2. Barreras regulatorias, normativas y legislativas

Habría que tener en cuenta que las invenciones biotecnológicas, además de requerir elevadas inversiones de capital, y precisar largos ciclos de desarrollo, están sujetas a una exigente normativa. Si bien los distintos agentes de la bioeconomía (económicos, sociales y técnicos) entienden la necesidad de que la regulación sea restrictiva y preventiva, debería fomentarse el desarrollo de procesos regulatorios más sencillos y directos, basada en una aproximación más equilibrada entre los riesgos y los beneficios, basándose para ello en la ciencia disponible. De esta forma se generaría un sistema más estable y predecible, en base a una implementación y cumplimiento más fácil y asequible, evitando cargas administrativas y económicas añadidas. Un exceso de regulación o una forma equivocada de implementarla puede suponer una barrera para el avance de la I+D+i.

En esta misma línea, la protección eficaz de los resultados de las actividades de investigación, desarrollo tecnológico e innovación constituye un elemento fundamental para impulsar la innovación tecnológica y el beneficio socio-económico, cumpliendo a su vez con el compromiso de difusión y divulgación del conocimiento. Desde Europa se han realizado grandes esfuerzos para desarrollar un marco normativo a nivel europeo sobre protección de la propiedad intelectual y patentes, que constituye el resultado de la voluntad política colectiva de los países europeos de establecer un sistema de patentes uniforme en Europa. En este sentido, ayudas especiales

para reducir la carga administrativa y el coste de la protección de la propiedad intelectual o de las búsquedas en las etapas tempranas serían muy útiles, especialmente para las pymes.

1.3. Barreras de nivel técnico

El desarrollo de la bioeconomía a nivel nacional requiere del establecimiento de una visión estratégica a medio/largo plazo, basada en una continuidad de las políticas públicas de apoyo al desarrollo de la ciencia y la tecnología, que las preserve de los vaivenes políticos. Esto solo es posible si existe una visión y compromiso compartido a nivel de todos los agentes implicados. Esta visión debe incluir la definición de unos objetivos claros y estables, la priorización de líneas de investigación para evitar la dispersión de esfuerzos y de financiación, y una reducción de la burocracia.

A la hora de sustituir los procesos industriales tradicionales por otros más sostenibles, la industria biotecnológica también se ve limitada por una serie de barreras tecnológicas, que incluye el coste de la materia prima, el grado de madurez y la disponibilidad de las tecnologías y el nivel de apoyo al mercado para los productos de base biológica.

El uso de la biomasa como materia prima supone una gran oportunidad, aunque el desarrollo, estabilidad y competitividad de los procesos biotecnológicos industriales depende fuertemente de la disponibilidad garantizada de una cantidad de biomasa suficiente y segura, y de que sus precios sean competitivos. Sin embargo, en la actualidad, la producción se encuentra en un momento delicado, principalmente por el aumento de la demanda mundial de alimentos y una limitada disponibilidad de estas materias primas, limitando su uso para otros fines y, presionando los precios al alza. Es necesario desterrar cualquier incertidumbre sobre su disponibilidad y asegurar un suministro suficiente y estable de biomasa, primando, por supuesto, la producción de alimentos frente a cualquier otro uso, a unos precios competitivos, mediante la concienciación de las oportunidades potenciales a los productores y beneficios a los consumidores con respecto al fomento del uso de los cultivos existentes y novedosos, así como de los desechos y residuos como fuentes alternativas de biomasa, asegurando además el desarrollo de infraestructura para la recolección, almacenamiento y transporte de biomasa, y una regulación que soporte y promueva su uso¹².

Asimismo, es necesario un desarrollo y mejora de la tecnología y el estado de la técnica, que permita el uso de nuevas materias primas, así como el desarrollo de nuevos productos, de una forma efectiva. Las herramientas de la biotecnología suponen una oportunidad para ampliar el rango de materias primas a utilizar dentro de los procesos, y para reducir el uso de sustancias peligrosas, minimizar el consumo de energía y la generación de residuos, que reduzca nuestra dependencia de recursos fósiles. Además, supone una alternativa para generar modelos de alimentación sostenible que aseguren un uso eficiente de los recursos y la conservación de

¹² DUPONT-INGLIS y BORG (2017).

la biodiversidad. En cualquier caso, todavía las tecnologías, las herramientas y los desarrollos tecnológicos en algunas áreas de la biotecnología (uso de coproductos de procesamiento, tecnologías de separación y procesos de bioconversión y procesamiento) son relativamente inmaduros en comparación con los de la química convencional, por lo que requieren de una mayor investigación y desarrollo, ya que todavía es difícil evaluar los beneficios de la implementación y los riesgos asociados.

1.4. Barreras estructurales

La escasa orientación de la oferta tecnológica pública a las necesidades del mercado, y la incipiente, pero poco desarrollada, cultura de la colaboración y transferencia científica, no han promovido ni potenciado hasta la fecha la colaboración entre los distintos agentes del desarrollo de la bioeconomía y la innovación en España (universidades, organismos públicos de investigación, centros tecnológicos, e industria). Sin duda, una receta que implique menos burocracia y más contacto directo, sin intermediarios, entre el investigador y el desarrollador del producto final para el desarrollo de un sistema de relaciones bajo-demanda, además de la creación de instrumentos de transferencia tecnológica y de formación de personal especializado en la gestión de estos aspectos sería la clave del éxito.

Del mismo modo, el desarrollo actual de la ciencia y tecnología requiere, en muchas ocasiones, de la utilización de grandes infraestructuras e instalaciones para dar cobertura y servicio a las necesidades de toda la comunidad científico-tecnológica y las empresas. Esto les permite adaptar y mejorar sus capacidades y prestación de servicios o posibilidades de desarrollo para alcanzar una mayor competitividad en el ámbito internacional.

1.5. Barreras sociales

Todas estas acciones podrían tener un efecto positivo, pero sin duda serán más eficaces si se combinan con un plan de comunicación coherente para crear la conciencia sobre el potencial de la biotecnología, el uso de recursos renovables y los beneficios que puede proporcionar una bioeconomía basada en el conocimiento.

Uno de los principales elementos tractores en el desarrollo de la bioeconomía y la biotecnología es la demanda social. Entre ellos, uno de los más críticos es la percepción de la sociedad. En muchas ocasiones se suele incidir en los riesgos de las nuevas tecnologías, enmascarando en muchos casos los grandes beneficios que la biotecnología puede ofrecer a la sociedad, perjudicando la percepción social. No se trata de ocultar los riesgos, sino de tratar de trasladarlos de forma clara, completa y sin manipulación, basándonos para ello en la mejor ciencia disponible.

Por tanto, para afrontar los retos sociales antes mencionados y las barreras que limitan la implantación de la bioeconomía, la biotecnología y su industria se requiere del desarrollo de

un entorno político y económico propicio que estimule la investigación y la innovación, así como políticas y estrategias de apoyo para difundir y apoyar el desarrollo de sus tecnologías y herramientas, la aprobación de los nuevos (bio)productos, el fomento del espíritu empresarial, y el desarrollo del mercado. El apoyo y compromiso político para mejorar las sinergias y la coherencia entre las políticas y actuaciones de los distintos ministerios y autonomías es imprescindible para crear una sólida política de bioeconomía en España, con fuerte vinculación con el territorio, el sector primario y la generación de mercados de alto valor añadido.

2. Retos y oportunidades de la industria innovadora

Como hemos observado, las bioindustrias se enfrentan a una serie de obstáculos importantes para el despliegue y desarrollo de la bioeconomía. Entre algunas de las medidas que deberían desarrollarse para favorecer el desarrollo y promoción de la biotecnología y su industria estarían:

Ámbito financiero

1. Fomento de la inversión en investigación, innovación y capacitación, con objeto de generar conocimiento y transferirlo eficazmente al mercado. Deberá promoverse el conocimiento por parte de las entidades financieras privadas y de capital riesgo, con objeto de ampliar su oferta de instrumentos de financiación adaptados a las peculiaridades del sector y sus agentes.
2. Introducir un marco político y de incentivos que sea estable transparente, y sostenible a largo plazo y que permita promover la bioeconomía, proporcionando estímulos de mercado que estimulen la comercialización y la demanda de productos de base biológica o bioproductos. Para ello será necesaria la implantación de mecanismo facilitadores, tales como incentivos financieros o reducciones fiscales, para fomentar las inversiones, o la contratación y programas de compra pública, el desarrollo de mecanismos normalizados de evaluación de sostenibilidad y la creación de etiquetas diferenciadoras para ayudar en la creación de mercados de los bioproductos.
 - a) Fomentar la adopción de bioproductos en los programas de adquisición, en base a los beneficios de sostenibilidad, económicos, sociales y de rendimiento del uso de estos.
 - b) Considerar una directiva para ordenar la contratación pública de materiales de origen biológico, planteando una jerarquía de objetivos para diferentes categorías de materiales y aplicaciones, basada en los volúmenes, el impacto y la disponibilidad.
 - c) Promover el desarrollo y la convergencia de las etiquetas de sostenibilidad comúnmente reconocidas y aceptadas y la aplicación generalizada de dichas etiquetas por parte de los fabricantes.

- d) Definir, crear y mantener un conjunto de indicadores y técnicas de medición para permitir el establecimiento de objetivos y la monitorización del progreso.
 - e) Establecer medidas de discriminación positiva y de fijación de precios, como por ejemplo la reducción del IVA en los productos de base biológica si se demuestra que son más sostenibles, o el establecimiento de una cuota de mercado mínima.
3. Proporcionar apoyo estatal para minimizar los riesgos financieros inherentes a la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías y productos, mejorando y aumentando la financiación de los proyectos de demostración y otros relacionados con las biorrefinerías a gran escala. Hay una necesidad de mejorar la visibilidad y la alineación de los diferentes regímenes de financiación, de demostración y las vías de integración de estos.
- a) Utilizar los fondos nacionales y de la UE, así como los préstamos del Banco Europeo de Inversiones, para facilitar las asociaciones público-privadas para la creación de proyectos de demostración.
 - b) Desarrollar planes de financiamiento público-privado para consorcios multi-compañías que construyan proyectos de escala de demostración y biorrefinerías innovadoras.
 - c) Desarrollar esquemas de financiamiento específicos para instalaciones pioneras de bioproducción y alentar la formación de coaliciones de empresas activas en la cadena de valor para construir proyectos a pequeña escala y crear soluciones integradas.

Ámbito técnico

1. Desarrollar y mejorar las relaciones entre los actores convencionales y no convencionales de la biotecnología, mediante un ejercicio de mapeo que permita identificar los clústeres existentes, teniendo en cuenta las cadenas de valor existentes y futuras y el desarrollo de modelos público-privados idóneos que promuevan la transferencia.
2. Desarrollo de las líneas prioritarias de investigación que deben seguirse para la consecución y resolución de los grandes retos sociales. Sería deseable un mayor grado de concreción en este aspecto, para así evitar la dispersión de esfuerzos y de financiación y facilitar una mejor gestión de los limitados recursos disponibles.
3. Mejorar las oportunidades para los productores de materia prima en el ámbito de la bioeconomía. Se debe crear conciencia sobre las oportunidades potenciales (tanto utilizando cultivos existentes y nuevos), como la posibilidad de utilizar nuevos tipos de biomasa y recursos de distinto origen, garantizar un precio justo de mercado para las materias primas y el desarrollo de una infraestructura eficiente de recogida, almacenamiento y transporte de la biomasa.

- a) Se necesita una evaluación de los flujos de residuos y el desarrollo de tecnologías capaz de hacer frente a la variabilidad inherente de los desechos y residuos.
 - b) La legislación y políticas nacionales necesitarán ser modificadas para adaptarse a este nuevo escenario y garantizar así el uso de residuos y otros desechos en el desarrollo y producción de materiales y productos.
4. Promover el uso de co-productos de procesamiento. El uso inteligente y eficiente de la biomasa puede ayudar a desarrollar más productos por unidad de biomasa. Esto significa hacer un mejor uso de biomasa a través de un enfoque en cascada que obtenga el máximo rendimiento de co-productos que actualmente tienen una aplicación limitada en el mercado. La optimización de las tecnologías de separación será necesaria para recuperar los co-productos potencialmente comercializables.
 5. Mejorar la bioconversión y los pasos de procesamiento (*downstream*). La optimización de la bioconversión y el procesamiento posterior de los productos biotecnológicos industriales podría reducir significativamente los costes y mejorar la eficiencia de la producción. Para ello es necesaria la optimización de cepas microbianas para la producción de nuevos productos, mejorando su resistencia a los contaminantes presentes. Existe la necesidad de asegurar la mejora continua de las tecnologías de biotecnología industrial para asegurar la competitividad; por tanto, la I+D+i debe ser financiada a través de los distintos niveles de la tecnología, no solo dentro de las tecnologías emergentes.

Ámbito estructural

1. Identificar, aprovechar y construir sobre las capacidades de la UE para el desarrollo y utilización de grandes infraestructuras e instalaciones piloto y de demostración para dar cobertura y servicio a las necesidades de los agentes de las cadenas de valor. Es necesario facilitar el acceso a plantas piloto flexibles y orientadas a la investigación y permitir a las empresas utilizar infraestructuras y plantas de escalado durante la fase de investigación y desarrollo, para probar y refinar los procesos industriales, ofrecer más servicios y complementar sus necesidades, reduciendo los plazos de entrega y los costes de inversión, y permitiendo a las empresas comprender mejor los costos operativos reales y las fortalezas y debilidades de los procesos tecnológicos.

Ámbito de la educación y la concienciación social

1. Mejorar la percepción pública y la conciencia de la biotecnología y los productos de base biológica. La posible percepción negativa de la sociedad hacia la biotecnología, principalmente en relación con algunos temas polémicos, debe ser combatida de un modo más eficaz, mediante una información clara y veraz, que ponga de manifiesto

los enormes beneficios de estas, así como sus posibles, limitados y controlados riesgos. A pesar de los beneficios sociales y medioambientales que pueden suponer o traer los productos de la biotecnología industrial y agroalimentaria, los clientes y usuarios finales no son necesariamente conscientes de lo que significa la biotecnología o la propuesta de valor que ofrecen estos productos. Promover campañas de información específicas dirigidas a clientes y usuarios finales pueden ayudar a desarrollar el mercado.

- a) Realizar campañas sostenidas de comunicación de alta calidad, difusión y promoción de bioproductos sostenibles y de oportunidades de contratación pública.
- b) Crear conciencia de las nociones fundamentales relativas a los productos de base biológica, y los beneficios asociados, como su contribución a la reducción de combustibles fósiles y la mitigación del cambio climático, a la revitalización de la economía rural, la seguridad de los materiales y el potencial de innovación generada localmente.
- c) Crear paquetes de información para tipos de productos específicos, informando de forma clara y precisa sobre sus características (aplicaciones, proveedores, beneficios, ciclos de vida, perfiles de sostenibilidad y perfiles de costes de productos y materiales biológicos en el mercado).

La biotecnología en general, y la biotecnología industrial y agroalimentaria, en particular, deben ser consideradas como uno de los sectores clave sobre los que debe sustentarse el avance de la sociedad española en la implantación del modelo de bioeconomía, al contribuir al desarrollo económico, la competitividad industrial y la mejora de la calidad de vida, contribuyendo así a un futuro más sostenible. En consecuencia, la Administración pública, desde su responsabilidad y competencia, debe poner todos los instrumentos a su alcance para permitir, facilitar y promover el adecuado desarrollo de la biotecnología y su tejido empresarial, con actuaciones en diversos ámbitos, entre los que se incluyen la regulación normativa y legislativa, la financiación, la educación y formación, y la divulgación e información¹³.

3. Beneficios

La creación de nuevos modelos productivos de alto valor añadido y la consolidación de otros en el ámbito de la bioeconomía fortalecerá el tejido industrial español, además de la consecuente creación de riqueza y mantenimiento de puestos de trabajo, fundamentalmente en áreas rurales, al ser donde se encuentran los recursos. Todo esto implicaría a su vez importantísimas ventajas medioambientales, claves para la consecución de los compromisos en

¹³ Las medidas y barreras definidas se han basado en el trabajo desarrollado dentro del proyecto BIO-TIC (EuropaBio; BIO-TIC, 2015).

materia de cambio climático. Por ello, aprovechamos para mostrar a continuación algunos de los principales beneficios que se derivan de la aplicación de la biotecnología¹⁴:

3.1. Beneficios socioeconómicos

Entre los principales beneficios socioeconómicos de la implementación de la biotecnología en el desarrollo del modelo de bioeconomía pueden destacarse los siguientes:

- Creación de empleo, innovador y de calidad, vinculado al reconocimiento del tejido industrial español y sus nuevos desarrollos, consolidando la competitividad del sector industrial y del sector agrícola.
- Dinamización del medio rural como consecuencia de una estrecha cooperación a lo largo de la cadena de valor que incluya a los productores locales de materias primas agrícolas, forestales, costeras y a las biorrefinerías, aumentando la rentabilidad de dichas regiones y el equilibrio territorial.
- Creación y establecimiento de canales de comunicación estables, eficientes y multilaterales, de modo que se fomente la innovación biotecnológica y la transferencia de conocimiento y su traslación a la sociedad, capitalizando el beneficio socioeconómico y medioambiental, aumentando la ventaja competitiva nacional e incrementando la competitividad comercial.
- Producción de una variedad de productos de alto valor añadido, como alimentos, productos (bio)químicos, bioplásticos y otros biomateriales nuevos e innovadores o bioenergía, respondiendo a la creciente demanda de la población, en base a esquemas más sostenibles y respetuosos con el medioambiente.
- Reducción de la dependencia de los combustibles fósiles y mejora de la sostenibilidad económica y medioambiental de la producción primaria y de las industrias de transformación.
- Disminución de emisiones de gases de efecto invernadero y fomento del ahorro energético, al cerrar el círculo de los ciclos de vida de los productos a través de un mayor reciclado y reutilización.
- Mejora de la rentabilidad de las instalaciones mediante el aprovechamiento de los subproductos generados en sus propios procesos ligado a un aumento de las capacidades de la bioindustria al promover la colaboración entre los distintos agentes.

¹⁴ Los beneficios definidos se han basado en el trabajo desarrollado por las Plataformas Tecnológicas BIOPLAT y SusChem-España) (2017).

3.2. Beneficios medioambientales

La aplicación de la biotecnología y sus múltiples herramientas presentan una serie de oportunidades sociales y beneficios ambientales directamente relacionados con el uso eficiente de los recursos renovables, reduciendo la generación de residuos, o el consumo de los recursos naturales escasos, y limitando el riesgo de daños al medioambiente y determinados hábitats. De esta forma se mejoran las oportunidades de conservación de la biodiversidad. Entre los principales beneficios medioambientales pueden destacarse los siguientes:

- Ahorro en la gestión y tratamiento de residuos y en el consumo de los recursos naturales escasos (materias primas, energía, agua, aire) al hacer los procesos más eficientes y sostenibles, mejorando el rendimiento.
- Aprovechamiento de determinados residuos orgánicos como materias primas de procesos industriales (residuos cero).
- Disminución sustancial de gases de efecto invernadero y otros gases contaminantes (CO, CO₂, HC, NOX y SOX) a la atmósfera al sustituir los combustibles fósiles.
- Contribución a la conservación de la biodiversidad y a su mantenimiento, generando un menor impacto en el hábitat.
- Reducción de la dependencia de los combustibles fósiles, y la mitigación del cambio climático, lo cual constituye una obligación absolutamente ineludible e inaplazable.

En resumen, España en particular, y Europa en general, se enfrentan a múltiples desafíos, para mejorar y mantener una posición competitiva en la economía mundial, donde es cada vez más necesario tomar medidas a largo plazo y realizar una adecuada planificación para su desarrollo en el contexto de la bioeconomía, mediante el soporte y apoyo al tejido empresarial y la generación de modelos más sostenibles en términos de eficiencia económica, social y medioambiental. Se precisa de un apoyo expreso de las administraciones públicas capaz de promover la conexión entre la investigación y la industria, de fomentar la colaboración y desarrollar canales de comunicación estables, eficientes y multilaterales entre los distintos agentes del sistema ciencia-tecnología-empresa con los usuarios finales, responsables políticos y sociedad civil, y de instrumentalizar los mecanismos político-administrativos necesarios que minimicen los trámites burocráticos y las barreras legislativas que puedan entorpecer un desarrollo óptimo de las biotecnología al servicio de la bioeconomía.

Referencias bibliográficas

ASEBIO (2017): «Informe ASEBIO 2016». Recuperado de http://www.asebio.com/es/documents/InformeASEBIO2016_final_1_tabla.pdf.

- COM (2012): 60 final. *La innovación al servicio del crecimiento sostenible: una bioeconomía para Europa*.
- COM (2014): 398 final. *Hacia una economía circular: un programa de cero residuos para Europa*.
- COMISIÓN EUROPEA (2015): «Comunicado de prensa 'Cerrar el círculo'». Bruselas, 2 de diciembre de 2015. Recuperado de: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-15-6203_es.htm.
- COMISIÓN EUROPEA: «Paquete sobre la economía circular: preguntas y respuestas»; http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-15-6204_es.htm.
- DUPONT-INGLIS, J. y BORG, A. (2018): «Destination bioeconomy—The path towards a smarter, more sustainable future»; en *New Biotechnology* (40); pp. 140-143.
- FECYT (2016): «Indicadores. Gasto en I+D». Recuperado de: <https://services.icono.fecyt.es/indicadores/Paginas/default.aspx?ind=134&cidPanel=1>.
- FEDIT (CENTROS TECNOLÓGICOS DE ESPAÑA) (2008): «Tendencias en el uso de la biotecnología en el sector químico». Observatorio Químico del MITYC. Actual Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital. Recuperado de: http://marinponsasociados.com/pdfindustria/tendencias_en_el_uso_de_biotecnologia.pdf.
- FEDIT (CENTROS TECNOLÓGICOS DE ESPAÑA) (2008): «Tendencias en el uso de la biotecnología en el sector químico». Observatorio químico industrial del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Actual Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital. Recuperado de http://www.minetad.gob.es/industria/observatorios/SectorQuimico/Actividades/2008/Centros_Tecnologicos_de_Espana/OIQuimico_Analisis_de_lineasID_Emergentes.pdf.
- OBSERVATORIO SOCIAL DE 'LA CAIXA' (2017): «Investigación e Innovación: ¿qué nos jugamos?». Recuperado de https://observatoriosociallacaixa.org/documents/22890/102496/DOS-SIER3_Sept2017_CASTELLA.pdf/79586d89-148f-9e9f-eccb-328e4cdf0cb.
- PLATAFORMAS TECNOLÓGICAS ESPAÑOLAS DE BIOMASA PARA LA BIOECONOMÍA (BIOPLAT) y PLATAFORMAS TECNOLÓGICAS ESPAÑOLAS DE QUÍMICA SOSTENIBLE (SUSCHEM-ESPAÑA) (2017): *Manual sobre las Biorrefinerías en España*. Recuperado de http://www.suschem-es.org/docum/pb/2017/publicaciones/Manual_de_Biorrefinerias_en_Espana_feb_2017.pdf.
- PROYECTO BIO-TIC (2015): *A roadmap to a thriving industrial biotechnology sector in Europe*. EuropaBio; BIO-TIC
- SECRETARÍA DE ESTADO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN, MINEICO y MAPAMA (2015): «Estrategia española de Bioeconomía Horizonte 2030». Recuperado de <http://bioeconomia.agripa.org/download-doc/102163>.
- VELA, C. (2017): «Ciencias de la Vida y de la Materia»; *Simposio Internacional: Los retos del Planeta y propuestas de soluciones desde la bioeconomía*. Madrid.



LA BIOECONOMÍA EN EL SISTEMA AGROALIMENTARIO

SEGURIDAD ALIMENTARIA

Montaña Cámara Hurtado^a y María Victoria Castillo Ruiz-Cabello^b

^aUniversidad Complutense de Madrid y ^bMcDonald's España

Resumen

El Sistema Agroalimentario Mundial tiene una doble vertiente local y global, y está influido poderosamente por los diferentes entornos económico, político, social, científico y tecnológico y, en última instancia, ambiental, en cada uno de los cuales surgen desafíos y oportunidades que enfrentar. En este capítulo nos centraremos en el problema de la Seguridad Alimentaria, asunto que está siendo abordado por instituciones internacionales como la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), ejemplo de gobernanza internacional por el que los gobiernos de las naciones ceden parte de su papel a instituciones supranacionales apoyadas igualmente por organizaciones sociales y con respaldo de instituciones académicas.

Abstract

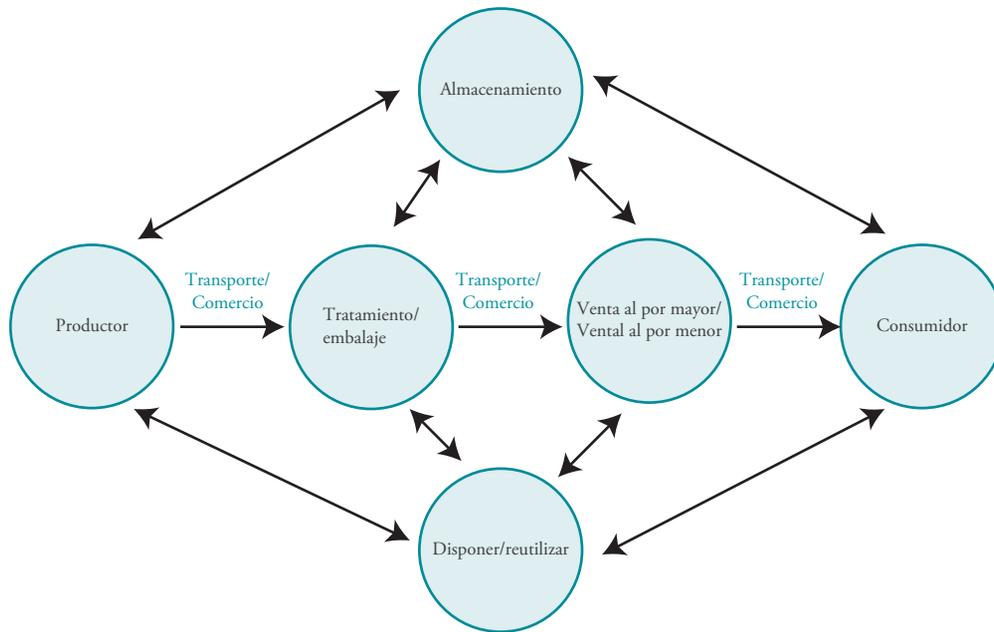
The Global Agri-Food System has a dual local and global dimension, and is powerfully influenced by its various economic, political, social, scientific, and technological surroundings, as well as, ultimately, the environmental ambit, all of which involve challenges and opportunities that must be confronted. In this chapter, we will focus on the problem of Food Security, an issue that is being addressed by international institutions such as the FAO (Food and Agriculture Organisation of the United Nations), an example of international governance through which national governments yield part of their role to supranational institutions that are, in turn, supported by social organisations and academic institutions.

1. Sistema agroalimentario: actividades, entornos y resultados

Los sistemas agroalimentarios se pueden describir como una cadena de actividades que comienza con la producción de las materias primas alimentarias, continúa con el procesado y envasado de las mismas, para pasar en una etapa posterior a su venta al mayor o al detalle y terminar en el hogar o en los comedores de instituciones para ser consumidas tras una preparación culinaria. Tras cada una de estas etapas hay una fase de almacenamiento, así como otra de venta y transporte. Asimismo, cada una de las actividades descritas produce una cierta cantidad de residuos. El sistema agroalimentario así descrito podría representarse en la Figura 1.

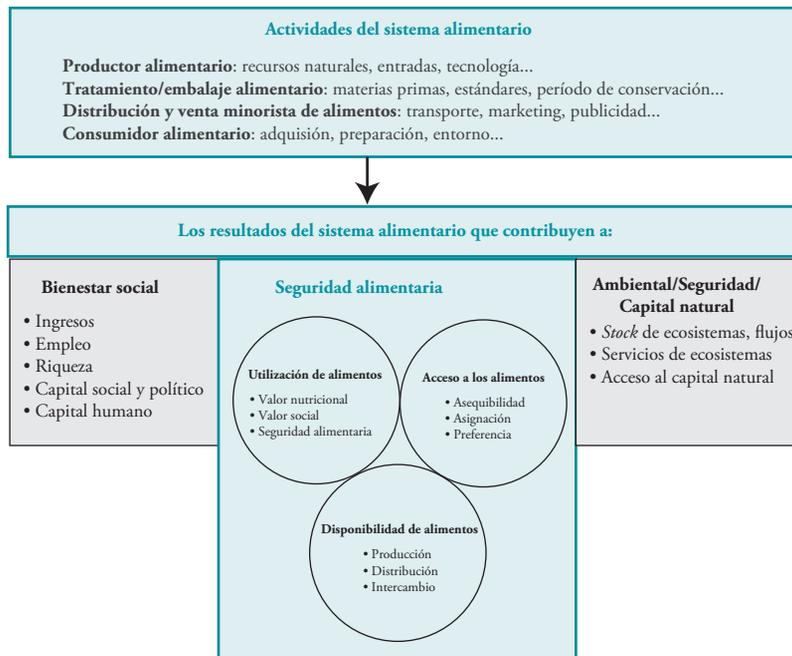
Como se muestra en la Figura 2, las actividades del sistema agroalimentario (producción de materias primas, procesado, distribución y consumo) producen una serie de resultados que contribuyen tanto a la seguridad alimentaria como al bienestar social y al bienestar ambiental.

Figura 1. Representación del sistema agroalimentario



Fuente: Ingram *et al.* (2012).

Figura 2. Concepto de Sistema Alimentario: actividades y resultados



Fuente: Ingram (2011).

El sistema agroalimentario mundial tiene una doble vertiente local y global, y está influido poderosamente por los diferentes entornos económico, político, social, científico y tecnológico y, en última instancia, ambiental, en cada uno de los cuales surgen desafíos y oportunidades que afrontar. Sin ánimo de ser exhaustivos, pero al mismo tiempo intentando enumerar los problemas más importantes (Tabla 1), podríamos establecer la siguiente relación:

Tabla 1. Problemática sistema agroalimentario mundial

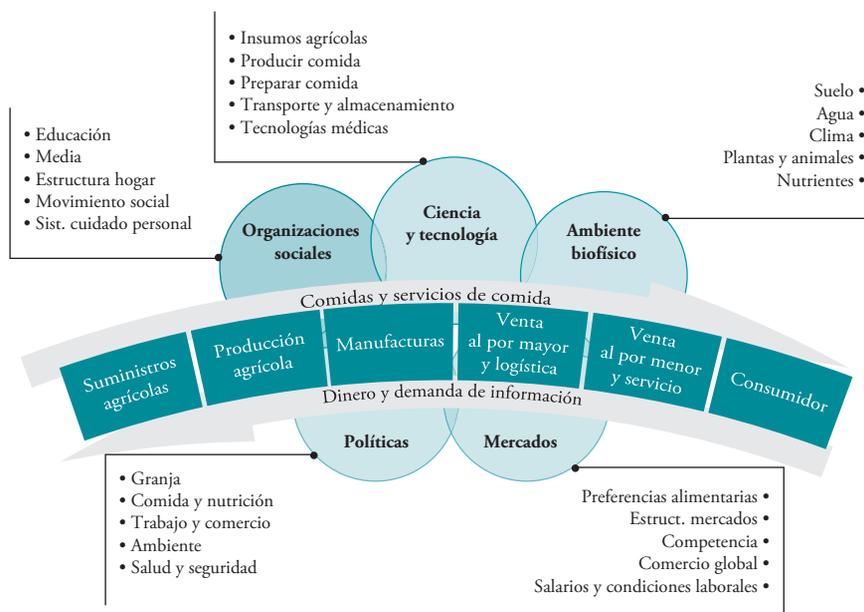
<p>Económicos (relacionados con mercados) Comercio internacional Infraestructura países en desarrollo Desarrollo tecnológico Preferencias consumidor Precios-stocks</p>	<p>Políticos Gobernanza Instituciones internacionales Normas internacionales</p>
<p>Sociales Seguridad alimentaria (<i>Food Security</i>) Desigualdades Pobreza-HAMBRE Crecimiento demográfico Deficiencias nutricionales Soberanía alimentaria</p>	<p>Ambientales Cambio climático Suelo, nutrientes Agua Residuos Consumo recursos naturales Competencia entre alimentación humana, animal y biocombustibles)</p>

Este sistema se puede describir asimismo con el término *cadena de valor alimentaria (CVA)*, que incorpora el concepto de desarrollo progresivo de valor en cada uno de sus eslabones con la finalidad de satisfacer al cliente final, el consumidor. La utilidad o el valor aportado al consumidor se mide tradicionalmente por el precio que el consumidor esté dispuesto a pagar. No obstante, el precio de mercado no refleja todos los factores que interesan al bienestar social ni al justo reparto de valor entre los diferentes eslabones de la cadena (Briz, 2015). A la vez, la cadena alimentaria se encuentra rodeada e influida por una serie de entornos, como se muestra en la Figura 3 y se describe a continuación:

- *Económico y comercial*: preferencias sobre alimentos, estructura de mercados, competencia, comercio internacional, salarios y condiciones laborales.
- *Político*: marco legislativo agrícola, alimentario, sobre nutrición, comercial y laboral, ambiental y de sanidad.
- *Social*: educación, medios de comunicación, estructura de las familias, movimientos sociales, sistemas nacionales de salud.
- *Científico y tecnológico*: aportes necesarios para el cultivo (semillas, fertilizantes, pesticidas, etc), estado de las técnicas de procesado de alimentos, técnicas de transporte y almacenamiento, técnicas de preparación de alimentos.

- *Biofísico o ambiental*: constituido por el suelo y sus nutrientes, el agua, el clima, otras especies animales o vegetales.

Figura 3. Entornos de influencia en la cadena alimentaria



Fuente: National Research Council of the National Academies (2015).

2. La seguridad alimentaria

El derecho a alimentos adecuados es un derecho reconocido en la *Declaración Universal de Derechos Humanos*, que en el párrafo 1 del artículo 25 dispone que «toda persona tiene derecho a un nivel de vida adecuado que le asegure, así como a su familia, la salud y el bienestar, y en especial la alimentación, el vestido, la vivienda, entre otros».

La FAO, desde la Cumbre Mundial de la Alimentación de 1996 define la *seguridad alimentaria* como «la situación en la que todas las personas tienen en todo momento acceso físico, social y económico a suficientes alimentos inocuos y nutritivos para satisfacer sus necesidades alimenticias y sus preferencias en cuanto a los alimentos con el fin de llevar una vida activa y sana» (FAO, 1996). No obstante, en inglés este amplio concepto se denomina *food security*, refiriéndose al acceso físico, económico, social y medioambiental a una dieta equilibrada y a agua de bebida limpia de todas las personas para garantizar su supervivencia, su reproducción y su bienestar (Contreras Hernández y Gracia Arnáiz, 2005 y Swaminathan, 2010).

De acuerdo con las conclusiones de la Cumbre Mundial sobre la Alimentación, de Naciones Unidas (1996): «Existe seguridad alimentaria cuando todas las personas tienen en todo momento acceso físico y económico a suficientes alimentos inocuos y nutritivos para satisfacer sus necesidades alimenticias y sus preferencias en cuanto a los alimentos a fin de llevar una vida activa y sana».

Los componentes básicos de la seguridad alimentaria son:

- *Disponibilidad* de alimentos a escala local o nacional. Tiene en cuenta la producción, las importaciones, el almacenamiento y la ayuda alimentaria.
- *Estabilidad*: se refiere a solventar las condiciones de inseguridad alimentaria transitoria de carácter cíclico o estacional, a menudo asociadas a las campañas agrícolas. Juega un importante papel la existencia de almacenes o silos en buenas condiciones, así como la posibilidad de contar con alimentos de contingencia para las épocas de déficit alimentario.
- *Acceso y control* sobre los medios de producción (tierra, agua, insumos, tecnología, conocimiento, etc) y los alimentos disponibles en el mercado. La falta de acceso y control es frecuentemente la causa de la inseguridad alimentaria y puede tener un origen físico o económico.
- *Consumo y utilización biológica* de los alimentos. El consumo se refiere a que las existencias alimentarias en los hogares respondan a las necesidades nutricionales, a la diversidad, a la cultura y las preferencias alimentarias. También hace referencia a la inocuidad de los alimentos. La utilización biológica está relacionada con el estado nutricional.

En el contexto de las sociedades industrializadas, hablar de seguridad alimentaria hace referencia, sobre todo, a este concepto de la inocuidad de la cadena alimentaria. Así, en los llamados países desarrollados (países de la UE y occidentales en general), el acceso a suficientes alimentos se alcanza de forma generalizada salvo en situaciones excepcionales, por lo que es el último punto, el que se refiere a la calidad e inocuidad de los alimentos, el que cobra especial protagonismo y trascendencia, y al que van dirigidas todas las políticas de control. Tanto las políticas gubernamentales como las medidas y procesos de control pretenden alcanzar que todo alimento que llega al consumidor esté libre de contaminaciones que supongan una amenaza para la salud. Por tanto, dentro del amplio concepto anglosajón de *food security* se recoge el concepto de *food safety*, el cual se refiere concretamente a la calidad y a la inocuidad de los alimentos. Este último concepto de «seguridad alimentaria» es la base fundamental sobre la que trabaja el *Codex Alimentarius* (CAC, 2011).

La inseguridad alimentaria afecta al desarrollo humano, a la estabilidad social y política y al avance en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Sobre todo,

los estados frágiles tienen graves dificultades para cumplir el segundo ODS: «Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible», y más concretamente para 2030, poner fin al hambre y asegurar el acceso de todas las personas, en particular los pobres y las personas en situaciones vulnerables, incluidos los lactantes, a una alimentación sana, nutritiva y suficiente durante todo el año.

3. El entorno socioeconómico

En el año 2050 la población mundial será de 9.100 millones de personas, un 34 % superior a la de hoy en día, y prácticamente la totalidad de este incremento de la población tendrá lugar en los países en desarrollo. La urbanización continuará a un ritmo acelerado, con lo que aproximadamente el 70 % de la población mundial será urbana (en la actualidad esta cifra es del 49 %) (FAO, 2009). El nivel de ingresos será varias veces superior al actual. Para alimentar a esta población más numerosa, más urbana y más rica, la producción de alimentos deberá aumentar un 70 %. La producción anual de cereales habrá de aumentar desde los 2.100 millones de toneladas actuales hasta los 3.000 millones, mientras que la producción anual de carne deberá aumentar en más de 200 millones de toneladas hasta alcanzar los 470 millones.

Por tanto, los principales factores socioeconómicos que motivan el incremento de la demanda alimentaria son el crecimiento de la población, el aumento de la urbanización y la subida de los ingresos. En lo que respecta a los dos primeros, el crecimiento de la población y la urbanización, existen pocas dudas sobre la magnitud, la naturaleza y las tendencias regionales de su futuro desarrollo.

Comparado con los 50 años precedentes, el índice de crecimiento de la población se frenará considerablemente. Sin embargo, al partir de una base mucho mayor, el incremento absoluto será importante: 2.300 millones de seres humanos más. Casi todo este incremento de la población tendrá lugar en la parte del mundo que engloba a los países en desarrollo actuales. El mayor incremento relativo, del 120 %, se espera que corresponda a los países menos adelantados de hoy en día.

La totalidad del crecimiento de la población mundial, e incluso más, tendrá lugar en las zonas urbanas. En 2050 se espera que más del 70 % de la población mundial sea urbana, y la urbanización traerá consigo cambios en los estilos de vida y en los hábitos de consumo. La urbanización, en combinación con el incremento de los ingresos podría acelerar la diversificación en curso de las dietas en los países en desarrollo. Mientras que la cantidad de cereales y otros cultivos básicos consumidos descenderá, aumentará la de hortalizas, fruta, carne, lácteos y pescado.

Aunque la proporción de la población urbana está aumentando, las zonas rurales seguirán siendo el hogar de la mayor parte de la población pobre y hambrienta durante cierto tiempo.

En la actualidad 1.000 millones de personas no pueden satisfacer sus necesidades básicas en lo que respecta a la energía alimentaria

A pesar de la urbanización, las poblaciones rurales aumentarán más rápidamente que los empleos en la agricultura primaria, algo típico de los países en transformación, por lo que los gobiernos deberán facilitar la transición gradual al empleo no agrícola. Para ello será necesario un entorno institucional en las zonas rurales que dé lugar a múltiples fuentes de empleo y de generación de ingresos.

El tercer determinante clave de la futura expansión de la demanda es el aumento de los ingresos, para el que existe una mayor incertidumbre. En los años previos a la reciente crisis que comenzó en 2008, el crecimiento económico había sido particularmente alto en numerosas regiones en desarrollo, especialmente en Asia, pero también en muchos países del África subsahariana, pero se vio interrumpido por la crisis financiera.

También importante tener en cuenta que en el futuro la demanda total de productos agrícolas podría superar la demanda de alimentos y piensos, en función de la expansión de la demanda de biocombustibles y de la tecnología empleada para la conversión de biomasa agrícola en biocombustibles. Desde 2012, Europa ha superado esta competencia entre la producción de alimentos y de biocombustibles, con la adopción de la Estrategia Europea de Bioeconomía (Comisión Europea, 2012), uno de cuyos objetivos es producir biomasa de alta calidad sin comprometer la seguridad alimentaria. Posteriormente, en 2016, España también adoptó su propia Estrategia Española de Bioeconomía (MINECO, 2016), completamente alineada en este mismo objetivo europeo.

4. Desafíos a los que se enfrenta el sistema agroalimentario mundial

La FAO convocó el Foro de Expertos de Alto Nivel en Roma en junio de 2009 para reflexionar sobre estas y otras cuestiones afines. El sistema deberá garantizar que la creciente población mundial sea capaz de producir y acceder a una cantidad de alimentos suficiente tanto hoy como en el futuro. Los expertos participantes en dicha reunión estuvieron de acuerdo en que debería ser posible producir una cantidad de alimentos suficiente en 2050 como para satisfacer las necesidades de una población mundial que habrá superado los 9.000 millones de personas, pero admitieron que tal posibilidad suponía el cumplimiento de ciertas condiciones. Se establecieron dos condiciones esenciales para tener éxito en la satisfacción de las necesidades alimentarias previstas de modo sostenible. Una de ellas es el aumento de las inversiones en investigación y desarrollo para conseguir un incremento de la productividad sostenido, para reformar las infraestructuras institucionales, para prestar servicios ambientales y para gestionar los recursos de manera sostenible. La otra es que las políticas no deberían centrarse simplemente

en el incremento del suministro, sino también en el acceso de la población pobre y hambrienta del mundo a los alimentos que necesitan para llevar una vida activa y saludable.

El hambre puede persistir a pesar de existir un suministro total suficiente debido a la falta de oportunidades de ingresos para los pobres y a la ausencia de unas medidas protectoras sociales eficaces. La experiencia de los países que han conseguido reducir el hambre y la malnutrición muestra que el crecimiento económico no garantiza automáticamente el éxito, sino que el origen del crecimiento también desempeña un papel importante. El crecimiento derivado de la agricultura, en particular del sector en pequeña escala, es al menos el doble de eficaz a la hora de beneficiar a la población más pobre que el crecimiento derivado de sectores no agrarios. Este hecho no resulta sorprendente ya que el 75 % de la población pobre de los países en desarrollo vive en zonas rurales y sus ingresos están vinculados directa o indirectamente a la agricultura. La lucha contra el hambre requiere también unas medidas específicas y prudentes en forma de unos servicios sociales extensivos que incluyan la asistencia alimentaria, la salud y el saneamiento y la educación y la capacitación, prestando especial atención a la población más vulnerable.

El mensaje clave del análisis realizado por el Comité de Expertos convocado por la FAO abre la puerta a la esperanza, ya que se estima que será posible alcanzar la seguridad alimentaria de la población en 2050 siempre y cuando se cumplan algunas condiciones específicas mediante las políticas adecuadas. Por tanto, el sistema agrícola y alimentario mundial debe satisfacer la demanda actual y futura de alimentos. A continuación, se enumeran algunos de los desafíos concretos a los que se enfrenta.

a) Necesidad de producir más alimentos

Los avances tecnológicos en la agricultura, tales como la mejora de las especies de cultivo, el desarrollo de técnicas de irrigación, el uso de fertilizantes y pesticidas mejorados, han permitido que desde la Segunda Guerra Mundial la producción de alimentos pueda seguir el ritmo del crecimiento de la población mundial. La agricultura mundial produce un 17 % de calorías por persona más que las que producía en la década de 1970, a pesar del aumento de la población en un 70 % (FAO, 2001), no existiendo estudios más actuales. Además, los precios de los alimentos básicos han descendido de forma general en un 55-60 % desde 1960.

A pesar de todo, todavía parece que sea necesario aumentar la producción de alimentos. En 2007, a pesar de que los años anteriores los mercados habían gozado de estabilidad debida a una adecuada producción agrícola, la combinación de una mala cosecha y altos precios del petróleo desató una importante subida en el precio de los alimentos que llevó al hambre a millones de personas. La disminución de las reservas debilitó la capacidad del sistema para hacer frente a la crisis, por lo que es necesario producir más alimentos básicos con menos recursos.

b) Pobreza - crisis de precios

La pobreza es una causa fundamental de inseguridad alimentaria. De acuerdo a la FAO, se produce suficiente cantidad de alimentos básicos para alimentar a la población mundial (FAO, 2001). Sin embargo, pese a que el precio de los alimentos estaba en su nivel más bajo en el año 2000, 840 millones de personas en el mundo padecían hambre. Durante la última década, aunque la producción mundial de alimentos siguió en general una tendencia al alza, el número de personas crónicamente subnutridas se ha incrementado en lugar de descender. Durante treinta años los precios de las materias primas agrarias a nivel mundial han ido progresivamente disminuyendo. Esta tendencia cambió radicalmente durante los años 2007 y 2008, en los que se produjo un importante aumento de los precios de determinadas materias primas agrarias. Concretamente, entre septiembre del 2006 y febrero del 2008 los precios mundiales aumentaron un 70 %, aumento que fue mucho mayor en productos como el trigo, maíz, arroz y productos lácteos. El incremento extraordinario del hambre durante la crisis alimentaria de 2007-08 tuvo lugar a pesar de que la cosecha de cereales de 2008 alcanzó un máximo récord. La crisis de precios de 2007 tuvo un alto impacto en la seguridad alimentaria. Posteriormente, aunque los precios bajaron volvieron a aumentar en 2011 (FAO, 2017).

Por tanto, la disponibilidad de alimentos no es el único factor importante, la población debe disponer de medios económicos que les permitan comprarlos a precios razonables. Garantizar una oferta suficiente de alimentos a nivel global, ya sea internacional o nacionalmente, no asegura que todas las personas tengan suficiente para comer y que se elimine el hambre.

En los países desarrollados, la población con menos recursos basa su dieta en la ingesta de alimentos con alto contenido graso o azucarado, ya que son más saciantes y de menor precio, resultando los únicos que se pueden permitir. Los alimentos más saludables, como fruta, verduras y cereales integrales, son significativamente más caros en términos de coste por caloría que los alimentos ricos en grasas, almidones o azúcares. Se da la circunstancia, además, de que los hogares de niveles bajos de renta tienen otras demandas inminentes y deciden destinar su presupuesto al pago de la renta, impuestos, calefacción, necesidades de los hijos y pago de deudas, priorizando estos conceptos frente a la compra de alimentos, de manera que el escaso presupuesto que queda se destina a la compra de alimentos baratos y saciantes. La población con bajos niveles de recursos a menudo tiene jornadas de trabajo excesivamente largas, que les dejan poco tiempo para cocinar o hacer ejercicio.

Las razones por las que el hambre y la malnutrición podrían persistir a pesar de que exista una oferta global suficiente a nivel nacional o internacional son la falta de oportunidades para obtener ingresos por parte de la población pobre y la ausencia de unas medidas protectoras sociales eficaces. La experiencia de los países que han conseguido reducir el hambre y la malnutrición muestra que el crecimiento económico y las políticas dirigidas a reducir la pobreza no garantizan automáticamente el éxito, sino que el origen del crecimiento también juega un papel importante.

La movilización mundial tras la aprobación en el año 2000 de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) ha generado el movimiento contra la pobreza más exitoso de la historia (Naciones Unidas, 2015a). Gracias a estos esfuerzos, el descenso continuado de la pobreza mundial se ha intensificado en los últimos decenios. Sin embargo, el progreso no ha sido uniforme y parece ser que fue interrumpido por la existencia de conflictos bélicos en algunos países. Si bien en China y en otros países de gran tamaño como Indonesia, India, Pakistán, Brasil, México y Sudáfrica se registraron grandes mejoras, en el África subsahariana en su conjunto se constató un gran incremento del número de personas que viven en la pobreza más absoluta y el índice de pobreza sufrió tan solo un pequeño descenso. Pese a que la tasa de pobreza mundial en 2017 se ha reducido a la mitad desde el año 2000, es necesario intensificar los esfuerzos destinados a aumentar los ingresos e incrementar la resiliencia de las personas que aún viven en la pobreza extrema, en particular en África Subsahariana. (Naciones Unidas, 2017).

c) *Efectos del cambio climático sobre la producción de alimentos*

Otro desafío cada vez más preocupante para la seguridad alimentaria es el cambio climático, que afecta a los países en desarrollo de manera desproporcionada. Todos los análisis cuantitativos actuales muestran que el cambio climático afectará negativamente a la seguridad alimentaria. En promedio se espera que los precios de los alimentos aumenten debido al cambio climático.

Los efectos del cambio climático sobre la producción de cultivos están distribuidos muy desigualmente en el ámbito geográfico. A pesar de que los países del hemisferio sur no son los principales causantes del cambio climático, podrían sufrir la mayor proporción de las repercusiones en forma del descenso del rendimiento y la mayor frecuencia de los episodios meteorológicos extremos como las sequías y las inundaciones. Se calcula que los efectos negativos totales del cambio climático sobre la producción agrícola africana hasta el período 2080-2100 podrían situarse en el 15-30 % (FAO, 2009). Como punto positivo cabe destacar que, en las latitudes templadas, principalmente en algunas zonas del hemisferio norte, el aumento de las temperaturas podría beneficiar a la agricultura: las áreas potencialmente adecuadas para el cultivo se ampliarán, se incrementará la duración del período de crecimiento y podría aumentar el rendimiento de los cultivos.

d) *Competencia por el uso de la tierra y el alimento*

El acceso a los recursos, ya sean tierras, agua, semillas, suministros agrícolas, tecnología sostenible o conocimiento, es fundamental para que la población en riesgo de inseguridad alimentaria pueda alimentarse por sí misma y generar ingresos a través de la producción agrícola. Una de las tendencias actuales más significativas es el aumento del uso de la superficie cultivable y de cereales comestibles para la producción de biocombustibles y piensos. Esto supone que se toma tanto la tierra como el propio alimento que deberían

haber sido destinados al consumo humano directo para producir alimento y combustibles destinados a las economías de los países más ricos, provocando la consiguiente escasez adicional en los mercados de alimentos.

La producción de biocombustibles a partir de productos agrícolas se multiplicó por más de tres entre 2000 y 2008 y representa casi el 2 % del consumo mundial de combustibles para el transporte. Con la tecnología de conversión conocida como «de primera generación», un incremento ulterior del uso de materias primas agrícolas para la producción de biocombustibles constituiría un riesgo real para la seguridad alimentaria (FAO, 2009).

Deberían reconsiderarse las políticas en favor del uso de materias primas alimentarias para la producción de biocombustibles con el fin de reducir la competencia entre los alimentos y los combustibles por los escasos recursos, como se ha hecho en Europa (Comisión Europea, 2012). Dado que se reconoce que las materias primas de biomasa no alimentaria empleadas en la producción de biocombustibles también competirán con los alimentos y otros tipos de uso de la tierra por unos recursos limitados, deberían realizarse más esfuerzos para crear formas de energía renovable que no dependiesen de la biomasa alimentaria y, en términos generales, para promover la eficiencia del uso energético en los ámbitos familiar e industrial.

5. Gobernanza de la seguridad alimentaria como solución institucional

Podríamos definir el sistema de gobernanza global de la seguridad alimentaria como un conjunto de instituciones, normas, acuerdos, objetivos y políticas orientados a regular, coordinar y gestionar las cuestiones relativas a la alimentación y al hambre.

La gobernanza global de la seguridad alimentaria es un sistema altamente complejo que ha evolucionado mucho desde su creación. Desde el final de la Segunda Guerra Mundial, una serie de actores diversos (estados, organizaciones y foros internacionales, empresas, fundaciones privadas, organizaciones de la sociedad civil, centros de investigación, etc.) operan como ámbitos de toma de decisión a diferentes niveles, desde lo local a lo global. También consiste en una red de regulaciones formales superpuesta con declaraciones no vinculantes, normas y prácticas no escritas no sometidas a ningún tipo de supervisión política.

En sus primeras décadas el sistema de gobernanza centró su objetivo en la producción de alimentos, y luego se ha ido ocupando de otras cuestiones, como las relativas a su procesamiento, comercialización y consumo, incluyendo aspectos como los sanitarios y medioambientales.

Es necesario tomar medidas en este momento para garantizar que se consigue el incremento necesario del 70 % de la producción de alimentos, así como que todos los seres humanos tienen acceso a una alimentación adecuada.

En primer lugar, las inversiones en la agricultura de los países en desarrollo deben aumentar al menos un 60 % sobre el nivel actual mediante una combinación de mayores inversiones públicas y mejores incentivos para los agricultores y el sector privado para que inviertan sus propios recursos.

En segundo lugar, debe concederse mayor prioridad a la investigación, el desarrollo y los servicios de extensión agrícolas con vistas a mejorar el rendimiento y la productividad, algo necesario para alimentar al mundo en 2050.

La agricultura mundial ha sido capaz de satisfacer la demanda mundial de alimentos, pienso y fibras, en rápido crecimiento, durante los últimos 50 años a unos precios agrícolas reales en descenso durante la mayor parte del tiempo, al menos hasta mediados de la década de 1980.

En tercer lugar, los mercados mundiales deben funcionar de manera eficaz ya que la seguridad alimentaria de un número creciente de países dependerá del comercio internacional y del acceso a un suministro estable de importaciones.

Un número considerable de países en desarrollo han tenido éxito a la hora de mejorar la seguridad alimentaria. Las características comunes de sus políticas y estrategias son la estabilidad política, la buena gobernanza, un crecimiento económico fuerte basado, en algunos países, principalmente en el crecimiento de la agricultura, estrategias relativas a la seguridad alimentaria y la integración en los mercados mundiales.

Se necesita, por tanto, aplicar disposiciones nuevas e innovadoras que garanticen que los niveles de las reservas de alimentos a nivel mundial sean los adecuados y que los países pobres y dependientes de las importaciones tengan acceso a dichas reservas, especialmente en épocas de extraordinaria carestía.

La comunidad internacional está comprometida a mejorar la gobernanza sobre seguridad alimentaria a escala mundial desde la década de 1990. Los Objetivos de Desarrollo del Milenio aprobados en el año 2000 contemplaban, entre otros, la erradicación de la pobreza y el hambre.

Como consecuencia de la primera crisis importante de precios alimentarios (2007-08), se produjo una oleada de reacciones políticas en instituciones mundiales: la Conferencia de Alto Nivel de la FAO sobre Seguridad Alimentaria Mundial (junio de 2008); la Cumbre del G8 en L'Aquila (junio de 2009), la Cumbre Mundial de la FAO sobre Seguridad Alimentaria (noviembre de 2009) y la Reunión Ministerial del Comité de Agricultura de la OCDE (febrero de 2010). En todas estas reuniones del máximo nivel mundial se puso de manifiesto la necesidad de emprender una acción internacional para erradicar el hambre de la faz de la tierra, de forma permanente y a la mayor brevedad posible.

El esfuerzo sin precedentes realizado por la comunidad internacional desde el año 1990 hasta 2015 ha permitido que la pobreza mundial descienda desde el nivel del 47 % en 1990 hasta el 14 % en 2015, mientras que el hambre en las regiones en desarrollo pasó de más del 23 % en 1990 al 12,9 % en 2015. (Naciones Unidas, 2015a).

Una vez terminado el periodo de aplicación de los Objetivos de Desarrollo del Milenio en 2015, los nuevos Objetivos de Desarrollo Sostenible aprobados por la Organización de Naciones Unidas continúan contemplando poner fin a la pobreza y al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y fomentar la agricultura sostenible como un objetivo irrenunciable de cara a 2030 (Naciones Unidas, 2015b).

6. La bioeconomía como garantía de seguridad alimentaria en 2050

El siglo XXI ha traído nuevos desafíos a nuestras sociedades a los que se debe hacer frente. El cambio climático, la disminución de los recursos fósiles, la falta de sostenibilidad en muchas de las actividades humanas y el anunciado incremento de población mundial amenazan la seguridad alimentaria en muchas partes del planeta. La economía basada en el petróleo, considerada como un sistema abierto, sin límites en el crecimiento, ha demostrado ser una falacia.

La bioeconomía abarca la producción sostenible de los recursos biológicos renovables y la conversión de estos recursos y residuos en productos de valor añadido, tales como alimentos, piensos, bioproductos y bioenergía.

Muchos países están en la actualidad implicados en el proceso de transición de una petroeconomía a una bioeconomía que garantice en primer lugar la seguridad alimentaria y un uso racional y más eficaz de los recursos fósiles y de los residuos, tanto agrícolas como urbanos. Esta transición conlleva un proceso transformador, un nuevo paradigma en nuestras sociedades que promueva un desarrollo económico sostenible y la aceptación de un límite al crecimiento en nuestro planeta que garantice el desarrollo de las generaciones futuras (Aguilar, 2016).

Abordar de una forma efectiva los retos sociales que son la esencia de una bioeconomía sostenible requiere promover y garantizar una amplia implicación social y una gobernanza responsable y participativa. Concomitantemente es necesario acelerar el proceso innovativo desde la idea y el descubrimiento hasta las aplicaciones en la sociedad y en el mercado. Esta profunda transformación social conducirá a la sociedad a estar mejor preparada y mejor formada frente a los retos a los que se enfrenta y generará nuevos puestos de trabajos en sectores actualmente inexistentes. Los sistemas agrícolas necesitarán también ser rediseñados de una forma integral para poder conciliar las diversas demandas relativas a la productividad, la sostenibilidad y los valores sociales, para garantizar la viabilidad y calidad de los alimentos tanto para el presente como el futuro.

Ante los desafíos descritos anteriormente, la bioeconomía, como sistema económico basado en la transformación de recursos biológicos renovables en alimentos, bioproductos y biocombustibles supone:

- La integración de medidas de agricultura sostenible y de economía circular, de forma que se optimicen los consumos de agua y otros insumos agrícolas, como fertilizantes

y pesticidas, al tiempo que se aumente la productividad por hectárea y se disminuyan las pérdidas de alimentos postcosecha, posibilitando la utilización de residuos de procesos productivos como nuevos recursos.

- Reducir la dependencia de combustibles fósiles, lo que a su vez disminuye la aportación de gases de efecto invernadero.
- Promover el desarrollo de sociedades más sostenibles, al integrar la cadena de valor industrial con la química y agrícola.
- Posibilitar el intercambio internacional de recursos educativos, de investigación y desarrollo.

7. Conclusiones

El acceso a los recursos es fundamental para que la población en riesgo de inseguridad alimentaria pueda alimentarse por sí misma y generar ingresos a través de la producción agrícola.

El sistema agrícola y alimentario mundial debe satisfacer la demanda actual y futura de alimentos. Afortunadamente, dispone de los recursos y la tecnología necesarios para erradicar el hambre.

Para ello, se debe movilizar la voluntad política, incentivar el diálogo social y crear las instituciones necesarias para garantizar que las decisiones clave, tanto sobre el nivel y la distribución de las inversiones como sobre las políticas agrícolas y relativas a la seguridad alimentaria, se tomen con el fin de erradicar el hambre.

La bioeconomía, como sistema económico basado en la transformación de recursos biológicos renovables en alimentos, bioproductos y biocombustibles, puede dar respuestas válidas a estos desafíos.

Referencias bibliográficas

- AGUILAR, A. (2016): «Bioeconomía y Sostenibilidad»; en *Seguridad Alimentaria y Sostenibilidad. Una bioeconomía para el siglo XXI*. Universidad Internacional Menéndez Pelayo.
- BRIZ, J. (2015): «Bioeconomía: Reflexiones sobre la cadena alimentaria»; *La Casa Encendida*. Disponible en: <https://www.lacasaencendida.es/conferencias/bio-economia-reflexiones-sobre-la-cadena-alimentaria-julian-briz-4378>.
- CODEx ALIMENTARIUS COMMISSION (CAC) (2011): *Manual de procedimiento del Codex Alimentarius*. Vigésima edición. Roma, FAO.

- COMISION EUROPEA (2012): *Innovating for Sustainable Growth. A Bioeconomy for Europe*. Disponible en: <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/1f0d8515-8dc0-4435-ba53-9570e47dbd51>.
- CONTRERAS HERNÁNDEZ, J. y GRACIA ARNÁIZ, M. (2005): *Alimentación y cultura. Perspectivas antropológicas*. Barcelona, Ariel.
- FAO (1996): *Cumbre Mundial sobre la Alimentación*. 13-17 de noviembre de 1996. Disponible en http://www.fao.org/wfs/index_es.htm.
- FAO (2001): *The State of Food Insecurity in the World 2001*. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/003/y1500e/y1500e00.htm>.
- FAO (2009): *How to Feed the World in 2050*. En High-Level Expert Forum, Rome.
- FAO (2017): *FAO World Price index*. Disponible en <http://www.fao.org/worldfoodsituation/foodpricesindex/en/>.
- HUESTON, W. y MCLEOD, A. (2012): «Overview of the Global Food System: changes over time/space and lessons for future food safety»; en *Improving Food Safety through a One Health Approach*. EEUU, National Academy of Sciences.
- INGRAM, J. (2011): «A food systems approach to researching food security and its interactions with global environmental change»; en *Food Security* 3(4); pp. 417-431.
- INGRAM, J.; ERIKSEN, P. y LIVERMAN, D. (2012): *Food Security and Global Environmental Change*. Routledge.
- MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD (MINECO) (2016): «Estrategia Española de Bioeconomía»; *Horizonte 2030*. Disponible en <http://bioeconomia.agripa.org/download-doc/102163>.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2015): *A framework for assessing effects of the food system*. National Academies Press.
- NESTLE, M. (2007): «Food Politics»; *How the Food Industry influences nutrition and health*. University of California Press.
- NACIONES UNIDAS (2015a): «Objetivos de Desarrollo del Milenio»; *Informe 2015*.
- NACIONES UNIDAS (2015b): «Programa Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)»; *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Disponible en <http://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>.
- NACIONES UNIDAS (2017): «Progreso en el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible»; *Informe del Secretario General*.
- SWAMINATHAN, M. S. (2010): «Achieving food security in times of crisis»; en *New Biotechnology* (27, 5); pp. 453-460.



BIOECONOMÍA, SEGURIDAD ALIMENTARIA Y SOSTENIBILIDAD

José Pío Beltrán

Instituto de Biología Molecular y Celular de Plantas CSIC-UPV

Resumen

El éxito de la especie humana se ha basado en nuestra capacidad para producir suficientes alimentos. Durante el presente siglo nos enfrentamos a un gran desafío consistente en alcanzar la seguridad alimentaria. Para ello, necesitaremos producir alimentos para que, a comienzos del siglo XXI, puedan alimentarse 3.000 millones de personas más de las que lo hacen en la actualidad. La obtención de alimentos no se puede separar de otros desafíos como la producción y el uso de la energía o la gestión sostenible de los recursos naturales. Se trata de producir mucho más, utilizando menos recursos. El mundo se encuentra en una encrucijada que demanda un cambio de modelo, desde la economía de usar y tirar a una economía circular que no genere residuos ni permita la pérdida de nutrientes. La bioeconomía se fundamenta en la gestión sostenible de la biomasa para producir de forma equilibrada alimentos, piensos, energía y otros productos derivados. La mejora genética de las plantas es una de las piedras angulares de la bioeconomía. Tenemos fundadas esperanzas en que las técnicas más innovadoras de mejora genética conocidas como técnicas de edición de genomas, entre las que destaca el sistema CRISPR-Cas9, sean idóneas para acortar los ciclos que nos permitan enfrentar a tiempo los grandes desafíos. La bioeconomía se tiene que fundamentar en la cooperación público-privada basada en un modelo innovador de la cuádruple hélice donde empresas, investigadores, administraciones y ciudadanía tengan voz. Europa no puede repetir el error cometido con las primeras generaciones de cultivos transgénicos. Es necesario incorporar a los ciudadanos desde el principio a los procesos innovadores, ya que es la sociedad la que debe participar y dar apoyo a los procesos de la mejora genética. En este trabajo presentamos la estrategia bioeconómica de la «European Plant Science Organization» (EPSO) en el marco de la plataforma Tecnológica «Plants for the Future».

Abstract

The success of the human species has been based on our skill in producing sufficient foodstuffs. In this present century we are confronted by the major challenge of food security. To face this, we will need to produce enough foodstuffs so that, at the start of the 22nd century, we are able to feed 3,000 million more people than we do currently. The acquisition of foodstuffs cannot be separated from other challenges, such as the production and use of sustainable energy and the management of natural resources. It is a case of producing a lot more, using less resources. The world is at a turning point that demands a change of model, from a throw-away economy to a circular economy that does not generate waste and does not allow nutrients to be lost. The bioeconomy is based on the sustainable management of the biomass to generate a balanced production of foodstuffs, fodder, energy, and other derivatives. The genetic improvement of plants is one of the cornerstones of the bioeconomy. We have well-founded hope that the most innovative genetic improvement techniques, known as genome editing, including the CRISPR-Cas9 system, will prove suitable for shortening cycles and allow us to tackle the major challenges in time. The bioeconomy must be based on public-private cooperation, employing an innovative model of the quadruple helix where companies, researchers, administrations, and citizens all have a voice. Europe cannot repeat the error it committed with first generation of transgenic crops. It is necessary to incorporate the general public into innovative processes right from the beginning, since society must participate and support genetic improvement processes. In this work, we present the bioeconomy strategy of the «European Plant Science Organisation» (EPSO) as part of the technological platform «Plants for the Future».

1. Bioeconomía y alimentación

La bioeconomía es la parte de la economía que integra la biología y las aplicaciones de las ciencias biológicas. En el año 2014, el comercio mundial de bienes y productos de la bioeconomía en los sectores de la agricultura, silvicultura, alimentación, bioenergía, biotecnología

y química verde tuvo un valor estimado de unos 2 billones de dólares y supuso un 13 % del comercio global (El-Chichakly, 2016). Aproximadamente la mitad del comercio de la bioeconomía correspondió a la compraventa de alimentos. Estas cifras dan una idea del potencial de la bioeconomía para influir sobre sectores estratégicos para la seguridad alimentaria, el acceso a la energía, la salud y la sostenibilidad. El motor que impulsa la bioeconomía es la necesidad de disponer de suficientes materias primas de biomasa para producir alimentos, piensos, energía y productos industriales derivados.

La población humana alcanzará los 7.500 millones de personas en 2020 y continúa creciendo en un planeta finito gracias a la capacidad para procurarnos alimentos. Las previsiones demográficas indican que alcanzaremos los 9.000 millones hacia el año 2050 y que sobrepasaremos los 10.000 millones de personas hacia finales del siglo XXI. Aunque actualmente se observa una desaceleración en la velocidad de crecimiento de la población humana (se sugiere que durante el siglo XXII se podría estabilizar o incluso decrecer ligeramente; Wilson, 2017), no obstante, el desafío de producir alimentos para todos es enorme (Beltrán, 2012). Hoy producimos alimentos suficientes para la población actual. De hecho, cubrimos las necesidades alimentarias de unos 6.600 millones de personas, mientras que alrededor de 900 millones pasan hambre o están malnutridas de acuerdo con las estimaciones de la Organización para la Alimentación y la Agricultura de Naciones Unidas (FAO). Además, entre las personas que disponen de suficientes alimentos, hay unos 800 millones que están obesas o tienen sobrepeso; lo que conducirá a que en un futuro próximo desarrollen problemas cardiovasculares o enfermedades como la diabetes. La cuestión que nos planteamos es si será posible, a través del fomento de la bioeconomía, facilitar la producción de alimentos hacia finales del siglo XXI para alrededor de 3.000 millones de personas más de las que hoy comen y, además, hacerlo de manera sostenible.

La Unión Europea adoptó en 2012 la estrategia denominada *Innovating for Sustainable Growth: a Bioeconomy for Europe*. Esta estrategia propone una aproximación holística a los desafíos ecológicos, ambientales, energéticos, de manejo de recursos naturales y de producción de alimentos a los que Europa y el planeta Tierra tienen que enfrentarse. Europa necesitará materias primas biológicas renovables para garantizar la producción de alimentos y para producir nuevos materiales que permitan desarrollar la sociedad después de la era del petróleo. Esto implica que se debe plantear un cambio económico en el que habrá nuevas demandas, productos, mercados o trabajos, entre otros. Se trata, también, de un cambio radical en las estructuras económicas. Los avances en el desarrollo de esta estrategia se pueden consultar en el *Bioeconomy Knowledge Centre* creado en el seno del *Joint Research Centre*¹. Por su parte, España aprobó en 2016 la llamada Estrategia Española de Bioeconomía que analiza los desafíos para los sectores españoles de la agroalimentación, la biotecnología y la biomasa, poniendo de relieve el dinamismo de estos sectores productivos (Lainez *et al.*, 2018). Sin embargo, es conocido el déficit inversor en I+D+i del sector privado español, por lo que, además de analizar los sectores, la administración española debería abordar la necesidad de idear e implementar urgentemente medidas de apoyo

¹ <https://ec.europa.eu/jrc/en/scientific-tool/bioeconomy-observatory>.

a la investigación y a la innovación pública. Esas medidas deben ser atractivas para las empresas de forma que se generen alianzas público-privadas (*public private partnerships* o PPP), que son cruciales para el desarrollo de la bioeconomía. En la actualidad, una parte significativa de los programas públicos españoles de fomento del liderazgo innovador empresarial se lleva a cabo a través de un sistema de créditos a las empresas reembolsables que, al no resultar atractivos para las empresas, quedan, a menudo, sin ejecutar. Para un análisis de dicho sistema se puede consultar el vigente Plan de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2017-2020 del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad².

2. Alimentos, recursos naturales y energía

La bioeconomía se basa en el uso sostenible de recursos como la tierra, el agua, los nutrientes y la biodiversidad, dando prioridad a la producción de alimentos sobre otras opciones. No obstante, no se puede separar el desafío que supone la producción de alimentos para todos de otros desafíos como el de la obtención y el uso de la energía y el del manejo de los recursos naturales. Recursos, energía y alimentos constituyen un triángulo imposible de desmontar, ya que son asuntos interdependientes. De hecho, la bioeconomía y la economía circular comienzan a vislumbrarse como las dos caras de la misma moneda. Esto es, una economía que, a diferencia de la actual, no se base en «usar y tirar», sino que tenga su fundamento en la reutilización, la reparación, el reciclado y la restauración de productos y materiales, impidiendo la pérdida de los nutrientes a lo largo de sus ciclos. Pues bien, las plantas son fundamentales para el concepto de la bioeconomía como instrumento para alcanzar los objetivos de la seguridad alimentaria que nos demanda la FAO y que consiste en que «todas las personas tengan permanentemente acceso físico y económico a alimentos nutritivos e inocuos suficientes para satisfacer sus necesidades alimenticias y sus preferencias de alimentos para disfrutar de una vida activa y sana». La bioeconomía debe ser el instrumento que ayude a alcanzar un equilibrio entre los usos de las plantas para la producción de alimentos y piensos, la obtención de energía y la fabricación de otros productos.

De acuerdo con la FAO, para alcanzar la seguridad alimentaria en el año 2050 deberemos aumentar la producción de alimentos en un 60 %, lo que requeriría, con las tecnologías disponibles en la actualidad, un aumento del consumo energético y del agua del 50 % y del 40 %, respectivamente. Así, a la dificultad de producir alimentos suficientes se une la insostenibilidad debida al aumento de los recursos que se requieren. Por otra parte, nos encontramos frente a un cambio ambiental global derivado de la actividad humana que puede afectar al funcionamiento del propio planeta Tierra. La fuerza motriz que dirige el cambio global resulta de la combinación del aumento de la población con el consumo de recursos *per cápita*. El hombre utiliza ya entre el 30 % y el 40 % de toda la producción primaria y ha transformado, aproximadamente, la mitad de todo el territorio de la Tierra. El aumento del uso de energía

² www.idi.mineco.gob.es.

y de recursos naturales asociados a actividades humanas en nuestra época, el Antropoceno, está produciendo un aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, provocando un calentamiento global y contribuyendo al cambio climático. De acuerdo con las estimaciones del panel intergubernamental sobre cambio climático (IPCC), aunque redujéramos drásticamente las emisiones de gases con efecto invernadero durante los próximos cien años, tanto la temperatura ambiente global alcanzada como las concentraciones de CO₂ atmosféricas tardarían varios siglos en estabilizarse. Urgen pues innovaciones que conduzcan a la disminución de la huella ecológica que nos permitan evolucionar desde el modelo de crecimiento económico actual a otro modelo que utilice instrumentos con mayores prestaciones a cambio de un menor consumo de materiales y energía. Por ejemplo, los modelos de producción intensiva ganadera de rumiantes utilizados en Estados Unidos y en la Unión Europea liberan una gran cantidad de metano, gas productor del efecto invernadero, que se podría reducir si los rumiantes tuvieran acceso a forrajes enriquecidos en taninos condensados o proantocianidinas. En nuestro laboratorio, hemos realizado avances que permiten la expresión coordinada de cuatro genes cuya presencia es necesaria para la producción de proantocianidinas en la alfalfa. Para ello, hemos utilizado un novedoso sistema de transformación genética denominado *Golden Braid 2.0* que facilita la herencia de los cuatro genes necesarios de forma conjunta (Cañas *et al.*, 2017 y Fresquet-Corrales *et al.*, 2017). Las innovaciones necesarias para el cambio de modelo se producirán probablemente en las interfases entre disciplinas como la biología, la nanotecnología y la robótica. Tendremos que ser capaces de encontrar propuestas innovadoras que nos permitan repetir éxitos como el de la transición del teosinte, una hierba silvestre centroamericana, a los maíces híbridos actuales que permiten alimentar a centenares de millones de personas utilizando mucha menor superficie de cultivo. A modo de ejemplo, desde la aparición de los maíces híbridos en los años 60 del siglo pasado, la superficie necesaria para producir una tonelada de maíz en España se ha reducido a una tercera parte respecto de la que requieren las líneas puras. Como veremos, las nuevas técnicas de edición de genomas pueden facilitar en gran medida la obtención de cosechas híbridas.

3. La necesidad de la agricultura de precisión

Las plantas de cultivo pueden modular los niveles de CO₂ en la atmósfera. Su desarrollo se ve afectado, entre otras causas, por las perturbaciones climáticas, los cambios en el uso del territorio, la sobreexplotación de los recursos naturales, la contaminación, la aparición de especies invasoras y las enfermedades emergentes. De hecho, las semillas que plantamos fueron seleccionadas para ser cultivadas en unas condiciones ambientales concretas. Muchas de estas semillas no muestran la adaptabilidad o resiliencia necesaria frente a cambios ambientales. A estas condiciones adversas hay que añadir la escasez de nuevos territorios aptos para el cultivo, así como de las materias primas necesarias para los insumos agrícolas. Tan solo aproximadamente un 10 % de los aumentos necesarios de las cosechas podrán derivarse de un aumento en la superficie de las tierras de cultivo. El resto tendremos que obtenerlo consiguiendo aumentos

en los rendimientos o intensificando los cultivos. Necesitamos desarrollar una agricultura sostenible y segura para la Tierra. Podemos aprender analizando los defectos actuales de la cadena de producción y de consumo de alimentos. En Europa, América del Norte, Oceanía y Asia industrializada, una tercera parte de las pérdidas de alimentos se produce después de haber llegado estos a las casas de los consumidores, mientras que las otras dos terceras partes se pierden mientras llegan al mercado minorista. Los consumidores de los países desarrollados tienen una gran responsabilidad para reducir drásticamente las pérdidas de alimentos en sus casas. También hay un margen enorme para aumentar la producción de alimentos disminuyendo las pérdidas previas (Fita *et al.*, 2015). Estas pérdidas se producen, entre otras causas, porque las semillas disponibles no son adecuadas para las condiciones de cultivo, porque las plantas sufren ataques de patógenos incluyendo los causantes de las enfermedades emergentes favorecidas por el cambio climático; por las condiciones ambientales estresantes, como las bajas o altas temperaturas o la falta o el exceso de agua, o en postrecolección, durante el almacenamiento o el transporte. Por otra parte, los expertos en cambio climático predicen un aumento de la temperatura media de dos grados en el hemisferio norte que conllevará un descenso del agua disponible del 17 %, al tiempo que se harán más frecuentes los episodios de lluvias intensas. La OCDE predice que, en el año 2050, casi la mitad de la población mundial sufrirá falta de agua. Estas tendencias ponen en riesgo la tercera parte del suelo fértil del mundo. Suelos que también están amenazados por la erosión, la salinización o la fertilización excesiva.

En este contexto, si queremos aumentar la producción de alimentos de forma sostenible, se hace necesario el desarrollo y la implantación de manera generalizada de la agricultura de precisión o *digital farming*. Para ello, es necesario realizar estudios integrados que recojan el historial de la tierra de cultivo, analizar los suelos y desarrollar modelos de plagas y enfermedades teniendo en cuenta las predicciones climáticas de forma que sea posible anticipar los rendimientos de las cosechas. Todo ello permitirá al agricultor decidir qué cultivo y qué variedad plantar, el momento óptimo de la siembra y seguir las pautas de abonado y protección ajustadas a las necesidades. Los beneficios deben plasmarse en la obtención de mayores rendimientos con menos insumos, en una mejor planificación del trabajo, así como en la protección de la calidad del agua y de las tierras adyacentes. A modo de ejemplo, se están desarrollando aplicaciones digitales que permiten al agricultor reconocer, en función del estudio realizado, las malas hierbas, los insectos, los síntomas de enfermedades, el estado nutricional del cultivo, los daños en las superficies foliares e incluso realizar estimaciones de los rendimientos. Con los datos básicos de cada campo, según el cultivo e integrando los datos climáticos el agricultor podrá obtener asesoramiento *online* para conocer el riesgo de infección, cómo proteger el cultivo y cuáles son las soluciones recomendables. A lo largo de esta cadena, la bioeconomía deberá apoyarse en innovaciones de forma que se pueda optimizar la producción de alimentos de manera sostenible. En definitiva, la agricultura del futuro debe ser sostenible y capaz de aumentar el rendimiento de las cosechas utilizando menos recursos. Quizás esto se vea como la cuadratura del círculo con la tecnología actual, de ahí la necesidad de innovar.

4. El consumo de alimentos: saber cuántos comen y qué quieren comer

Actualmente se cultiva un 3 % de la superficie terrestre, de la cual el 71 % se utiliza para producir piensos. Si tenemos en cuenta que más del 70 % de la superficie terrestre está cubierta por los océanos, que el 11 % lo ocupan montañas, desiertos y ciudades, que el 8 % está cubierto por bosques y un 7 % por pastos, nos daremos cuenta de la imposibilidad de agrandar mucho las superficies dedicadas a los cultivos.

Una alimentación adecuada debe proporcionar proteínas, hidratos de carbono y grasas, además de distintos minerales y vitaminas. Desde el punto de vista nutricional, las proteínas de origen animal tienen mayor interés que las de origen vegetal, ya que proporcionan todos los aminoácidos esenciales. Sin embargo, se pueden construir dietas equilibradas en aminoácidos esenciales a partir de proteínas vegetales. Es conocido que, en lugares muy remotos de la tierra, los agricultores han cultivado de forma combinada cereales cuyas proteínas son deficientes en el aminoácido lisina, aunque contienen aminoácidos azufrados, con legumbres cuyas proteínas contienen lisina, aunque sean deficientes en metionina. Así, por ejemplo, surgieron dietas en la cuenca Mediterránea que combinan trigo, cebada, avena y centeno con guisantes, habas y garbanzos. Una dieta que combine cereales con legumbres puede proporcionar los aminoácidos que necesitamos. En los países más desarrollados, las dietas suelen incluir proteínas de origen animal, mientras que países en vías de desarrollo como China o India, Pakistán o Afganistán han venido utilizando dietas basadas en el consumo de arroz que proporcionan suficientes calorías a pesar de ser deficitarias en proteínas de calidad y en alguna vitamina.

Un ejemplo del potencial de las innovaciones tecnológicas para solucionar problemas actuales de la alimentación lo proporciona el denominado arroz dorado biofortificado con beta-caroteno. Una dieta basada en el consumo de arroz tiene como consecuencia la carencia de vitamina A, puesto que en el genoma del arroz no existen varios de los genes de la ruta metabólica que sintetiza el betacaroteno precursor de dicha vitamina. La carencia de vitamina A provoca ceguera infantil. Este problema se ha podido resolver mediante ingeniería genética. En la actualidad, Filipinas ha puesto en el mercado variedades locales de arroz modificadas genéticamente para producir betacaroteno. La tecnología utilizada se basa en la desarrollada en variedades experimentales de arroz por los investigadores europeos Ingo Potrykus y Peter Beyer. Estos investigadores donaron el uso de su desarrollo tecnológico para que se pudieran utilizar en variedades de arroz de propiedad pública en países en desarrollo. El *Philippine Rice Research Institute* (PhilRice) y el *International Rice Research Institute* (IRRI, irri.org/) en Filipinas acaban de liberar al ambiente en dicho país el arroz biofortificado en vitamina A denominado GR2E. Más allá de la producción de betacaroteno, se ha comprobado que el grano del arroz transgénico no presenta cambios en el contenido nutricional, ni tampoco produce nuevos alérgenos o sustancias tóxicas. El arroz GR2E será utilizado en alimentación humana y animal y en la fabricación de productos derivados. Aunque este arroz dorado no está destinado a la exportación, se ha autorizado su inscripción en el *Food Standards Australia New Zealand* para

prevenir conflictos derivados de su entrada accidental en Australia. El arroz GR2E, cuyo precio es igual que el del arroz convencional, proporcionará la mitad de la vitamina A requerida por niños en edad preescolar y también la que necesitan las madres lactantes. Sin embargo, las preferencias, en los países emergentes, de dietas basadas en plantas como el arroz están cambiando y se está generalizando la demanda de proteínas de origen animal. Desde el punto de vista de la producción de alimentos, la incorporación a la dieta de proteínas de origen animal va a tener un gran impacto, ya que la huella ecológica de la producción de proteína animal es muy superior a la de la producción de proteína vegetal. Por ejemplo, la producción de proteínas y grasas animales requiere consumos de agua 25 veces mayores que los necesarios para la obtención de un peso igual de proteínas y grasas vegetales. Además del consumo de agua, la producción de proteína y grasas de origen animal requiere la disponibilidad de piensos, cuya producción necesita grandes superficies de cultivo. El asunto adquiere su dimensión real si se tiene en cuenta que la población actual de China supera los 1.300 millones de personas y la de India los 1.200 millones, y que las predicciones para el año 2050 son que China tendrá unos 1.700 millones de habitantes e India unos 1.300 millones, constituyendo entre ambos, aproximadamente, el 45 % de la población mundial. Estas nuevas demandas de proteína de origen animal se fundamentan en una acumulación progresiva de riqueza en los países emergentes que les sitúa en condiciones de competir en los mercados internacionales de compraventa de cosechas (Bustelo, 2010). Es necesario que tanto los países desarrollados como los emergentes reduzcan su huella ecológica y las dietas van a influir mucho en que esto sea posible.

5. Cultivos y bioeconomía: la visión de EPSO

Los cultivos y las plantas en la naturaleza deben jugar un papel central en la sostenibilidad de la economía del futuro. Los vegetales son esenciales tanto para la producción de alimentos como para la obtención y el uso de energía en un contexto medioambiental complejo en lo que se refiere al clima y a los recursos naturales. Una visión global de las propuestas de la *European Plant Science Organization* (EPSO) para impulsar la bioeconomía se puede consultar en BECOTEPS (2011). En un sentido amplio, el comercio de las plantas de la Unión Europea supone un 3,5 % del producto interior bruto de los veintiocho países miembros, combina la agricultura, la alimentación y la investigación y es responsable de más de 30 millones de puestos de trabajo, incluyendo más de 50.000 científicos en el sector público y 13.000 personas trabajando en I+D+i en el sector privado. La Plataforma Tecnológica *Plants for the Future* de la que forman parte más de 7.000 empresas asociadas en la *European Seed Association* (ESA), organizaciones de agricultores como COPA COGECA, que agrupa a 76 organizaciones de agricultores y 40.000 cooperativas, y la EPSO que agrupa a más de 200 centros de investigación y universidades de 29 países, urge el desarrollo de metodologías que permitan optimizar el uso de los recursos necesarios para la agricultura y señala, como objetivos inmediatos, conseguir aumentar los rendimientos de las cosechas de forma estable en condiciones ambientales dinámicas, mejorar las respuestas de las plantas frente al ataque de patógenos o frente factores

ambientales estresantes de forma que no disminuya la productividad de las cosechas, y desarrollar plantas cuya composición sirva para mejorar la nutrición y la salud de las personas y de los animales que las consuman. Todo ello se debería de lograr de manera sostenible, es decir, utilizando menos recursos y todas las tecnologías disponibles para ello. El planteamiento de la plataforma tecnológica *Plants for the future* se alinea con los objetivos de la bioeconomía y está recogido en tres planes de acción estratégica sobre investigación³, innovación⁴ y educación⁵. La lectura de los tres planes de acción pone de manifiesto que el sector industrial y la investigación pública sobre mejora genética de las plantas tienen que jugar un papel central en la producción de materias primas, así como lo tendrá el desarrollo de marcos legales claros que tengan en cuenta las consideraciones socioeconómicas y el papel de los ciudadanos. En definitiva, desde EPSO se da soporte al denominado modelo de la innovación de la cuádruple hélice en el que se integran la industria, la academia, los agentes sociales y las administraciones.

6. La mejora genética como piedra angular de la bioeconomía

En 1960, un agricultor alemán producía alimentos suficientes para diecisiete personas. En 2017 produce alimentos suficientes para nutrir a ciento cincuenta personas. Durante el presente siglo, las dos terceras partes del aumento en la productividad de las cosechas, que suponen un aumento del 16 % de la productividad en la Unión Europea, se ha debido a la mejora genética de las semillas (Noleppa, 2016). Además, ese aumento en la productividad se ha conseguido utilizando técnicas para proteger el medioambiente. Siendo evidente el potencial de la mejora genética y el vigor de los sectores europeos de la industria de semillas y de la investigación cabe preguntarnos si técnicamente es posible alcanzar los objetivos de la seguridad alimentaria para finales de siglo, o incluso para el año 2050 como demanda la FAO. Actualmente, apreciamos un problema del tiempo disponible para ello, ya que el tiempo necesario para poner en el mercado nuevas semillas mejoradas para la producción de alimentos, de piensos, o ropas y textiles, es de unos quince años. En el campo de la obtención de energía, incluyendo los biocombustibles, son necesarios unos siete años. En definitiva, disponemos de un sector potente que trabaja a una velocidad insuficiente para dar respuesta a las demandas sociales. Sería conveniente y necesario acortar los ciclos de la mejora si queremos proporcionar nuevas variedades para las cadenas de valor en las que se ha de basar la bioeconomía. Así, junto a innovaciones en el campo del manejo sostenible de los recursos (nutrientes, suelo, agua), muchas de las cuales vendrán de la mano de la agricultura de precisión, necesitamos a corto plazo semillas capaces de garantizar, e incluso aumentar, los rendimientos de las cosechas en condiciones ambientales cambiantes. Estas semillas deberán permitir vencer las enfermedades clásicas causadas por patógenos y las nuevas enfermedades y plagas que están emergiendo como consecuencia del cambio climático, y también deberán tener composiciones mejoradas para

³ http://www.plantetp.org/system/files/publications/files/plantetp_researchactionplan_corrected_0.pdf.

⁴ http://www.plantetp.org/system/files/publications/files/plantetp_etp_innovationactionplan_0.pdf.

⁵ http://www.plantetp.org/system/files/publications/files/plant_etp_educationactionplan_0.pdf.

nutrición animal y humana que contribuyan a reducir la huella ecológica de la agricultura. La nueva mejora genética se tiene que apoyar en herramientas como la genómica, la proteómica, el fenotipado automatizado, el análisis de expresión génica, las tecnologías de la información que permitan el análisis de grandes números de datos (*big data*) y nuevos métodos de transformación genética. Como hemos dicho, la piedra angular de la bioeconomía será la mejora genética y sus técnicas más innovadoras conocidas hoy como nuevas técnicas de mejora de plantas o *new plant breeding techniques*.

7. *New plant breeding techniques*: la edición de genomas

Las primeras técnicas de la genética reversa se han basado en la imitación del procedimiento utilizado en la naturaleza por *Agrobacterium tumefaciens* para incorporar genes bacterianos al genoma de las plantas y facilitar así su colonización. Estas técnicas han permitido a las empresas de semillas comercializar las primeras cosechas de cultivos transgénicos, esto es, semillas mejoradas eludiendo las barreras del cruce sexual. Los genes se incorporan a las plantas al azar en cualquier sitio del genoma. Luego hay que comprobar que el gen incorporado promueve el carácter deseado sin producir efectos adversos o no deseados. Recientemente, los ingenieros genéticos han descubierto procedimientos precisos para editar los genomas. Si imaginamos los genomas como textos de manuales de instrucciones, escritos con cuatro letras distintas (A, T, G, C) que se corresponden a las bases de los nucleótidos (adenina, tirosina, guanina y citosina), lo que diferencia a unos genes de otros es el orden o secuencia en que están escritas esas cuatro letras a lo largo de sus cadenas de ADN en el genoma. Lo que permiten las técnicas de edición de genomas es similar al uso de un procesador de textos que nos posibilita cambiar una o varias letras que elegimos y que ocupan una posición concreta cualquiera del genoma. Por ejemplo, se podría, en principio, inactivar un gen concreto del genoma de una planta de cosecha. Si sabemos que ese gen es responsable de que la planta pueda ser atacada por un patógeno, introduciendo un cambio en su secuencia lo podremos inactivar y conseguir que la planta fuera inmune a la enfermedad.

Actualmente, los mejoradores genéticos pueden incorporar a su «caja de herramientas» diversas técnicas que pueden utilizar para editar con precisión los genomas de las plantas, entre ellas, las nucleasas específicas (SDN) o la mutagénesis dirigida por oligonucleótidos (ODM), que facultan la introducción de cambios específicos en la secuencia de los genomas de las plantas. Estas técnicas, cada vez más precisas, sirven para obtener el cambio deseado sin generar centenares de mutaciones adicionales como las que se producen al usar los agentes mutagénicos químicos o las radiaciones, que son herramientas básicas de la mejora genética tradicional.

8. Mutagénesis dirigida por oligonucleótidos

La mutagénesis dirigida por oligonucleótidos es capaz de introducir una única mutación en un solo punto preciso del genoma elegido por el mejorador. Imaginemos que queremos introducir una mutación en un gen del cual conocemos su secuencia. Lo primero que tendremos que hacer es fabricar un oligonucleótido (molécula corta de ADN de una sola hebra), típicamente de unos veinte nucleótidos, mediante un procedimiento rutinario en el laboratorio que nos permite decidir su secuencia de nucleótidos. Esta secuencia debe ser complementaria a la del gen que queremos mutar, excepto en una posición en la que no introducimos la base complementaria. Por tanto, en ese punto se creará un desapareamiento cuando el oligonucleótido hibride con la cadena de ADN de nuestro gen diana. Esto sucede cuando introducimos el oligonucleótido con la secuencia modificada en la planta, puesto que, al replicarse el ADN, se copia la secuencia del oligonucleótido que contiene la mutación que hemos introducido. La propia maquinaria de reparación celular detecta que hay un desapareamiento puntual y lo corrige, de forma que engañamos a la célula que modifica la secuencia del gen al creer que hay un error y es esta secuencia mutada la que se hereda y, por tanto, la propiedad o función del gen mutado. La maquinaria de reparación elimina los restos que puedan quedar del oligonucleótido que hemos introducido. En este proceso se han utilizado técnicas de ingeniería genética, sin embargo, el uso de esas técnicas es indetectable *a posteriori*. La mutación podría haber sucedido al azar de manera natural. Esa variedad mutada ¿debería considerarse como transgénica? El autor de este artículo no lo cree así, puesto que es indistinguible de otra que podría haberse producido de forma natural. Comercialmente, la empresa norteamericana CIBUS aplica esta tecnología para producir plantas tolerantes a un herbicida cuya autorización está pendiente en la Unión Europea.

No obstante, hay quien piensa que estas plantas deberían considerarse como transgénicas porque en su desarrollo se han utilizado técnicas de ingeniería genética y, por lo tanto, deberían ser sometidas a las costosas (en tiempo y en dinero) evaluaciones de seguridad que se aplican en la Unión Europea a los transgénicos antes de autorizar su cultivo. Sería más racional, en estos casos, juzgar las plantas de acuerdo con lo que son y no de acuerdo con la tecnología con la que se han obtenido. En este caso, no se ha introducido gen alguno, ni de la misma especie (cisgénesis) ni de otra especie (transgénesis). Se trataría de una mutación puntual, como las que suceden con frecuencia en la naturaleza.

9. Nucleasas utilizadas en la edición de genomas

Para editar genomas se utilizan las nucleasas específicas que ocasionen cambios dirigidos en secuencias de ADN concretas. Mediante la utilización de nucleasas se puede eliminar, añadir o cambiar una o varias bases específicas de la cadena de ADN en un lugar específico definido por la propia secuencia de bases del ADN. Es decir, las nucleasas específicas son capaces de cortar la doble cadena del ADN en un sitio predefinido del genoma gracias a su capacidad para

reconocer secuencias específicas. Hasta la fecha se vienen utilizando cuatro clases principales de nucleasas específicas para la edición de genomas: las meganucleasas, las nucleasas tipo dedo de zinc (*Zinc-Finger Nucleases* o ZFN), las nucleasas asociadas a efectores similares a activadores transcripcionales (nucleasas tipo TALEN) o el sistema de nucleasas CRISPR-Cas9 (*Clustered Regularly Interspaced Palindromic Repeats*). El sistema de nucleasa CRISPR-Cas9 aplicado a la edición de genomas ha irrumpido en los últimos años y se está mostrando como el más eficaz. El sistema CRISPR-Cas9 fue descubierto por Francisco Juan Martínez Mojica en la Universidad de Alicante. Detectó las repeticiones de secuencia características del sistema y les asignó el papel que desempeñan como parte de un sistema de inmunidad adquirida de las bacterias. Las secuencias CRISPR contienen fragmentos de ADN de los elementos invasores que, al incorporarse al genoma bacteriano, constituyen una especie de memoria química de las infecciones sufridas que inmunizan a las bacterias frente a ulteriores infecciones de los mismos agentes. El sistema bacteriano utiliza nucleasas guiadas por un ARN derivado de las secuencias incorporadas, que dirige a las proteínas Cas (Cas, de *CRISPR Associated*) a reconocer y cortar las secuencias de ADN foráneas. El sistema CRISPR-Cas9 modificado sirve para editar genomas de forma específica y precisa. La revista *Science* eligió esta tecnología como el principal avance científico del año 2015 (Breakthrough of the Year, 2015). La utilización de los distintos tipos de nucleasas para la mejora vegetal ha crecido de forma exponencial en los últimos años. Las especies mejoradas incluyen nuevas variedades de maíz, colza, soja, tomate, tabaco o patata. Sin embargo, la tecnología que ha despertado el mayor interés es la del sistema CRISPR-Cas9 (Bortesi y Fischer, 2015), pues es la que proporciona una mayor capacidad para dirigir la acción de las nucleasas a un mayor número de puntos concretos del genoma, virtualmente a cualquier punto. Recientemente, los investigadores del IBMCP de Valencia, Diego Orzáez y Antonio Granell (comunicación personal) han conseguido mimetizar el fenotipo característico de la variedad de tomate conocida como chocolate que tiene un sabor muy apreciado por los consumidores, en nuevas variedades mediante la introducción mediante la tecnología CRISPR-Cas9 de la misma mutación puntual que dio origen en la naturaleza al genotipo chocolate.

10. La posición de la Comisión Europea sobre la edición de genomas

La Comisión Europea publicó en abril de 2017 un documento sobre las nuevas técnicas aplicables a la biotecnología agraria basado en el asesoramiento científico⁶. En dicho documento, elaborado mediante los procedimientos previstos⁷, se analizan las aplicaciones que se están derivando del uso de dichas técnicas, así como las implicaciones de su utilización, incluyendo un análisis de riesgos y beneficios. Se comparan las llamadas *new plant breeding techniques* (NPBT) con las técnicas de mejora convencional (CBT) y también con las técnicas utilizadas hasta la fecha para modificar genéticamente las plantas de cosecha mediante ingeniería genética

⁶ <http://ec.europa.eu/research/index.cfm?pg=2017&na=na-280417>.

⁷ https://ec.europa.eu/research/sam/pdf/topics/explanatory_note_new_techniques_agricultural_biotechnology.pdf#view=fit&pagemode=none.

(transgénicos de primera generación). En el documento se recoge una recomendación para que las NPBT se excluyan de las cuestiones jurídicas y regulatorias que actualmente aplica la UE a los transgénicos.

11. El punto de vista de los consumidores

Más allá de los desarrollos científico técnicos y de las empresas de los sectores implicados, la bioeconomía necesita contar con una fuerte aceptación pública y con una regulación administrativa adecuada. A pesar de los beneficios enormes para los ciudadanos de actividades como la mejora genética, es fácil que estos pasen desapercibidos o sean malentendidos por los consumidores. Buen ejemplo de ello son las opiniones en la Unión Europea sobre los cultivos transgénicos, con opiniones ciudadanas contrarias que terminan plasmándose en regulaciones administrativas y políticas que ponen en riesgo el desarrollo de las tecnologías más innovadoras. Estamos a tiempo de impedir que las nuevas tecnologías de mejora y, en especial, las tecnologías de edición de genomas y sus beneficios sociales, sean mal comprendidas por los ciudadanos europeos y por los legisladores. Hasta la fecha se ha insistido, con poco éxito, en facilitar la transmisión de información sobre estos temas al público en general con la intención de mover su postura desde la emoción a lo racional. Los expertos en ciencias sociales recomiendan basar las nuevas estrategias de la información en la transparencia y en la participación social en las acciones de investigación e innovación (Malyska y Jacobi, 2017). Esto supondría que desde las empresas y desde la Academia se tendría que incorporar a la sociedad (ciudadanos, agricultores, asociaciones, etc.), a lo largo de todos los procesos innovadores, incluyendo sus puntos de vista y respondiendo a sus demandas específicas. Un ejemplo de la nueva forma de relacionarse con la sociedad es el desarrollado por EPSO desde 2012 a través del denominado *Fascination of Plants Day* (FoPD)⁸. En 2017, participaron en esta acción más de seiscientas instituciones que albergaron más de mil eventos diferentes dedicados al público general y a los medios de comunicación de forma simultánea en sesenta y siete países (treinta y uno de Europa, diez de América, once de África y trece de Asia, Australia y Nueva Zelanda). España participa de forma muy activa. En el año 2017 se desarrollaron cuarenta y ocho eventos entre universidades, centros de investigación del CSIC, asociaciones culturales, supermercados, colegios de educación infantil y primaria, institutos de educación secundaria y jardines botánicos, entre otros. Dichas actividades se pueden consultar en el sitio web www.dicv.csic.es. Se puede obtener información sobre pasados o futuros eventos dentro de los FoPDs a través de su coordinador para España (jpbeltran.fascinationofplants@dicv.csic.es).

⁸ <http://www.plantday.org/home.htm>.

12. Conclusiones

La producción de alimentos para garantizar la seguridad alimentaria puede beneficiarse de un cambio del modelo económico basado en la bioeconomía. Solo la intensificación tecnológica basada en campos científico-técnicos como la biotecnología, la nanotecnología, las tecnologías de la información y la robótica parecen sugerir que es posible un cambio económico estructural dirigido a producir más alimentos de forma sostenible y utilizando menos recursos. Sin embargo, para ello será necesaria la colaboración intensa entre la industria, la academia, los agentes sociales y las administraciones. Dada la compleja realidad social de la Unión Europea es previsible que surjan muchos problemas que habremos de enfrentar.

Referencias bibliográficas

- BECOTEPS (2011): «The European Bioeconomy in 2030»; *Delivering sustainable growth by addressing the Grand Societal Challenges*. www.becoteps.org, <http://www.epsoweb.org/file/560>.
- BELTRÁN, J. P. (2012): «El desafío global de la producción de alimentos y l'Horta de Valencia»; *Publicaciones Universidad de Valencia*. Universidad de Valencia.
- BORTESI, L. y FISCHER, R. (2015): «The CRISPR/cas9 system for plant genome editing and beyond»; en *Biotechnology Advances* (33); pp. 41-52.
- BUSTELO, P. (2010): *Chindia. Asia a la conquista del siglo XXI*. Tecnos editorial.
- CAÑAS, L. A.; FRESQUET, S.; ROQUE, E. M.; ROCHINA, M. C. y BELTRÁN, J. P. (2017): «Forage legumes with improved nutritional value: condensed tannins to avoid pasture bloat»; en *Legumes for Global Food Security*. Nueva York, editorial Nova Science Pub. Inc.; pp. 183-222.
- EL-CHICHAKLI, B.; VON BRAUN, J.; LANG, C.; BARBEN, D. y PHILP, J. (2016): «Five cornerstones of a global bioeconomy»; en *Nature* (535); 221-223.
- FITA, A.; RODRÍGUEZ-BARRUEZO, A.; BOSCAIU, M.; PROHENS, J. y VICENTE, O. (2015): «Breeding and domesticating crops adapted to drought and salinity: a new paradigm for increasing food production»; en *Frontiers in Plant Science*. doi: 10.3389/fpls.2015.00978.
- FRESQUET-CORRALES, S.; ROQUE, E.; SARRIÓN-PERDIGONES, A.; ROCHINA, M. C.; LÓPEZ-GRESA, M. P.; DÍAZ-MULA, H. M.; BELLÉS, J. M.; TOMÁS-BARBERAN, F.; BELTRAN, J. P. y CAÑAS, L. A. (2017): *Metabolic engineering to simultaneously activate anthocyanin and proanthocyanidin in Nicotiana spp.* *PloS one*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0184839>.
- GERLAND, P.; RAFTERY, A. E.; SEVCIKOVA, H.; LI, N.; GU, D.; SPOORENBERG, T.; ALKEMA, L.; FOSDICK, B.; CHUNN, J.; LALIC, N.; BAY, G.; BUETTNER, T.; HEILIG, G. K. y WILMOTH, J. (2014): «World population stabilization unlikely this century»; *Science* 346; pp. 234-237.

- LAINIZ, M.; GONZÁLEZ, J. M.; AGUILAR, A. y VELA, C. (2018): «Spanish strategy on Bioeconomy: towards a knowledge based sustainable innovation»; en *New Biotechnol.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.nbt2017.05.006>.
- MALIYSKA, A. y JACOBI, J. (2017): «Plant breeding as the cornerstone of a sustainable bioeconomy»; en *New Biotechnol.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.nbt.2017.06.011>.
- NOLEPPA, S. (2016): «The social, economic and environmental value of plant breeding in the European Union»; en *An ex post evaluation and ex ante assessment*. Berlin, GmbH.
- WILSON, E. O. (2017). *Medio Planeta. La lucha por las tierras salvajes en la era de la sexta extinción*. Madrid, Errata Naturae Editores.



MEDITERRÁNEO
ECONÓMICO

32

- I. Iniciativas europeas en bioeconomía
- II. Perspectivas de la bioeconomía en España
- III. Necesidad de una sólida base científica y técnica en bioeconomía
- IV. Bioeconomía, bioindustrias y seguridad alimentaria
- V. Ejemplos de éxito en la bioeconomía
- VI. Bioeconomía y bioenergía



SUBPRODUCTOS HORTOFRUTÍCOLAS PARA UNA BIOECONOMÍA CIRCULAR

María Carmen Villarán, María Chávarri, Thomas Dietrich y Elena Rodríguez
Fundación Tecnalia Research & Innovation

Resumen

La demanda global de recursos supera ya en la actualidad la capacidad de producción biológica de la Tierra en un 20 %, y según los demógrafos prevén que la población de esta aumente de los 6.500 millones de personas actuales a un mínimo de 9.000 millones en las próximas décadas. Ello hace necesario un cambio en los patrones de consumo de cara a lograr la reducción del uso de materias primas. Debemos pasar de una economía lineal a una economía circular en la que el valor de los productos, los materiales y los recursos se mantengan en la economía durante el mayor tiempo posible, y que se reduzca al mínimo la generación de residuos.

Existen numerosos desarrollos que ponen de manifiesto la posibilidad de emplear los subproductos actualmente generados, en procesos agroalimentarios para la obtención de productos de alto valor añadido con aplicación en el campo alimentario, químico o energético mediante el empleo de diversas tecnologías limpias. Este artículo expone un ejemplo de cómo los subproductos de la industria de transformados hortofrutícolas pueden ser objeto de una economía circular, planteándose tanto el empleo de procesos de extracción para la recuperación de compuestos de interés; como la valorización de los rechazos generados en estas extracciones y de los subproductos ricos en azúcares para obtener ingredientes y biopolímeros mediante procesos biotecnológicos. Aquellos subproductos que no entran en los ciclos de valorización mencionados, se emplean para la producción de piensos, fertilizantes o energía; lográndose así cerrar el ciclo de frutas, vegetales y hortalizas y contribuyendo a la reducción del consumo de materias primas.

1. Introducción

La demanda de recursos a escala global supera ya en la actualidad la capacidad de producción biológica de la Tierra en un 20 %, debido a unos niveles de consumo no sostenibles. Dado que los demógrafos prevén que la población de la Tierra aumente de los 6.500 millones de personas actuales a un mínimo de 9.000 millones en las próximas décadas, la Organización

Abstract

Global demand for resources now exceeds the Earth's biological production capacity by 20% and, according to demographers, it is predicted that the planet's population will increase from its current 6,500 million people to a minimum of 9,000 million in the coming decades. This requires a change in consumption patterns to achieve a reduction in the use of raw materials. We must move away from a linear economy to a circular economy where the value of products, materials, and resources is kept in the economy for as long as possible, and waste generation is minimised.

There are numerous developments that highlight the possibility of employing by-products currently generated in agri-food processes to obtain high-added-value products with applications in the fields of food, chemistry, or energy by using various clean technologies. This article sets out an example of how by-products from the fruit and vegetable processing industry can be the subject of a circular economy, considering both the use of extraction processes to recover the compounds of interest, and adding value to the waste generated in this extraction, as well as the sugar-rich by-products, to obtain ingredients and biopolymers through biotechnology processes. Any by-products that do not enter these added-value cycles, are used to produce fodder, fertilisers or energy; thus closing the cycle of fruits, vegetables, and horticultural products, and helping reduce the consumption of raw materials.

de las Naciones Unidas (ONU) aboga por reducir el consumo de recursos naturales a niveles sostenibles y realizar una mejor gestión y utilización de los recursos a nivel mundial¹. La implantación de una economía circular es la vía para salvaguardar la biodiversidad de la tierra y optimizar los recursos, reducir la cantidad de residuos y la contaminación generada por la actividad humana. La economía circular es un concepto económico que se interrelaciona con la sostenibilidad, y cuyo objetivo es que el valor de los productos, los materiales y los recursos (agua, energía...) se mantenga en la economía durante el mayor tiempo posible, y que se reduzca al mínimo la generación de residuos. Se trata de implementar una nueva economía, circular –no lineal–, basada en el principio de «cerrar el ciclo de vida» de los productos, los servicios, los residuos, los materiales, el agua y la energía².

Históricamente, la actividad agrícola global se ha centrado, principalmente, en el aumento de la productividad en lugar de una integración de la gestión de los recursos naturales junto con la seguridad alimentaria y nutricional. Es por ello, que se debe aprender de la naturaleza y cerrar los ciclos biológicos como requisito clave para una economía sostenible. En este contexto, el sector de frutas y hortalizas ofrece un enorme potencial para desarrollar una bioeconomía circular. En 2016, se produjeron más de 124 millones de toneladas de frutas y verduras en los 28 países de la Unión Europea (UE-28). La producción española representó más de 32 millones de toneladas de frutas y verduras, lo que supone el 25 % de la producción de UE-28, según estadísticas de Eurostat³. A lo largo de la cadena de valor que va desde la agricultura al consumidor se pierde el 45 % de la producción de frutas y hortalizas⁴.

Si se aplica la jerarquía de residuos⁵ (Figura 1), muchos de estos subproductos ofrecen la oportunidad de ser utilizados de manera sostenible, alimentando una bioeconomía circular mediante procesos de extracción y procesos de fermentación para la obtención de compuestos de valor añadido para uso alimentario (antioxidantes, colorantes, fibras dietéticas), biopolímeros u otros productos de valor añadido. Un caso real de bioeconomía circular para obtener biopolímeros⁶, productos químicos o enzimas se muestra en el proyecto de investigación financiado con fondos europeos TRANSBIO⁷ (acuerdo de subvención n.º 289603).

Adicionalmente, subproductos que no son susceptibles de ser valorizados por las rutas anteriormente descritas o incluso los residuos generados en los procesos químicos o biológicos de valorización descritos, pueden convertirse en materias primas para la generación de piensos de alta calidad⁸, como una nueva alternativa de alimentación animal que ayude a cubrir las necesidades de una población en aumento que va a requerir mayores producciones ganaderas que las fuentes convencionales de alimentación animal no podrán cubrir. Como ejemplo nombrar los desarrollos realizados por la empresa TRASA, sita en el Valle del Ebro, que lleva

¹ ONU (2015).

² FUNDACIÓN PARA LA ECONOMÍA CIRCULAR (2017).

³ EUROSTAT (2017).

⁴ FAO (2011).

⁵ EUROPEO (2008).

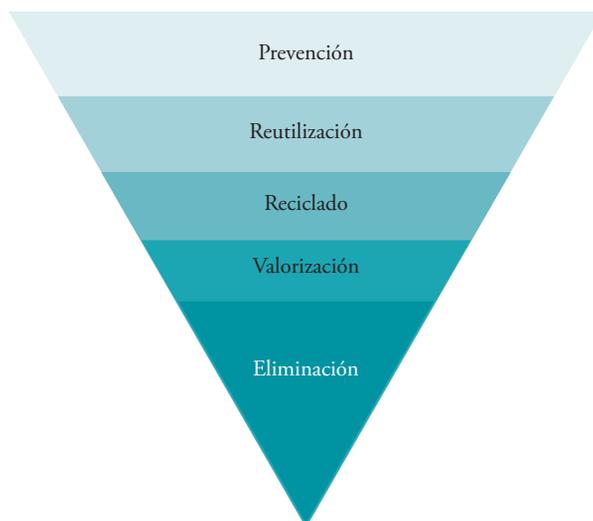
⁶ HAAS *et al.* (2015).

⁷ TRANSBIO (2017).

⁸ FAO (2013).

a cabo la valorización de estos subproductos hortofrutícolas, a través de la digestión anaeróbica produciendo energía y fertilizantes, de esta forma se cierra el ciclo entre la agricultura y la obtención de productos de alto valor añadido⁹.

Figura 1. Jerarquía de los subproductos

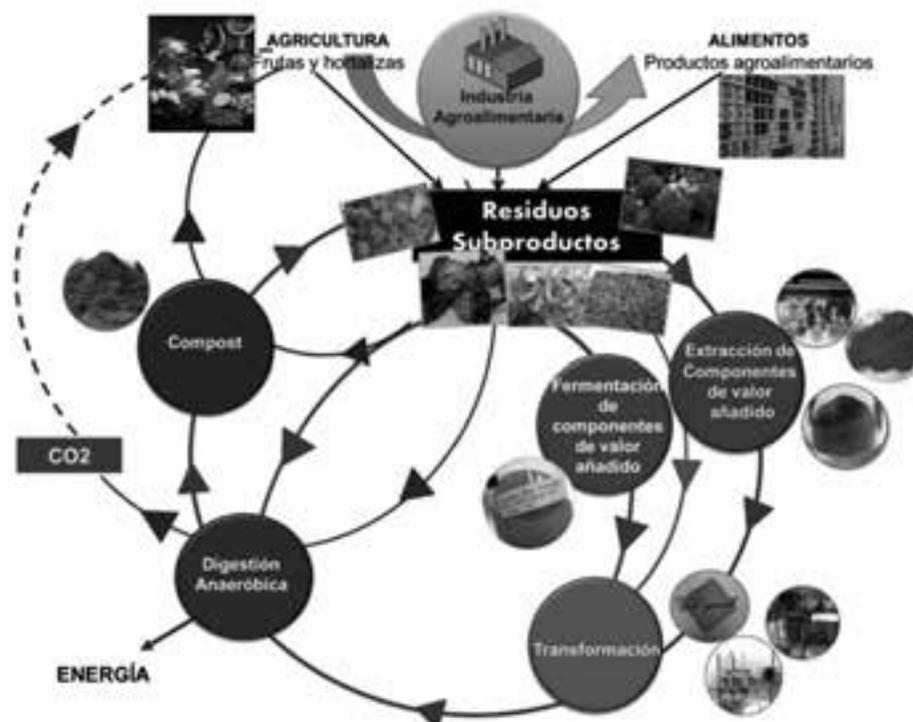


Fuente: Parlamento Europeo (2008).

Este concepto de bioeconomía aplicado a los subproductos hortofrutícolas generados por las empresas transformadoras de hortalizas y verduras se muestran en la Figura 2. Algunos de estos subproductos pueden convertirse en primer lugar para la generación de ingredientes alimentarios u otros productos de valor añadido. Los subproductos no aptos para estos usos o incluso los residuos generados en estos procesos pueden ser empleados para la producción de piensos, energía o fertilizantes, cerrando con ello el ciclo.

⁹ MORTIER (2016) y SCANO (2014).

Figura 2. Bioeconomía de los subproductos agrícolas



2. Extracción de compuestos de alto valor añadido

Los subproductos de la industria de transformados de frutas y verduras son una gran fuente de compuestos activos de interés tales como fibra, proteína, polifenoles, fitosteroles, etc.¹⁰, con diversas propiedades como antimicrobiana, antibacteriana, antifúngica, antitumoral, antiinflamatoria, antiobesidad, anticolesterol, insecticida, antioxidante¹¹, entre otras.

Mediante la adecuada aplicación de tecnologías de extracción es posible recuperar estos compuestos para su aplicación como materia prima para el desarrollo de nuevos alimentos, complementos alimenticios, cosméticos, etc.

Un primer aspecto a considerar a la hora de recuperar estos compuestos activos es que la biomasa de la que se obtienen viene condicionada por su procedencia, estación de recolección, parte de la planta de la que se obtiene, proceso de transformación en el que se ha generado el subproducto, etc. Todo ello puede modificar las características del extracto que se obtenga y sus propiedades bioactivas. Adicionalmente, el proceso seguido en el almacenamiento del

¹⁰ ABU-REIDAH *et al.* (2017) y PETKOWICZ *et al.* (2017).

¹¹ VINATORU *et al.* (1999).

subproducto generado y su preparación como materia prima del proceso extractivo puede también alterar las propiedades de los compuestos activos que se recuperen¹².

Así pues, una primera etapa del proceso de extracción es la estabilización de los subproductos para asegurar el mantenimiento de los compuestos de interés. En este sentido existen diferentes técnicas de conservación entre las que cabe citar las tecnologías de deshidratación (secado por aire caliente, deshidratación osmótica, microondas, atomización, etc.) y congelación. La selección de una u otra se hace en función de la sensibilidad frente a la temperatura del compuesto a recuperar y del coste del proceso.

Además de la naturaleza de la materia prima, la calidad del extracto va a depender de otros factores como el tipo, tiempo y temperatura de extracción, tipo de solvente, relación solvente material sólido¹³. La selección de estos parámetros es esencial a la hora de lograr un extracto con la calidad requerida a costes viables. A ello hay que adicionar el hecho de que las tendencias actuales buscan tecnologías extractivas llamadas verdes, evitando el empleo de solventes peligrosos tales como diclorometano o metanol, y reduciendo los tiempos del proceso.

Actualmente existe un amplio porfolio de tecnologías de extracción aplicadas a la recuperación de compuestos activos a partir de subproductos hortofrutícolas y plantas en general.

2.1. Tecnologías de extracción

Dentro de las conocidas como técnicas de extracción convencionales podemos citar la destilación, la extracción con solventes y la compresión en frío. La destilación se emplea especialmente para la obtención de aceites esenciales. La extracción con solventes, tecnología con alta implantación, puede realizarse por diferentes procesos:

- a) *Maceración*: consistente en poner el material vegetal en contacto con el solvente en determinadas condiciones de temperatura, agitación, tiempos de contacto y relaciones sólido líquido.
- b) *Percolación*: el solvente circula por el interior del material vegetal.
- c) *Infusión*: hacer hervir el solvente en contacto con el material vegetal.
- d) *Extracción* con aceite frío o caliente lo cual es empleado fundamentalmente para la obtención de fragancias de hierbas aromáticas.

Hay que señalar que la tendencia actual, especialmente cuando el compuesto activo a recuperar es para uso alimentario, es el empleo de los denominados solventes verdes como agua

¹² COLEGATE *et al.* (2011).

¹³ DA SILVA *et al.* (2016).

y etanol. En esta línea, ha surgido una nueva generación de solventes verdes, los denominados *Natural Deep Eutectic Solvents* (NADES), constituidos por metabolitos que están presentes naturalmente en todas las células y organismos¹⁴.

Por otro lado, con objeto de mejorar el rendimiento de la extracción con solventes se ha llevado a cabo la incorporación de ultrasonidos o microondas en el proceso de extracción, en lo que se denomina extracción asistida con ultrasonidos y extracción asistida con microondas respectivamente¹⁵. Sin embargo, las aplicaciones a nivel industrial de estos procesos, es aun limitada.

En la compresión en frío se presiona el material vegetal para forzar la salida del líquido en él contenido y es habitualmente empleado en la obtención de aceites vegetales.

Con objeto de reducir el consumo de solventes orgánicos, nuevas tecnologías de extracción están siendo empleadas con diferente grado de implantación industrial¹⁶: extracción con fluidos supercríticos (SF) empleando como solvente sustancias en estado supercrítico como el dióxido de carbono¹⁷, extracción asistida con pulsos eléctricos (PEE), extracción acelerada y extracción con agua subcrítica en la que los solventes orgánicos son sustituidos por agua en condiciones subcríticas, en condiciones de temperatura y presión por debajo de su punto crítico (74 °C - 220 bares) para obtener compuestos de interés como por ejemplo polifenoles a partir de materia prima vegetal¹⁸.

No obstante, los requerimientos de inversión para implantación de estas técnicas pueden condicionar su escalado industrial en función de los rendimientos del proceso y valor en el mercado de los productos obtenidos¹⁹.

Otra novedosa tecnología es la denominada *negative pressure cavitation* (NPC) extraction» que ha sido aplicada con éxito para la extracción, a escala de laboratorio, de polifenoles, alcaloides, polisacáridos y flavonoides de raíces de plantas, hojas y semillas²⁰.

2.2. Compuestos activos

Existen numerosas referencias, incluso desarrollos industriales, sobre la obtención de compuestos activos a partir de materias primas de origen vegetal, mediante tecnologías de extracción, que ponen de manifiesto el potencial de los subproductos hortofrutícolas para la generación de nuevos ingredientes y aditivos para su empleo en el sector alimentario, nutracéutico, cosmético. Entre las moléculas extraídas destacar carotenoides, compuestos fenólicos y flavonoides, inulina y glucosinolatos.

¹⁴ DAI *et al.* (2013).

¹⁵ VINATORU *et al.* (2017).

¹⁶ ROOHINEJAD *et al.* (2016).

¹⁷ BARBOSA *et al.* (2014).

¹⁸ ŠVARC-GAJIĆ *et al.* (2017) y KOVU *et al.* (2017).

¹⁹ JIAO *et al.* (2014).

²⁰ LIU *et al.* (2009) y ZHANG *et al.* (2010).

Carotenoides

Son pigmentos liposolubles responsables del color rojo, amarillo, naranjado y púrpura de frutas y vegetales²¹. Químicamente se dividen en Carotenos (ej.: Licopeno y β -caroteno) y Xantofilas (ej.: luteína, zeaxantina, y β -criptoxantina) considerados derivados oxigenados. El β -caroteno, el α -caroteno, y la β -criptoxantina, son considerados precursores de la vitamina A. Los carotenoides previenen el daño por fotosensibilidad en bacterias, animales y humanos; disminuye el daño genético y las transformaciones malignas; inhibe la inducción tumoral provocada por los rayos UV y agentes químicos y disminuye las lesiones premalignas en humanos.

Compuestos fenólicos y flavonoides

Los compuestos fenólicos son un grupo de metabolitos con una estructura común, determinada por un anillo aromático unido al menos a un sustituyente hidroxilo (grupo fenol) y frecuentemente se encuentran como derivados de ésteres, éteres y glicósidos. Los compuestos fenólicos han mostrado una amplia variedad de actividades biológicas: antioxidante, antimicrobiana, antiinflamatoria, inmunomoduladora, antiviral, antiproliferativa, antimutagénica, anticarcinogénica, acciones vasodilatadoras, y prevención de enfermedades coronarias y desórdenes neurodegenerativos²².

Inulina

La inulina está compuesta de una mezcla de oligosacáridos y polisacáridos y compuesta por unidades de fructosa²³. La inulina es un compuesto cada vez más usado en alimentación debido a sus beneficios para la salud ya que posee un efecto prebiótico, es capaz de incrementar la absorción gastrointestinal de minerales, contribuye a disminuir el riesgo de arteriosclerosis e incrementa la saciedad²⁴.

Glucosinolatos

Los glucosinolatos son metabolitos secundarios presentes en todos los vegetales de la familia Brassicaceae. La hidrólisis del glucosinolatos mayoritario, la glucorafanina, a través de la acción de la enzima mirosinasa da lugar a la generación de sulforafano, que ha demostrado poseer cierto efecto preventivo frente al cáncer de colon²⁵.

²¹ O'CONNELL *et al.* (2007).

²² HAVSTEEN (2002) y SKREDE *et al.* (2002).

²³ LÓPEZ-MOLINA *et al.* (2005).

²⁴ AZORÍN-ORTUÑO *et al.* (2009).

²⁵ LATTÉ *et al.* (2011).

En la Tabla 1 se indican, a modo de ejemplo, ciertas fuentes de estos compuestos y técnicas de extracción empleadas.

Tabla 1. Compuestos activos obtenidos mediante extracción a partir de ciertos subproductos

Compuesto de interés	Subproducto	Tecnología de extracción
Compuestos fenólicos	Hollejo y hojas de aceituna	Extracción convencional con solventes, extracción asistida con microondas y ultrasonidos, extracción a altas presiones ^(a,b y c)
Polisacáridos	Pieles y semillas de tomate y cítricos	Extracción convencional con agua caliente y extracción con bases ^(d)
Compuestos fenólicos	Derivados de transformación de uva	Extracción con solventes, asistida por ultrasonidos y asistida por microondas ^(e)
Licopeno	Pieles y semillas de tomate	Extracción con solventes ^(f)
Caroteno	Piel de zanahoria	Extracción con solventes y extracción con fluidos supercríticos ^(g)
Inulina	Hojas de alcachofa	Extracción convencional con solvente, extracción con líquidos presurizados y la extracción asistida por microondas ^(h)
Glucosinolatos	Tallos de brócoli	Extracción con solventes ⁽ⁱ⁾

^aBUCIĆ-KOJIĆ *et al.* (2009); ^bSPIGNO *et al.* (2009); ^cPAINI *et al.* (2016); ^dTAURISANO *et al.* (2014); ^eGUNTERO *et al.* (2015); ^fESPINOSA (2006); ^gTORRES (2017); ^hRUIZ (2015); ⁱTECNALIA (2017).

3. Biotransformación: compuestos de alto valor añadido obtenidos por fermentación a partir de subproductos vegetales

La biotecnología industrial permite a las industrias desarrollar productos novedosos, reemplazando procesos químicos por métodos biotecnológicos más eficientes en recursos, y por tanto desarrollar y fortalecer la bioeconomía basada en el conocimiento a través de la alta tecnología.

En este sentido, la biotransformación es el proceso por el que una sustancia se convierte en otra a través de una reacción bioquímica o un conjunto de ellas. Concretamente, los procesos biotecnológicos, como la fermentación, basados en la acción de microorganismos como agentes transformadores dentro de sistemas productivos a nivel industrial, orientados a la obtención de enzimas, aditivos, proteínas, y otros productos de diversos usos como alimenticio y farmacéutico, abarcan tres etapas básicas.

Una primera etapa en la que engloba el inóculo (microorganismo) y el medio de cultivo (subproductos hortofrutícolas), el cual debe de cumplir con los requerimientos necesarios que permita el crecimiento, formación de compuestos y energía para el correcto funcionamiento

celular. Una segunda etapa, que industrialmente ocurre en un bioreactor, y que se denomina bioproceso, en el cual se realiza la transformación de la materia prima por la acción de un catalizador biológico, normalmente un microorganismo o una enzima, en unas condiciones controladas, por lo que se monitorizan diferentes variables como presión, agitación, temperatura y concentración de gases, para ofrecer condiciones óptimas para el desarrollo y la acción del microorganismo. Tras agotar el sustrato original, obtener una población microbiana suficiente y conseguir cantidad adecuada del compuesto, se obtiene un medio acuoso complejo. Una tercera etapa, denominada bioseparación que comprende la concentración y purificación del compuesto de interés, en el cual se va a obtener un producto sólido o líquido de alta pureza y calidad, que va a ser envasado y listo para su comercialización.

Concretamente, sobre este tema hay estudios científicos que demuestran que el proceso de fermentación es una herramienta potencial para transformar los subproductos vegetales en productos de alto valor añadido²⁶. Si nos centramos en los subproductos hortofrutícolas observamos que se generan en grandes cantidades en todo el mundo²⁷, y que además poseen propiedades nutricionales y características bioquímicas idóneas para emplearlos como materia prima en procesos de fermentación y obtener compuestos de valor añadido²⁸. Algunos de estos productos de interés son las enzimas, los ácidos orgánicos, los compuestos aromatizantes, los colorantes alimentarios, el bioetanol, el biometano, etc., y son conocidos por obtenerse con éxito a partir de subproductos hortofrutícolas a través de aplicaciones microbianas²⁹. Por otro lado, para aumentar la producción de estos metabolitos, se han desarrollado microorganismos genéticamente modificados mediante la inserción de genes, logrando que estos procesos biotecnológicos sean exitosos en la sobreexpresión de los productos biológicos de interés y más rentables para las industrias³⁰.

3.1. Microorganismos

Se conocen varios grupos de microorganismos que pueden emplear como medio de cultivo subproductos hortofrutícolas para la producción de compuestos biológicos de interés. Entre ellos está el *Aspergillus sp.* que produce ácidos orgánicos como ácido cítrico y láctico a partir de extracto/melaza de dátiles (*Phoenix dactylifera*), y *Bacillus sp.* que produce enzimas como la celulasa, amilasa y proteasa cuando se emplea subproducto de naranja como medio de cultivo³¹. De forma similar, *Streptomyces* produce compuestos bioactivos como bafilomicina, oxitetracilina y cefamicina a partir de subproducto de naranja y de jarabe de dátil. En estos procesos, la selección del microorganismo para un tipo particular de subproducto hortofrutícola

²⁶ PANDA, *et al.* (2016).

²⁷ SOCACI *et al.* (2017).

²⁸ SONG *et al.* (2017).

²⁹ LAUFENBERG *et al.* (2003).

³⁰ MAZZOLI *et al.* (2014).

³¹ MUSSATTO *et al.* (2012).

y la optimización de los parámetros físico-químicos juegan un papel vital en la producción de compuestos de alto valor añadido³².

La biotransformación microbiana se puede clasificar en general en fermentación en estado sólido (FS) y fermentación en estado líquido (FL)³³. FS se define como el proceso de fermentación en el que los microorganismos crecen en materiales sólidos generados a partir de subproductos agrícolas/hortícolas sin la presencia de líquido libre³⁴. La FL se realiza el cultivo del microorganismo en un medio líquido. En la Tabla 2 se presentan estudios realizados con diferentes microorganismos empleando subproductos hortofrutícolas como medio de cultivo.

3.2. Productos de valor añadido

3.2.1. Enzimas

Las enzimas son catalizadores biológicos responsables de diversos procesos metabólicos³⁵. Estas son proteínas, que algunas de ellas requieren de un co-factor (uno o más iones inorgánicos) o una coenzima (componente no proteico, termoestable y de baja masa molecular) para su actividad³⁶. Actualmente, las enzimas se usan en procesos industriales. Por ejemplo, las amilasas y las pectinasas se usan en la industria alimentaria, las celulasas se usan en la industria de biocombustibles y la tanasa se usa para reducir la concentración de ácido tánico en el efluente de la curtiduría. El conocimiento sobre la producción y la estabilidad de las enzimas ha llevado a desarrollar tecnologías para la producción a partir de sustratos baratos. Concretamente, se han empleado diversos tipos de subproductos hortofrutícolas como dátiles, caqui, mango, yuca, plátano, mandarina, naranja, patata, etc. para obtener enzimas como la amilasa, lignocelulasas, pectinasas, tanasa, proteasa, lipasa, invertasa (Tabla 2).

3.2.2. Ácidos orgánicos

Los ácidos orgánicos están registrados como la tercera categoría más grande dentro de los productos biológicos de interés³⁷. El ácido orgánico es un compuesto orgánico que se caracteriza por sus propiedades ácidas débiles y no se disocia completamente en presencia de agua. Algunos ácidos orgánicos son empleados por una amplia gama de sectores industriales, entre ellos estarían el procesamiento de alimentos, nutrición e industria de piensos, productos farmacéuticos, unidades de estimulación de petróleo y gas, etc. Los microorganismos, como las bacterias y hongos, se usan comercialmente para la producción de ácidos orgánicos. Dentro

³² PANDA *et al.* (2015).

³³ RAY *et al.* (2006).

³⁴ MOUNA IMEN *et al.* (2015).

³⁵ CHAPMAN-SMITH *et al.* (1999).

³⁶ NELSON *et al.* (2004).

³⁷ ALI *et al.* (2011).

de las bacterias estarían *Arthrobacter paraffinensis*, *Bacillus sp.*, *Lactobacillus sp.*, *Streptococcus thermophilus* y en los hongos serían *Aspergillus sp.*, *Penicillium sp.*, *Yarrowia lipolytica*³⁸ (Tabla 2).

Tabla 2. Productos de valor añadido obtenidos por procesos biotecnológicos a partir de subproductos hortofrutícolas

Productos de valor añadido	Subproducto	Microorganismo
Enzimas		
Enzimas amilolíticas	Mango	<i>Fusarium solani</i> ^(a)
	Plátano	<i>Rhizopus stolonifer</i> ^(b)
Enzimas lignocelulolíticas	Palma	<i>Trichoderma reesei</i> ^(c)
	Plátano	<i>Pseudomonas putida</i> ^(d)
Enzimas pectinolíticas	Cáscara de piña	<i>Aspergillus niger</i> ^(e)
	Piel de naranja	<i>Penicillium chrysogenum</i> ^(f)
Tanasa	Cereza de Barbados	<i>Aspergillus sp.</i> ^(e)
	Bagazo de anacardo	<i>Penicillium sp.</i> ^(g)
Proteasa	Cáscara de algarrobo africano	<i>Aspergillus sp.</i> ^(h)
	Cáscara de granada	<i>Bacillus subtilis</i> ⁽ⁱ⁾
Ácidos orgánicos		
Ácido láctico	Cáscara de patata	<i>Lactobacillus casei</i> ^(j)
	Maíz dulce, mango, naranja	<i>Lactobacillus delbrueckii</i> ^(k)
Ácido cítrico	Cáscara de piña	<i>Aspergillus niger</i> ^(l)
	Pulpa de manzana	<i>Yarrowia lipolytica</i> ^(m)
Biocombustible		
Etanol	Extracto de Dátil	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> ⁽ⁿ⁾
Biopolímeros		
Goma xantana	Zumo de Dátil	<i>Xanthomonas campestris</i> ^(o)
Curdano	Zumo de Dátil	<i>Rhizobium radiobacter</i> ^(p)
Colorante		
Carotenos	Extracto de Dátil	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> ^(q)
Biomasa		
Levadura panadería	Azúcar de Dátil	<i>Saccharomices cerevisiae</i> ^(r)
Probiótico	Polvo de Dátil	<i>Lactobacillus casei</i> ^(s)

^aKUMAR *et al.* (2013); ^bUNAKAL *et al.* (2012); ^cNORSALWANI *et al.* (2012); ^dDABHI *et al.* (2014); ^eSILVA *et al.* (2014); ^fMRUDULA *et al.* (2011); ^gPROMMAJAK *et al.* (2014); ^hRADHA *et al.* (2012); ⁱOYELEKE *et al.* (2011); ^jMUDALIYAR *et al.* (2012); ^kJAWAD *et al.* (2013); ^lPANDA *et al.* (2015); ^mPRABHA *et al.* (2014); ⁿGRUPTA *et al.* (2011); ^oBESBES *et al.* (2006); ^pSALAH *et al.* (2011); ^qELSANHOTV *et al.* (2012); ^rKHAN *et al.* (1995); ^sSHAHRAVY *et al.* (2012).

³⁸ SHAIKH *et al.* (2013).

3.2.3. Biocombustible

Afortunadamente, los residuos y/o subproductos vegetales de crucíferas son bio-convertables en biocombustibles y otros productos valiosos, proporcionando una vía para reducir la contaminación y revalorizar la economía agrícola³⁹. El coste general de la producción de biocombustibles es, generalmente más elevado si se compara con el obtenido a partir de fósiles⁴⁰. Para que la producción de biocombustibles a partir de subproductos agrícolas sea económicamente viable, se deben tener en cuenta los beneficios económicos del valor agregado del bioazúcar⁴¹. En la Tabla 2 se observan los subproductos estudiados para obtener biocombustible.

3.2.4. Biopolímeros

Los biopolímeros son macromoléculas presentes en los seres vivos. A partir de fermentación microbiana es posible producir una amplia variedad de biopolímeros como alginato, xanthan gum, curdlano, ácido hialurónico, xantano, etc. En la Tabla 2 se detallan subproductos hortofrutícolas empleados para la producción de biopolímeros empleando la biotransformación, hecho que ha permitido disminuir considerablemente el coste del medio de fermentación, el cual ha sido, hasta hace poco, una gran preocupación en la producción comercial de los estos compuestos.

3.2.5. Colorantes

Concretamente, los carotenoides son un grupo de pigmentos altamente insaturados de color rojo, amarillo o naranja que se encuentran en alimentos, tales como zanahorias, patata dulce y vegetales de hojas verdes. Los carotenoides son pigmentos orgánicos tetra terpenoides que se producen naturalmente en los cloroplastos y cromoplastos de plantas, y en algunos otros organismos fotosintéticos como las algas. También son producidos por algunos microorganismos durante el proceso de la fermentación, y en la actualidad están siendo explotados industrialmente⁴² (Tabla 2).

3.2.6. Biomasa

La producción industrial de microorganismos, denominada biomasa, para aplicaciones industriales es amplia. Concretamente, en el caso de las levaduras sirven como biocatalizadores o fuente de productos en panaderías⁴³, cervecerías, etc.; las bacterias lácticas se emplean como

³⁹ GUO *et al.* (2010).

⁴⁰ CASPETA *et al.* (2013).

⁴¹ PFALTZGRAFF *et al.* (2013).

⁴² CHANDRASEKARAN *et al.* (2013).

⁴³ KHAN *et al.* (1995).

cultivos iniciadores para uso en la fabricación de productos lácteos, y si nos centramos en los probióticos⁴⁴ estos se usan en industrias lácteas, alimentación animal y producción de alimentos acuícolas, entre otras aplicaciones. La producción de biomasa a gran escala requiere el uso de sustratos baratos para la producción económica de los productos mediante tecnologías de fermentación. Mientras que los sustratos como la melaza de caña de azúcar, la harina de soja y otros subproductos agroindustriales ya se utilizan, en la actualidad se están focalizando en el empleo de subproducto hortofrutícolas por la gran cantidad de subproductos que se generan en todo el mundo. En la Tabla 2 se detallan estudios relacionados con la obtención de biomasa empleando subproductos hortofrutícolas.

4. Otras aplicaciones: piensos, fertilizantes y energía

Según datos publicados por la ONU, la población mundial llegará a 8.600 millones en 2030 y seguirá aumentando hasta llegar a 9.800 millones en 2050⁴⁵. Este aumento de población junto al de ingresos y estilos de vida dará como resultado una demanda creciente de productos ganaderos como leche o carne. Esto va a suponer una considerable exigencia de materias primas para fabricación de piensos⁴⁶. El sector ganadero es actualmente el mayor usuario de recursos de tierras del mundo con el uso de casi el 80 % de los terrenos agrícolas para la producción de piensos.

En consecuencia, se debe utilizar con eficiencia los recursos alimenticios disponibles como requisito clave para una producción pecuaria sostenible que sirve de sustento a la creciente población, incluyendo subproductos, además de ampliar la gama de materias primas como base de la producción de pienso, en particular los que no compiten con la alimentación humana. En 2015-16, alrededor del 35 % de los cereales producidos en el mundo se utilizaron para la elaboración de piensos⁴⁷. Sin embargo, muchos estudios han demostrado que es posible sustituir todo o parte de los cereales en la alimentación animal por diversos subproductos de frutas y verduras que, además, tienen un alto valor energético⁴⁸. Actualmente, existe una gran cantidad de subproductos de frutas y verduras disponibles en todo el mundo que podrían utilizarse como materia prima para la producción de piensos. Angulo y colaboradores⁴⁹ concluyeron que los subproductos de frutas y hortalizas son una materia prima idónea para la elaboración de piensos dirigida a bovinos. San Martín y colaboradores⁵⁰ demostraron que los desechos vegetales son nutricionalmente apropiados para la alimentación de los animales. Por otro lado, el estudio mostró el alto contenido de agua en este tipo de subproductos. Para solventar este inconveniente se puede usar un proceso de ensilaje para estabilizar los subproductos de frutas

⁴⁴ CHÁVARRI *et al.* (2010).

⁴⁵ ONU (2017).

⁴⁶ FAO (2013).

⁴⁷ FAO (2017).

⁴⁸ GEOFFROY (1985).

⁴⁹ ANGULO *et al.* (2012).

⁵⁰ SAN MARTÍN *et al.* (2016).

y verduras. El ensilado es un forraje fermentado de alta humedad que puede emplearse para alimentar al ganado bovino, ovino y otros rumiantes.

Este proceso ha sido implementado con éxito por la empresa TRASA (Tratamientos Subproductos Agroalimentarios SL). Esta empresa fabrica piensos con los subproductos de la industria transformadora de frutas y hortalizas en el Valle del Ebro, cuya capacidad de producción es de aproximadamente 40.000 toneladas de pienso/año.

Otra oportunidad para la valorización representa la recuperación de la energía y los nutrientes contenidos en los subproductos de frutas y verduras. Puesto que los niveles de humedad son bastante altos, la digestión anaeróbica ofrece una buena alternativa para tratar estos subproductos. La digestión anaeróbica es un proceso microbiológico en el cual la materia orgánica es degradada por microorganismos en ausencia de oxígeno.

La materia de entrada se convierte en gran medida en biogás, una mezcla de CH_4 y CO_2 , y lodo de digestión (digestato). El biogás puede ser purificado e inyectado en la red de gas natural o quemado en el sitio para la producción de electricidad y calor.

Dependiendo del material de entrada y la aplicación deseada, el digestato se puede usar directamente como fertilizante orgánico o se puede convertir en compost, reciclando los nutrientes de la planta al suelo. La digestión anaeróbica es, por lo tanto, una tecnología de valorización que conduce tanto a la recuperación de energía como al reciclaje de nutrientes, cerrando así los ciclos naturales⁵¹.

Además de la recuperación de energía y nutrientes, los subproductos de frutas y vegetales también podrían transformarse en otros compuestos de valor añadido a través de la digestión anaeróbica. El uso de residuos de frutas y verduras en la digestión anaeróbica conduce a una acidificación rápida, disminuyendo el pH en el reactor y produciendo ácidos grasos volátiles (AGV)⁵². Estos AGV se pueden recuperar y utilizar como fuente de carbono para otros enfoques de fermentación de valor agregado como los implementados en el proyecto de investigación financiado con fondos europeos VOLATILE⁵³.

5. Conclusiones

Ante una situación mundial de crecimiento de la población, la demanda de recursos va ir en aumento y por ello se hace necesario la búsqueda de materias primas alternativas que permitan garantizar la biodiversidad de la tierra y cubrir las necesidades de la población. Ante ello, se hace necesario sustituir la idea actual de consumo lineal basada en el usar y tirar por una bioeconomía circular, en la que los subproductos se conviertan en nuevas materias primas para la generación de productos de alto valor y sean reintroducidos en la cadena de consumo.

⁵¹ MORTIER *et al.* (2016).

⁵² MISE *et al.* (2001) y BOUALLAGUI *et al.* (2005).

⁵³ VOLATILE (2016).

En este sentido, los subproductos generados en los procesos de transformación de hortalizas, frutas y vegetales han mostrado un alto potencial para la obtención de productos de alto valor añadido tanto mediante procesos biotecnológicos, como mediante procesos de extracción. Así, para ciertos subproductos se han desarrollado procesos adecuados para la obtención de ingredientes alimentarios, ácidos orgánicos, enzimas, biopolímeros. Y en todos los casos, es posible su empleo para el desarrollo de una economía circular generando finalmente, piensos, fertilizantes o biogás, optimizando el empleo de materias primas y cerrando el ciclo de vida de los productos.

Referencias bibliográficas

- ABU-REIDAH, I. M.; ARRÁEZ-ROMÁN, D.; WARAD, I.; FERNÁNDEZ-GUTIÉRREZ, A. y SEGURA-CARRETERO, A. (2017): «UHPLC/MS2-based approach for the comprehensive metabolite profiling of bean (*Vicia faba* L.) by-products: A promising source of bioactive constituents»; en *Food Research International* (93); pp. 87-96.
- ALI, H. K. Q. y ZULKALI, M. M. D. (2011): «Utilization of agro-residual ligno-cellulosic substances by using solid state fermentation: a review»; en *Croat J Food Technol Biotechnol Nutr* (6-1/2); pp. 5-12.
- ANGULO, J.; MAHECHA, L.; YEPES, S. A.; YEPES, A. M.; BUSTAMANTE, G.; JARAMILLO, H.; VALENCIA, E.; VILLAMIL, T. y GALLO, J. (2012): «Quantitative and nutritional characterization of fruit and vegetable waste from Marketplace: A potential use as bovine feedstuff?»; en *Journal of Environmental Management* (95); pp. 5203-9.
- AZORÍN-ORTUÑO, M.; URBÁN, C.; CERÓN, J. J.; TECLES, F.; ALLENDE, A.; TOMÁS-BARBERÁN, F. A. y ESPÍN, J. C. (2009): «Effect of low inulin doses with different polymerisation degree on lipid metabolism, mineral absorption, and intestinal microbiota in rats with fat supplemented diet»; en *Food Chemistry* (113); pp.1058-65.
- BARBOSA, H. M. A.; DE MELO, M. M. R.; COIMBRA, M. A.; PASSOS, C. P. y SILVA, C. M. (2014): «Optimization of the supercritical fluid coextraction of oil and diterpenes from spent coffee grounds using experimental design and response surface methodology»; en *J. Supercrit. Fluids* (85); pp. 165-72.
- BESBES, S.; CHEIKHROUHOUS, S.; BLECKER, C.; DEROANNE, C.; LOGNAY, G. y DRIRA, N. E. (2006): «Voies de valorisation des sous produits de dattes: valorisation de la pulpe»; en *Microbiologie Hygiène Alimentaire* (18); pp. 3-7.
- BOUALLAGUI, H.; TOUHAMI, Y.; BEN CHEIKH, R. y HAMDIA, M. (2005): «Review - Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes»; en *Process Biochemistry* (40); pp. 989-95.

- BUCIĆ-KOJIĆ, A. *et al.* (2009): «Influence of solvent and temperature on extraction of phenolic compounds from grape seed, antioxidant activity and colour of extract»; en *International Journal of Food Science & Technology* (44); pp. 2394-2401.
- CASPETA, L.; BUIJS, N. A. A. y NIELSEN, J. (2013): «The role of biofuels in the future energy supply»; en *Energy & Environmental Science* (6-4); pp. 1077-82.
- CHANDRASEKARAN, M. y BAHKALI, A. H. (2013): «Valorization of date palm (*Phoenix dactylifera*) fruit processing by-products and wastes using bioprocess technology - Review»; en *Saudi Journal of Biological Sciences* (20-2); pp. 105-20.
- CHAPMAN-SMITH, A. y CRONAN, J. E. (1999): «The enzymatic biotinylation of proteins: a post-translational modification of exceptional specificity»; en *Biochemical Sciences* (24-9); pp. 359-63.
- CHÁVARRI, M.; MARAÑÓN, I.; ARES, R.; IBÁÑEZ, F. C.; MARZO, F. y VILLARÁN, M. C. (2010): «Microencapsulation of a probiotic and prebiotic in alginate-chitosan capsules improves survival in simulated gastro-intestinal conditions»; en *International Journal of Food Microbiology* (142-1); pp. 185-9.
- COLEGATE, S. M. y MOLYNEUX, R. J. (2011): «An introduction and overview», en COLEGATE, S. M. y MOLYNEUX, R. J., ed.: *Bioactive Natural Products: Detection Isolation and Structural Determination*, CRC; pp. 1-9.
- DA SILVA, RUI P. F. F.; ROCHA-SANTOS, T. A. P. y DUARTE, A. C. (2016): «Supercritical fluid extraction of bioactive compounds»; en *Trends in Analytical Chemistry* (76); pp. 40-51.
- DABHI, B. K.; VYAS, R. V. y SHELAT, H. N. (2014): «Use of banana waste for the production of cellulolytic enzymes under solid substrate fermentation using bacterial consortium»; en *Int J Curr Microbiol App Sci* (3-1); pp. 337-46.
- DAI, Y.; VAN SPRONSEN, J.; WITKAMP, G. J.; VERPOORTE, R. y CHOI, Y. H. (2013): «Natural deep eutectic solvents as new potential media for green technology»; en *Analytica Chimica Acta* (766); pp. 61-8.
- DESA U. N. (2017): «World Population Prospects: The 2017 Revision. Key Findings and Advance Tables»; *Working Paper No. ESA/P/WP/248*.
- ELSANHOTY R. M.; AL-TURKI, I. A. y RAMADAN, M. F. (2012): «Screening of medium components by Plackett-Burman design for carotenoid production using date (*Phoenix dactylifera*) wastes»; en *Ind Crops Prod* (36); pp. 313-20.
- ESPINOSA (2006): «Procedimiento de obtención del licopeno a partir de pieles y semillas de tomate»; *WO2006032712 A1*.
- EUROSTAT (2017): «Producción agrícola-cultivos»; en *Estadísticas de agricultura, silvicultura y pesca - edición 2017*. Disponible en http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Agricultural_production_-_crops#Further_Eurostat_information.

- FAO (2011): «Global food losses and food waste - Extent, causes and prevention»; Rome.
- FAO (2013): «Utilization of fruit and vegetable wastes as livestock feed and as substrates for generation of other value-added products»; *RAP Publication* (2013/04). Disponible en <http://www.fao.org/docrep/018/i3273e/i3273e00.htm>.
- FAO (2017): *Food Outlook - Biannual report on global food market*.
- FUNDACIÓN PARA LA ECONOMÍA CIRCULAR (2017): en http://economiacircular.org/wp/?page_id=62.
- GEOFFROY, F. (1987): «Fruits and fruit by-products as cereal substitutes in animal feeding»; In *Proceedings of the FAO Expert Consultation on the Substitution of Imported Concentrate Feeds in Animal Production Systems in Developing Countries*. Bangkok, FAO; pp. 9-13.
- GUNTERO, V. A.; LONGO, M. B.; CIPARICCI, S. A.; MARTINI, R. E. y ANDREATTA, A. E. (2015): «Comparación de métodos de extracción de polifenoles a partir de residuos de la industria Vitivinícola». Argentina, Buenos Aires, CAIQ2015 - VIII Congreso Argentino de Ingeniería Química.
- GUO, X. M.; TRABLY, E.; LATRILLE, E.; CARRÈRE, H. y STEYER, J. P. (2010): «Hydrogen production from agricultural waste by dark fermentation: A review»; en *International Journal of Hydrogen Energy* (35-19); pp. 10660-73.
- GUPTA, N. y KUSHWAHA, H. (2011): *Date palm as a source of bioethanol producing microorganisms*. Netherlands, Springer.
- HAAS, C.; STEINWANDTER, V.; DIAZ DE APODACA, E.; MAESTRO MADURGA, B.; SMERILLI, M.; DIETRICH, T. y NEUREITER M. (2015): «Production of PHB from Chicory Roots - Comparison of Three *Cupriavidus necator* Strains»; *Chemical and biochemical engineering quarterly* (29-2); pp. 99-112. Disponible en: <https://doi.org/10.15255/CABEQ.2014.2250>.
- HAVSTEEN, B. (2002): «The biochemistry and medical significance of the flavonoids»; *Pharmacol & Therapeutics* (96); pp. 67-202.
- JIAO, J.; WEI, F. Y.; GAI, Q. Y.; WANG, W.; LUO, M.; FU, Y. J. *et al.* (2014). «A pilot-scale homogenization-assisted negative pressure cavitation extraction of Astragalus polysaccharides»; en *International Journal of Biological Macromolecules* (67); pp. 189-94.
- KHAN, J. A.; ABULNAJA, K. O.; KUMOSANI, T. A. y ABOU-ZAID A. Z. A. (1995): «Utilization of Saudi date sugars in production of baker's yeast»; en *Bioresource Technology* (53-1); pp. 63-6.
- KHAN, J. A.; ABULNAJA, K. O.; KUMOSANI, T. A. y ABOU-ZAID, A. Z. A. (1995): «Utilization of Saudi date sugars in production of baker's yeast»; en *Bioresource Technology* (53-1); pp. 63-6.
- KOYU, H.; KAZAN, A.; OZTURK, T. K.; YESIL-CELIK TAS, O. y HAZNEDAROGLU, M. Z. (2017): «Optimizing subcritical water extraction of *Morus nigra* L. fruits for maximization of tyrosinase inhibitory activity»; en *J. Supercrit. Fluids* (127); pp. 15-22.

- KUMAR, D.; YADAV, K. K.; MUTHUKUMA R. M. y GARG, N. (2013): «Production and characterization of alpha-amylase from mango kernel by *Fusarium solani* NAIMCC-F-02956 using submerged fermentation»; en *Journal of environmental biology* (34-6); pp. 1053-8.
- LATTÉ, K. P.; APPEL, K. E. y LAMPEN, A. (2011): «Health benefits and possible risks of broccoli - An overview»; en *Food and Chemical Toxicology* (49); pp. 3287-309.
- LAUFENBERG, G.; KUNZ, B. y NYSTROEM, M. (2003): «Transformation of vegetable waste into value added products: (A) the up grading concept; (B) practical implementations»; en *Bioresource Technology* (87); pp. 167-98.
- LIU, W.; FU, Y.; ZU, Y.; KONG, Y.; ZHANG, L.; ZU, B. *et al.* (2009): «Negative-pressure cavitation extraction for the determination of flavonoids in pigeon pea leaves by liquid chromatography-tandem mass spectrometry»; en *J. Chromatogr. A.* (1216); pp. 3841-50.
- LÓPEZ-MOLINA, D.; NAVARRO-MARTÍNEZ, M. D.; ROJAS MELGAREJO, F.; HINER, A. N. P.; CHAZARRA, S. y RODRÍGUEZ-LÓPEZ, J. N. (2005): «Molecular properties and prebiotic effect of inulin obtained from artichoke (*Cynara scolymus* L.)»; en *Phytochemistry* (66); pp. 1476-84.
- MAZZOLI, R.; BOSCO, F.; MIZRAHI, I.; BAYER, E. A. y PESSIONE, E. (2014): «Towards lactic acid bacteria-based biorefineries»; en *Biotechnology Advances* (32-7); pp. 1216-36.
- MISI, S. N. y FORSTER, C. F. (2001): «Batch co-digestion of multi-component agro-wastes»; en *Bioresource Technology* (80); pp. 19-28.
- MORTIER, N.; VELGHE, F. y VERSTICHEL, S. (2016): «Organic Recycling of Agricultural Waste Today: Composting and Anaerobic Digestion»; en PALMIRO POLTRONIERI, P. y FERNÁNDO D'URSO, O., dir.: *Biotransformation of Agricultural Waste and By-Products - The Food, Feed, Fibre, Fuel (4F) Economy*; pp. 69-124.
- MOUNA IMEN, O. y MAHMOUD, K. (2015): «Statistical optimization of cultural conditions of an halophilic alpha-amylase production by halophilic *Streptomyces* sp. grown on orange waste powder»; en *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* (4-4); pp. 685-93.
- MRUDULA, S. y SHYAM, N. (2012): «Immobilization of *Bacillus megaterium* MTCC 2444 by Ca-alginate entrapment method for enhanced alkaline protease production»; en *Brazilian Archives of Biology and Technology* (55); pp. 135-44.
- MUDALIYAR, P.; SHARMA, L. y KULKARNI, C. (2012): «Food waste management-lactic acid production by *Lactobacillus* species»; en *Int. J. Adv. Biol. Res.* (1); pp. 34-8.
- MUSSATTO, S. I.; BALLESTEROS, L. F.; MARTINS, S. y TEIXEIRA, J. A. (2012): «Use of agro-industrial wastes» en *solid-state fermentation processes*. Croacia, Intech.
- NELSON, D. L. y COX, M. M. (2004): *Lehninger Principles of Biochemistry*. Nueva York. 4.ª edición. WH Freeman Publishers.

- NORSALWANI, T. L. T. y NORULAINI, N. A. N. (2012): «Utilization of lignocellulosic wastes as a carbon source for the production of bacterial cellulases under solid state fermentation»; en *Int. J. Env. Sci. Dev.* (3-2); pp. 136-40.
- O'CONNELL, O. F.; RYAN, L. y O'BRIEN, N.M. (2007): «Xanthophyll carotenoids are more bioaccessible from fruits than dark green vegetables»; en *Nutrition Research* (27-7); pp. 258-64.
- ONU (2015): «ONU aboga por un consume sostenible en el Día Mundial del Medio Ambiente»; en <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/06/en-el-dia-mundial-del-medio-ambiente-onu-pide-cambios-en-el-consumo-humano/>.
- ONU (2017): «World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables»; en *Working Paper* No. ESA/P/WP/248. Nueva York, United Nations.
- OYELEKE, S. B. OYEWOLE, O. A. y EGWIM, E. C. (2011): «Production of Protease and Amylase from *Bacillus subtilis* and *Aspergillus niger* Using *Parkia biglobosa* (Africa Locust Beans) as Substrate in Solid State Fermentation»; en *Advances in Life Sciences* (1-2); pp. 49-53.
- PAINI, M. *et al.* (2016): «Influence of ethanol/water ratio in ultrasound and high-pressure/high-temperature phenolic compound extraction from agri-food waste»; en *International Journal of Food Science and Technology* (51-2); pp. 349-58.
- PANDA, S. K.; MISHRA, S. S.; KAYITESI, E. y RAY, R. C. (2016): «Microbial-processing of fruit and vegetable wastes for production of vital enzymes and organic acids: Biotechnology and scopes»; en *Environmental Research* (146); pp. 161-72.
- PARLAMENTO EUROPEO (2008): «Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas».
- PETKOWICZ, C. L. O.; VRIESMANN, L. C. y WILLIAMS, P. A. (2017): «Pectins from food waste: Extraction, characterization and properties of watermelon rind pectin»; en *Food Hydrocolloids* (65); pp. 57-67.
- PFALTZGRAFF, L. A.; DE BRUYN, M.; COOPER, E. C.; BUDARIN, V. y CLARK, J. H. (2013): «Food waste biomass: a resource for high-value chemicals»; en *Green Chemistry* (15-2); pp. 307-14.
- PRABHA, M. S. y RANGAIAH, G. S. (2014): «Citric acid production using *Ananas comosus* and its waste with the effect of alcohols»; en *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.* (3-5); pp. 747-54.
- PROMMAJAK, T.; LEKSAWASDI, N. y RATTANAPANONE, N. (2014): «Biotechnological valorization of cashew apple: a review»; en *Chiang Mai University Journal of Natural Sciences* (13-2); pp. 159-82.

- RADHA, S.; SRIDEVI, A.; HIMAKIRANBABU, R.; NITHYA, V. J.; PRASAD, N. B. L.; NARASIMHA, G. *et al.* (2012): «Medium Optimization for Acid protease production from *Aspergillus* sps under Solid state fermentation and mathematical modelling of protease activity»; en *J. Microbiol. Biotech. Res.* (2-1); pp. 6-16.
- RAY, R. C. y WARD, O.P. (2006): *Postharvest microbial biotechnology of tropical root and tuber crops*. EEUU, N. H., Science Publishers.
- ROOHINEJAD, S.; KOUBAA, M.; BARBA F. J.; GREINE, R.; ORLIEN V. y LBOVKA N. I (2016): «Negative pressure cavitation extraction: A novel method for extraction of food bioactive compounds from plant materials»; en *Trends in Food Science & Technology* (52); pp. 98-108.
- RUIZ ACEITUNO, L. (2015): *Nuevos métodos de extracción y fraccionamiento de carbohidratos bioactivos*; Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Madrid.
- SALAH, R. B.; JAOUADI, B.; BOUAZIZ, A.; CHAARI, K.; BLECKER, C.; DERROUANE, C.; ATTIA, H. y BESBES, S. (2011): «Fermentation of date palm juice by curdlan gum production from *Rhizobium radiobacter* ATCC 466: purification, rheological and physico-chemical characterization»; en *LWT-Food Sci. Technol.* (44); pp. 1026-34.
- SAN MARTIN, D.; RAMOS, S. y ZUFIA, J. (2016): «Valorisation of food waste to produce new raw materials for animal feed»; en *Food Chemistry* (198); pp. 68-74.
- SAUER, M.; PORRO, D.; MATTANOVICH, D. y BRANDUARDI, P. (2008): «Microbial production of organic acids: expanding the markets»; en *Biotechnology* (26-2); pp. 100-8.
- SCANO, E. A.; ASQUER, C.; PISTIS, A.; ORTU, L.; DEMONTIS, V. y COCCO, D. (2014): «Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: Experimental results on pilot-scale and preliminary performance evaluation of a full-scale power plant»; en *Energy Conversion and Management* (77); pp. 22-30.
- SHAHRAVY, A.; TABANDEH, F.; BAMBAL, B.; ZAMANIZADEH, H. R. y MIZANI, M. (2012): «Optimization of probiotic *Lactobacillus casei* ATCC 334 production using date powder as carbon source»; en *Chem. Ind. Chem. Eng.* (18); pp. 273-82.
- SHAIKH, Z. y QURESHI, P. (2013): «Screening and isolation of organic acid producers from samples of diverse habitats»; en *Int. J. Curr. Microbiol. Appl.* (2-9); pp. 39-44.
- SILVA DE LIMA, J.; CRUZ, R.; FONSECA, J. C.; VALENTE DE MEDEIROS, E.; MACIEL, M. H. C. *et al.* (2014): «Production, Characterization of Tannase from *Penicillium montanense* URM 6286 under SSF Using Agroindustrial Wastes, and Application in the Clarification of Grape Juice (*Vitis vinifera* L.)»; en *The Scientific World Journal*; pp. 1-9.
- SKREDE, G. y WROLSTAD, R. E. (2002): «Flavonoides from Berries and Grapes»; en SHI, J. MAZZA, G. y MAGUER, M., LE: *Functionals Foods: Biochemical and Processing Aspects*. Nueva York, D. Boca Raton L.; pp. 71-133.

- SOCACI, S. A.; RUGINA, O. R.; DIACONEASA, Z. M.; POP, O. L.; FĂRCAȘ, A. C.; PĂUCEAN, A.; TOFANĂ, M. y PINTEA, A. (2017): «Compuestos antioxidantes recuperados de desechos alimenticios»; en CHAVARRI, M., ed.: *Alimentos funcionales: mejorar la salud a través de una alimentación adecuada*. Croacia, InTech; pp. 3-21.
- SONG, Y.; NGUYEN, Q. A.; WI, S. G.; YANG, J. y BAE, H. J. (2017): «Strategy for dual production of bioethanol and d-psicose as value-added products from cruciferous vegetable residue»; en *Bioresource Technology* (223); pp. 34-9.
- SPIGNO, G.; TRAMELLI, L. y DE FAVERI, D. M. (2007): «Effects of extraction time, temperature and solvent on concentration and antioxidant activity of grape marc phenolics»; en *Journal of Food Engineering* 81(1); pp. 200-8.
- ŠVARC-GAJIĆ, J.; CVETANOVIĆ, A.; SEGURA-CARRETERO, A.; BORRÁS LINARES, I. y MAŠKOVIĆ, P. (2017): «Characterisation of ginger extracts obtained by subcritical water»; en *J. Supercrit. Fluids* (123); pp. 92-100.
- TAURISANO, V.; ANZELMO, G.; POLI, A.; NICOLAUS, B. y DI DONATO P. (2014): «Re-use of Agro-industrial Waste: Recovery of Valuable Compounds by Eco-friendly Techniques»; en *International Journal of Performability Engineering* (10-4); pp. 419-425.
- TECNALIA RESEARCH & INNOVATION (2017): «Formulation of Glucosinolates and Myrosinase»; WO 2017/016906 A1.
- TORRES VASQUES, M. (2017): *Evaluación de los parámetros de extracción con CO₂ supercrítico que influyen en la obtención del caroteno a partir de la cascara de zanahoria (daucus carota)*; Tesis doctoral. Perú, Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo.
- TRANSBIO (2011-2015): «BioTRANSformation of by-products from fruit and vegetable processing industry into valuable BIOproducts (GA n.º 289603)»; CORDIS; recuperado de http://cordis.europa.eu/project/rcn/101135_en.html.
- UNAKAL, C. G.; KALLUR, R. I. y KALIWAL, B. (2012): «Production of α -amylase using banana waste by *Bacillus subtilis* under solid state fermentation» in *European Journal of Experimental Biology* (2-4); pp.1044-52.
- VINATORU, M.; MASON, T. J. y CALINESCU, I. (2017): «Ultrasonically assisted extraction (UAE) and microwave assisted extraction (MAE) of functional compounds from plant materials»; en *Trends in Analytical Chemistry* (97); pp. 159-78.
- VINATORU, M.; TOMA, M. y MASON, T. J. (1999): «Ultrasonically Assisted Extraction of Bioactive Principles from Plants and Their Constituents»; en *JAI Press Inc., Stamford, Connecticut* (06904-0811); pp. 209.
- VOLATILE (2016-2020): «Biowaste derived volatile fatty acid platform for biopolymers, bioactive compounds and chemical building blocks (GA n.º 720777)»; CORDIS; recuperado de http://cordis.europa.eu/project/rcn/206563_en.html.

ZHANG, D. Y.; ZHANG, S.; ZU, Y. G.; FU, Y. J.; KONG, Y.; GAO, Y. *et al.* (2010): «Negative pressure cavitation extraction and antioxidant activity of genistein and genistin from the roots of pigeon pea (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.)»; en *Separation and Purification Technology* (74); pp. 261-70.



VALORIZACIÓN DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA CADENA DEL ACEITE DE OLIVA

Julio Berbel^t, Carlos Gutiérrez-Martín^a y José Antonio La Cal^b

^aUniversidad de Córdoba y ^bUniversidad de Jaén

Resumen

La generación de biomasa residual y subproductos de la cadena de valor del aceite de oliva en la UE-28 generan un volumen aproximado de 10,5 millones de toneladas anuales. Estos son principalmente restos de podas en campo, 'hojín' (hojas y ramas finas del proceso de limpieza del fruto en almazara), orujo grasoso y húmedo o 'alperoujo', (procedente del proceso de almazara), hueso y orujo extractado y seco u 'orujillo', generado en las extractoras de aceite de orujo (orujeras). En este trabajo se analiza el uso actual de esta biomasa que es valorizada principalmente para generación de energía eléctrica para su inyección a red a partir del orujillo y restos de podas, o térmica en forma de agua caliente, de proceso, vapor o calefacción a partir del hueso. Estas aplicaciones han generado una actividad económica significativa en muchos municipios de zonas rurales productoras. No obstante, en este caso de éxito de aprovechamiento integral de la biomasa residual, la bioeconomía abre nuevas oportunidades, entre las que cabe citar la producción de biocombustibles sólidos de alto valor añadido, como los pellets o hueso limpio y tratado, la obtención de biocarburantes de segunda generación (bioetanol), la alimentación ganadera funcional o la obtención de compuestos bioactivos, entre otros.

Abstract

The residual biomass and by-products generated in the olive oil value chain in the EU-28 account for an approximate volume of 10.5 million tons annually. These are mainly cuttings from pruning in the fields, hojín (leaves and thin branches from when the fruit is cleaned in the press), fatty and humid pomace or alperoujo, (from the pressing process), the pits and pomace extracted and dried or orujillo, generated in the pomace oil extractors (orujeras). In this work we analyse the current use of this biomass, which is principally valued for electrical power generation to be injected into the grid, from orujillo and pruning remains, or thermal energy in the form of hot water, from the process, steam or heating from the pits. These applications have generated significant economic activity for many municipalities in oil-producing rural zones. Nonetheless, in this successful case of residual biomass use, the bioeconomy opens up new opportunities, including the production of high-added-value solid biofuels (in the form of pellets or clean, treated pits), the acquisition of second-generation biofuels (bioethanol), animal fodder, and the acquisition of bioactive compounds, among other things.

1. Introducción

Las previsiones para el año 2050 plantean una moderación del crecimiento de la demanda de alimentos que se reducirán a un 1,1 % anual en el periodo de 2010-2050, frente al 2,2 % del periodo 1970-2010 (Alexandratos y Bruinsma, 2012). A pesar de esto, hay riesgos para una seguridad alimentaria global que, debido al aumento de presiones sobre los recursos naturales y al cambio climático, puede estar en peligro si las tendencias actuales continúan (FAO, 2017a). Entre los cambios previstos para el año 2050 se espera que la oferta global de alimentos en los países desarrollados superará a la demanda, siendo el envejecimiento de la población el factor clave. Por tanto, la calidad y la salubridad serán los determinantes de este consumo.

Por otro lado, el futuro de la agricultura y la habilidad del sistema global alimenticio para asegurar la seguridad alimentaria con una población mundial creciente está estrechamente vinculado a la mejora de la gestión de los recursos naturales. La producción de alimentos es responsable de gran parte de las emisiones de gases de efecto invernadero (FAO, 2017a), por ello, la mitigación de los efectos del cambio climático pasa por disminuir las pérdidas y residuos de la cadena alimentaria.

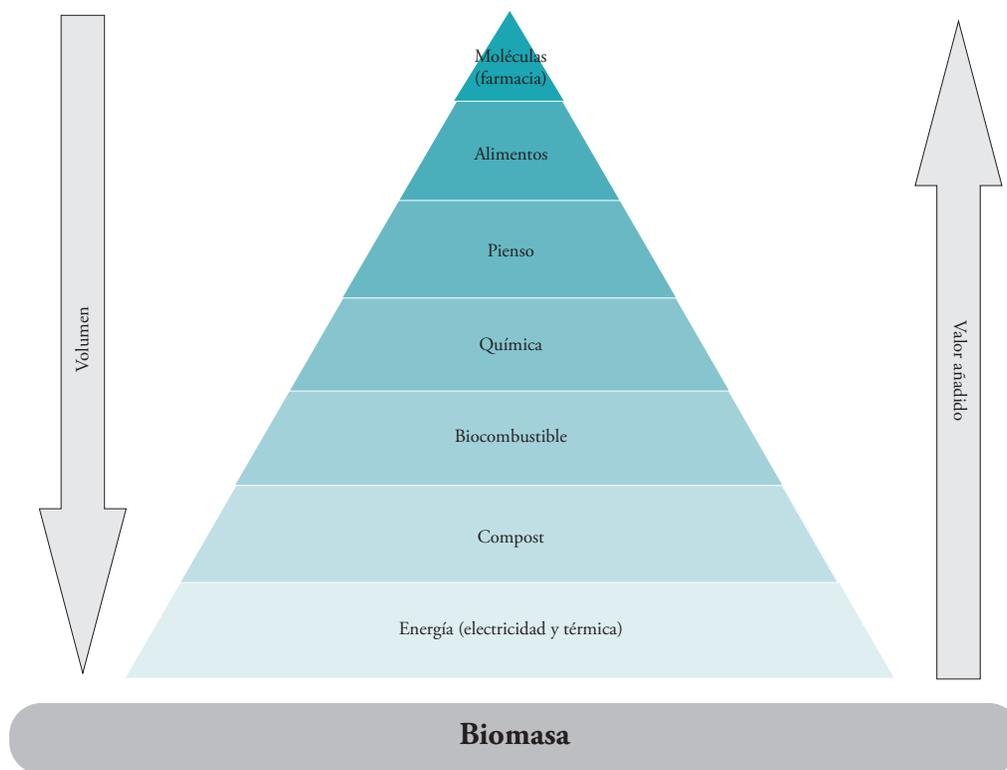
Este trabajo tiene como objetivo analizar la contribución actual de la cadena de valor del aceite de oliva para apoyar una producción de alimentos y de energía más sostenible, basada en un aprovechamiento más eficiente de los subproductos. Revisaremos lo conseguido, que ha sido mucho, y plantearemos los desafíos del sector con una estrategia relevante e inteligente en el marco de la bioeconomía, la economía circular, y la política de recursos sostenibles.

2. Los residuos del sector agroalimentario en la bioeconomía

La bioeconomía abarca la producción de recursos biológicamente renovables y la conversión de estos recursos y residuos en productos con valor añadido, tales como alimentos, pienso, productos de base biológica y bioenergía. Según la Comisión Europea, en la UE trabajan en este sector 18,6 millones de personas y generan aproximadamente 2,2 billones de euros, lo que supone el 9 % del PIB de la UE (Ronzon y Camia, 2017). Una fuente de biomasa que va tomando una importancia creciente son los residuos procedentes de los sectores agrícola, forestal y pesquero. El modelo de economía lineal «extraer-consumir-desechar» es insostenible, y el enfoque de la economía circular aspira a mantener el valor del producto y los materiales tanto tiempo como sea posible (Comisión Europea, 2015).

La estrategia europea se basa en una comprensión amplia de la bioeconomía que incluye la biotecnología, pero también la ingeniería, agronomía y zootecnia. Se centra en tres sectores dentro del uso de la biomasa: a) la destinada a alimentos y pienso, b) productos industriales de base biológica, y c) bioenergía. Las diferentes estrategias nacionales no priorizan de forma clara ninguno de estos sectores sobre los otros y es frecuente que existan programas nacionales independientes y específicos de I+D para cada subsector mencionado. El enfoque estratégico seguido en la bioeconomía debería considerar la pirámide de valor de la biomasa como referencia (Figura 1). La biomasa es más valiosa cuando se emplea en farmacia o en química fina con el propósito de mejora de salud (alimentos funcionales y medicinas) y estilo de vida (cosmética). En segundo lugar, aparecen alimentación y piensos, siendo los productos químicos el tercer nivel y finalmente la bioenergía y compostaje las opciones menos prioritarias.

Figura 1. Pirámide de valor de la biomasa



Fuente: Asveld *et al.* (2011). Elaboración propia.

Un análisis reciente de estrategias bioeconómicas oficiales en la OCDE muestra la existencia de un conflicto entre los diferentes usos de la biomasa para la producción de alimentos, materiales y energía (Meyer, 2017). Aunque el desarrollo de productos innovadores y de alto valor es un objetivo común en la mayor parte de las estrategias, la realidad es que las estrategias se centran en productos químicos (*building blocks*) con base biológica y la bioenergía. McCormick y Kautto (2013) concluyen que en las estrategias de aprovechamiento de la biomasa se debe hacer énfasis en una perspectiva económica y en la creación de bienestar social, y no plantear un enfoque centrado en la solución energética como prioritaria.

Sin embargo, hay una oportunidad de dotar de mayor valor a los residuos del sector de la aceituna, ya que el uso de los subproductos del aceite de oliva como fuente de bajo coste, puede mejorar el perfil de los ácidos grasos que constituyen la grasa animal (en leche o carne), aumentando los ácidos grasos considerados beneficiosos. Así mismo, los subproductos de la aceituna pueden ser una fuente de componentes funcionales como el esteroil vegetal y otros componentes funcionales, con el objetivo de reducir los niveles de colesterol en sangre consumiendo alimentos fortificados y «funcionales» con fitonutrientes naturales. El aceite de oliva y los subproductos de este son una fuente abundante de estos componentes funcionales, y por

El sector industrial (almazaras, extractoras y refinerías) generan a nivel del conjunto de la UE un total de 9,6 millones de toneladas al año de subproductos sujetos a valoración (orujo, hojas y hueso). La poda del olivo produce adicionalmente una cantidad difícil de estimar de biomasa agrícola que podemos considerar que asciende a 3,0 millones de toneladas de las cuales se estima que un 30 % puede ser valorizada con una racionalidad económica (Manzanares *et al.*, 2017). Esto conlleva una estimación para la UE-28 de 10,5 millones de toneladas de biomasa residual. La valorización de esta cantidad de biomasa ya está generando actualmente empleo y actividad económica, aunque se abren nuevas oportunidades con la aplicación del paradigma de la bioeconomía que queremos analizar en este trabajo.

Las hojas del olivo son una mezcla entre hojas y pequeñas ramas, ambas generadas tanto en la explotación agraria con la actividad de poda de los olivos, como en la recolección y limpieza de las aceitunas antes de la extracción del aceite en la planta de procesamiento. Las hojas se aprovechan para alimentación animal en fresco, compostaje, generación de energía eléctrica y, lamentablemente, en algunos casos se elimina mediante combustión o aplicación directa. En cuanto a la alimentación animal, actualmente se aprovecha en fresco a pesar de la existencia de algunas experiencias de pelletizado y ensilado, y de alguna pequeña empresa que ofrece el producto de pellets de hojín pero no por el momento estas iniciativas no se han extendido a un aprovechamiento más integral y duradero para alimentación animal.

El orujo de aceituna, también llamado alperujo cuando procede de almazara de dos fases (que es el sistema generalizado en España), consiste en pulpa de aceituna, piel, hueso y agua, aunque las características específicas pueden diferir según el tipo de extracción del aceite, de si es fresco o seco, y de si ha sido ya extractado (orujillo). Los huesos de aceituna pueden usarse en bruto (uso agroindustrial) o tras un proceso de limpieza y tamizado (uso doméstico). Se utilizan principalmente para la producción de energía.

4. El uso de la biomasa generada por el sector oleícola

La biomasa generada por el sector oleícola se puede englobar en dos grandes grupos:

- a) La que se produce en la explotación agrícola como consecuencia del proceso de poda del olivo, la cual está compuesta por hojas (25 % peso seco), ramas finas (50 %) y madera de diferente grosor (25 %) (Manzanares *et al.*, 2017). Solo una pequeña cantidad de restos de poda se usa como combustible en plantas generadoras de energía eléctrica, al igual que para usos finales térmicos en forma de astillas. Ha habido también alguna experiencia de uso de esta biomasa para la producción de pellets.
- b) La obtenida en las industrias del sector: almazaras y extractoras de aceite de orujo principalmente. En las primeras se obtienen hojín y pequeñas ramas del proceso de limpieza del fruto, orujo graso y húmedo y hueso sin tratar, es decir, extraído directa-

mente de la corriente de orujo. En las segundas, también llamadas orujeras, se genera un subproducto denominado orujo seco y extractado u orujillo.

Los restos de poda han sido tradicionalmente quemados a cielo abierto sin ningún tipo de aprovechamiento para evitar la propagación del temido «barrenillo». Desde hace unos años esta práctica ha convivido con la trituración y su deposición en el suelo como aporte orgánico, fundamentalmente la fracción fina o ramón. La leña, en cambio, es autoconsumida por los propios agricultores o bien comercializada para fines térmicos o culinarios sin demasiado valor añadido. Incluso, en las grandes explotaciones oliveras, es eliminada directamente mediante incineración a cielo abierto o enterrada en barrancos.

Los subproductos industriales como el hueso o el orujillo han sido también utilizados tradicionalmente como combustibles para fines térmicos. Este último se ha utilizado también para autoconsumo en las propias industrias extractoras y para generar energía eléctrica. Durante algunos años ha sido exportado a países de nuestro entorno como Italia o Reino Unido. La hoja se ha empleado como alimento para el ganado o, en algunos casos también, para la producción de compost junto con orujo grasoso y húmedo y residuos de explotaciones ganaderas.

También cabe mencionar que ha habido alguna experiencia de obtención de productos de mayor valor añadido como carbón activo, usado para fines tales como la limpieza de fachadas a presión. No obstante, se puede afirmar que la biomasa procedente del olivar en su conjunto ha sido mayoritariamente valorizada para fines energéticos, en menor medida para alimentación animal y producción de compost, y muy residualmente para la obtención de productos de mayor valor añadido.

Las investigaciones actuales se centran en este último aspecto, como por ejemplo bioetanol como carburante de segunda generación o bioplásticos, entre otros. Las aplicaciones energéticas van a pasar por el autoconsumo eléctrico y térmico, para lo cual la tecnología de gasificación se prevé que experimente un desarrollo medio-alto, así como las aplicaciones térmicas de mayor eficiencia energética y la producción de biocombustibles sólidos de calidad (La Cal, 2017). También se prevé que el compostaje experimente un crecimiento lento y sostenido, limitado por los trámites ambientales que impone la administración autonómica.

4.1. Usos actuales de la biomasa del olivar y la industria del aceite

La utilización de los residuos y subproductos de la cadena del aceite de oliva es un caso de éxito ya que han pasado de ser un problema ambiental en la década de los ochenta a ser un recurso que se destina principalmente a aprovechamiento energético y compostaje. La Figura 2 refleja los flujos de biomasa donde predomina el uso energético, que además de generar una actividad económica y empleo en zonas rurales de Andalucía, supone un beneficio ambiental si

se consideran el volumen de 1,6 millones de toneladas de CO_{2-eq}/año ahorradas en Andalucía (Consejería de Agricultura y Pesca, 2015) por su empleo.

4.1.1. Biomasa para energía

El uso de subproductos del olivar con finalidad energética está ampliamente instituido en Andalucía, de hecho, se puede considerar como un caso de éxito. El análisis del uso de los subproductos andaluces pone de manifiesto que la biomasa como forma de generación de energía hace uso del 80 % de los subproductos de la aceituna (47 % para la generación de electricidad y 33 % para la térmica) (Consejería de Agricultura y Pesca, 2015). El compostaje o la aplicación directa en el campo es el destino del 14,3 %, mientras que los residuos llevados al vertedero solo suponen el 0,7 %. Por consiguiente, los usos energéticos, compostaje y aplicación directa suman un total del 95 %, destinando el 5 % restante para alimentación animal.

También el uso energético de la biomasa de olivar se puede considerar otro caso de éxito. Andalucía es líder mundial en este campo donde, entre los proyectos que se han realizado destacan el llevado a cabo por la Cooperativa de Segundo Grado Oleícola El Tejar, que ha sido pionera en este campo en su planta de Palenciana (Córdoba). También, en el municipio de Cañete de las Torres (Córdoba), hay una instalación de gasificación de poda de olivar que es un modelo a seguir. Por último, y también en esta provincia y ubicada en Puente Genil, se encuentra una planta de cogeneración integrada en una extractora que es capaz de utilizar, junto a los ya conocidos orujillo y hueso de aceituna, otras fuentes de biomasa (podas de olivo y forestales). Todo ello es una muestra de la pujanza de este sector en España y Andalucía.

Probablemente, los parámetros expuestos en la Figura 2 presenten una versión optimista del sector en la UE, ya que el complejo agroindustrial dentro del sector de la aceituna en Andalucía, que supone la mitad de la UE, es también el más desarrollado. El resto de los miembros de la UE pueden tener un menor aprovechamiento energético y una mayor presencia de compostaje, aplicaciones en el campo e incluso vertido como tratamiento final. En el resto de regiones mediterráneas se sigue molturando la aceituna con prensas de capachos, tres fases y dos fases y los problemas de vertidos siguen sin estar resueltos. como lo están en el caso de Andalucía y España.

Se puede afirmar que la principal aplicación actual de la biomasa del olivar en su conjunto es la generación de energía eléctrica en plantas de combustión soportadas por un marco normativo que ha primado algunos tipos de producción de energía eléctrica. Según datos de la Agencia Andaluza de la Energía, la potencia total instalada con biomasa en Andalucía se sitúa en 257,5 MW, de los cuales la mayor parte procede del olivar (orujillo en su mayor parte y también restos de poda). En algunas ocasiones, este tipo de plantas forman parte de complejos industriales donde se realizan una serie de procesos en continuo a partir de orujo graso y húmedo, también llamado alperujo, que son los siguientes: deshuesado, repaso o centrifugación mecánica, secado térmico con cogeneración termoeléctrica y extracción de aceite

de orujo de oliva. El subproducto resultante, el orujillo, es la materia prima para las plantas de combustión, en general junto con otros biocombustibles tales como restos de podas de olivar o residuos forestales.

Otro gran porcentaje de la biomasa del olivar es empleado para fines térmicos, como el hueso bruto en almazaras para la generación de agua caliente de proceso (calentamiento de la pasta previa a la extracción de aceite) y calefacción de oficinas y bodegas, o el orujillo en las extractoras para el secado del orujo grasoso y húmedo previo a la extracción química. En el caso de las almazaras, los equipos utilizados suelen ser calderas de agua caliente de potencias medias-altas, las cuales están adaptadas para consumir el hueso con una humedad elevada (40-45 %) y con un elevado contenido en pulpa y finos, lo que hace que el rendimiento energético sea inferior, al mismo tiempo que incrementa las emisiones de partículas a la atmósfera. En el caso de las orujeras, los sistemas empleados para el secado suelen ser los llamados trómeles rotativos que emplean aire caliente generado en un horno, también de no muy elevada eficiencia energética. En algunas industrias, tal y como se ha citado, se utilizan los gases de escape de grupos motogeneradores (cogeneraciones).

La combustión directa de biomasa para la generación de electricidad o su uso térmico no ha generado muchos trabajos de investigación debido a que es una industria bien establecida. El uso del hueso de aceituna como biocombustible para aplicaciones térmicas está bastante extendido en las regiones productoras de aceite de oliva, especialmente en las agroindustrias, las explotaciones ganaderas, los invernaderos y dentro del sistema de calefacción doméstica. La investigación en cuanto al uso de la energía se ha enfocado en la mejora de la generación de metano en procesos de digestión anaeróbica (Siciliano *et al.*, 2016).

Los intentos de producir pellets de madera de olivo se han encontrado con la dificultad del exceso de cenizas que impide al producto cumplir el producto los estándares de calidad (García-Maraver *et al.*, 2012), pudiendo obtenerse un pellet de categoría B según la Norma UNE-EN ISO 17225-2:2014.

Los restos futuros en el ámbito de la biomasa del olivar para fines energéticos pasan por lo siguiente:

- La producción de astilla normalizada para usos finales térmicos a partir de la fracción gruesa o leña de la poda.
- El tratamiento del hueso de aceituna de almazara para la obtención de un biocombustible sólido de calidad.
- La gasificación para autoconsumo en almazara, tanto térmica como eléctrica.
- La obtención de bioproductos, como por ejemplo etanol carburante y otros productos para el sector farmacéutico.

La biomasa disponible en Andalucía se cuantifica en 5,6 millones toneladas, que supondría un potencial de generación de 3,3 millones MWh, por lo que sería posible aumentar todavía más el aprovechamiento energético, especialmente en lo relativo a poda de olivar (Berbel y Delgado-Serrano, 2017).

4.1.2. Biomasa para compostaje y otros

Los residuos procedentes de la almazara se caracterizan por ser fitotóxicos, por lo que no se recomienda su liberación directa al medioambiente (Akratos *et al.*, 2017). La pasta residual de las almazaras de dos fases (llamada generalmente ‘orujo húmedo’, o ‘alperujo’) es un desecho sólido con un fuerte olor y una textura pastosa, lo cual dificulta su tratamiento y transporte. El compostaje de los residuos de las almazaras ha sido foco de una gran atención (Roig *et al.*, 2006). La producción anual de compost de alperujo en Andalucía se estima en unos 100.000 ton/año (Álvarez de la Puente *et al.*, 2010). A pesar del apoyo de la administración, este uso sigue siendo una opción poco establecida. Por una parte, los nutrientes que aporta compiten con los productos de origen químico y los agricultores no valoran suficientemente la componente orgánica del compost por lo que la demanda es reducida. Por otra, existe un problema administrativo, ya que la administración considera al alperujo un residuo en lugar de un co-producto cuando va destinado a este fin, lo que obliga a unos trámites ambientales complejos y costosos.

Otra alternativa al uso energético que se ha analizado en la sección precedente es la conversión de residuos a biocombustibles sólidos (pellets) o líquidos (biodiésel y bioetanol) que aporta un mayor valor en comparación con el uso directo de la energía o el compostaje. Por último, y en relación a los usos de mayor volumen de la pirámide de biomasa (Figura 1), otras investigaciones se han dirigido hacia la conversión de subproductos del olivar en biodiésel con el uso de enzimas (lipasas) (Yücel, 2011 y Calero *et al.*, 2015) o por otros medios (Hernández *et al.*, 2014).

4.2. Usos con alto valor procedentes de la biomasa de la aceituna (compuestos funcionales)

La biomasa de la aceituna como fuente de compuestos bioactivos es una prioridad en la investigación aplicada en este campo. En lo que respecta a la extracción de compuestos valiosos que puedan ser objeto de comercialización en la industria farmacéutica y cosmética, Galanakis y Kotsiou (2017) describen las diferentes tecnologías para la recuperación de compuestos bioactivos a partir del aceite de oliva, procesando subproductos de la aceituna, y sugiere una metodología integral que garantice la sostenibilidad del proceso. La técnica más ampliamente utilizada consiste en la realización de un pretratamiento de la materia inicial y la conversión posterior de la oleuropeína en hidroxitiroso, previa a la extracción de fenoles con disolvente

y/u otras tecnologías. Fernández-Bolaños y colaboradores (2006) resumen el conocimiento actual sobre la utilización de productos residuales con más de noventa referencias que incluyen artículos y patentes, destacando prometedoras aplicaciones futuras. Todos estos trabajos los clasifican en torno a dos opciones: la recuperación de componentes naturales de valor y la bioconversión en productos de valor.

Las aguas residuales procedentes de almazaras son una fuente rica en compuestos bioactivos y fenoles naturales como el hidroxitirosol, el tirosol y la oleuropeína. Estos fenoles son filtros ultravioleta activos usados en cosmética (Galanakis *et al.*, 2018). Un aspecto interesante consiste en la posibilidad de aplicar el principio de ‘uso en cascada’, por el cual solo se hace uso de la energía una vez que los compuestos de valor han sido extraídos. La separación y purificación de estos compuestos de alto valor añadido podría abrir la puerta a futuras investigaciones, dado el efecto inhibitorio que los compuestos fenólicos pueden ejercer sobre la fermentación del azúcar. La eliminación de estos compuestos del extracto acuoso también podría favorecer la producción de etanol procedente de la glucosa presente en la fracción extractiva, aumentando así la producción de biogás o bioetanol (Manzanares *et al.*, 2017).

4.3. Usos con valor medio de la biomasa de la aceituna (alimentación animal)

Como se ha mencionado anteriormente, tanto los usos de alto valor como los de bajo valor en alimentación humana han sido tratados en un número relevante de publicaciones y patentes, mientras que la atención prestada al empleo en la alimentación animal ha sido inferior. El uso de los residuos alimenticios para alimentación animal está bien establecido en algunas industrias, pero los residuos de la aceituna necesitan generalmente algún procesamiento y son más complejos de usar que, por ejemplo, la pulpa de remolacha o la piel de la patata, que son suministradas por sus respectivas industrias y están bien integradas en la industria ganadera.

Los subproductos de la aceituna han sido empleados tradicionalmente por los agricultores de las regiones productoras en el Mediterráneo, sin embargo existen tres barreras que impiden que se lleve a cabo un uso más amplio: a) la biomasa de la aceituna tiene poca proteína asimilable, b) existe cierta presencia de fitoesteroles que pueden tener resultados contraproducentes y c) los subproductos de las almazaras son una buena fuente de energía, sin embargo este alto contenido energético puede reducir la ingesta total de los animales, produciendo también de esta forma otros efectos contraproducentes. Estas características convierten a los subproductos de la aceituna en un buen suplemento para una dieta equilibrada, pero los subproductos con un alto contenido en grasa deben ser limitados a un porcentaje inferior al 10 % (recomendándose generalmente un 5 % de la dieta total).

El subproducto utilizado con más frecuencia en alimentación animal es el orujo de oliva, uno de los dos subproductos principales en la industria de extracción de aceite de oliva. Por cada 100 kg de aceitunas se obtienen 40-80 kg de orujo (altamente variable según la tecnología). El orujo ha sido usado directamente en bajas dosis (5 % de la ingesta total) con

resultados satisfactorios. Nasopoulou y Zabetakis (2013) llevaron a cabo una revisión de la evidencia disponible del uso los subproductos de la aceituna como alimento en acuicultura y ganado, concluyendo en ambos casos que un consumo moderado de orujo por debajo del 12 % de la ingesta no afecta el crecimiento y mejora el perfil de ácidos grasos, disminuyendo la composición de ácidos saturados y aumentando los insaturados, tanto en la carne como en la leche (Rodríguez *et al.*, 2008). En el caso de los rumiantes con una dieta con un contenido de orujo inferior al 10 % de la ingesta total, se consigue una reducción en el coste de alimentación y se mejora la composición de la leche sin efectos negativos en la cantidad producida (Molina-Alcaide *et al.*, 2010).

Existen además otros subproductos de la aceituna a los que se hace referencia en la literatura, como los huesos de aceituna usados para conejos y aves (Perez-Alba *et al.*, 1997; Carraro *et al.*, 2005 y Sanz Sampelayo *et al.*, 2007), o el uso de derivados para las ovejas (Rojas-Cano *et al.*, 2014) y la crianza de cerdo ibérico. Todos estos estudios ponen de manifiesto la modificación del perfil de ácidos grasos hacia una mayor presencia relativa de componentes insaturados frente a los saturados.

4.4. Los subproductos de la cadena del aceite de oliva como suplemento de pienso funcional para mejorar la alimentación humana

Es de todos conocido que, de forma general, una reducción de la grasa saturada en la dieta alimenticia mejora la salud cardiovascular. Así, las recomendaciones y políticas dietéticas se centran con frecuencia en reducir el consumo de ácidos grasos saturados para mejorar la salud cardiometabólica. La leche y los productos lácteos contienen grasas saturadas, y su consumo a menudo conduce a un aumento en el nivel de colesterol en plasma. Las recomendaciones aportadas por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, 2016) para la consecución de una dieta saludable señalan la conveniencia de evitar las grasas saturadas en la dieta, incluida la contenida en los productos lácteos. Sin embargo, los meta-análisis llevados a cabo por Elwood y colaboradores (2010) indican una reducción del riesgo de contraer enfermedades vasculares y diabetes en los sujetos con un mayor consumo de lácteos en relación con los que reportan un consumo más bajo.

El concepto de bioeconomía y el uso los subproductos procedentes del aceite de oliva ofrecen la posibilidad de mejorar el perfil de ácidos grasos de la leche mediante la inclusión de fuentes de grasa apropiadas en las dietas de los rumiantes (Berbel y Posadillo, 2018a). Más específicamente, el objetivo es reducir en la leche el contenido de ácidos grasos saturados de cadena media (AGSCM), los cuales tienen un efecto hipercolesterolemiante, y aumentar los ácidos grasos considerados beneficiosos, como los ácidos grasos poliinsaturados de la serie n-3 y el ácido ruménico (*cis*-9, *trans*-11 18: 2) (Lock y Bauman, 2004 y Martínez Marín *et al.*, 2011). La fuente de los ácidos grasos poliinsaturados puede ser tanto en semillas oleaginosas como en el aceite de oliva de baja calidad (aceite lampante) (Castro *et al.*, 2016). Como se ha

indicado en los apartados anteriores, los subproductos de la aceituna pueden ser utilizados como alternativas dentro de la alimentación primaria (granos o pienso), siguiendo los principios de la economía circular y de la bioeconomía.

En cuanto a los rumiantes, las hojas de olivo son fibrosas y con una baja digestibilidad, especialmente en proteína cruda, y promueven una fermentación ruminal muy pobre. De igual forma, se ha observado que en el caso de los animales lactantes, las hojas de olivo presentan un resultado de mejora en la calidad de la grasa de la leche en comparación con las dietas basadas en forrajes convencionales (Molina-Alcaide y Yáñez-Ruiz, 2008).

Hay estudios que demuestran que el uso de orujillo está en línea con lo descrito respecto a la hoja de olivo. La leche de cabra muestra un cambio significativo en su composición cuando se incrementan los niveles de orujillo en la dieta. Un hallazgo común es que los contenidos de grasa y sólidos en la leche, así como su producción, aumentan en una dieta con orujillo, con una reducción en ácidos grasos saturados y un incremento de los monoinsaturados comparados con el control (Molina-Alcaide *et al.*, 2010; Gomes *et al.*, 2015 y Castro *et al.*, 2016). Estos mismos autores coinciden en que la adición de cantidades moderadas de los subproductos de la aceituna a las dietas de cabras lecheras tiene efectos favorables sobre la composición de ácidos grasos de la leche desde el punto de vista del consumidor humano, sin presentar efectos negativos sobre el rendimiento. También se ha demostrado un cambio en el perfil de ácidos grasos en la carne similar al mencionado para la leche, tanto en rumiantes (Molina-Alcaide y Yáñez-Ruiz, 2008; Nasopoulou y Zabetakis, 2013; Castro *et al.*, 2016) como en cerdos ibéricos (Rojas-Cano *et al.*, 2014), y también en pescado (Nasopoulou y Zabetakis, 2013).

Respecto al impacto medioambiental que tendría un aumento en el uso de estos subproductos para la alimentación animal, hemos realizado una estimación preliminar basada en el «Modelo de Evaluación Ambiental de la Ganadería Mundial (GLEAM_v2)» (FAO, 2017b). Asumiendo una estimación conservadora, y suponiendo que el 10 % de la dieta alimenticia actual para ovejas lecheras fuera sustituida por subproductos de la aceituna, el modelo estima un 8 % de disminución en emisiones de gases de efecto invernadero. Esta estimación es solo preliminar (para ovejas en el sur de Europa) y requiere una verificación más detallada, pero los resultados provisionales indican que existe una contribución a la mitigación del cambio climático gracias al uso de subproductos de la aceituna en la alimentación de animales productores de leche.

5. Discusión y conclusiones

La producción intensiva de productos lácteos en la cuenca mediterránea se basa en gran parte en la importación de ingredientes. El uso de subproductos de la aceituna en la alimentación animal está creciendo (Romero-Huelva *et al.*, 2017), sin embargo, su uso es aún limitado en comparación con los usos en energía y compostaje. Según EUROSTAT, la producción de leche en la UE-28 es de alrededor de 160 millones de toneladas, de los que el 37 % se desti-

na para producir 9,3 millones de toneladas de queso (el consumo per cápita en la UE es de 18,3 kg). En conjunto, la alimentación y los gastos veterinarios representaron 94,5 millones de euros y la UE-28 presenta en general una tasa de autosuficiencia para la alimentación del ganado entre el 58 % y el 71 %. Existe la posibilidad de mejorar esta situación, reduciendo la dependencia externa de materia prima en la UE y aumentando la calidad de los productos de origen animal (principalmente lácteos) mediante el uso de subproductos de la aceituna en las dietas de los rumiantes, en especial en las regiones mediterráneas.

La industria de fabricación de piensos compuestos es un elemento esencial dentro de la cadena de producción de los productos de origen animal. La bioeconomía y la economía circular aspiran a que los operadores en la industria alimentaria aumenten la eficiencia del uso de los recursos, reduciendo las pérdidas tanto como sea posible. Por tanto, hay que fomentar que los fabricantes de alimentos hagan uso de los subproductos del olivar para la alimentación animal, algo que es compatible con el enfoque de una industria olivarera que ha favorecido el uso energético. En la UE-28, el valor de la carne y otros productos de origen animal representó 170.000 millones de euros en el año 2014 (el 42 % del valor total de la producción agraria) y la alimentación animal es el factor más importante del coste de producción ganadera. Los animales de granja en la UE-28 se alimentan con 475 millones de toneladas de pienso y el uso de los subproductos de la aceituna para la alimentación animal, que se ha estimado en alrededor de 13,1 millones de toneladas (restos de poda, hojín, orujo y orujillo), puede contribuir de forma relevante a reducir los costes de alimentación y aumentar la calidad de los productos de origen animal (carne y productos lácteos).

No obstante, a pesar de proponer nuevos usos para estos subproductos y residuos, esto no implica que se abandonen los avances conseguidos con el enfoque de extraer componentes funcionales o en la línea del aprovechamiento energético. Ambas líneas de trabajo se pueden considerar un éxito, ya sea en el ámbito científico como en el empresarial, pero habría que evitar «dormirse en los laureles» de lo que ya ha sido capaz el sector de conseguir, e intentar aumentar el valor del sector en su conjunto.

Este trabajo considera el hecho de que los alimentos consumidos por los animales finalmente determinan la alimentación humana, y que el empleo de la biomasa en usos con bajo valor añadido debe ser el último recurso una vez que se haya empleado la biomasa en usos de alto valor añadido, lo que representaría una mejora sobre la situación actual en el sector del olivar. Sería conveniente llevar a cabo un análisis más amplio que incluya el sector de las aceitunas de mesa y realizar un análisis económico y ambiental a nivel global de la estrategia de valorización de los subproductos de la aceituna.

Agradecimientos

Este trabajo se ha beneficiado de la financiación del proyecto AGL2014-53417-R (MINECO). Parte de este trabajo está basado en la reciente publicación Berbel y Posadillo (2018b). Los

autores agradecen a Cajamar la oportunidad de publicar este trabajo y a Eduarda Molina Alcaide (CSIC-Zaidin) por la información aportada. Todos los datos y opiniones reflejadas en este trabajo pertenecen a los autores.

Referencias bibliográficas

- AKRATOS, C. S.; TEKERLEKOPOULOU, A. G.; VASILIOU, I. A. y VAYENAS, D. V. (2017): «Co-composting of olive mill waste for the production of soil amendments»; en GALANAKIS, C. M., ed.: *Olive mill waste. Recent advances for sustainable management*. Academic Press.
- ALEXANDRATOS, N. y BRUINSMA, J. (2012): *World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision*. ESA Working paper Rome, FAO.
- ÁLVAREZ DE LA PUENTE, J. M.; GARCÍA RUIZ, R.; JÁUREGUI ARANA, J. y MARTÍN PÉREZ, A. (2010): «Compostaje de alperujos en Andalucía»; en *Fertilidad de la Tierra: Revista de Agricultura Ecológica* (41); pp. 12-14.
- ASVELD, L.; VAN EST, R. y STEMERDING, D. (2011): *Getting to the core of the bio-economy. A perspective on the sustainable promise of biomass*.
- BERBEL, J. y DELGADO-SERRANO, M. M. (2017): «La bioeconomía del sector del olivar y del aceite de oliva»; en GÓMEZ-LIMÓN, J. A. y PARRAS, M., eds.: *La economía y la comercialización de los aceites de oliva*. Almería, Cajamar Caja Rural.
- BERBEL, J. y POSADILLO, A. (2018a): «Opportunities for the bioeconomy of olive oil by-products»; en *Biomedical Journal of Scientific & Technical Research* (1, 7).
- BERBEL, J. y POSADILLO, A. (2018b) «Review and analysis of alternatives for the agro-industrial olive oil by-products valorisation»; en *Sustainability* (10, 1); pp. 237
- CALERO, J.; LUNA, D.; SANCHO, E. D.; LUNA, C.; BAUTISTA, F. M. *et al.* (2015): «An overview on glycerol-free processes for the production of renewable liquid biofuels, applicable in diesel engines»; en *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (42, Supplement C); pp. 1437-1452.
- CARRARO, L.; TROCINO, A. y XICCATO, G. (2005): «Dietary supplementation with olive stone meal in growing rabbits»; en *Italian Journal of Animal Science* 4(sup3); pp. 88-90.
- CASTRO, T.; CABEZAS, A.; DE LA FUENTE, J.; ISABEL, B.; MANSO, T. *et al.* (2016): «Animal performance and meat characteristics in steers reared in intensive conditions fed with different vegetable oils»; en *Animal* (10, 3); pp. 520-530.
- COMISIÓN EUROPEA (2015): *Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy*. COM/2015/0614 final. Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions.

- CONSEJERÍA DE AGRICULTURA Y PESCA-JUNTA DE ANDALUCÍA (2015): *Evaluación de la producción y usos de los subproductos de las agroindustrias del olivar en Andalucía*. Sevilla.
- ELWOOD, P. C.; PICKERING, J. E.; GIVENS, D. I. y GALLACHER, J. E. (2010): «The consumption of milk and dairy foods and the incidence of vascular disease and diabetes: An overview of the evidence»; en *Lipids* (45, 10); pp. 925-939.
- FAO (2017a): *The future of food and agriculture – Trends and challenges*. Rome.
- FAO (2017b): *Global livestock environmental assessment model*. Roma, FAO.
- FERNÁNDEZ-BOLAÑOS, J.; RODRÍGUEZ, G.; RODRÍGUEZ, R.; GUILLÉN, R. y JIMÉNEZ, A. (2006): «Extraction of interesting organic compounds from olive oil waste»; *Grasas y aceites* 57(1); p. 12; <https://doi.org/10.3989/gya.2006.v57.i1.25>.
- GALANAKIS, C. M. y KOTSIU, K. (2017): «Recovery of bioactive compounds from olive mill waste»; en GALANAKIS, C. M., ed.: *Olive mill waste. Recent advances for sustainable management*. Reino Unido, Londres. Academic Press.
- GALANAKIS, C. M.; TSATALAS, P. y GALANAKIS, I. M. (2018): «Implementation of phenols recovered from olive mill wastewater as UV booster in cosmetics»; en *Industrial Crops and Products* (111, Supplement C); pp. 30-37.
- GARCÍA-MARAVÉ, A.; ZAMORANO, M.; RAMOS-RIDAO, A. y DÍAZ, L. F. (2012): «Analysis of olive grove residual biomass potential for electric and thermal energy generation in Andalusia (Spain)»; en *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (16,1); pp. 745-751.
- GOMES, L. C.; ALCALDE, C. R.; SANTOS, G. T.; FEHRMANN, A. C.; MOLINA, B. S. L. *et al.* (2015): «Concentrate with calcium salts of fatty acids increases the concentration of polyunsaturated fatty acids in milk produced by dairy goats»; en *Small Ruminant Research* (124, Supplement C); pp. 81-88.
- HERNÁNDEZ, V.; ROMERO-GARCÍA, J. M.; DÁVILA, J. A.; CASTRO, E. y CARDONA, C. A. (2014): «Techno-economic and environmental assessment of an olive stone based biorefinery»; en *Resources, Conservation and Recycling* (92, Supplement C); pp. 145-150.
- LA CAL, J. A. ed. (2017): *Valorización energética de subproductos del olivar y sus industrias de transformación*. Jaén, Fundación Caja Rural de Jaén.
- LOCK, A. L. y BAUMAN, D. E. (2004): «Modifying milk fat composition of dairy cows to enhance fatty acids beneficial to human health»; en *Lipids* (39, 12); pp. 1197-1206.
- MANZANARES, P.; RUIZ, E.; BALLESTEROS, M.; NEGRO, M. J.; GALLEGO, F. J. *et al.* (2017): «Residual biomass potential in olive tree cultivation and olive oil industry in Spain: valorization proposal in a biorefinery context»; *Spanish Journal of Agricultural research (SJAR)* (15, 3); pp. 1-12.

- MARTÍNEZ MARÍN, A. L.; GÓMEZ-CORTÉS, P.; GÓMEZ CASTRO, A. G.; JUÁREZ, M.; PÉREZ ALBA, L. M. *et al.* (2011): «Animal performance and milk fatty acid profile of dairy goats fed diets with different unsaturated plant oils»; en *Journal of Dairy Science* (94, 11); pp. 5359-5368.
- MCCORMICK, K. y KAUTTO, N. (2013): «The Bioeconomy in Europe: An Overview»; en *Sustainability* (5, 6); pp. 2589.
- MEYER, R. (2017): «Bioeconomy strategies: Contexts, visions, guiding implementation principles and resulting debates»; en *Sustainability* (9, 6); p. 1031.
- MOLINA-ALCAIDE, E.; MORALES-GARCÍA, E. Y.; MARTÍN-GARCÍA, A. I.; BEN SALEM, H.; NEZAOUI, A. *et al.* (2010): «Effects of partial replacement of concentrate with feed blocks on nutrient utilization, microbial N flow, and milk yield and composition in goats»; en *Journal of Dairy Science* (93, 5); pp. 2076-2087.
- MOLINA-ALCAIDE, E. y YÁÑEZ-RUIZ, D. R. (2008): «Potential use of olive by-products in ruminant feeding: A review»; en *Animal Feed Science and Technology* (147, 1); pp. 247-264.
- NASOPOULOU, C. y ZABETAKIS, I. (2013): «Agricultural and aquacultural potential of olive pomace a review»; en *Journal of Agricultural Science* (5, 7); pp. 116-127.
- PÉREZ-ALBA, L. M.; DE SOUZA CAVALCANTI, S.; HERNANDEZ, M. P.; MARÍN, A. M. y MARÍN, G. F. (1997): «Calcium soaps of olive fatty acids in the diets of manchega dairy ewes: Effects on digestibility and production»; en *Journal of Dairy Science* (80, 12); pp. 3316-3324.
- RODRÍGUEZ, G.; LAMA, A.; RODRÍGUEZ, R.; JIMÉNEZ, A.; GUILLÉN, R. *et al.* (2008): «Olive stone an attractive source of bioactive and valuable compounds»; en *Bioresource Technology* (99, 13); pp. 5261-5269.
- ROIG, A.; CAYUELA, M. L. y SÁNCHEZ-MONEDERO, M. A. (2006): «An overview on olive mill wastes and their valorisation methods»; en *Waste Management* (26, 9); pp. 960-969.
- ROJAS-CANO, M. L.; RUÍZ-GUERRERO, V.; LARA, L.; NIETO, R. y AGUILERA, J. F. (2014): «Digestibility and energy value of diets containing increasing proportions of olive soapstocks for Iberian crossbred pigs»; *Animal Feed Science and Technology* (191, Supplement C); pp. 83-90.
- ROMERO-HUELVA, M.; RAMÍREZ-FENOSA, M. A.; PLANELLES-GONZÁLEZ, R.; GARCÍA-CASADO, P. y MOLINA-ALCAIDE, E. (2017): «Can by-products replace conventional ingredients in concentrate of dairy goat diet?»; en *Journal of Dairy Science* (100, 6); pp. 4500-4512.
- RONZON, T.; KLINKENBERG, M.; LUSSE, M.; LANDA, L.; SÁNCHEZ LÓPEZ, J.; M'BAREK, R.; HADJAMU, G.; BELWARD, A.; CAMIA, A.; CRISTOBAL, J.; PARISI, C.; FERRARI, E.; GIUNTOLI, J.; MARELLI, L.; TORRES DE MATOS, C.; GÓMEZ BARBERO, M.; RODRÍGUEZ CEREZO, E. (2017): *Bioeconomy Report 2016*. Joint Research Centre. Unión Europea.

- SANZ SAMPELAYO, M. R.; CHILLIARD, Y.; SCHMIDELY, P. y BOZA, J. (2007): «Influence of type of diet on the fat constituents of goat and sheep milk»; *Small Ruminant Research* (68, 1); pp. 42-63.
- SICILIANO, A.; STILLITANO, M. y LIMONTI, C. (2016): «Energetic Valorization of Wet Olive Mill Wastes through a Suitable Integrated Treatment: H₂O₂ with Lime and Anaerobic Digestion»; en *Sustainability* (8, 11); pp. 1150.
- USDA (2016). 2015-2020 dietary guidelines: Answers to your questions. *ChooseMyPlate.gov*. Retrieved December 2017; en <https://www.choosemyplate.gov/2015-2020-dietary-guidelines-answers-your-questions>.
- YÜCEL, Y. (2011): «Biodiésel production from pomace oil by using lipase immobilized onto olive pomace»; en *Bioresource Technology* (102, 4); pp. 3977-3980.



LOS MICROORGANISMOS COMO ELEMENTOS CLAVE DE LA BIOECONOMÍA

María José López, Francisca Suárez-Estrella y Joaquín Moreno Casco
Universidad de Almería

Resumen

El uso eficiente de recursos biológicos para la obtención de productos y servicios que generen un valor económico constituye la base de la bioeconomía. Mediante la aplicación de procesos biológicos respetuosos con el medio ambiente, es posible la conversión de la biomasa en productos de alto valor, tales como nuevos biomateriales, productos farmacéuticos, alimentos, piensos o biocombustibles. Los microorganismos (bacterias, levaduras y hongos filamentosos), sus actividades y productos son considerados uno de los elementos impulsores de la bioeconomía. Actualmente están presentes en sectores tales como las industrias agroalimentaria y química y se emplean para la obtención de productos tan diversos como los antibióticos, el papel o los polímeros avanzados. El avance en el conocimiento está permitiendo anticipar futuros retos de innovación que soporten la implementación de las estrategias bioeconómicas. Los microorganismos constituirán la piedra angular en la economía industrial del mañana, especialmente debido al empleo de biomasa como alternativa a los recursos fósiles, de modo que se estima que abrirán el camino hacia procesos industriales ambientalmente más sostenibles, transformando materias primas renovables en productos valiosos, mediante procesos más eficientes que generan menos residuos. En este capítulo se revisan las aplicaciones más relevantes de los microorganismos en los ámbitos de la agricultura, la salud humana, la industria y el medioambiente.

Abstract

The efficient use of biological resources to acquire products and services that generate economic value constitutes the basis of the bioeconomy. By applying environmentally conscious biological processes biomass can be converted into high-value products, such as new biomaterials, pharmaceuticals, foodstuffs, fodder, and biofuels. Microorganisms (bacteria, yeasts and filamentous fungi), their activities, and products are considered one of the driving forces of the bioeconomy. They are currently present in sectors like the agri-food and chemical industries and are used to obtain products as diverse as antibiotics, paper, and advanced polymers. Advances in knowledge are making it possible to anticipate future innovation challenges that support the implementation of bioeconomic strategies. Microorganisms are the cornerstone of tomorrow's industrial economy, especially as biomass is used as an alternative to fossil resources, and it is estimated that they will open the way to more environmentally sustainable industrial processes, transforming renewable raw materials into valuable products, through more efficient processes that generate less waste. In this chapter we review the most important applications of microorganisms in the fields of agriculture, human health, industry, and the environment.

1. Introducción

El crecimiento de la población mundial, el cambio climático y la necesidad de proteger el medioambiente son algunos de los desafíos a los que se enfrenta la humanidad. El futuro depende en gran medida de la accesibilidad a alimentos seguros, energía y agua. Para proteger el acceso a estos recursos a medio y largo plazo, la producción y el consumo deben modificarse de forma que sean ecológica y socialmente sostenibles, premisas subyacentes al concepto de bioeconomía. Un aspecto inherente a este concepto reside en el uso eficiente de recursos biológicos, entendiéndose

como tales cualquier material de origen biológico (biomasa), para la obtención de productos y servicios que generen un valor económico.

Las industrias biotecnológicas constituyen un nicho que provee de microorganismos (bacterias, levaduras, hongos filamentosos y microalgas) y sus productos a numerosos sectores, constituyendo uno de los pilares básicos para el desarrollo de la bioeconomía. Esta actividad es unánimemente considerada en la Unión Europea como una de sus fortalezas tecnológicas y ha sido reconocida como «tecnología clave facilitadora» que ayudará a alcanzar una bioeconomía más competitiva y sostenible, contribuyendo a mejorar la calidad de los productos, incrementar su producción, proporcionar mayor resistencia a enfermedades (tanto humanas, como vegetales) u obtener mayor utilidad de los subproductos¹. Las expectativas que ofrecen los microorganismos en este contexto aumentarán en un futuro con la aplicación de la genómica, proteómica y metabolómica que han contribuido significativamente a la explotación de la biodiversidad natural, también desde hábitats extremos. Mediante la aplicación de tecnologías modernas, hoy en día es posible la utilización de enzimas microbianas muy potentes y estables, así como de sistemas microbianos robustos, y activos bajo condiciones de temperatura, pH o presión extremas².

Los productos y servicios que los microorganismos pueden proporcionar son múltiples en el contexto de la bioeconomía. En los siguientes apartados se describen algunas de sus aplicaciones más relevantes en los ámbitos de la agricultura, la salud humana, la industria y el medioambiente.

2. Agricultura, microorganismos y economía circular

La agricultura intensiva se encuentra sometida a continuos avances que buscan el incremento de la productividad, entendida esta como aumento de la cantidad y calidad de los productos obtenidos, así como de la sostenibilidad, mediante el empleo de métodos y materiales más naturales y seguros de cara al consumidor. Prueba de ello es el continuo desarrollo de mejoras en los sistemas y métodos agrícolas, tales como la utilización de estructuras más sostenibles que permiten reducir los consumos energéticos, la mejora en el control climático de los invernaderos, la reducción en el consumo de agua y fertilizantes, o el desarrollo de métodos de lucha integrada y control biológico frente a agentes patógenos.

Algunas de las características más importantes de la agricultura intensiva y sus impactos negativos sobre el medioambiente, la seguridad alimentaria, y en definitiva la salud del consumidor, se indican en la Tabla 1.

La producción agrícola actual requiere de estrategias que reduzcan los insumos de agua, fertilizantes y fitosanitarios, para asegurar el rendimiento vegetal a un costo relativamente bajo, sin deterioro de la fertilidad del suelo. Una posible solución sería el uso de rizo-microorganismos, los cuales viven asociados a las raíces de las plantas, estimulando y facilitando, el sano

¹ ALBRECHT y ETTLING (2014).

² KRUGER *et al.* (2018).

desarrollo de las mismas a dosis inferiores de fertilizantes químicos. Estos microorganismos son mayoritariamente bacterias, aunque también se incluyen destacadas especies fúngicas. Mediante su correcta aplicación es posible mejorar la absorción de fertilizantes, además de proteger a las raíces del ataque de fitopatógenos. Kloepper y Schroth³ fueron los primeros que definieron el grupo de bacterias promotoras de crecimiento vegetal o *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR). Lo hicieron como «aquellas bacterias que al aplicarlas al suelo colonizaban las raíces de las plantas mejorando su crecimiento». Actualmente son aplicadas como inoculantes microbianos para potenciar los fenómenos de control biológico, o bien favorecer los procesos de biofertilización y fitoestimulación⁴.

Tabla 1. Actividades agrícolas intensivas y su impacto negativo sobre el medioambiente y la salud de los consumidores

Actividad agrícola	Impacto económico	Efectos negativos
Uso de fertilizantes nitrogenados	Desde la década de 1960, el uso mundial de fertilizantes nitrogenados minerales ha crecido aproximadamente 7 veces, mientras que el rendimiento total ha aumentado solo 2,4 veces. La comparación del aumento en los rendimientos globales y el uso de fertilizantes nitrogenados muestran una disminución global drástica en la eficiencia del uso de nutrientes.	Más del 50 % del nitrógeno aplicado a los campos no es absorbido por las plantas, de modo que se estaría emitiendo principalmente a los ríos y la atmósfera con la consecuente repercusión negativa sobre los ecosistemas acuáticos, el cambio climático y la salud humana.
Uso de fertilizantes fosfatados	El uso anual de fosfato de roca, un recurso no renovable, para producir fertilizantes ha aumentado de 6 a 7 veces desde 1960, y sus reservas mundiales actuales pueden agotarse en 50-100 años. Alrededor del 85 % de la demanda mundial de fósforo es para la producción de fertilizantes.	Se estima que alrededor del 25 % del fósforo extraído desde 1950 y aplicado en campo, está enterrado en vertederos o ha sido vertido a ecosistemas acuáticos, provocando problemas de eutrofización.
Uso de fitosanitarios	Paralelamente al uso de fertilizantes, la producción de fitosanitarios en los últimos 50 años casi se ha cuadruplicado. Los costes totales derivados del uso de plaguicidas, aún genera dudas sobre la relación coste-beneficio.	<ul style="list-style-type: none"> • Consecuencias negativas sobre la biodiversidad, sobre la salud humana, y también plantea cada vez más problemas de resistencia a las plagas y enfermedades en plantas. • Esterilidad y fertilidad reducida de los suelos.
Regadío	En los últimos 50 años se han duplicado las tierras de cultivo de regadío, de modo que el 80-90 % del consumo de agua dulce se dedica al riego.	Escasez de agua para el riego y serios problemas de salinización.
Industrialización de la actividad agrícola	La agricultura industrial depende en gran medida del uso directo de energía fósil (actividades mecanizadas), con lo que se considera una actividad emisora de gases de efecto invernadero.	La agricultura representa el 52 % y el 84 % de las emisiones antropogénicas mundiales de metano y óxido nítrico respectivamente.
Monocultivo	La mecanización y el uso intensivo de plaguicidas han permitido a los agricultores simplificar drásticamente las rotaciones de cultivos y desarrollar rotaciones cortas y monocultivos, lo que ha provocado en ocasiones una caída o estancamiento en la producción.	El desarrollo de cultivos excesivamente especializados ha derivado en una simplificación del paisaje, lo cual influye de forma importante en los procesos de regulación biológica de los ecosistemas, así como en la biodiversidad de los mismos.

Fuente: Modificada de Theron *et al.* (2017).

³ KLOEPPER (1994).

⁴ AHMAD *et al.* (2008).

Dentro de los llamados PGPM (*Plant Growth Promoting Microorganisms*), si nos referimos en general a microorganismos de origen bacteriano y fúngico, se encuentran bacterias pertenecientes a los géneros *Azotobacter*, *Acetobacter*, *Azospirillum*, *Burkholderia*, *Pseudomonas*, *Pasteuria* y *Bacillus*, y hongos pertenecientes a los géneros *Trichoderma*, *Penicillium*, *Paecilomyces* o *Beauveria*. Teniendo en cuenta que el estudio de este grupo microbiano se encuentra en auge, se propone para su mejor comprensión la separación en dos grupos, los agentes PGPM que afectan estrictamente al crecimiento vegetal, y los agentes «biocontrol-PGPM», término referido a aquellos que controlan el crecimiento de determinados agentes fitopatógenos.

En general, se conocen dos mecanismos de estimulación del crecimiento vegetal por la inoculación con agentes biológicos, mecanismos indirectos y directos⁵:

- a) Cuando la estimulación del crecimiento es indirecta, el agente microbiano libera algún metabolito, que a su vez, afecta a otros factores rizosféricos que revierten en una mejora o estimulación del crecimiento de la planta. Los mecanismos que estos agentes utilizan van desde la producción de sustancias movilizadoras de nutrientes, como ácidos orgánicos o aminoácidos, hasta la producción de sideróforos. También es muy común, dentro de este grupo, el control de patógenos mediante producción de sustancias antifúngicas o antibióticas, y mediante mecanismos de competencia por sustrato o inducción de la resistencia sistémica del vegetal. Estos mecanismos serían los típicamente utilizados por los agentes denominados «antagonistas». Por último, la hidrólisis de moléculas producidas por patógenos, la síntesis de enzimas hidrolíticas de la pared fúngica, la síntesis de ácido cianhídrico o el control de plagas producidas por insectos, son aspectos bien conocidos desde la década de los noventa.
- b) Por otro lado, los mecanismos directos son aquellos en los que el metabolito producido por el microorganismo es en sí capaz de estimular el crecimiento vegetal, y por tanto, no afectan en principio al resto de la población microbiana del suelo. De forma resumida, los mecanismos de acción directa son la fijación de nitrógeno asociada a la raíz (proceso exclusivo de algunos procariotas), nitrificación y amonificación, la producción de hormonas de tipo auxinas, citoquininas y giberelinas, la inhibición de la síntesis de etileno y el aumento de la permeabilidad de la raíz.

2.1. Biopesticidas

Para superar los peligros asociados al uso de plaguicidas químicos (Tabla 1), se está adoptando cada vez más el uso de productos derivados de fuentes naturales, de origen vegetal o microbiano. En los últimos años, numerosas empresas se han centrado en el desarrollo de

⁵ KLOEPPER (1994) y PAL y MCSADDEN GARDENER (2006).

productos considerados de «residuo cero», en los que no existe un período de seguridad entre la aplicación y el momento de la cosecha.

El término «biopesticida» engloba diversas estrategias de control, aunque en este capítulo nos centraremos en el uso de bacterias y hongos así como de una gran diversidad de metabolitos bioactivos producidos por ambos grupos microbianos, frente al desarrollo de enfermedades de plantas⁶.

En la Tabla 2 se enumeran algunas de las sustancias antifúngicas y antibacterianas producidas por cepas bacterianas consideradas agentes de control biológico, y la enfermedad vegetal frente a la cual son efectivas.

Tabla 2. Antibióticos relevantes producidos por agentes de control biológico microbianos

Antibiótico	Cepa	Patógeno diana	Enfermedad
2,4-diacetil-floroglucinol (DAPG)	<i>Pseudomonas fluorescens</i> F113	<i>Pythium spp.</i>	Damping off
Agrocina 84	<i>Agrobacterium radiobacter</i>	<i>Agrobacterium tumefaciens</i>	Tumores
Bacilomicina D	<i>Bacillus subtilis</i> AU195	<i>Aspergillus flavus</i>	Aflatoxinas
Bacilomicina, fengicina	<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> FZB42	<i>Fusarium oxysporum</i>	Marchitez
Xantobacina A	<i>Lisobacter</i> sp. strain SB-K88	<i>Aphanomyces cochlioides</i>	Damping off
Gliotoxina	<i>Trichoderma virens</i>	<i>Rhizoctonia solani</i>	Pudrición de la raíz
Herbicolina	<i>Pantoea agglomerans</i> C9-1	<i>Erwinia amylovora</i>	Fuego bacteriano
Iturina A	<i>B. subtilis</i> QST713	<i>Botrytis cinerea</i> / <i>R. solani</i>	Damping off
Micosubtilina	<i>B. subtilis</i> BBG100	<i>Pythium aphanidermatum</i>	Damping off
Fenacinas	<i>P. fluorescens</i> 2-79 / 30-84	<i>Gaeumannomyces graminis var. tritici</i>	Enfermedad del pie, pudrición de la raíz
Pioluteorina, pirrolnitrina	<i>P. fluorescens</i> PF-5	<i>Pythium ultimum</i> / <i>R. solani</i>	Damping off
Pirrolnitrina, pseudano	<i>Burkholderia cepacia</i>	<i>R. solani</i> / <i>Pyricularia oryzae</i>	Damping off / quemazón
Zwittermicina A	<i>Bacillus cereus</i> UW85	<i>P. medicaginis</i> / <i>P. aphanidermatum</i>	Damping off

Fuente: Pal y McSpadden (2006).

2.2. Bioestimulantes y biofertilizantes

Existe cierta incertidumbre sobre el tipo de producto que puede considerarse bioestimulante o biofertilizante. Según el Consejo de Industria de Bioestimulantes (*European Biostimulants Industry Council*, EBIC), los bioestimulantes vegetales contienen sustancias y/o microorganismos cuya función en las plantas o la rizosfera es estimular los procesos naturales para mejorar la absorción de nutrientes, la tolerancia al estrés abiótico y la calidad de cultivo. Los bioestimulantes no tienen acción directa contra las plagas y enfermedades y, por lo tanto, no entran dentro del marco regulatorio de

⁶ REGLAMENTO UE 2017/1432, núm. 205 de 8 de agosto de 2017.

los fitosanitarios⁷. En el año 2011, se fundó el anteriormente mencionado EBIC que se encarga de promover la aplicación de este tipo de productos para mejorar el crecimiento y desarrollo vegetal a lo largo de todo el ciclo de cultivo. Los mecanismos utilizados por este tipo de bioproductos son muy diversos, y van desde mejorar la eficiencia del metabolismo vegetal para inducir aumentos en el rendimiento y en la calidad del cultivo, a aumentar la tolerancia de la planta a los distintos estreses bióticos y abióticos, pasando por facilitar la asimilación, translocación y uso de nutrientes, mejorar los atributos de calidad de los productos, como el contenido de azúcar, color o textura, hacer que el uso del agua sea más eficiente o mejorar ciertas propiedades fisicoquímicas del suelo o fomentar el desarrollo de los microorganismos rizosféricos.

A diferencia de otros productos fertilizantes, en la Unión Europea los bioestimulantes carecen de normas que regulen su acceso al mercado. En este sentido, gracias en parte al trabajo desarrollado por el EBIC en los últimos años, el Parlamento Europeo ha aprobado recientemente la necesidad de una regulación y desarrollo de un mercado único para esta innovadora industria de los bioestimulantes (enmienda adoptada por el Parlamento Europeo el 24 de octubre de 2017).

En el caso de los biofertilizantes, la situación es aún más complicada. No existe una definición oficial para este término, y en algunos casos los términos bioestimulantes y biofertilizantes se confunden. Sin embargo, se acepta que los biofertilizantes son mezclas complejas de origen biológico, como abonos o compost, obtenidos de transformaciones principalmente aeróbicas de la materia orgánica a partir de residuos vegetales. Debido a su origen, los biofertilizantes contienen niveles suficientes de nutrientes vegetales (nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio) y microorganismos, que son capaces de producir el enriquecimiento en nutrientes del suelo, mejorando su disponibilidad para los cultivos.

En general, los bioestimulantes y biofertilizantes, se pueden agrupar en las siguientes categorías: microorganismos, ácidos húmicos y fúlvicos, extractos de algas marinas e hidrolizados de proteínas y aminoácidos⁸. Cabe destacar el papel de las cianobacterias y las microalgas en el entorno de los agentes bioestimuladores del crecimiento vegetal. Este grupo está presente de forma natural en hábitats acuáticos dulces y salinos, y son una fuente rica de metabolitos biológicamente activos. Existen más de 30.000 especies de microalgas, pero las especies comercialmente más relevantes por su efecto bioestimulante son *Chlorella*, *Spirulina* y *Scenedesmus*⁹.

2.3. El mercado global de biopesticidas y bioestimulantes

El mercado de los biofertilizantes y biopesticidas se diferencia en función del tipo de materia activa, de la variedad vegetal en la que se aplica o del método de aplicación. Algunos análisis de mercado publicados recientemente afirman que el valor de mercado global de fitosanitarios, suponía 1.700 millones de dólares en el año 2014 y experimentará un incremento

⁷ REGLAMENTO UE 2017/1432, núm. 205 de 8 de agosto de 2017.

⁸ DU JARDIN (2015).

⁹ GOUVEIA *et al.* (2008).

en los próximos años superando los 4.200 millones de dólares en el año 2023¹⁰. Por otro lado, en relación con el mercado de los biofertilizantes, se prevé que la tasa de crecimiento anual se incremente en más de un 13 %, alcanzando valores de 1.660 millones de dólares en este mismo año.

El mercado actual de biofertilizantes representa aproximadamente el 5 % del mercado total de fertilizantes químicos, destacando la comercialización de organismos fijadores de nitrógeno. Entre los bioproductos de mayor interés destacan aquellos preparados a base de cepas de *Rhizobium*, *Actinorhizobium*, *Azotobacter* y *Azospirillum*, utilizándose principalmente para el cultivo de leguminosas, arroz y caña de azúcar.

Aunque el pronóstico es que el mercado norteamericano domine la venta de productos de carácter biopesticida y biofertilizante durante la próxima década, es posible que en Europa se observe un importante incremento en la aplicación de este tipo de productos, dadas las exigencias de los consumidores en lo referente a productos ecológicos, libres de fitosanitarios químicos. Actualmente, en esta zona geográfica, el precio de los bioplaguicidas microbianos es, al menos, un 25 % mayor que el de los fitosanitarios convencionales. Incluso se espera que esta diferencia se haga mayor gracias a la reducción en los precios de los fitosanitarios convencionales. Además, la aplicación de nuevas tecnologías y la mejora del sector servicios, podría provocar un incremento inmediato de los precios de este tipo de productos, aunque el pronóstico es que tiendan a estabilizarse a corto-medio plazo¹¹.

3. Bioeconomía y salud humana

En sanidad, los productos o actividades de base biotecnológica más relevante son los denominados biofármacos, las terapias experimentales (como la ingeniería celular y tisular y la terapia génica), el diagnóstico, la bioinformática (incluyendo la secuenciación de DNA y la farmacogenómica), los alimentos funcionales y nutraceuticos y los productos sanitarios¹².

Los biofármacos o biomedicamentos generados gracias a los grandes avances en biología molecular son, sin duda, la causa principal de crecimiento de la industria farmacéutica de los últimos treinta años. A finales del año 2014, se aprobaron 260 nuevos productos dirigidos al tratamiento de más de 230 indicaciones diferentes¹³. Ya en ese momento, las ventas totales acumuladas de biofármacos superaban los 140.000 millones de dólares.

La mayoría de los productos biotecnológicos tradicionales poseen valores de mercado más modestos que aquellos generados gracias a la tecnología del ADN recombinante. Dicha tecnología permite la modificación de biomoléculas complejas, y se ha aplicado en la industria farmacéutica desde la década de los setenta. Algunos de los productos que han supuesto una

¹⁰ MARKETS AND MARKETS (2014a y b).

¹¹ MARKETS AND MARKETS (2014b).

¹² LOKKO *et al.* (2018).

¹³ EVENS y KAITIN (2014).

revolución en la industria sanitaria y en consecuencia, en la salud y calidad de vida, son las nuevas generaciones de insulina humana, las innovadoras terapias contra el cáncer basadas en anticuerpos, los interferones para el tratamiento de infecciones virales y una variedad de terapias para enfermedades no transmisibles como la esclerosis múltiple o la artritis reumatoide.

Un biofármaco se puede definir como cualquier producto obtenido a partir de un ser vivo o material biológico mediante un proceso biotecnológico y que se utiliza con fines terapéuticos y de diagnóstico. El origen de este tipo de productos biológicos puede ser microbiano o bien a partir de órganos y tejidos de origen vegetal o animal, y células o fluidos de origen animal (incluidos los de origen humano). Dentro del gran grupo de los biofármacos, las categorías más importantes son proteínas recombinantes, anticuerpos monoclonales, vectores de material genético, fragmentos de anticuerpos, oligonucleótidos y vacunas.

Tanto las proteínas recombinantes como los anticuerpos monoclonales, son producidos a partir de sistemas biológicos vivos (bacterias, hongos, levaduras, células de mamíferos, tejidos de origen vegetal o animal, animales de laboratorio). El proceso completo incluye técnicas de ingeniería genética dirigidas en primer lugar a la clonación de una secuencia genética dentro de un vector de expresión apropiado (viral o plasmídico, principalmente), seguido por la construcción de un sistema de expresión celular (procariota o eucariota) y, finalmente, el diseño de un sistema de producción industrial a gran escala (*upstream*). Una vez realizado el diseño de producción, la proteína deseada debe ser aislada y purificada utilizando técnicas que no alteren su estructura e integridad funcional (*downstream*). Finalmente, el producto purificado debe ser formulado adecuadamente para no perder actividad biológica antes de ser administrado en pacientes¹⁴.

3.1. Biofármacos producidos por microorganismos

El uso de biomedicamentos en salud humana data del siglo XIX, con el uso de la conocida antitoxina diftérica. Dicha práctica consistía básicamente en el uso de inmunoglobulinas extraídas del suero de animales inmunizados, que reconocían y neutralizaban la toxina. Este método se ha utilizado tradicionalmente durante décadas para combatir el envenenamiento por serpientes, escorpiones y avispas. Sin embargo, el uso de anticuerpos de origen no humano, puede causar graves reacciones de hipersensibilidad en el paciente. Ya en el siglo XX, fue muy útil el empleo de moléculas procedentes de fuentes animales, como la insulina, la hormona del crecimiento (GH) o el glucagón, aunque el descubrimiento de las enfermedades priónicas relacionadas con la administración de la hormona del crecimiento, reveló otro potencial riesgo asociado con proteínas animales no humanas. Este hecho reforzó la necesidad de producir biofármacos proteicos a partir de otras fuentes más seguras, y aquí es donde los microorganismos y la tecnología del ADN recombinante, han jugado un papel especial en los últimos cuarenta años.

¹⁴ JOZALA *et al.* (2016) y MATAR (2008).

El uso de células microbianas recombinantes ha permitido la producción a gran escala de un gran número de productos de interés farmacéutico (hormonas, anticoagulantes, proteínas de alto valor, anticuerpos y antígenos, interferones o interleucinas, entre otros). Los principales microorganismos explotados como «biofábricas» son la especie bacteriana *Escherichia coli*, seguida de la levadura *Saccharomyces cerevisiae*¹⁵.

Aproximadamente el 30 % de las proteínas recombinantes disponibles comercialmente actualmente se producen en sistemas procariotas. Hoy en día es posible sintetizar cerca de 2.000 productos en *E. coli* (bioproductos no nativos), de los cuales 279 tienen aplicaciones comerciales. No solo esta especie, sino también algunas cepas modificadas de *Staphylococcus carnosus*, *Corynebacterium glutamicum*, *Bacillus subtilis* y *Lactococcus lactis*, por ejemplo, se han utilizado en la síntesis biológica de calcitonina, aminoácidos (glutamato y lisina) o proinsulina, entre otros¹⁶.

Por otro lado, además de la levadura *S. cerevisiae*, la utilización de hongos filamentosos como fábricas eucariotas de biofármacos, justifica el potencial de este grupo microbiano para ser utilizado con dicha finalidad. En particular, el aislamiento e identificación de hongos endófitos productores de taxol, un fármaco antineoplásico, ha avanzado significativamente en las últimas décadas. Se ha podido sobreproducir taxol a partir de algunas cepas de *Fusarium oxysporum*, *Aspergillus niger* y *Taxomyces andreanae*, entre otras. También se ha avanzado en la producción de determinadas enzimas extracelulares a partir de hongos filamentosos, como es el caso de la β -D-galactosidasa, producida por algunas cepas de *Aspergillus foetidus*, responsable de la catálisis de lactosa a glucosa y galactosa, y que ha sido fundamental en el tratamiento de la intolerancia a la lactosa, así como en el desarrollo de alimentos funcionales, o como aditivo en productos lácteos fermentados, panes y bebidas.

Otros biofármacos de origen fúngico que merecen especial atención son la enzima asparraginas, producida por algunas cepas de *Aspergillus terreus*, muy útil en el tratamiento de determinados tipos de linfoma, o determinadas proteasas con actividad colagenolítica producidas por cepas de *A. niger*, así como la producción de interleucinas a partir de cepas recombinantes de *A. nidulans*.

3.2. El mercado de los biofármacos

La producción de proteínas recombinantes es una de las aportaciones más importantes de la biotecnología moderna, lo que ha supuesto además un enorme impacto económico en el sector de la salud humana. De hecho, se estima que en los próximos diez años, más del 50 % del mercado de los biofármacos podría estar dedicado a la obtención de proteínas recombinantes.

¹⁵ JOZALA *et al.* (2016) y VITORINO y BESSA (2017).

¹⁶ JOZALA *et al.* (2016) y VITORINO y BESSA (2017).

Las ventas actuales en el mercado de los biofármacos recombinantes de origen microbiano superan los 50.000 millones de dólares, lo que representa un tercio de las ventas totales de productos biofarmacéuticos.

En el año 2015, al menos diez fármacos de origen biotecnológico figuraban ya entre los veinticinco medicamentos más vendidos. Cuatro de ellos eran producidos por microorganismos, en concreto por algunas cepas de las especies *E. coli*, *Streptococcus pneumoniae* y *Corynebacterium diphtheriae*, alcanzando un volumen de ventas en torno a los 22.000 millones de dólares¹⁷.

4. Los microorganismos en la industria

Las aplicaciones de los microorganismos y sus productos en el ámbito industrial abarcan casi todos los sectores. En este apartado nos centraremos en tres tipos de productos que presentan un amplio número de aplicaciones: las enzimas microbianas como elementos catalizadores de diversos procesos, los ácidos orgánicos y biopolímeros por su aplicación emergente en química verde y en producción de nuevos materiales, y la producción de bioenergía y biocombustibles, que contribuirá a la demanda energética renovable actual. También se describe el concepto de biorefinería como elemento integrador de las nuevas tendencias en los procesos industriales y se destacan algunos aspectos relevantes sobre el mercado de dichos productos microbianos.

4.1. Enzimas microbianas

Diversas bacterias y hongos producen enzimas que presentan numerosas aplicaciones en áreas tales como agricultura, industria química, agroalimentaria, textil, farmacéutica, papelera, analítica, detergentes, cosmética y en control de la contaminación. Entre las enzimas actualmente comercializadas, el 50 % son producidas por hongos y el 35 % por bacterias. El número de enzimas microbianas descritas asciende a unas 4000 y los microorganismos productores son muy diversos, destacando por volumen actual de producción la bacteria *Bacillus subtilis* y el hongo *Aspergillus oryzae*¹⁸.

Alrededor de 150 procesos industriales emplean enzimas microbianas y unos 500 productos industriales se fabrican mediante su uso. La industria de procesado de alimentos y bebidas representa el principal campo de aplicación actual, seguida de la producción de detergentes, pero la demanda aumentará como consecuencia de la búsqueda de soluciones sostenibles en procesos de transformación establecidos y a la creación de nuevos procesos y productos. A modo de ejemplo, en la Tabla 3 se muestran las principales enzimas empleadas por diversas industrias.

¹⁷ JOZALA *et al.* (2016).

¹⁸ PATEL *et al.* (2017).

Tabla 3. Principales enzimas microbianas con aplicación industrial

Enzima	Microorganismo productor	Aplicación
Amilasa	<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> <i>Bacillus licheniformis</i> <i>Aspergillus oryzae</i> <i>Aspergillus niger</i> <i>Rhizopus</i>	Germinación de cereales en cervecería
		Preparación de alimentos infantiles y cereales de desayuno
		Producción de jarabe de maíz y glucosa
		Eliminación del almidón y clarificación para aumentar el sabor
		Tratamiento de frutas y zumos para eliminar el almidón de la pectina
		Preparación de productos de panadería
		Control de consistencia de sopas
		Modificación del almidón para recubrimiento de papel
		Desaprestado de tejidos en la industria textil
		Fabricación de detergentes
Preparación de complementos digestivos en clínica y farmacia		
Proteasa	<i>Bacillus licheniformis</i> <i>Bacillus spp.</i> <i>Aspergillus spp.</i>	Tratamiento de la cerveza
		Condimento en la industria alimentaria
		Hidrólisis de la proteína de la leche
		Preparación de leche evaporada y productos de panadería
		Tratamiento de la carne
		Recuperación de plata de films de fotografía
		Detergentes y quitamanchas
		Preparación de complementos digestivos en clínica y farmacia
Preparación del cuero		
Glucosa oxidasa	<i>A. niger</i> <i>Penicillium spp.</i>	Eliminación de oxígeno en alimentos
		Pruebas para diagnóstico de diabetes
Pectinasas	<i>Aspergillus niger</i>	Fabricación de dentífricos
		Tratamiento de granos de café
		Clarificación, filtración y condensación de frutas y zumos
Lactasa	<i>Kluyveromyces</i>	Prensado, clarificación y filtrado del vino
		Preparación de concentrados lácteos y helados
Celulasa	<i>Clostridium</i> <i>Cellulomonas</i> <i>Thermomonospora</i> <i>Trichoderma</i>	Producción de leche sin lactosa
		Desteñido de papeles para reciclado
		Desteñido de prendas vaqueras
Lipasa	<i>Rhizopus spp.</i> <i>Aspergillus</i> <i>Penicillium</i> <i>Geotrichum</i>	Preparación de detergentes
		Limpieza de lentes de contacto
		Detergentes desengrasantes
Fitasa	<i>Aspergillus spp.</i>	Maduración del queso
		Liberación de fosfato para alimentación animal
Hemicelulasas	<i>Trichoderma</i> <i>Penicillium</i> <i>Aspergillus</i>	Preparación de concentrados de café
		Hidrólisis de la celulosa de biomasa para producir glucosa (bioetanol)
		Bioblanqueo de la pasta de papel en la industria papelera
Catalasa	<i>Aspergillus spp.</i>	Aumento de la digestibilidad en piensos animales
		Biolimpieza en la industria textil

Fuente: Liu y Kokare (2017).

Las enzimas empleadas para la fabricación de piensos se incorporan para incrementar su digestibilidad y reducir el impacto ambiental ocasionado por las heces animales. Las enzimas técnicas incluyen un amplio grupo de enzimas que se aplican en industrias tan diversas como la química, textil, producción de cuero, papel y biocombustibles. Estas aplicaciones constituyen un campo emergente. En el futuro próximo y como consecuencia de las nuevas tendencias en el ámbito de la bioeconomía sostenible, se espera un incremento notable de las enzimas en aplicaciones tales como la producción de papel, biocombustibles, caucho, fotografía, detergentes biológicos, limpiadores de lentes de contacto y biología molecular.

4.1. Biocompuestos y biopolímeros: nuevos materiales

Los ácidos orgánicos son compuestos base para la síntesis química y sirven para la producción de polímeros (bioplásticos y otros biopolímeros), entre otros. La mayoría de ellos se obtienen a partir del petróleo, pero la tendencia actual es sustituirlos por otros procedentes de recursos renovables. Actualmente, los ácidos orgánicos más importantes en cuanto a volumen de producción son los ácidos acético, láctico, itacónico, succínico y cítrico. Los microorganismos y sus enzimas, se han constituido como elementos clave en la producción de estos compuestos y de otros que permiten la creación de nuevos procesos de síntesis¹⁹. En la Tabla 4 se muestran las alternativas biotecnológicas para la producción de los ácidos orgánicos con mayor potencial así como sus principales aplicaciones.

Entre los biopolímeros empleados como plásticos destacan los polihidroxialcanoatos (PHA) que son polímeros sintetizados y acumulados como material de reserva por los microorganismos procariontes. El primer PHA se descubrió en 1926 en *Bacillus megaterium* y posteriormente se ha detectado en más de noventa especies de bacterias, incluyendo *Cupriavidus necator*, que tiene actualmente una elevada proyección. Estos polímeros son biodegradables y se emplean para la fabricación de envases, productos de uso doméstico, cosmética y material de medicina. También se pueden fabricar a partir del ácido poliláctico (PLA), un material biodegradable que se obtiene a partir del ácido láctico producido por bacterias mediante fermentación de azúcares (Tabla 4). Adicionalmente existen otras alternativas biotecnológicas para la obtención de materiales. Así, por ejemplo la compañía BASF ha producido un intermediario de síntesis del nylon empleando *Corynebacterium glutamicum*. Por su parte, las compañías DuPont y Goodyear están trabajando con cepas de *E. coli* modificadas genéticamente que son capaces de producir isopreno (bioisopreno), un intermediario químico empleado en la síntesis del caucho que se puede utilizar en la producción de neumáticos «verdes»²⁰.

¹⁹ SHELDON (2014).

²⁰ LEWANDOWSKI (2018).

Tabla 4. Producción microbiana de ácidos orgánicos relevantes en producción de nuevos materiales

Compuesto	Producción biotecnológica	Aplicaciones		
		Industria	Propiedades	Producto
Ácido acético	Producción de vinagre con <i>Acetobacter</i> o <i>Gluconobacter</i> (oxidación incompleta del etanol a acetato)	Alimentaria	Acidulante y preservativo	Aditivo alimentario (E260)
		Química y materiales	Síntesis de Acetato de polivinilo (PVAC)	Pinturas y barnices
			Síntesis de Acetato de celulosa	Filtros de cigarrillos, films y otros productos plásticos.
Ácido láctico	Fermentación de carbohidratos (glucosa y otros) por <i>Lactobacillus</i> o <i>Saccharomyces</i> (modificado genéticamente)	Alimentaria, cosmética, farmacéutica	Regulador del pH, agente antimicrobiano, saborizante, humectante y agente para limpieza	Múltiples
		Química y materiales	Síntesis de polímeros: Ácido poliláctico (PLA)	Plástico biodegradable sustituto de plásticos convencionales
Ácido succínico	Fermentación de glucosa por <i>E. coli</i> recombinante, <i>Basfia succiniciproducens</i> y <i>S. cerevisiae</i> recombinante	Industria alimentaria	Aditivo y suplemento alimentario, regulador de la acidez y saborizante	Aditivo alimentario (E 363)
		Química y materiales	Síntesis de polímeros (resinas) y uso directo	Resinas, plastificantes, flexibilizantes y solventes de pinturas
Ácido itacónico	Cultivo de <i>Aspergillus terreus</i> o <i>A. itaconicus</i> en glucosa o melazas	Química y materiales	Síntesis de polímeros	Polímeros superabsorbentes, Resinas, plásticos, fibras sintéticas. Potencial reemplazo de metacrilato
Ácido adípico	<i>E. coli</i> <i>S. cerevisiae</i>	Química y materiales	Síntesis de polímeros	Nylon

Fuente: Lewandowski (2018) y Pleissner *et al.* (2017).

4.1. Bioenergía y biocombustibles

El término biocombustible se aplica a combustibles renovables obtenidos a partir de biomasa mediante procesos químicos o bioquímicos. El biocombustible microbiano de mayor proyección es el bioetanol, pero a él se unen otros biocombustibles líquidos como el butanol y el 2,3 butanodiol. Adicionalmente otros productos microbianos tales como el metano, el hidrógeno o el biohitano (mezcla de metano e hidrógeno) constituyen fuentes notables de bioenergía. Finalmente, los microorganismos capaces de transferir electrones extracelularmente se incorporan en los sistemas denominados «Microbial Fuel Cells» (MFC) que permiten la producción directa de electricidad (bioelectrogénesis).

El bioetanol de segunda generación se produce en dos fases. La primera está orientada a liberar los azúcares contenidos en la biomasa. En la segunda dichos azúcares son fermentados por microorganismos productores. En el caso del bioetanol se emplea la levadura *S. cerevisiae* y otros microorganismos como *Zymomonas mobilis* capaces de fermentar un mayor rango de

carbohidratos. Este modelo se aplica también para la producción de biobutanol mediante fermentación ABE (acetona-butano-etanol) por especies del género *Clostridium*.

La producción biológica de metano se realiza mediante la digestión anaerobia de residuos orgánicos que genera un gas rico en metano denominado biogás. Este gas puede utilizarse como combustible para generar energía eléctrica, mecánica o calorífica. Adicionalmente se obtiene una fracción sólida que puede ser utilizada como sustrato orgánico en agricultura, preferentemente tras ser sometida a compostaje. La digestión anaerobia está actualmente implantada como método de tratamiento y aprovechamiento energético de diversos residuos. Modulando sus condiciones de operación es posible también producir hidrógeno o biohitano, que presenta unas mejores prestaciones para automoción que cada uno de sus dos componentes. Otros procesos microbianos para la producción de hidrógeno incluyen la fotofermentación y la biofotólisis²¹.

La producción de bioelectricidad es realizada en reactores MFC que contienen dos cámaras con electrodos, un ánodo y un cátodo, separadas por una membrana. Estas MFC se alimentan con residuos orgánicos (aguas residuales urbanas o industriales) y permiten el crecimiento de microorganismos electrogénicos. Estos sistemas pueden emplearse como acumuladores energéticos (pilas biológicas), para el tratamiento de aguas, la recuperación de metales valiosos y la producción de electricidad²².

4.3. Biorefinerías

El término biorefinería alude a procesos sostenibles de transformación de la biomasa, generalmente en cascada, que generan diversos productos comercializables y energía. La secuencia en este concepto implica el empleo en primera instancia de materias primas procedentes de plantas, animales o pesca para la producción de alimentos y productos farmacéuticos de forma segura. Los residuos o subproductos generados en dichas transformaciones son empleados para la alimentación de ganado, la producción de nuevos materiales o la obtención de productos biotecnológicos (microorganismos, enzimas, etc.) y compuestos químicos. Finalmente, los residuos procedentes de tales transformaciones o no susceptibles a las mismas se emplean para la producción de energía y compost. En una biorefinería los microorganismos y sus productos y transformaciones constituyen una de las piedras angulares. Una biorefinería puede dar lugar a biocombustibles (bioetanol, hidrógeno, metano o biohitano), compuestos químicos de base (azúcares, ácidos orgánicos, bioetanol, biobutanol), bioelectricidad, biomasa microbiana, biopolímeros, biofertilizantes, alimento animal, a la vez que se minimiza la generación de residuos. La implementación de estos modelos contribuirá al desarrollo de una bioeconomía basada en el uso sostenible de recursos^{23, 24}.

²¹ DAHIYA *et al.* (2017).

²² NEALSON (2017).

²³ LEWANDOWSKI (2018).

²⁴ O'CALLAGHAN (2016).

4.1. Mercado de productos microbianos industriales

El mercado global de enzimas alcanzó los 8.000 millones de dólares en el año 2015 y experimenta un continuo aumento debido a su creciente número de aplicaciones en la producción de detergentes, productos farmacéuticos y alimentos y bebidas²⁵. Actualmente, se comercializan aproximadamente 200 tipos de enzimas de las 4000 conocidas, pero solo unas 20 se producen a escala verdaderamente industrial. Alrededor del 75 % del total de enzimas es producido por tres compañías: Novozymes, DuPont y Roche²⁶.

El mercado de los biopolímeros está dominado por el PLA. Su producción mundial se ha duplicado entre los años 2011 y 2015 alcanzando las 400.000 t por año. El ácido succínico se encuentra entre los 12 compuestos químicos de base con mayor proyección, la producción total anual es de 30.000 a 50.000 t y se espera que su mercado aumente para 2020 a 654.000 t²⁷.

En el ámbito de las biorefinerías, en la Unión Europea existe potencial para valorizar alrededor de 100 Mt de biomasa sin impactar adversamente el medioambiente o la producción de alimentos. El aprovechamiento de dicha biomasa en biorefinerías conduciría a reducir las emisiones de CO₂ en más de 60 Mt, cantidad equivalente a las emisiones anuales de ciudades europeas como París o Londres²⁸.

5. Aplicaciones de los microorganismos en el medioambiente

La aplicación de la biotecnología para la protección del medioambiente es intrínseca a la filosofía de la bioeconomía sostenible. Los procesos biotecnológicos son de forma inherente más limpios que los petroquímicos, se desarrollan en un ambiente controlado y tienen el potencial de producir mayores rendimientos de productos específicos con menor demanda energética y mínima generación de residuos. Como consecuencia de todo ello tienen un reducido impacto ambiental²⁹. En el contexto de la protección del medioambiente también deben considerarse otros procesos mediados por microorganismos que se enmarcan como elementos de la bioeconomía. Tal es el caso del uso de microorganismos en descontaminación ambiental (suelo, agua y aire) o en el secuestro de CO₂ para mitigar el cambio climático.

5.1. Biodescontaminación

La biodescontaminación o biorremediación consiste en el uso de plantas, microorganismos o sus productos para limpiar entornos contaminados (agua, gases o sólidos). A diferencia de

²⁵ PELLIS *et al.* (2018).

²⁶ LIU y KOKARE (2017).

²⁷ PLEISSNER *et al.* (2017).

²⁸ DUPONT-INGLIS y BORG (2018).

²⁹ LOKKO *et al.* (2018).

otros productos o servicios resultantes de la industria biotecnológica, su éxito reside más en el cumplimiento de normativas que en el beneficio económico de su producción.

Para la descontaminación de suelos se emplean microorganismos para la biodegradación de hidrocarburos, metales pesados, residuos de fitosanitarios y otros contaminantes ambientales. Estos procesos se llevan a cabo en tierras o materiales contaminados bien estimulando la acción de los microorganismos presentes en los mismos (bioestimulación) mediante incorporación de materia orgánica u operaciones de aireación, o por incorporación de microorganismos con reconocida capacidad para ello (bioaumentación) proporcionados por la industria biotecnológica.

Aunque se puede considerar que la descontaminación de suelos y efluentes industriales permite el retorno de recursos y servicios, la implementación de procesos que permitan recuperar los recursos contenidos en efluentes contaminados conducirá a ofrecer una nueva dimensión en el ámbito de la bioeconomía para estos flujos. Así por ejemplo, el tratamiento convencional de aguas residuales ha estado orientado a eliminar su carga contaminante. Este enfoque está cambiando de modo que se han propuesto nuevos modelos para recuperar los recursos contenidos en dichos efluentes, incluyendo procesos de extracción biológica de componentes tales como nitrógeno y fósforo para su uso posterior en agricultura, así como el tratamiento de materiales sólidos de depuradora (fangos) mediante digestión anaerobia para producción de biogás, y la producción de compost a partir de los sólidos obtenidos tras dicho proceso. De este modo las depuradoras podrán en un futuro ser consideradas como suministradoras de energía, productos con valor y agua descontaminada³⁰.

5.2. Mitigación del cambio climático: secuestro de CO₂

El cambio climático sin precedentes influenciado por las elevadas concentraciones de, entre otros gases, CO₂, ha estimulado la búsqueda de alternativas para el secuestro de este gas. En este sentido, se han desarrollado diversas estrategias que proponen el uso de microorganismos que asimilan CO₂ y sintetizan productos con valor añadido que pueden estimular la bioeconomía circular. Aunque las plantas y las algas son bien conocidas para tal actividad, el CO₂ puede ser también asimilado por bacterias fotosintéticas aerobias (cianobacterias) y anaerobias, así como por bacterias no fotosintéticas. Estos microorganismos pueden ser modificados genéticamente para incrementar su capacidad para fijar CO₂, lo que unido al uso de efluentes industriales para el cultivo de los microorganismos proporcionará una nueva dimensión a este modelo que podrá ser explotado en el contexto de las biorefinerías³¹.

³⁰ O'CALLAGHAN (2016).

³¹ MOHAN *et al.* (2016).

Referencias bibliográficas

- AHMAD, I.; PICHTEL, J. y HAYAT, S. (2008): *Plant-Bacteria Interactions: Strategies and Techniques to Promote Plant Growth*, John Wiley & Sons.
- ALBRECHT, K. y ETTLING, S. (2014): «Bioeconomy strategies across the globe»; en *Rural 21: The International Journal for Rural Development* (48-3); pp. 10-13.
- DAHIYA, S.; KUMAR, A. N.; SRAVAN, J. S.; CHATTERJEE, S.; SARKAR, O. y MOHAN, S. V. (2018): «Food waste biorefinery: Sustainable strategy for circular bioeconomy»; en *Bioresource Technology* (248); pp. 2-12.
- DU JARDIN, P. (2015): «Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation»; en *Scientia Horticulturae* (196); pp. 3-14.
- DUPONT-INGLIS, J. y BORG, A. (2018): «Destination bioeconomy-The path towards a smarter, more sustainable future»; en *New Biotechnology* (40); pp. 140-143.
- EVENS, R. P. y KAITIN, K. I. (2014): «The biotechnology innovation machine: a source of intelligent biopharmaceuticals for the pharm industry - mapping biotechnology's success»; en *Clinical Pharmacology and Therapeutics* (95); pp. 528-532.
- GOUVEIA, L.; BATISTA, A. P.; SOUSA, I. *et al.* (2008): «Microalgae in novel food products»; en PAPADOPOULOS, K. N., dir.: *Food chemistry research developments*. EEUU, Nueva York. Nova Science Publishers.
- JOZALA, A. F.; GERALDES, D. C.; TUNDISI, L. L. *et al.* (2016): «Biopharmaceuticals from microorganisms: from production to purification»; en *Brazilian Journal of Microbiology* (47); pp. 51-63.
- KLOEPPER, J. W. (1994): «Plant growth-promoting rhizobacteria»; en Okon, Y., dir.: *Azospirillum/Plant Associations*. Boca Ratón, CRC Press; pp. 137-166.
- KRUGER, A.; SCHAFERS, C.; SCHRODER, C. *et al.* (2018): «Towards a sustainable biobased industry-Highlighting the impact of extremophiles»; en *New biotechnology* (40); pp. 144-153.
- LEWANDOWSKI I. (2018): «Processing of Biobased Resources»; en LEWANDOWSKI I. ed.: *Bioeconomy*. Springer, Cham; pp. 75-94).
- LIU, X. y KOKARE, C. (2017): «Microbial Enzymes of Use in Industry»; en Goutam, B. ed.: *Biotechnology of Microbial Enzymes*. Academic Press; Cap. 11, pp. 267-298.
- LOKKO, Y.; HEIJDE, M. y SCHEBESTA, K. (2018): «Biotechnology and the bioeconomy - Towards inclusive and sustainable industrial development»; en *New Biotechnology* (40, Part A); pp. 5-10.
- MARKETS AND MARKETS. (2014a): «Global Biofertilizer Markets by Types, Application and Geography - Trends and Forecast»; disponible en MarketResearch.com.

- MARKETS AND MARKETS (2014b): «Biopesticides Market by Active Ingredient, by Types, by Application, by Formulation, by Crop Type and by Geography»; disponible en: MarketResearch.com.
- MATAR, P. (2008): «Biofármacos y biosimilares - Riesgos y desafíos en los nuevos desarrollos»; en *Hematología* (12); pp. 57-59.
- MOHAN, S. V.; MODESTRA, J. A.; AMULYA, K.; BUTTI, S. K. y VELVIZHI, G. (2016): «A circular bioeconomy with biobased products from CO₂ sequestration»; en *Trends in Biotechnology* (34); pp. 506-519.
- NEALSON, K. H. (2017): «Bioelectricity (electromicrobiology) and sustainability»; en *Microbial Biotechnology* (10); pp. 1114-1119.
- O'CALLAGHAN, K. (2016): «Technologies for the utilisation of biogenic waste in the bioeconomy»; en *Food Chemistry* (198); pp. 2-11.
- PAL, K. K. y MCSPADDEN GARDENER, B. (2006): «Biological Control of Plant Pathogens»; en *The Plant Health Instructor*. DOI 10.1094/PHI-A-2006-1117-02.
- PATEL, A. K.; SINGHANIA, R. R. y PANDEY, A. (2017): «Production, purification, and application of microbial enzymes»; en GOUTAM, B. ed.: *Biotechnology of Microbial Enzymes*. Academic Press; cap. 2, pp. 13-41.
- PELLIS, A.; CANTONE, S.; EBERT, C. y GARDOSI, L. (2018): «Evolving biocatalysis to meet bioeconomy challenges and opportunities»; en *New Biootechnology* (4); pp. 154-169.
- PLEISSNER, D.; DIETZ, D.; VAN DUUREN, J. B. J. H.; WITTMANN, C.; YANG, X.; LIN, C. S. K. y VENUS, J. (2017): «Biotechnological Production of Organic Acids from Renewable Resources»; en *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*. Berlin, Heidelberg, Springer.
- REGLAMENTO (UE) 2017/1432 DE LA COMISIÓN, de 7 de agosto de 2017, relativo a la comercialización de productos fitosanitarios.
- SHELDON, R. A. (2014): «Green and sustainable manufacture of chemicals from biomass: state of the art»; en *Green Chemistry* (16); pp. 950-963.
- THEROND, O.; DURU, M.; ROGER-ESTRADE, J. *et al.* (2017): «A new analytical framework of farming system and agriculture model diversities. A review»; en *Agronomy for Sustainable Development* (37); article 21; DOI 10.1007/s13593-017-0429-7.
- VITORINO, L. C. y BESSA, L. A. (2017): «Technological Microbiology: development and applications»; en *Frontiers of Microbiology* (8); article 827.
- VON BRAUN, J. (2014): «Bioeconomy and sustainable development-dimensions»; en *Rural 21: The International Journal for Rural Development* (48-3); pp. 6-9.



CONTRIBUCIÓN DE LAS MICROALGAS AL DESARROLLO DE LA BIOECONOMÍA

Francisco Gabriel Acién Fernández, José María Fernández Sevilla y Emilio Molina Grima
Universidad de Almería

Resumen

Las microalgas fueron la base de la vida en el planeta, y han sido utilizadas durante siglos como fuente de alimento en sistemas artesanales. Sin embargo, solo recientemente se han desarrollado procesos industriales para su producción. Ello se ha debido a una mejora en el conocimiento de estos microorganismos, los factores que determinan su crecimiento, así como de los fotobiorreactores necesarios para su producción. Las principales aplicaciones de las microalgas se relacionan con el consumo humano directo, pero en los últimos años han surgido un amplio abanico de nuevas aplicaciones relacionadas con la mejora de la sostenibilidad de algunos procesos como la producción agrícola y ganadera, el tratamiento de aguas residuales e incluso la producción de biocombustibles. De esta manera la utilización de microalgas a gran escala se considera una contribución a la revolución verde en la sostenibilidad de la humanidad. En este capítulo se analizan las principales aplicaciones de las microalgas y como estos microorganismos pueden contribuir al desarrollo de la bioeconomía, a la mejora de la sostenibilidad de las actividades económicas. Se repasan las últimas mejoras de tecnologías y aplicaciones, además de los obstáculos todavía existentes para la explotación industrial de estos microorganismos.

Abstract

Microalgae were the basis of life on the planet, and for centuries have been used as a food source in artisanal systems. However, only recently have industrial processes been developed to produce them. This is possible thanks to improved knowledge of these microorganisms, the factors that determine their growth, and the photobioreactors necessary for their production. The main applications of microalgae are related to direct human consumption, but recent years have seen the emergence of a wide range of new applications related to improving the sustainability of certain processes, such as agricultural and livestock production, waste water treatment, and even biofuel production. The large-scale use of microalgae is therefore considered to contribute to the green revolution for the sustainability of humankind. This chapter analyses the principal applications of microalgae and how these microorganisms can contribute to developing the bioeconomy, improving the sustainability of economic activities. The latest improvements in technology and applications are reviewed, as are the remaining obstacles in the industrial exploitation of these microorganisms.

1. Introducción

Las microalgas y cianobacterias son aquellos microorganismos capaces de realizar la fotosíntesis oxigénica. Aunque hay más de 30.000 especies catalogadas, a día de hoy solo se han estudiado menos de 100, y no más de 10 se encuentran actualmente en explotación comercial (Spolaore *et al.*, 2006). Estos microorganismos fueron los responsables de las mayores transformaciones en el planeta, como la producción de la mayor parte del oxígeno de la atmósfera, además de la oxidación de Fe^{2+} y $S^{=}$, lo que permitió la posterior explosión de vida en el planeta (Lodeyro *et al.*, 2012). Además, estos microorganismos fueron en el pasado los responsables

de la reducción de la concentración de CO₂ en la atmósfera, transformándolo en rocas calcáreas y diatomeas, además de ser el origen de la mayor parte de los combustibles fósiles que hoy utilizamos. Actualmente, las microalgas y cianobacterias son los mayores responsables de la producción de oxígeno y captura de energía del sol en todo el planeta, siendo la base de la cadena trófica en los sistemas acuáticos. Además, las microalgas y cianobacterias son los principales responsables de la transformación de CO₂ en biomasa en el planeta, contribuyendo de esta forma a reducir el efecto del calentamiento global (Benemann, 2003). Así pues, estos microorganismos son un pilar fundamental en la sostenibilidad de la vida en el planeta.

La contribución de las microalgas a la bioeconomía se relaciona con la potencialidad que poseen estos microorganismos para mejorar la sostenibilidad de diversos procesos, y por ende para hacer un uso más racional de los recursos que permita un aumento de la sostenibilidad de la actividad humana y sus actividades económicas relacionadas. Esta potencialidad se basa en la diversidad de especies y ambientes en que estos microorganismos pueden desarrollarse, así como del amplio abanico de productos y servicios que a partir de ellas se pueden obtener. Las microalgas son capaces de crecer en muy diferentes ambientes, desde zonas cálidas en los trópicos y desiertos, hasta zonas frías en los polos y altas montañas. Algunas de las principales ventajas de estos microorganismos son que no requieren tierras fértiles o agua utilizable en agricultura, creciendo incluso en aguas contaminadas, además de que hacen un uso más eficiente de la energía solar que cualquier otro organismo en el planeta. Es por ello por lo que estos microorganismos se han estado utilizando durante siglos de forma artesanal. Así, la cianobacteria *Spirulina* ha sido utilizada en la zona de lago Texcoco en México, al igual que en los alrededores del lago Chad en África, donde crece de forma natural y ha constituido la base de la alimentación de diversas culturas por siglos (Abdulqader *et al.*, 2000). Otras cianobacterias se han utilizado y continúan hoy en día siendo utilizadas también en la agricultura, para fijar el nitrógeno atmosférico y aumentar así la fertilidad del suelo en la producción de arroz entre otros cultivos. La aplicación más relevante de las microalgas, y que generalmente se olvida, es la producción de alimento primario en los sistemas acuáticos utilizados en acuicultura, donde millones toneladas de peces y moluscos se producen sobre la base del fitoplancton que se genera de forma natural en aguas continentales y océanos (Muller-Feuga, 2013).

La elevada potencialidad de estos microorganismos ha dado lugar al desarrollo de diferentes procesos industriales. Dichos procesos se fundamentan en que las microalgas, además de tener una alta capacidad de producción, producen una biomasa de elevado interés por su composición, con proteínas ricas en aminoácidos esenciales y lípidos de alto valor ricos en ácidos grasos polinsaturados. Los primeros trabajos sobre la producción de microalgas fueron publicados en 1950 empleando fotobiorreactores tubulares para la producción de *Chlorella* en reactores de 50 l. Más tarde se desarrolló la producción de microalgas en reactores abiertos tipo *raceway*, incluso acoplada al tratamiento de aguas residuales. Los reactores *raceway* se han aplicado desde los años 70 y 80 para producir *Spirulina* como alimento a escala comercial, además de *Dunaliella* como fuente de β-caroteno, entre otras. Aún hoy, estas son las especies y reactores más extendidos en todo el mundo, estimándose una producción mundial de biomasa de microalgas de alrededor de 20.000 t/año. Esta capacidad de producción es reducida

en comparación con otras biomásas o cultivos, pero aumenta más del 10 % anualmente (Benemann, 2013). Así, en los últimos veinte años se han incorporado otras cepas de microalgas a la producción comercial como *Haematococcus*, *Euglena*, y *Nannochloropsis* entre otras, para diversas aplicaciones relacionadas con la alimentación, cosmética y farmacia entre otras. Sin embargo, donde las microalgas han despertado mayor interés es en sus aplicaciones para la mejora de la sostenibilidad de la producción de alimentos por la agricultura y acuicultura (Muller-Feuga, 2000; Tilman *et al.*, 2011), así como en sus aplicaciones medioambientales, relacionadas con la captura de CO₂ de gases industriales, la producción de biocombustibles o el tratamiento de aguas contaminadas, ya sean aguas urbanas, ganaderas o industriales (Ación *et al.*, 2012; Ación *et al.*, 2016).

En este capítulo se resumen los principales factores que influyen en la producción de microalgas y las tecnologías que se utilizan a escala comercial en estos procesos. Así mismo, se analizan las tendencias futuras y como las microalgas contribuirán a la mejora de la sostenibilidad de algunos procesos para mostrar la importancia de esta «revolución verde».

2. Factores que influyen en la producción de microalgas

Las microalgas son fotosintéticamente equivalentes a las plantas pero con algunas diferencias: (i) son microscópicas ya que su tamaño varía entre 2 a 20 µm y generalmente se producen suspendidas en agua por lo que no requieren de suelos fértiles; (ii) su crecimiento es mucho más rápido que las plantas superiores con tiempos de duplicación inferior a 1 día; (iii) no tienen raíces o estructuras de gran tamaño y ende su eficiencia fotosintética es mucho mayor que las plantas superiores, aunque por ello también (iv) requieren el suministro de grandes cantidades de nutrientes, principalmente CO₂, N y P para maximizar su productividad. Sobre la base de estas diferencias se han desarrollado distintos sistemas de producción de microalgas que intentan satisfacer las necesidades de estos microorganismos y alcanzar su capacidad máxima de producción a un menor coste.

2.1. Disponibilidad de luz

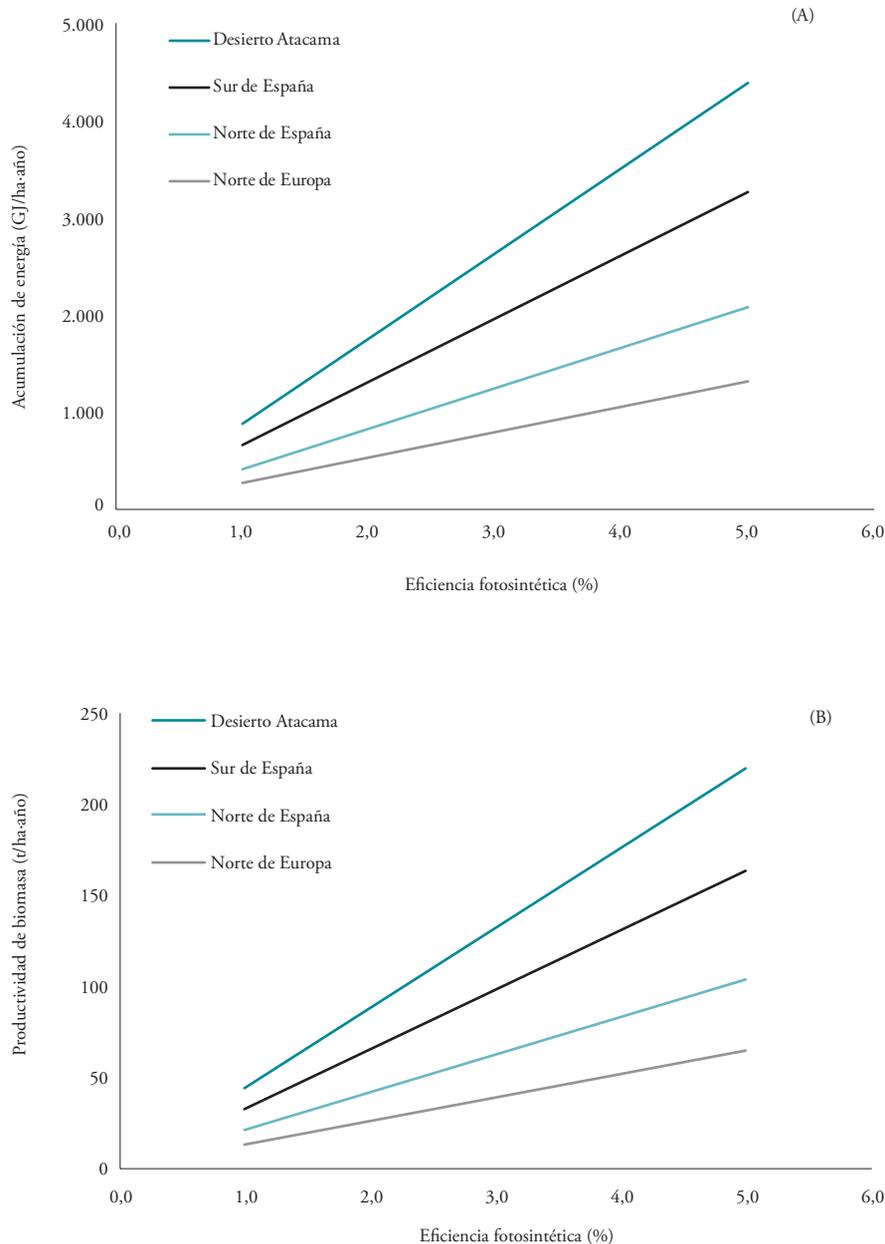
Las microalgas se producen en fotobiorreactores, que no son más que biorreactores expuestos a la luz solar de forma que esta penetra en su interior y constituye la fuente de energía para la producción de biomasa o productos. En este sentido, el principal factor que determina la producción de microalgas es la luz. De todo el espectro solar, el aparato fotosintético utiliza exclusivamente la radiación en longitudes de onda de 400 a 700 nm (radiación fotosintéticamente activa, PAR de sus siglas en inglés), y se satura cuando la radiación es superior a 100-200 µE/m²·s. Debido a que la radiación solar alcanza valores más de diez veces superiores a este valor de saturación, de hasta 3.000 µE/m²·s, el aparato fotosintético de las microalgas

puede estar sobresaturado o incluso llegar a fotoinhibirse cuando se expone a la radiación solar directa. Para solucionar este problema y mejorar el rendimiento de los cultivos de microalgas en condiciones externas, la radiación solar debe ser «distribuida» entre el mayor número de células o de superficie como sea posible. Así, se han propuesto diferentes diseños de fotobiorreactores que intentan aumentar la superficie iluminada por unidad de superficie de terreno o unidad de volumen de cultivo.

Para cualquier diseño de fotobiorreactor, la luz que incide en la superficie del reactor se atenúa a lo largo del cultivo en función de la profundidad del cultivo, la concentración de biomasa y coeficiente de extinción de la misma. Esta atenuación hace que existan gradientes de luz, es decir las células están expuestas a diferentes condiciones de luz según su posición en el reactor la cual viene determinada además por la mezcla en el mismo. Para maximizar la irradiancia a la que las células de microalgas son expuestas en un cultivo sería recomendable utilizar reactores de poca profundidad con bajas concentraciones de biomasa, pero en estas condiciones la capacidad de producción sería muy baja por haber pocas células, mientras que si la profundidad del cultivo es muy elevada y hay una alta concentración de biomasa habría muy poca luz por célula y por ello también una muy baja productividad, por lo que es necesario encontrar una solución óptima. De esta forma el reto es optimizar el diseño del fotobiorreactor maximizando la captación de luz en su superficie, al tiempo que se optimiza la profundidad del cultivo para mantener la concentración de biomasa en valores óptimos.

En términos globales se puede resumir que, de toda la radiación solar que llega a nivel del suelo, el aparato fotosintético solo puede aprovechar una parte, habiéndose demostrado que las microalgas pueden lograr una eficiencia máxima fotosintética (PE) del 5 % de la radiación global. La radiación solar disponible es función de la localización geográfica considerada, y puede variar desde los valores más altos de 7,4 kWh/m² en el desierto de Atacama (Chile) hasta valores mínimos de 2,2 kWh/m² en el Norte de Europa, mientras que en España la radiación solar disponible varía de 3,5 kWh/m² a 5,5 kWh/m² entre el norte y sur. Esto significa que las microalgas son capaces de acumular hasta 5.000 GW/ha·año si se diseñan y operan sistemas eficientes capaces de alcanzar el 5 % PE, mientras que este valor se reduce a 400 GW/ha·año si se considera el 1 % PE, variando dichos valores en función de la disponibilidad de radiación solar en función de la localización seleccionada (Gráfico 1A). Teniendo en cuenta el calor de combustión de la biomasa de microalgas, de 20 MJ/kg, esto significa que la cantidad de biomasa que se puede producir por unidad de área anualmente está limitada por la disponibilidad de radiación solar en la ubicación seleccionada y la eficiencia fotosintética lograda en el sistema de producción utilizado. El Gráfico 1B muestra como los sistemas de microalgas pueden llegar a valores de productividad de hasta 250 t/ha·año si se logra un 5 % PE en zonas con alta disponibilidad de radiación solar, mientras que dicha productividad desciende a 20 t/ha·año en zonas con baja radiación solar si se alcanza solo el 1 % PE. En España los valores de productividad pueden variar entre 20 y 160 t/ha·año.

Gráfico 1. Variación de la acumulación de energía (A) y de la producción de biomasa de los cultivos de microalgas (B) en función de la localización geográfica que determina la disponibilidad de radiación solar y la eficiencia fotosintética alcanzada en el sistema de producción



En todo caso estos valores son muy superiores a los alcanzados en cultivos más tradicionales como maíz (12 t/ha-año), trigo (8 t/ha-año) o soja (6 t/ha-año) mostrando así que biomasa de microalgas es una alternativa realista a este tipo de cultivos. Esta gran capacidad de producción por unidad de superficie es uno de los motivos por los que estos microorganismos han sido considerados una alternativa real a cultivos energéticos convencionales para la producción de

biocombustibles (Chisti, 2007). Estos datos confirman que, si bien la disponibilidad de radiación solar es un factor importante en la producción de biomasa de microalgas, la optimización del sistema de producción utilizado y la eficiencia fotosintética final alcanzada son también muy relevantes en la capacidad de producción final de biomasa.

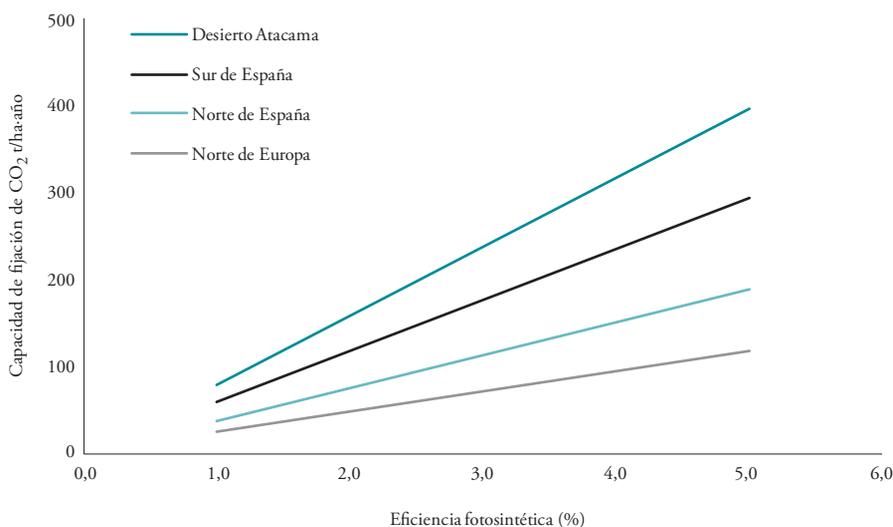
2.2. Requerimiento de nutrientes

La biomasa de microalgas se compone principalmente de carbono (45 %), nitrógeno (7 %) y fósforo (1 %), además de oxígeno e hidrógeno que se obtienen directamente del agua. Tanto carbono, como nitrógeno y fósforo, deben ser aportados externamente, siendo la cantidad necesaria de estos nutrientes directamente proporcional a la capacidad de producción de biomasa necesaria. El carbono puede suministrarse como carbonato o bicarbonato, pero se recomienda la utilización de CO_2 ya ello que permite al mismo tiempo controlar el pH de los cultivos y contribuir a la secuestación de CO_2 atmosférico. Se requieren hasta 1,8 kg de CO_2 para producir 1,0 kg de biomasa de microalgas, aunque este valor puede cambiar según la composición de la biomasa producida. El Gráfico 2 muestra como la capacidad de fijación de CO_2 de los cultivos de microalgas es una función directa de la disponibilidad de radiación solar, determinada por la localización geográfica seleccionada, y la eficiencia fotosintética en el sistema de producción. Se pueden alcanzar capacidades de fijación de CO_2 entre 80 y 400 $\text{tCO}_2/\text{ha}\cdot\text{año}$, para eficiencias fotosintéticas del 1 al 5 % respectivamente, en zonas con alta irradiancia como el desierto de Atacama, mientras que para zonas con baja disponibilidad de radiación solar como el Norte de Europa estos valores se reducen hasta 20 hasta 120 $\text{tCO}_2/\text{ha}\cdot\text{año}$ en el mismo rango de eficiencia fotosintética. En España los valores de capacidad de fijación de CO_2 pueden variar entre 30 y 300 $\text{tCO}_2/\text{ha}\cdot\text{año}$ según la localización y eficiencia fotosintética alcanzada. Como fuente de carbono puede utilizarse CO_2 puro, pero además se puede usar cualquier gas industrial que contenga CO_2 , por lo que se ha propuesto utilizar gases de combustión de centrales eléctricas, biogás procedente de la digestión anaerobia de residuos, o incluso gas de fermentación procedente de la producción de etanol, lo que permitiría producir la biomasa de microalgas al mismo tiempo que reducir las emisiones de CO_2 de estas industrias (Acien *et al.*, 2012). Sea cual sea la fuente de CO_2 utilizada se deben considerar dos aspectos importantes: (i) se deben emplear sistemas eficientes que sean capaces de transferir más del 90 % del CO_2 contenido en el gas utilizado al cultivo de microalgas; y (ii) es necesario asegurarse previamente que el gas no contiene sustancias tóxicas que pueden dañar el crecimiento de las microalgas (SO_x , NO_x) (Duarte-Santos *et al.*, 2016).

Relacionado con el suministro de CO_2 se encuentra la eliminación del oxígeno producido por la fotosíntesis, ya que ambos compuestos se consumen y generan en la misma proporción, pero en el caso del oxígeno si no se elimina se acumula en el sistema provocando efectos adversos. La mayoría de las microalgas se inhiben por oxígeno cuando la concentración de oxígeno disuelto es superior a 20 mg/l, por lo que resulta imprescindible instalar sistemas adecuados de eliminación de oxígeno para evitar estos fenómenos (Mendoza *et al.*, 2013). En general la

optimización de la capacidad de transferencia de materia es un factor clave en cualquier sistema de producción de microalgas (de Godos *et al.*, 2014b).

Gráfico 2. Variación de la capacidad de fijación de CO₂ con la disponibilidad de radiación solar en función de la eficiencia fotosintética alcanzada en el sistema de producción para diferentes ubicaciones geográficas



Después del carbono, el nitrógeno y fósforo son los dos nutrientes más importantes para la producción de microalgas. Se necesitan alrededor de 0,1 kg de N y 0,01 kg de P para producir 1 kg de biomasa de microalgas. En función de la capacidad de producción de biomasa se puede estimar la capacidad de fijación tanto de nitrógeno como de fósforo por las microalgas de forma análoga a la fijación de CO₂. La fijación de N varía de 1,5 a 7,0 tN/ha·año en zonas con baja disponibilidad de radiación solar como el Norte de Europa, y de 4,5 a 25,0 tN/ha·año en zonas con alta disponibilidad de radiación solar como el desierto de Atacama, cuando modifica la eficiencia fotosintética del 1 al 5 %. En España la capacidad de fijación de N varía entre 2,1 y 16,5 tN/ha·año en función de la ubicación geográfica para el mismo rango de eficiencia fotosintética. De igual forma, la fijación de P varía de 0,1 a 0,6 tP/ha·año en zonas con baja radiación solar, y de 0,5 a 2,2 tP/ha·año en zonas con altas disponibilidad de radiación solar, cuando se modifica la eficiencia fotosintética del 1 al 5 %. En España la capacidad de fijación de P varía entre 0,2 y 1,6 tN/ha·año en función de la ubicación geográfica para el mismo rango de eficiencia fotosintética.

Formas solubles tanto de nitrógeno como de fósforo se producen a gran escala en todo el mundo porque resultan imprescindibles para la producción de alimentos por la agricultura. En el caso del nitrógeno, la producción de fertilizantes nitrogenados mediante la síntesis de Haber conlleva el consumo de grandes cantidades de energía, que conllevan importantes emisiones de CO₂ asociadas. En el caso del fósforo, los fertilizantes fosfatados se obtienen por

degradación de la roca fosfórica, también requiriendo para ello enormes cantidades de energía con sus correspondientes emisiones de CO₂ asociadas. Más aún, las reservas de fósforo son limitadas y ya algunos informes alertan de los efectos negativos que puede acarrear su agotamiento para la producción de alimentos (Cordell *et al.*, 2009). Para evitar estos problemas es imprescindible recuperar el nitrógeno y el fósforo de los residuos y aguas residuales actualmente desechados, pudiéndose utilizar las microalgas para estos procesos (Craggs *et al.*, 1996). Así, las microalgas son capaces recuperar el N y P contenidos en las aguas residuales, utilizando solo la energía solar en el proceso, al mismo tiempo que producen grandes cantidades de biomasa. El desarrollo de procesos de tratamiento de aguas residuales empleando microalgas ha despertado el interés de numerosas empresas e investigadores (Acién *et al.*, 2016).

2.3. Condiciones de cultivo

Como cualquier otro microorganismo las microalgas tienen unas condiciones óptimas de cultivo que deben conocerse para maximizar su rendimiento. Cada cepa posee unos valores óptimos de salinidad, temperatura o pH, y los sistemas de producción deben diseñarse/operarse para mantener estos valores óptimos. En cuanto a salinidad, aunque algunas microalgas pueden tolerar grandes variaciones de salinidad, generalmente se utilizan cepas de agua dulce, como *Scenedesmus*, *Chlorella*, *Spirulina*, o cepas de agua de agua salada o de mar como *Nannochloropsis*, *T-ISO*, *Tetraselmis*. Además, algunas cepas son tolerantes a medios hipersalinos, como *Dunaliella*, reduciéndose en estas condiciones la probabilidad de contaminación por otras cepas. Con respecto a la temperatura, la mayoría de microalgas muestra su crecimiento óptimo en el rango de 20 a 30 °C. Algunas cepas pueden alcanzar elevados crecimientos por encima de los 30 °C como *Scenedesmus* y la cianobacteria *Anabaena* (Clares *et al.*, 2014; Sánchez *et al.*, 2008). El crecimiento se reduce por debajo de la temperatura óptima, pero por encima se puede llegar a la muerte del cultivo, por lo que en cualquier sistema de producción de microalgas es necesario disponer de sistemas de refrigeración que eviten el sobrecalentamiento de los cultivos y con ello su colapso.

En relación al pH, este se puede controlar añadiendo soluciones ácidas al medio de cultivo, pero generalmente se utiliza la inyección de CO₂ para al mismo tiempo reducir el pH y evitar la limitación por carbono. El pH óptimo para la mayoría de las microalgas se encuentra entre 7 a 8, aunque algunas cianobacterias muestra un rendimiento óptimo a valores de pH hasta 10 (Clares *et al.*, 2014). Controlar el pH mediante la inyección de CO₂ es un problema de ingeniería que debe ser adecuadamente optimizado para minimizar la cantidad de CO₂ consumido al mismo tiempo que aumenta la productividad de biomasa en el sistema, siempre teniendo en cuenta el coste de la infraestructura y el consumo de energía involucrado (Duarte-Santos *et al.*, 2016). Para asegurar que los cultivos de microalgas están solo limitados por luz es necesario suministrar CO₂ obligatoriamente, y por esto la mayoría de los sistemas de producción en todo el mundo disponen de sistemas de aporte de CO₂ aunque carezcan de otros sistemas de control para otras variables.

Proporcionar las condiciones de cultivo óptimas en el laboratorio o a pequeña escala es sencillo, aunque resulta gravoso si se analiza su coste. Sin embargo, en cultivos externos a gran escala controlar con precisión las condiciones de cultivo puede resultar muy difícil y en ocasiones hasta imposible. Como ejemplo, para controlar la temperatura en grandes reactores se requiere de grandes inversiones en sistemas de intercambio de calor, además que el consumo de energía resulta demasiado elevado, por lo que se descarta poder llevar a cabo este control y se obliga a producir cepas de microalgas seleccionadas por tener su crecimiento óptimo a los valores de temperatura media diaria que prevalecen en la ubicación seleccionada. En el caso del pH la inyección de CO₂ puro puede hacerse a gran escala pero ello puede suponer hasta un 30 % de los costes totales de producción, siendo recomendable la utilización de gases de combustión o corrientes residuales que contengan CO₂ para reducir dicho coste (Acién *et al.*, 2012).

En cuanto al control de los sistemas de producción de microalgas se debe considerar la variación de los parámetros de cultivo en tres escalas de tiempo bien diferenciadas: (i) las variaciones que tienen lugar a lo largo del año en la ubicación seleccionada; (ii) las variaciones que tienen lugar cada día debido al cambio de las condiciones de cultivo con el ciclo solar debido principalmente a la variación de la radiación solar; y (iii) el tiempo requerido para mezclar completamente el sistema de producción en cual influye en la existencia de gradientes de luz y nutrientes dentro del reactor. En los últimos años se están desarrollando y aplicando métodos de control avanzados a la producción industrial de microalgas para reducir los costes y mejorar el rendimiento de los procesos basados en microalgas (Pawlowski *et al.*, 2014). Solo un profundo análisis de las principales variables de cultivo principal y su optimización a lo largo de las diferentes escalas de tiempo existentes pueden permitir maximizar el rendimiento de cualquier proceso de producción de microalgas.

3. Fotobiorreactores para la producción de microalgas

La producción de microalgas es un proceso que debe ser adecuadamente planeado y realizado. Las principales etapas en cualquier proceso de producción de microalgas son: (i) la preparación del medio de cultivo, (ii) la producción de biomasa en fotobiorreactores, (iii) el cosechado de la biomasa, (iv) el tratamiento de aguas para recirculación o vertido, y (v) la estabilización de la biomasa o su transformación en productos finales. El corazón del proceso es el fotobiorreactor en el que se produce la biomasa de microalgas. Existe una amplia bibliografía sobre el diseño de fotobiorreactores y su operación (Cuaresma *et al.*, 2011; Posten, 2009), por lo que aquí solo se incluye una comparación de las tecnologías más usadas.

3.1. Fotobiorreactores abiertos

Los fotobiorreactores abiertos son los más extendidos para la producción de microalgas en todo el mundo, más del 90 % de la producción mundial se lleva a cabo en este tipo de reactores. Son básicamente grandes estanques de poca profundidad para facilitar la penetración de la luz y aumentar la productividad de biomasa, en los que se mantiene y hace circular el cultivo de microalgas mediante impulsores de paletas (Figura 1). Las principales ventajas de los reactores *raceway* son su bajo costo, por debajo de 10 euros/m², y fácil escalado ya que este se realiza a escala comercial por multiplicidad de unidades de un tamaño unitario de 5.000 m². Otra ventaja de esta tecnología es su bajo consumo de energía, inferior a 1 W/m³, lo que la hace especialmente adecuada para aplicaciones de bajo valor, incluyendo el tratamiento de aguas residuales y la producción de biocombustibles. Los principales inconvenientes de los reactores *raceway* están relacionados con el escaso control de las condiciones de operación y la fácil contaminación de los cultivos en estos sistemas. Por estas razones los reactores *raceway* se utilizan principalmente para producir microalgas que crecen bajo condiciones extremas de elevado pH (*Spirulina*) o salinidad (*Dunaliella*), que evitan o minimizan la contaminación de los cultivos por otros microorganismos. Para el resto de especies de microalgas resultan inviables a escala comercial por su facilidad de contaminación, por lo que estas otras especies deben ser producidas en reactores cerrados.

Figura 1. Imagen de reactor *raceway* de 20 m³ como ejemplo de reactor abierto.
Reactor instalado y operado en la Estación Experimental Cajamar



Existen numerosos ejemplos en todo el mundo de instalaciones de producción de microalgas utilizando reactores *raceway*. Así, empresas como Cyanotech (EEUU), Earthrise Nutritional (EEUU), Parry Nutraceuticals (India) y Spirulina Factory (Myanmar), son algunos de los mayores productores de *Spirulina* en todo el mundo que llevan a cabo la producción utilizando reactores *raceway* en instalaciones de 10 a 100 ha. Estos reactores se también utilizan para producir *Dunaliella* a gran escala por diferentes empresas como Nikken Sohonsa Corp (Japón), Betatene (Australia), Nature Beta Technologies (Israel), ABC Biotech Ltd. (India), Tianjin Lantai Biotechnology (China), Western Biotechnology Ltd. (Australia) y Aqua Carotene Ltd. (Australia). El diseño de este tipo de reactores *raceway* está siendo revisado en los últimos años para mejorar su rendimiento. Así, la hidrodinámica, la transferencia de materia y el consumo de energía son aspectos importantes aún por mejorar en este tipo de sistemas (de Godos *et al.*, 2014a; Sompech *et al.*, 2012). A pesar de estas posibles mejoras, estos sistemas son los más extendidos en todo el mundo y la actual tecnología funciona lo suficientemente bien como para que la mayoría de nuevas instalaciones industriales que se implantan en el mundo se basan en el uso de este tipo de reactores. Sobre todo, en procesos relacionados con el tratamiento de aguas residuales, o la producción de biofertilizantes y piensos para alimentación animal, que son actualmente los que más interés están despertando (Chisti, 2013; Park *et al.*, 2011).

3.2. Fotobiorreactores cerrados

Los fotobiorreactores cerrados se utilizan para producir cepas de microalgas que no pueden ser producidas en condiciones extremas, por lo que no se pueden producir en reactores abiertos, pero que contienen compuestos valiosos y por tanto su valor es lo suficientemente elevado para poder asumir los mayores costes derivados del uso de este tipo de fotobiorreactores cerrados. Se han propuesto diversos diseños de fotobiorreactores cerrados como columnas de burbujeo, sistemas helicoidales o paneles planos, pero los más extendidos a escala comercial son los fotobiorreactores tubulares (Figura 2). El elemento diferenciador de un fotobiorreactor cerrado es que permite aislar el cultivo de la atmósfera que lo rodea, minimizando así los riesgos de contaminación y permitiendo controlar de mejor forma los parámetros de operación. En los reactores tubulares el cultivo se recircula de forma continua a lo largo el receptor solar, el cual está diseñado para maximizar la interceptación y utilización de la radiación solar. Estos reactores permiten producir casi cualquier microalga, incluyendo cepas sensibles como *Haematococcus* o *Porphyridium*, permitiendo además alcanzar altas productividades, superiores a 1 g/L-día, por un mejor control de los parámetros de cultivo. Sin embargo, también tienen inconvenientes relacionados con su mayor coste, superior a 100 euros/m², así como mayor consumo de energía, superior a 100 W/m³, la dificultad de su escalado, o problemas derivados de ensuciamiento de las paredes que pueden reducir su rendimiento de forma notable (Acien Fernández *et al.*, 2013; Posten, 2009).

Figura 2. Imagen de fotobiorreactor tubular de 3 m³ como ejemplo de reactor cerrado.
Reactores instalados y operados en la Estación Experimental Cajamar



Los fotobiorreactores tubulares se utilizan principalmente para producir biomasa de alto valor para consumo humano, ya sea en alimentación, cosmética o farmacia. Así, empresas como «L'Age Vert» (www.agevert.com, Francia), SECIL (Portugal) y Roquette Klötzed (Alemania) producen *Chlorella* para alimentos en instalaciones de 1 a 2 hectáreas de tamaño total. Otras empresas como Mera Pharmaceuticals, (Hawai, EEUU) y Algatech Algaltechnologies (www.algotech.com, Israel) producen *Haematococcus pluvialis* también en fotobiorreactores tubulares para la obtención de astaxantina, un potente antioxidante de consumo humano. La instalación más grande basada en esta tecnología, con hasta 20 hectáreas, se ha ubicado recientemente en China también para producir *Haematococcus pluvialis* como fuente de astaxantina. En los últimos años se están poniendo en marcha en todo el mundo numerosas instalaciones basadas en el empleo de fotobiorreactores tubulares, por lo que su tamaño y capacidad aumentan año tras año. Esto es debido a la mejora en el diseño y materiales utilizados en este tipo de fotobiorreactores, así como a la necesidad de producir la biomasa de microalgas bajo condiciones controladas según las normas de «buenas prácticas de fabricación» para que sea apta para el consumo humano. La utilización de nuevos materiales, la reducción del ensuciamiento de las paredes y el aumento de la estabilidad de los sistemas de producción son aun desafíos por acometer para esta tecnología (Harris *et al.*, 2013).

4. Aplicaciones de las microalgas

4.1. Análisis de mercado de las microalgas

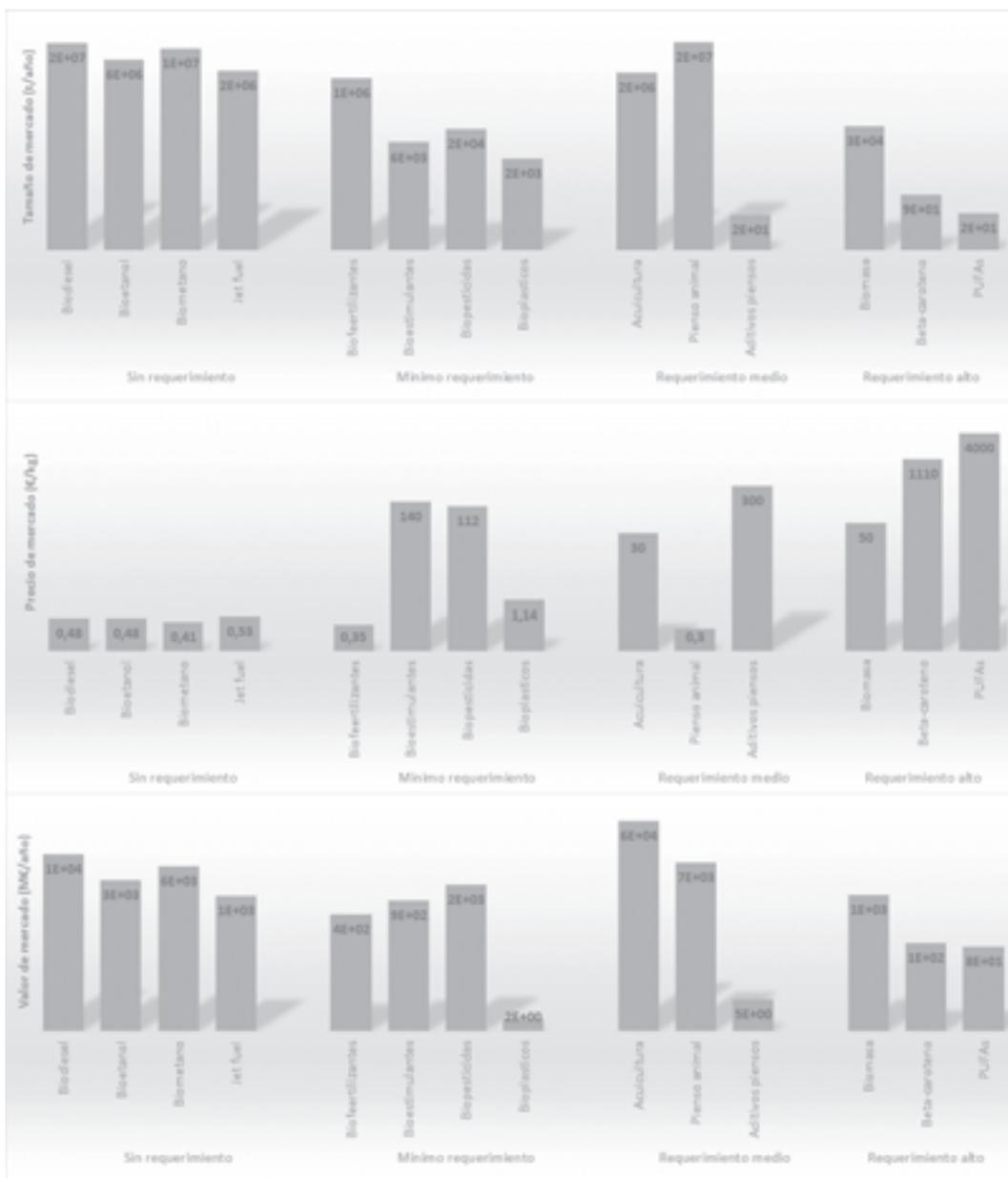
Las microalgas se pueden utilizar en un amplio abanico de aplicaciones, aunque solo unas pocas están siendo realmente explotadas a nivel comercial actualmente, el resto siendo aún potencialidades por desarrollar para este tipo de microorganismos. Las aplicaciones de las microalgas se pueden dividir en cuatro grupos principales en función de los requerimientos de seguridad de los diferentes mercados: (i) producción de energía, principalmente biocombustibles; (ii) obtención de bioplásticos y productos para la agricultura, como bioestimulantes y bioplaguicidas; (iii) producción de piensos para acuicultura y animales; y (iv) obtención de productos de consumo humano, principalmente alimentos y nutracéuticos (Voort *et al.*, 2015). Al comparar el tamaño de los diferentes mercados se observa como el mercado de biocombustibles requiere enormes producciones, superiores a 10^7 t/año, que están lejos de la actual capacidad de producción mundial de biomasa de microalgas, de 10^4 t/año (Gráfico 3). La mayor parte de la producción mundial de microalgas se destina actualmente al consumo humano, que requieren alrededor de 10^4 t/año, mientras que la agricultura requiere cantidades aún mayores, de hasta 10^5 t/año, y la producción de piensos tanto para granjas como para acuicultura requiere aún mayores cantidades, de hasta 10^6 t/año. En cuanto al precio de mercado, el coste mínimo de producción de biomasa de microalgas varía de 5 euros/kg en reactores *raceway*, a 12 euros/kg utilizando fotobiorreactores tubulares (Enzing *et al.*, 2014); por lo que solo mercados que permitan un precio de la biomasa por encima del coste de producción pueden ser a día de hoy factibles.

Este estudio de mercado muestra como actualmente, solo las aplicaciones directamente relacionadas con el consumo humano, así como la producción de aditivos para piensos, y algunas aplicaciones relacionadas con los usos agrícolas, como la producción de bioestimulantes y bioplaguicidas, tienen precios de mercado superiores a los actuales costes de producción (Gráfico 3). De este análisis se concluye que solo estas aplicaciones son realistas a día de hoy. Así, el valor de mercado de los productos relacionados con consumo humano supera los 10^3 millones de euros al año, mientras que el de los productos relacionados con uso agrícola puede llegar a 10^4 millones de euros al año, y el relacionado con la acuicultura hasta 10^5 millones de euros al año, poniendo de manifiesto la importancia de estos sectores en el desarrollo a corto plazo de la biotecnología de microalgas (Gráfico 3).

Para poder ampliar el campo de aplicación de las microalgas a otros sectores es necesario disminuir los costes de producción en un orden de magnitud a la vez que se aumenta la capacidad de producción en al menos tres órdenes de magnitud, lo cual no es un reto fácil de solventar. El coste de producción de la biomasa de microalgas puede reducirse enormemente si (i) se mejora la productividad de los actuales sistemas de producción, (ii) se amplía el tamaño de las instalaciones actualmente utilizadas, y (iii) se acopla la producción de microalgas con

otros procesos como el tratamiento de residuos, siendo estos los retos para el futuro próximo (Acíen *et al.*, 2012; Norsker *et al.*, 2011).

Gráfico 3. Análisis de mercado de productos derivados de microalgas



Fuente: Enzing *et al.* (2014); Vigani *et al.* (2015) y Voort *et al.* (2015).

4.2. Aplicaciones de alto valor de las microalgas

Las aplicaciones de alto valor de las microalgas se relacionan principalmente con el consumo humano directo como alimentos, nutracéuticos, cosméticos o incluso productos farmacéuticos (Borowitzka, 2013). La biomasa de microalgas contiene proteínas, lípidos y carbohidratos de alta calidad para el consumo humano. Además, la biomasa de microalgas contiene aminoácidos esenciales y ácidos grasos poliinsaturados, además de esteroides y carotenoides con actividad antioxidante, por lo que esta biomasa ha sido considerada como un súper alimento (Vigani *et al.*, 2015). En este sentido, la UE adoptó en 2012 una estrategia enfocada a innovar mediante el impulso del sector de la bioeconomía, siendo la «bioeconomía azul» uno de los pilares de esta estrategia, y dentro de ella la producción de microalgas como fuente de moléculas de alto valor para uso humano (Anon, 2012). Las microalgas han sido una fuente sostenible de nutracéuticos y alimentos para uso humano, por sus elevadas propiedades nutricionales y funcionales frente a los cultivos convencionales como cereales y verduras, así como por sus menores requerimientos de terreno, además de reducir los riesgos relacionados con la inseguridad alimentaria en un mundo global (Draaisma *et al.*, 2013).

La biomasa de microalgas puede utilizarse directamente como alimento, en diferentes mezclas con otros alimentos preparados, o bien consumirse extractos de compuestos valiosos obtenidos de la misma. Así, se comercializa biomasa seca de *Chlorella* y *Spirulina* como polvo o en cápsulas, aunque también se están incorporando a zumos, pasteles, pastas y otros alimentos para mejorar su valor nutricional y/o añadir propiedades saludables como mayor capacidad antioxidante entre otros. En cuanto a extractos, los carotenoides como la astaxantina y el β -caroteno se extraen de la biomasa de *Haematococcus* y *Dunaliella*, y se incorporan en suspensiones como mejorador de la salud. Otros compuestos como los ácidos grasos poliinsaturados (ácido eicosapentaenoico (EPA), ácido araquidónico (AA) y ácido docosahexaenoico (DHA)), también se extraen de la biomasa de cepas marinas, como *Nannochloropsis* y T-ISO, utilizando también principalmente CO₂ supercrítico, y se incorporan a aceites y cápsulas para el consumo humano. Merece especial mención la producción de ácido docosahexaenoico (DHA) a partir de *Schizochytrium* por la empresa Martek, el cual se incorpora a las leches infantiles en una aplicación de alto valor que es actualmente la norma a nivel mundial.

Actualmente las mayores barreras a la incorporación de las microalgas a los alimentos están relacionadas con aspectos regulatorios, especialmente en la UE. A pesar de las ventajas ampliamente demostradas de la biomasa de microalgas para el consumo humano, actualmente solo se pueden comercializar las microalgas reconocidas como seguras (GRAS) por su tradición de consumo demostrada. Estas solo incluyen *Chlorella*, *Spirulina*, *Dunaliella* y *Haematococcus*. Cualquier otra microalga debe ser registrada como nuevo alimento, como la recientemente aprobada *Tetraselmis* por la empresa Phytoplacton Marino, lo cual es un proceso largo y costoso. De todos modos, independientemente de la cepa a producir, todo el sistema de producción debe estar desarrollado conforme a los estándares de la «industria alimentaria», con su correspondiente certificación que abarca tanto los materiales, como los sistemas y protocolos

utilizados en todo el proceso de producción. De esta forma es imprescindible la participación de empresas de alimentos en el futuro desarrollo de la biotecnología de microalgas.

Recientemente se ha publicado un amplio análisis de los productos a base de microalgas que se comercializan como alimentos y piensos en Europa (Enzing *et al.*, 2014). Según este informe, el mercado de la biotecnología marina global en 2011 se estimó en 2,4 billones de euros, siendo las microalgas uno de sus componentes principales, con un crecimiento anual del 10 %. La mayor parte de este mercado está relacionado con el sector de alimentos saludables y suplementos dietéticos, por lo que grandes empresas del mercado de ingredientes alimentarios como BASF, Unilever, Roquette y Dow Chemical ya participan en proyectos relacionados con la producción de microalgas.

4.3. Aplicaciones de bajo valor de las microalgas

Las aplicaciones de bajo valor de las microalgas incluyen la captura de CO₂, así como la producción de biocombustibles y biofertilizantes entre otras, pero todas ellas solo son sostenibles si se acoplan con el tratamiento de aguas residuales (Lundquist *et al.*, 2010). Las microalgas pueden utilizarse para tratar no solo aguas residuales urbanas, sino también otras aguas residuales de granjas, acuicultura, e industria en general incluyendo la digestión anaerobia de residuos (Morales-Amaral *et al.*, 2015a; Muñoz *et al.*, 2006; Posadas *et al.*, 2013 y Sepúlveda *et al.*, 2015). La utilización de microalgas como sistema de captura de CO₂ ha sido ampliamente estudiada, ya que estos microorganismos permiten fijar como biomasa el CO₂ presente en los gases de combustión, entre otros, a velocidades mayores que cualquier otro cultivo o las masas forestales. Sin embargo, al tratarse de una biomasa fácilmente degradable que no puede ser almacenada por largos periodos no se pueden considerar a las microalgas como sistema de almacenamiento de CO₂, solo de captura. La ventaja de las microalgas frente a otros sistemas de captura es que no requieren energía para la captura del CO₂ ya que utilizan la energía solar, mientras que otros procesos químicos de captura de CO₂ de gases de combustión, como los basados en absorción con aminas requieren, hasta 4 MJ/kgCO₂, lo que los hace difícilmente viables (Herzog, Drake y Adams, 1997). En todo caso la producción de microalgas con gases de combustión resulta más costosa, alrededor de 1.000 euros/tCO₂, que los impuestos o tasas actuales impuestos a las empresas por sus emisiones de CO₂, alrededor de 30 euros/tCO₂. Solo la valorización de la biomasa producida a precios superiores a 2.000 euros/t biomasa puede hacer viable este tipo de procesos (Acien *et al.*, 2012).

En cuanto a la producción de biocombustibles, se ha estudiado mucho la producción de biodiésel a partir de microalgas ya que estos microorganismos pueden llegar a acumular hasta el 70 % de su peso en lípidos, susceptibles de ser transformados en biodiésel mediante transesterificación directa, en un proceso análogo al utilizado actualmente en la industria de producción de biodiésel a partir de aceites usados o vegetales. La mayor ventaja de las microalgas en este ámbito es su elevada capacidad de producción, que puede llegar a ser hasta cien veces superior

a los cultivos energéticos actuales como colza o palma (Chisti, 2007). Sin embargo, la realidad es que la capacidad de producción actual de aceites de microalgas es aún muy limitada y los costes de producción demasiado elevados para poder competir en este mercado. Sería necesario aumentar en varios órdenes de magnitud la actual capacidad de producción y reducir en al menos un orden de magnitud los actuales costes de producción para poder competir en este mercado, lo cual no se excluye como una posible solución al abastecimiento de combustibles líquidos a largo plazo. Hoy en día la mejor alternativa es la producción de biometano como biocombustible mediante digestión anaerobia de la biomasa de microalgas producida en el tratamiento de aguas residuales (Cabanelas *et al.*, 2013).

Una aplicación más realista para las microalgas es la producción de biofertilizantes y bioestimulantes de uso agrícola. El mercado global de la producción de alimentos está reclamando cada vez sistemas más sostenibles y ecológicos que reduzcan el uso de compuestos químicos de síntesis y el impacto ambiental derivado de la producción y uso de los mismos. En este sentido las microalgas son ricas en nitrógeno y fósforo como biofertilizantes, pero más aún contienen aminoácidos y fitohormonas que permiten aumentar la producción de cultivos agrícolas, reduciendo incluso la necesidad del aporte de fertilizantes químicos en los mismos (Lu and Xu, 2015). Para esto la biomasa de microalgas debe ser adecuadamente producida y procesada, para obtener biofertilizantes con contrastada actividad biológica, recomendándose el uso de métodos enzimáticos (Romero García *et al.*, 2012). En todo caso, la propia producción de la biomasa puede hacerse de forma más sostenible si se acopla con el tratamiento de aguas residuales, aprovechando la capacidad de estos microorganismos de fijar el nitrógeno y fósforo contenidos en dichas aguas, que si se emplean fertilizantes químicos para su producción.

4.4. Tratamiento de aguas residuales con microalgas

El tratamiento de aguas residuales es un gran desafío para la sostenibilidad de actividad humana. Así, la generación de aguas residuales está continuamente aumentando por el aumento de la población y su nivel de vida. Dichas aguas deben ser tratadas para evitar problemas de salud y medioambientales, pero ello conlleva un coste y la necesidad de tecnologías cada vez más eficientes. Sin embargo, las aguas residuales no siempre se tratan adecuadamente, así se ha señalado que en todo el mundo mueren más personas por enfermedades relacionadas con la contaminación del agua que debido a todas las formas de violencia incluyendo guerras. Por otra parte, el vertido de aguas residuales sin tratamiento al medioambiente causa problemas de eutrofización dañando seriamente los ecosistemas y al final las reservas de agua dulce para consumo humano.

Para evitar estos problemas, las aguas residuales deben ser adecuadamente tratadas para eliminar de ellas los contaminantes y poder así verter el agua de manera segura. Los sistemas convencionales basados en lodos activados consisten en una serie de operaciones unitarias enfocadas a transformar la materia orgánica presente en el agua residual en CO₂ que se emite

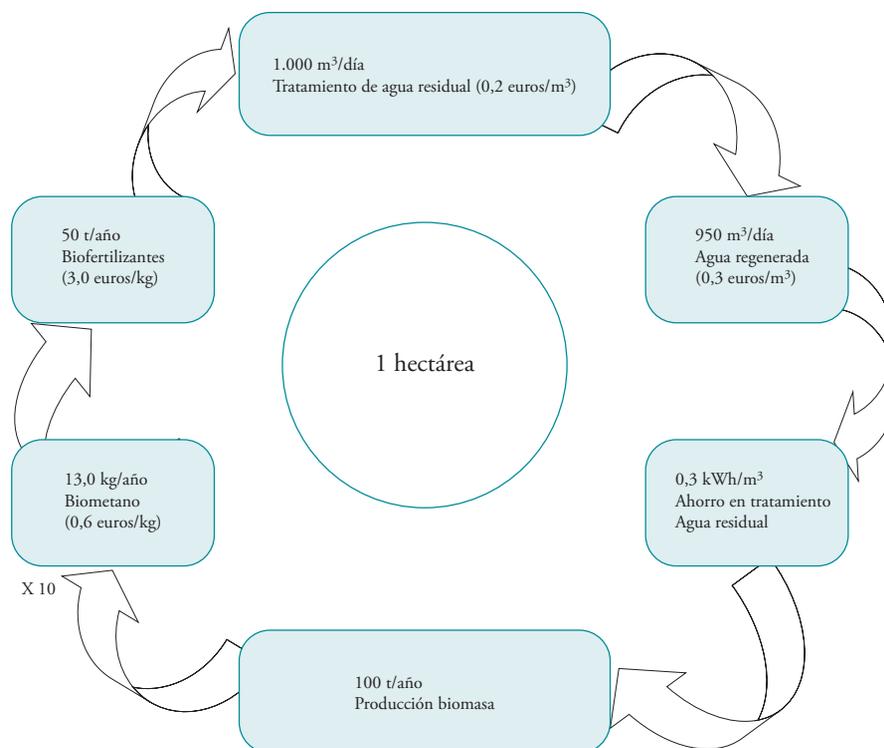
a la atmósfera, mientras que el nitrógeno contenido en el agua residual también se libera a la atmósfera en forma N_2 o de lo contrario se acumula en el lodo que es finalmente sometido a digestión anaerobia para producir biogás quedando el nitrógeno en el fango digerido. El fósforo no se suele depurar biológicamente, sino que se acumula en los fangos que finalmente se llevan a vertedero, normalmente sin recuperación de N o P. Realizar este proceso requiere una gran cantidad de energía, de hasta 0,5 kWh/m³, y un coste de tratamiento, de hasta 0,2 euros/m³. La preocupación por la protección del medioambiente obliga a los gobiernos a reducir los límites de vertido de N y P en las aguas residuales depuradas para su liberación segura al medioambiente, por lo que será necesario implementar procesos de tratamiento adicionales que incrementaran estos consumos de energía y costes de tratamiento.

Como ejemplo, una empresa como FCC Aqualia, que opera más de 250 plantas de tratamiento de aguas residuales en Europa, trata anualmente más de 500 Mm³/año de aguas residuales. El coste de tratamiento de este volumen de agua residual supone más de 100 M€/año y en él se consumen hasta 250 GWh/año, equivalente al consumo de electricidad total de España en un día. Además, esta energía y las emisiones de CO₂ asociadas con la misma se utilizan principalmente para disipar al ambiente más de 250.000 tCO₂/año, 25.000 tN/año y 5.000 tP/año. Esta gran cantidad de nutrientes es suficiente para producir más de 0,5 Mt/año de biomasa de microalgas, veinte veces más que la producción mundial de microalgas actual. Por otro lado, el acoplamiento de la producción de microalgas con el tratamiento de aguas residuales permite para reducir el consumo de energía y el coste del tratamiento de las aguas residuales, al mismo tiempo que permite la recuperación de los nutrientes contenidos en las aguas residuales y reducir con ello el coste de producción de la biomasa de microalgas. El desafío en los próximos años será demostrar y escalar a nivel comercial esta tecnología, así como aumentar su rendimiento, para que pueda contribuir significativamente a la mejora de la sostenibilidad de los actuales sistemas de tratamiento de aguas residuales (Acién *et al.*, 2016; Dalrymple *et al.*, 2013; Gouveia *et al.*, 2016).

El acoplamiento de la producción de microalgas con el tratamiento de aguas residuales no es una idea nueva y ya fue propuesta por Oswald en los años 60 (Oswald y Golueke, 1968). Sin embargo, a día de hoy existen muy pocos casos de aplicación real de este tipo de procesos a escala comercial (Craggs *et al.*, 2012). Son varios los motivos para ello, pero el más relevante es la baja eficiencia de las actuales tecnologías, especialmente debido al hecho de que requieren tiempos de retención hidráulicos muy elevados, de hasta 10 días, por lo que requieren grandes superficies. Para aumentar esta eficiencia es necesario mejorar las condiciones de operación así como la utilización de nuevos diseños de fotobiorreactores como los reactores de capa fina (Morales-Amaral *et al.*, 2015b). Avances recientes en el diseño y operación de reactores *raceway*, junto con la reducción del consumo de energía y tiempo de retención hidráulico requerido para lograr la completa eliminación de contaminantes de las aguas residuales han permitido a FCC Aqualia desarrollar la primera planta comercial basada en microalgas para el tratamiento de aguas residuales, de 10 hectáreas y que es capaz de tratar las aguas residuales de 80,000 habitantes en Chiclana de la Frontera (España) dentro del proyecto ALLGAS. Como ejemplo, los datos proporcionados por FCC Aqualia considerando una unidad de superficie de 1 ha, equivalente

a un campo de fútbol, señalan que empleando consorcios de microalgas y bacterias es posible tratar hasta 1.000 m³/día por hectárea de, generando 950 m³/día de agua regenerada apta para ser utilizada en riego, y hasta 100 t/año de biomasa de microalgas (Figura 3). Empleando este proceso se pueden ahorrar más de 0,3 kWh/m³ de agua residual tratada, lo que representa un importante ahorro económico y en cuanto a emisiones de CO₂ asociadas, pudiéndose utilizar la biomasa obtenida para producir biogás con lo que se produce biometano para abastecer a 10 vehículos ligeros durante todo un año, así como biomasa susceptible de ser utilizada en la producción de biofertilizantes de uso agrícola. Esto es un perfecto ejemplo de bioeconomía sostenible, donde el desarrollo de procesos basados en microalgas puede transformar los actuales procesos convencionales, que son altamente consumidores de energía y recursos, en procesos de tratamiento positivos en generación de energía y producción de compuestos de valor, lo que sería una transformación revolucionaria del sector de tratamiento de residuos. Por otra parte, la biomasa producida es interesante para ser utilizada en la producción de biofertilizantes y alimento para animales, aumentando así en gran medida la sostenibilidad de la producción de alimentos ahora relacionada con el consumo de grandes cantidades de abonos, tierra, deforestación y consumo de agua (Jorquera *et al.*, 2010; Romero García *et al.*, 2012).

Figura 3. Resumen las ventajas del tratamiento de aguas residuales empleando consorcios de microalgas y bacterias



Fuente: Comunicación de FCC Aqualia (2017).

5. Conclusiones

Las microalgas pueden contribuir significativamente a la bioeconomía por cuanto pueden mejorar la sostenibilidad múltiples procesos relacionados con la actividad humana, desde la producción de alimentos al tratamiento de aguas residuales. Así, la tolerancia de estos microorganismos a diferentes condiciones ambientales y su alta productividad los hacen idóneos para múltiples aplicaciones. El conocimiento de los principales factores que gobiernan la producción de microalgas está permitiendo el desarrollo de procesos de producción industrial que cada vez contribuyen en más sectores. Sin embargo, debido a que aún la capacidad de producción es baja y los costes de producción son elevados, las actuales aplicaciones comerciales de las microalgas están relacionadas principalmente con el consumo humano. A corto plazo se espera que la mejora de los sistemas de producción, especialmente el desarrollo de nuevas tecnologías, y la «domesticación» de cepas altamente productivas, aumentará en gran medida la capacidad de producción y el abanico de aplicaciones en las que las microalgas podrán contribuir en el futuro próximo. Así, la producción de alimentos a partir de microalgas puede permitir mitigar la cada vez mayor escasez de alimentos para un mundo en continuo crecimiento por cuanto permite alcanzar producciones por hectárea más de diez veces superiores a los cultivos tradicionales pudiendo realizarse incluso sin la necesidad de suelos fértiles. Incluso las microalgas pueden producirse empleando aguas de baja calidad, no aptas para riego o uso humano, lo que las hace idóneas para afrontar una producción de alimentos en zonas con escasez de agua. Además, las microalgas pueden mejorar la sostenibilidad de los actuales sistemas de producción agrícolas y ganaderos por cuanto pueden producir biofertilizantes y alimento animal a partir de residuos como aguas residuales y gases de combustión, recuperando los nutrientes contenidos en estos efluentes además de reducir el impacto de los actuales sistemas de tratamiento. Por tanto, el aumento de la contribución de las microalgas a la sostenibilidad de la sociedad es un hecho ya indiscutible y lo único que queda por conocer es cuál será el ritmo de incorporación de este tipo de tecnologías a los actuales sistemas de producción, el cual vendrá determinado por la velocidad con la que las actuales barreras técnicas y regulatorias puedan ir resolviéndose.

Referencias bibliográficas

- ABDULQADER, G.; BARSANTI, L. y TREDICI, M. R. (2000): «Harvest of *Arthrospira platensis* from Lake Kossorom (Chad) and its household usage among the Kanembu»; en *J. Appl. Phycol.* (12); pp. 493-498.
- ACIÉN, F. G.; FERNÁNDEZ, J. M.; MAGÁN, J. J. y MOLINA E. (2012): «Production cost of a real microalgae production plant and strategies to reduce it»; en *Biotechnol. Adv.* (30); pp. 1344-1353.

- ACIÉN, F. G.; GÓMEZ-SERRANO, C.; MORALES-AMARAL, M. M. M.; FERNÁNDEZ-SEVILLA, J. M. M. y MOLINA-GRIMA, E. (2016): «Wastewater treatment using microalgae: how realistic a contribution might it be to significant urban wastewater treatment?»; en *Appl. Microbiol. Biotechnol.* (100).
- ACIÉN, F. G.; GONZÁLEZ-LÓPEZ, C. V.; FERNÁNDEZ-SEVILLA, J. M. y MOLINA-GRIMA, E. (2012): «Conversion of CO₂ into biomass by microalgae: How realistic a contribution may it be to significant CO₂ removal?»; en *Appl. Microbiol. Biotechnol.* (96); pp. 577-586.
- ACIÉN FERNÁNDEZ, F. G.; FERNÁNDEZ SEVILLA, J. M. y MOLINA GRIMA, E. (2013): «Photobioreactors for the production of microalgae»; en *Rev. Environ. Sci. Bio/Technology* (12); pp. 131-151.
- OFFICIAL-STRATEGY_EN. (2012).
- BENEMANN, J. (2013): «Microalgae for biofuels and animal feeds»; en *Energies* (6); pp. 5869-5886.
- BENEMANN, J. R. (2003): *Biofixation of CO₂ and greenhouse gas abatement with microalgae-Technology roadmap* 7010000926; pp. 1-29.
- BOROWITZKA, M. A. (2013): «High-value products from microalgae-their development and commercialisation»; en *J. Appl. Phycol.* (25); pp. 743-756.
- BURLEW, J. S. (1953): «Algal culture from laboratory to pilot plant»; en *Carnegie Institution. Carnegie Institution of Washington Publication* (600). EEUU, Washington; pp. 235-281.
- CABANELAS, I. T. D.; ARBIB, Z.; CHINALIA, F. A.; SOUZA, C. O.; PERALES, J. A.; ALMEIDA, P. F.; DRUZIAN, J. I. y NASCIMENTO, I. A. (2013): «From waste to energy: Microalgae production in wastewater and glycerol»; en *Appl. Energy* (109); pp. 283-290.
- CHISTI, Y. (2007): «Biodiésel from microalgae»; en *Biotechnol. Adv.* (25); pp. 294-306.
- CHISTI, Y. (2013): «Raceways-based Production of Algal Crude Oil»; *Green* (3); pp. 195-216. Disponible en: <http://www.degruyter.com/view/j/green.2013.3.issue-3-4/green-2013-0018/green-2013-0018.xml>.
- CLARES, M. E.; MORENO, J.; GUERRERO, M. G. y GARCÍA-GONZÁLEZ, M. (2014): «Assessment of the CO₂ fixation capacity of *Anabaena* sp. ATCC 33047 outdoor cultures in vertical flat-panel reactors»; en *J. Biotechnol.* (187); pp. 51-55.
- CORDELL, D.; DRANGERT, J. O. y WHITE, S. (2009): «The story of phosphorus: Global food security and food for thought»; en *Glob. Environ. Chang.* (19); pp. 292-305.
- CRAGGS, R.; SUTHERLAND, D. y CAMPBELL H. (2012): «Hectare-scale demonstration of high rate algal ponds for enhanced wastewater treatment and biofuel production»; en *J. Appl. Phycol.* (24); pp. 329-337.

- Craggs, R. J.; Adey, W. H.; Jenson, K. R.; John, M. S.; St. Green, F. B. y Oswald, W. J. (1996): «Phosphorus removal from wastewater using an algal turf scrubber»; en Mara, D. D.; Pearson, H. W. y Silva, S. A., ed.: *Water Sci. Technol. Joao Pessoa*. 33. Water Science and Technology; pp. 191-198.
- Cuaresma, M.; Janssen, M.; Vílchez, C. y Wijffels, R. H. H. (2011): «Horizontal or vertical photobioreactors? How to improve microalgae photosynthetic efficiency»; en *Bioresour. Technol.* (102); pp. 5129-5137.
- Dalrymple, O. K.; Halfhide, T.; Udom, I.; Gilles, B.; Wolan, J.; Zhang, Q. y Ergas, S. (2013): «Wastewater use in algae production for generation of renewable resources: a review and preliminary results»; *Aquat. Biosyst.* (9); Disponible en: <http://aquaticbiosystems.biomedcentral.com/articles/10.1186/2046-9063-9-2>; p. 2.
- Draaisma, R. B.; Wijffels, R. H.; Slegers, P. M.; Brentner, L. B.; Roy, A. y Barbosa, M. J. (2013): «Food commodities from microalgae»; *Curr. Opin. Biotechnol.* (24); pp. 169-177.
- Duarte-Santos, T.; Mendoza-Martín, J. L.; Acién Fernández, F. G.; Molina, E.; Vieira-Costa, J. A. y Heaven, S. (2016): «Optimization of carbon dioxide supply in raceway reactors: Influence of carbon dioxide molar fraction and gas flow rate»; *Bioresour. Technol.* (212); pp. 72-81.
- Enzing, C.; Ploeg, M.; Barbosa, M. y Sijtsma, L. (2014): «Microalgae-based products for the food and feed sector: an outlook for Europe»; *JRC Sci. Policy Reports. Eur. Com.* 82, Report p. Disponible en <http://www.technopolis-group.com/wp-content/uploads/2014/04/1793-final-report.pdf>.
- Godos (de), I.; Mendoza, J. L.; Acién, F. G.; Molina, E.; Banks, C. J.; Heaven, S. y Rogalla, F. (2014a): «Evaluation of carbon dioxide mass transfer in raceway reactors for microalgae culture using flue gases»; *Bioresour. Technol.* (153); pp. 307-314.
- Godos (de), I.; Mendoza, J. L.; Acién, F. G.; Molina, E.; Banks, C. J.; Heaven, S. y Rogalla, F. (2014b): Evaluation of carbon dioxide mass transfer in raceway reactors for microalgae culture using flue gases. *Bioresour. Technol.* 153:307-314.
- Gouveia, L.; Graça, S.; Sousa, C.; Ambrosano, L.; Ribeiro, B.; Botrel, E. P.; Neto, P. C.; Ferreira, A. F. y Silva, C. M. (2016): «Microalgae biomass production using wastewater: Treatment and costs»; *Algal Res.* (16); pp. 167-176.
- Harris, L.; Tozzi, S.; Wiley, P.; Young, C.; Richardson, T. M. J.; Clark, K. y Trent, J. D. (2013): «Potential impact of biofouling on the photobioreactors of the Offshore Membrane Enclosures for Growing Algae (OMEGA) system»; *Bioresour. Technol.* (144); pp. 420-428.
- Herzog, H.; Drake, E. y Adams, E. (1997): «CO₂ Capture, reuse, and storage technologies for mitigating global climate change»; *EM Featrure*.

- JORQUERA, O.; KIPERSTOK, A.; SALES, E. A.; EMBIRUÇU, M. y GHIRARDI, M. L. (2010): «Comparative energy life-cycle analyses of microalgal biomass production in open ponds and photobioreactors»; *Bioresour. Technol.* (101); pp. 1406-1413.
- LODEYRO, A. F.; CECCOLI, R. D.; PIERELLA KARLUSICH, J. J. y CARRILLO, N. (2012): «The importance of flavodoxin for environmental stress tolerance in photosynthetic microorganisms and transgenic plants. Mechanism, evolution and biotechnological potential»; *FEBS Lett.* (586); pp. 2917-24.
- LU, Y. y XU, J. (2015): «Phytohormones in microalgae: A new opportunity for microalgal biotechnology?»; en *Trends Plant Sci.* (20); pp. 273-282. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1360138515000072>.
- LUNDQUIST, T. J.; WOERTZ, I. y BENEMANN, J. R. (2010): «Microalgae for wastewater treatment and biofuels production»; en: *ACS Natl. Meet. B. Abstr.*
- MENDOZA, J. L.; GRANADOS, M. R.; DE GODOS, I.; ACIÉN, F. G.; MOLINA, E.; HEAVEN, S. y BANKS, C. J. (2013): «Oxygen transfer and evolution in microalgal culture in open raceways»; en *Bioresour. Technol.* (137); pp. 188-195.
- MORALES-AMARAL, M. M.; GÓMEZ-SERRANO, C.; ACIÉN, F. G.; FERNÁNDEZ-SEVILLA, J. M. y MOLINA-GRIMA, E. (2015a): «Production of microalgae using centrate from anaerobic digestion as the nutrient source»; en *Algal Res.* (9); pp. 297-305.
- MORALES-AMARAL, M. M.; GÓMEZ-SERRANO, C.; ACIÉN, F. G.; FERNÁNDEZ-SEVILLA, J. M. y MOLINA-GRIMA, E. (2015b): «Outdoor production of *Scenedesmus* sp. in thin-layer and raceway reactors using centrate from anaerobic digestion as the sole nutrient source»; en *Algal Res.* (12); pp. 99-108.
- MULLER-FEUGA, A. (2000): «The role of microalgae in aquaculture: situation and trends»; *J. Appl. Phycol.* (12); pp. 527-534. Disponible en <http://link.springer.com/article/10.1023/A:1008106304417>.
- MULLER-FEUGA, A. (2013): «Microalgae for Aquaculture: The Current Global Situation and Future Trends»; en *Handb. Microalgal Cult. Appl. Phycol. Biotechnol.* Reino Unido, Oxford. John Wiley & Sons, Ltd; pp. 613-627.
- MUÑOZ, R.; GUIEYSSE, B.; MUÑOZ, R. y GUIEYSSE, B. (2006): «Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: A review»; *Water Res.* (40); pp. 2799-2815. Disponible en <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-33746605638&partnerID=tZOtx3y1>.
- NORSKER, N. H.; BARBOSA, M. J.; VERMUË, M. H. y WIJFFELS, R. H. (2011): «Microalgal production - A close look at the economics»; en *Biotechnol. Adv.* (29); pp. 24-27.
- OSWALD, W. J. y GOLUEKE, C. G. (1968): «Large scale production of microalgae»; en MATELESS, R. I. y TANNENBAUM, S.R., eds.: *MA: MIT Press Cambridge. Single cell protein*; pp. 271-305.

- PARK, J. B. K.; CRAGGS, R. J. y SHILTON, A. N. (2011): «Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production»; en *Bioresour. Technol.* (102); pp. 35-42.
- PAWLOWSKI, A.; MENDOZA, J. L.; GUZMÁN, J. L.; BERENGUEL, M.; ACIÉN, F. G. y DORMIDO, S. (2014): «Effective utilization of flue gases in raceway reactor with event-based pH control for microalgae culture»; en *Bioresour. Technol.* (170); pp. 1-9.
- POSADAS, E.; GARCÍA-ENCINA, P. A.; SOLTAU, A.; DOMÍNGUEZ, A.; DÍAZ, I. y MUÑOZ, R. (2013): «Carbon and nutrient removal from centrates and domestic wastewater using algal-bacterial biofilm bioreactors»; en *Bioresour. Technol.* (139); pp. 50-58.
- POSTEN, C. (2009): «Design principles of photo-bioreactors for cultivation of microalgae»; en *Eng. Life Sci.* (9); pp. 165-177.
- ROMERO GARCÍA, J. M.; ACIÉN FERNÁNDEZ, F. G. y FERNÁNDEZ SEVILLA, J. M. (2012): «Development of a process for the production of l-amino-acids concentrates from microalgae by enzymatic hydrolysis»; en *Bioresour. Technol.* (112); pp. 164-170.
- SÁNCHEZ, J. F. F.; FERNÁNDEZ-SEVILLA, J. M. M.; ACIÉN, F. G. G.; CERÓN, M. C. C.; PÉREZ-PARRA, J. y MOLINA-GRIMA E. (2008): «Biomass and lutein productivity of *Scenedesmus almeriensis*: Influence of irradiance, dilution rate and temperature»; en *Appl. Microbiol. Biotechnol.* (79); pp. 719-729.
- SEPÚLVEDA, C.; ACIÉN, F. G.; GÓMEZ, C.; JIMÉNEZ-RUIZ, N.; RIQUELME, C. y MOLINA-GRIMA, E. (2015): «Utilization of centrate for the production of the marine microalgae *Nannochloropsis gaditana*»; en *Algal Res.* (9); pp. 107-116.
- SOMPECH, K.; CHISTI, Y. y SRINOPHAKUN T. (2012): «Design of raceway ponds for producing microalgae»; en *Biofuels* (3); pp. 387-397.
- SPOLAORE, P.; JOANNIS-CASSAN, C.; DURAN, E. e ISAMBERT A. (2006): «Commercial applications of microalgae»; en *J. Biosci. Bioeng.* (101); pp. 87-96.
- Tilman, D.; Balzer, C.; Hill, J. y Befort, B. L. (2011): «Global food demand and the sustainable intensification of agriculture»; en *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* (108); pp. 20260-4.
- VIGANI, M.; PARISI, C.; RODRÍGUEZ-CEREZO, E.; BARBOSA, M. J.; SIJTSMA, L.; PLOEG, M. y ENZING C. (2015): «Food and feed products from micro-algae: Market opportunities and challenges for the EU»; *Trends Food Sci. Technol.* (42); pp. 81-92. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924224414002787>.
- VOORT (VAN DER), M. P. J.; VULSTEKE, E. y VISSER (DE), C. L. M. (2015): «Macro-economics of algae products»; *Marco-economics Algae Prod. Public Output Rep. WP2A7.02 EnAlgae Proj.* Swanse; pp. 47.



PRESENTE Y FUTURO DEL CULTIVO DE LAS MICROALGAS PARA SU USO COMO SUPERALIMENTOS

José Luis García^{a,b}, Marta de Vicente^a y Beatriz Galán^a

^aCentro de Investigaciones Biológicas-CSIC e ^bInstituto de Biología Integrativa de Sistemas-CSIC

Resumen

Aunque las microalgas constituyen un alimento conocido y utilizado por la humanidad desde hace siglos y recomendado desde hace años por la OMS y la FAO por su gran valor nutricional, últimamente están adquiriendo un creciente interés comercial, ya que contienen una gran cantidad de compuestos nutraceuticos que facilitan la prevención o el tratamiento de diferentes enfermedades o alteraciones de la salud, por lo que las microalgas se consideran un ejemplo de los llamados «superalimentos». Sin embargo, para que se conviertan en una fuente relevante de alimento para la creciente población humana, se necesita que su cultivo sea más competitivo en coste. Para ello se requiere desarrollar tecnologías de producción y de procesado más eficientes y económicas.

Solo unas pocas especies de microalgas están aprobadas para su consumo en Europa. Entre estas se encuentran las más utilizadas en el mercado como la espirulina y Chlorella. Sin embargo, hay todavía muchas especies por descubrir y utilizar que pueden proporcionar muchas sorpresas y beneficios. En este sentido, la legislación y la regulación para el consumo alimentario de nuevas especies tienen un papel importante en la economía de estos productos, todavía poco regulados a escala mundial. Estas consideraciones, junto con las otras muchas utilidades que poseen las microalgas en el campo de la energía y del medioambiente, hacen que estos organismos tengan que ser considerados de ahora en adelante como unos elementos importantes en el desarrollo de una bioeconomía sostenible.

Abstract

Although microalgae constitute a well-known food source used by humans for centuries, and recommended for years by the WHO and FAO for their important nutritional value, lately they have become increasingly interesting to business, as they contain a great quantity of nutraceutical compounds that facilitate the prevention or treatment of various illnesses or health disorders, making microalgae an example of the so-called «superfoods». However, for them to become a significant source of food for the growing human population, they must be cultivated in a more cost-competitive manner. This requires the development of more efficient and economic production and processing technologies.

Only a few species of microalgae have been approved for consumption in Europe. These include the most widely used in the market, such as spirulina and Chlorella. However, there are still many species to be discovered and used that can provide both surprises and benefits. In this sense, the legislation and regulation of new species for consumption as food play an important role in the economy of these products, which are still little regulated at the global scale. These considerations, together with the many other uses of microalgae in the field of energy and the environment, mean that these organisms must, from this point on, be considered important elements in the development of a sustainable bioeconomy.

1. Breve historia sobre el uso de las microalgas como alimentos

Existen muchos registros sobre el uso histórico de las cianobacterias y de las microalgas en general como nutrientes humanos. Los aztecas usaron como alimento la espirulina (*Arthrospira platensis*) del lago de Texcoco (México) alrededor del año 1300. Incluso se cree que los mayas ya la utilizaban con anterioridad. Bernal Díaz del Castillo, uno de los acompañantes de las tropas

de Hernán Cortés, describió en el año 1521 que la espirulina (*A. maxima*) que cosechaban los aztecas como masas azul verdosas en el lago de Texcoco, las vendían en el mercado de la capital Tenochtitlán como una torta seca conocida como «tecuitlatl».

En África durante siglos, la población de Chad ha estado recolectando espirulina (conocida como *dihé*) del Lago Kossorom en la franja noreste del lago Chad y usándola como alimento diariamente. *Nostoc*, un tipo de cianobacterias filamentosas, también se ha utilizado ampliamente como alimento. Las especies *N. commune*, *N. flagelliforme* y *N. punctiforme* se consumen tradicionalmente en China, Mongolia, Tartaria y América del Sur (conocidas como *fa cai* y *lakeplum*). En Japón, otra cianobacteria comestible *Aphanotheca sacrum* (antes *Phyllocladus sacro*) se considera un manjar especial conocido como “suizenji-nori”. Las algas verdes filamentosas *Spirogyra* y *Oedogonium* también se usan como un componente dietético en Birmania, Tailandia, Vietnam e India.

Sin embargo, la era moderna del desarrollo biotecnológico de las microalgas y las cianobacterias comenzó a principios de la década de 1940 y cobró impulso con el primer Simposio de Cultivo Masivo de Algas que se celebró en la Universidad de Stanford (EEUU) en 1952. Desde entonces se han utilizado para su explotación comercial numerosas tecnologías y enfoques para el cultivo de las microalgas, ya sea en estanques abiertos o en fotobiorreactores especializados, además de la recolección tradicional que se realiza en algunos espacios naturales.

Más recientemente, en 1982 los laboratorios KC de Klamath Falls (Oregón, EEUU) comenzaron a comercializar el denominado *Blue Green Manna* derivado de la cianobacteria *Aphanizomenon flos-aquae* cosechada en el lago Klamath Falls. La comercialización de este producto ha abierto un gran debate sobre el uso de nuevas algas para fines nutraceuticos o alimentarios cuando estas no pueden considerarse todavía como especies seguras para la alimentación, ya que aún no tienen en EEUU la consideración de especies GRAS (generalmente consideradas como seguras) basándose en su experiencia de uso tradicional. En este momento solo unas pocas microalgas cuentan con la aprobación por parte de las agencias reguladoras, tanto en EEUU como en la UE, para ser comercializadas para su uso en alimentación.

La espirulina fue declarada en la Conferencia Mundial de Alimentos de las Naciones Unidas (1974) como el mejor alimento para el futuro, y la Organización Mundial de la Salud (OMS) afirmó que la espirulina representa un alimento interesante por múltiples razones, como ser rico en hierro y proteínas, o ser adecuado para administrarse a niños sin ningún tipo de riesgo (Ginebra, Suiza, 8 de junio de 1993). Durante el sexagésimo período de sesiones de la Asamblea General de las Naciones Unidas (Segunda Comisión, Punto 52 del orden del día), la organización IIMSAM (por sus siglas en inglés *Intergovernmental Institution for the Use of Micro-Algae Spirulina Against Malnutrition*), inició un proyecto de resolución sobre el «Uso de la espirulina para combatir el hambre y la malnutrición y para ayudar a lograr el desarrollo sostenible». Como continuación de esta resolución, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) preparó un borrador de posicionamiento sobre la espirulina que se presentó en 2008 (FAO, 2011). Como puede verse, desde hace décadas

las microalgas han sido consideradas una posible alternativa para alimentar a un mundo que sigue incrementando su población.

Además de su elevada calidad nutricional, la producción de microalgas cuenta con otras ventajas como ser fuente de compuestos de alto valor, una relativa buena relación coste-efectividad, su bajo impacto ambiental o el hecho de que su producción permita aprovechar terrenos o espacios no aptos para el cultivo de especies vegetales, incrementando así, la capacidad mundial de producción de alimentos.

2. Las microalgas de mayor consumo alimentario en la actualidad

Hoy en día, las microalgas *Chlorella* y espirulina se comercializan ampliamente en supermercados y tiendas especializadas, y están ganando popularidad en todo el mundo porque son consideradas como uno de los superalimentos más nutritivos conocidos por el hombre (Figura 1). Estas microalgas también se usan para alimentar a muchos tipos de animales (gatos, perros, peces de acuario, aves ornamentales, caballos, aves de corral, vacas o toros reproductores). Además, otras microalgas como *Tetraselmis*, *Isochrysis*, *Pavlova*, *Phaeodactylum*, *Chaetoceros*, *Nannochloropsis*, *Skeletonema* y *Thalassiosira* también se utilizan como alimento de peces en acuicultura.

Figura 1. Diferentes productos derivados de microalgas



Pero sobre todo, el mercado de las microalgas se extiende porque además de su uso como alimento altamente nutritivo estos organismos son una fuente de compuestos bioactivos muy valiosos con una amplia aplicación como nutracéuticos (García *et al.*, 2017). Los nutracéuticos que se pueden extraer de las microalgas son muy abundantes y diversos, e incluyen entre

otros, varias vitaminas, carotenoides, clorofilas, ficobiliproteínas, ácidos grasos poliinsaturados (PUFA), polisacáridos, esteroides, y distintos compuestos fenólicos y volátiles (Tabla 1). Estos compuestos han sido propuestos como candidatos para el tratamiento de una gran cantidad de enfermedades, sin embargo, algunas de estas propiedades terapéuticas aún deben confirmarse mediante ensayos clínicos bien contrastados.

Tabla 1. Productos nutracéuticos derivados de las microalgas

Productos	Microalga	Productos	Microalga
Alimento humano	<i>Chlorella</i> , <i>Espirulina</i> , <i>Odontella aurata</i> , <i>Tetraselmis chuii</i> , <i>Aphanizomenon flosaquae</i> , <i>Nostoc</i> , <i>A. sacrum</i> , <i>Spirogyra</i> , <i>Oedogonium</i>	PUFA	
Alimento animal	<i>Chlorella</i> , <i>Espirulina</i> , <i>Tetraselmis</i> , <i>Isochrysis</i> , <i>Pavlova</i> , <i>Phaeodactylum</i> , <i>Chaetoceros</i> , <i>Nannochloropsis</i> , <i>Skeletonema</i> , <i>Thalassiosira</i>	Eicosapentanoico (EPA)	<i>Phaeodactylum tricornerutum</i> , <i>Monodus subterraneus</i> , <i>P. cruentum</i> , <i>Chaetoceros calcitrans</i> , <i>Nannochloropsis</i> , <i>Schizochytrium</i>
Vitaminas y carotenoides		Docosahexanoico (DHA)	<i>Cryptocodinium cohnii</i> , <i>Isochrysis galbana</i> , <i>Pavlova salina</i> , <i>Schizochytrium</i>
Vitamina B12	<i>Chlorella</i> , <i>Espirulina</i>	Linoleico	<i>D. salina</i>
Vitamina E	<i>Porphyridium cruentum</i>	γ-linolénico	<i>Espirulina</i>
β-caroteno	<i>D. salina</i> , <i>Haematococcus pluvialis</i> , <i>Synechococcus</i> , <i>Nannochloropsis gaditana</i>	Oleico	<i>D. salina</i> , <i>Espirulina</i>
α-caroteno	<i>Chlorella</i>	Láurico	<i>Espirulina</i>
Astaxantina	<i>D. salina</i> , <i>H. pluvialis</i> , <i>Chlorella</i>	Polisacáridos	
Luteína	<i>Murellopsis sp.</i> , <i>Chlorella</i> , <i>Scenedesmus almeriensis</i> , <i>Auxenochlorella protothecoides</i>	Sulfatados	<i>Porphyridium spp.</i>
Zeaxantina	<i>D. salina</i> , <i>Chlorella</i> , <i>Synechococcus</i> , <i>N. gaditana</i>	Nostoflan	<i>Nostoc flagelliforme</i>
Cantaxantina	<i>Scenedesmus komarekii</i> , <i>D. salina</i> , <i>Chlorella</i>	Esteroides	
Fucoxantina	<i>Phaeodactylum tricornerutum</i>	Brassicasterol, sitosterol, y estigmasterol	<i>D. salina</i> , <i>Dunaliella tertiolecta</i>
Fitoeno	<i>D. salina</i>	Fenoles y compuestos volátiles	
Fitoflueno	<i>D. salina</i>	Fenoles	<i>Chlorella</i> , <i>Nostoc</i> , <i>Anabaena</i> , <i>Tolypothrix</i> , <i>Chlamydomonas</i>
Violaxantina	<i>Chlorella</i> , <i>Synechococcus</i> , <i>N. gaditana</i>	β-ciclocitral	<i>D. salina</i>
Anteraxantina	<i>Chlorella</i>	α y β-ionona	<i>D. salina</i>
Echinenona	<i>Botryococcus braunii</i>	Neofitadieno	<i>D. salina</i>
Criptoxantina	<i>D. salina</i>	Fitol	<i>D. salina</i>
Ficobiliproteínas		Pentadecano	<i>Synechocystis sp.</i>
Ficocianina	<i>Espirulina</i>	Heptadecano	<i>Espirulina</i>
Ficoeritrina	<i>Porphyridium</i>	Extractos	
Aloficocianina	<i>Espirulina</i>	Total	<i>Chlorella</i> , <i>Chlamydomonas</i>
Clorofila		Lípidos	<i>Nostoc</i> , <i>Ulkenia</i>
Clorofila A	<i>A. flosaquae</i>	Carotenoides	<i>Chlorella</i>

Fuente: adaptado de García *et al.* (2017).

Los carotenoides constituyen un grupo de más de seiscientas moléculas orgánicas coloreadas o pigmentos naturales, sintetizados por plantas, algas y bacterias que desempeñan diferentes funciones fisiológicas, y que, por este motivo, ofrecen enormes valores nutraceuticos. La microalga *Dunaliella salina* es la mayor productora de carotenoides entre todas las fuentes conocidas, incluidas frutas, verduras y especias, y por esta razón, se explota comercialmente en la actualidad en diferentes países para producir β -caroteno. El β -caroteno es en estos momentos el carotenoide más utilizado a nivel industrial y se utiliza como colorante alimentario y como aditivo nutricional en alimentos y piensos, debido a sus propiedades antioxidantes y sus efectos beneficiosos para la salud. La microalga *Haematococcus pluvialis* es la fuente natural más rica de astaxantina, otra valiosa molécula carotenoide que es muy conocida por poseer actividad antioxidante y antiinflamatoria, y porque se utiliza para la prevención o tratamiento de enfermedades como la degeneración macular, la artritis reumatoide, diversas enfermedades cardiovasculares, y enfermedades neurodegenerativas como el párkinson. La astaxantina producida en microalgas compite comercialmente con la sintética, o con la producida en la levadura *Phaffia* o la bacteria *Paracoccus*, que se usan predominantemente en el sector de la acuicultura, mientras que la astaxantina derivada de *H. pluvialis* es la fuente principal para uso humano en aplicaciones como suplementos dietéticos, cosméticos alimentos y bebidas.

La clorofila es un pigmento fotosintético abundante en las microalgas y se ha demostrado que estimula la recuperación de la función hepática y aumenta la secreción biliar. También repara las células, aumenta la hemoglobina en la sangre y promueve el crecimiento celular. Tradicionalmente, se usa en la industria alimentaria como colorante debido a las crecientes demandas de los consumidores de colorantes naturales en alimentación.

Las ficobiliproteínas son proteínas hidrofílicas unidas a los pigmentos fotosintéticos de las ficobilinas, que se encuentran principalmente en las cianobacterias y en algunas algas rojas. Debido a sus propiedades espectrales UV-visibles, estas proteínas presentan diferentes colores: ficocianina (azul), ficoeritrina (roja) y aloficocianina (azul claro). Hoy en día, uno de los usos principales de la espirulina es la extracción de ficocianina que se utiliza para diversos productos industriales (tintes naturales, agentes fluorescentes marcadores, cosméticos) pero también como nutraceutico, ya que se ha comercializado como antioxidante, antiinflamatorio, agente neuroprotector o hepatoprotector.

Los PUFA contienen tres o más dobles enlaces en un ácido graso de 18 o más átomos de carbono. Especialmente los PUFA denominados n-3 han demostrado ser efectivos para prevenir o tratar varias enfermedades (trastornos cardiovasculares, cáncer, diabetes tipo 2, trastornos inflamatorios del intestino, asma, artritis, trastornos renales y cutáneos, o depresión y esquizofrenia). Estos compuestos ahora se extraen mayoritariamente del aceite de pescado, pero debido a varios problemas (acumulación de compuestos tóxicos en peces, olor peculiar, sabor desagradable, inestabilidad oxidativa), existe un interés creciente por tener otras fuentes naturales como las microalgas de donde extraer estos compuestos.

3. Algunos problemas asociados al consumo de las microalgas

Los primeros desarrollos sobre el cultivo controlado de *Chlorella* llevaron a pensar que, debido a su alto valor nutritivo, esta microalga se convertiría en una importante fuente de alimento para la creciente población humana. Sin embargo, este objetivo aún no se ha logrado completamente debido a que su cultivo no es todavía suficientemente competitivo cuando se compara con el coste de los alimentos procedentes de fuentes vegetales.

Por otra parte, aunque el valor nutricional de las microalgas está bien documentado, también se sabe que la digestibilidad, y por lo tanto el valor nutricional real de estos alimentos depende del proceso tecnológico utilizado para la producción de la biomasa. Además, algunos estudios mencionan que el sabor, la textura, el color y el olor de la biomasa de las microalgas pueden ser un posible cuello de botella para su comercialización y por lo tanto es necesario que en el procesado de las microalgas se consigan las propiedades organolépticas deseadas por los consumidores. Todas estas propiedades físico-químicas y organolépticas son, por lo tanto, aspectos relevantes a considerar en el desarrollo de productos alimenticios o ingredientes alimentarios basados en las microalgas.

Además, uno de los factores limitantes del uso de grandes cantidades de microalgas para el consumo humano es su alto contenido en ácidos nucleicos. Los componentes de los ácidos nucleicos se metabolizan a ácido úrico. Las cantidades excesivas de ácido úrico producen efectos adversos para la salud, como gota o cálculos renales.

A veces la biomasa de las microalgas, además de producirse en condiciones controladas (ver más adelante), también se cosecha con fines comerciales en entornos naturales, como por ejemplo en los lagos ya comentados Klamath Falls (EEUU) o Chad. Aunque los nichos naturales son ventajosos con respecto al uso de fuentes de nutrientes presentes de forma natural, a menudo la calidad de esta biomasa está menos garantizada y es menos reproducible en comparación con la biomasa producida en sistemas controlados de cultivo. Algunas microalgas pueden producir toxinas potentes y, por lo tanto, cuando las microalgas se cultivan en cuencas abiertas o se cosechan en lagos naturales, existe el riesgo de que la biomasa esté contaminada con microalgas tóxicas extrañas y con otros tipos de contaminantes biológicos y no biológicos. Por consiguiente, en estos casos de cultivos en sus nichos naturales es necesario realizar una monitorización frecuente e intensa del producto obtenido.

4. Métodos de producción de microalgas

El cultivo de microalgas a gran escala es todavía uno de los grandes retos biotecnológicos que hay que resolver. Su gran potencial de mercado, tanto para su uso como alimento como en la producción de biodiésel, se fundamenta en que se puedan conseguir grandes cantidades de biomasa con un coste competitivo en ambos sectores, el alimentario y el energético. Como se ha comentado anteriormente, para su cultivo en algunos casos se aprovechan las aguas naturales

(lagos, lagunas, estanques) o estanques artificiales, sin embargo, en la mayoría de los casos estos cultivos se realizan en los denominados fotobioreactores (PBR, *Photobioreactors*) que pueden ser sistemas abiertos (OPS, *Open Pond System*) o cerrados (CPBR, *Closed Photobioreactors*) (Figura 1, Tabla 2). Cada uno de ellos ofrece sus ventajas y sus inconvenientes.

Tabla 2. Productos funcionales derivados de las microalgas: especies de microalgas, sistemas de producción y productos comerciales

Sistemas de producción	Productos funcionales	Especies de microalgas	Productos comerciales
Estanques y <i>raceways</i>	Proteínas, phicobiliproteínas carotenoides y PUFA	<i>Arthrospira maxima</i> , <i>Arthrospira platensis</i> , <i>Chlorella</i> sp., <i>Dunaliella</i> sp., <i>Nannochloropsis</i> sp., <i>Scenedesmus</i> sp., <i>Hematococcus pluvialis</i> , <i>Anabaena</i> sp.	Productos nutracéuticos: pastillas, cápsulas, bebidas, colorantes alimentarios, fertilizantes
Fotobiorreactores	Astaxantina	<i>Hematococcus pluvialis</i>	Nutraceutico con propiedades antioxidantes, colorante
Fermentadores	Lípidos y PUFA	<i>Cryptocodinium cobmni</i> , <i>Schyzochytrium</i> sp., <i>Ulkenia</i> sp.	Suplementos alimenticios, aditivos de fórmulas infantiles y productos vegetarianos

Fuente: adaptado de Buono *et al.* (2014).

Existen varios tipos de OPS generalmente de muy poca profundidad, por lo que se les denomina de forma genérica *shallow ponds*, que según los casos pueden estar agitados artificialmente o no. Entre los que están agitados se encuentran distintas configuraciones, pero las más frecuentes son en una configuración rectangular (*raceway pond*) o en un formato circular (*circular ponds*). La superficie máxima que suelen ocupar estos OPS agitados es de unos 10.000 m² debido a las limitaciones que existe con sus sistemas de agitación y aireación. Actualmente el OPS más utilizado para la producción de microalgas a nivel comercial es el *raceway* (Kumar *et al.*, 2015). Se construyen usando un circuito cerrado y un canal de circulación con una profundidad que varía de 0,2 a 0,5 m. El contenido del estanque se mezcla con palas giratorias para proporcionar una distribución homogénea evitando el depósito de la microalga en el fondo o en las paredes. Los OPS tienen un gran potencial para la obtención de diversos bioproductos a escala comercial, ya que requieren poca energía, y por lo tanto, son económicamente viables y fáciles de mantener (Yoo *et al.*, 2013). Sin embargo los OPS dependen de la luz natural para la iluminación del cultivo y, aunque su instalación y funcionamiento son baratos, al ser abiertos presentan distintas dificultades para el control preciso del sistema debido fundamentalmente a que los cultivos no son axénicos, ya que están sometidos a las variaciones climáticas.

Las especies que se cultivan actualmente en OPS son mayoritariamente especies extremófilas capaces de crecer en un ambiente altamente selectivo (alto valor de pH, alta salinidad o alta temperatura) para evitar el crecimiento de otras especies contaminantes (Xu *et al.*, 2009). Algunas de las microalgas que se cultivan son *Nannochloropsis*, *Chlorella*, espirulina, *D. salina*, *Scenedesmus*, *H. pluvialis*, *Anabaena*, *P. tricornutum*, *Micractinium* y *Actinastrum* (Kumar *et al.*, 2015).

Los sistemas CPBR tienen el potencial de lograr una mayor producción de biomasa en comparación con los OPS. Existen varios tipos de sistemas CPBR que incluyen reactores tubulares, bolsas de plástico, placas planas, «airlift», o reactores de tanque agitado (Xu *et al.*, 2009; Enzing *et al.*, 2014; Dogaris *et al.*, 2015). Incluso se han diseñado reactores utilizando las ventanas en edificios (Pagliolico *et al.*, 2017). Estos reactores ofrecen ventajas tales como una mayor eficiencia de mezcla y un mayor grado de control sobre parámetros importantes como la temperatura, intensidad y longitud de onda de la luz suministrada, o los ciclos luz/oscuridad. Por todo esto tienen una productividad volumétrica de biomasa más alta (0,2-3,8 g/L/d) en comparación con la obtenida en OPS tipo *raceway* (0,12-0,48 g/L/d) (Kumar *et al.*, 2015). Sin embargo, tienen enormes desventajas que limitan su uso a escala comercial. En todos los casos, el uso eficiente de la luz y el requerimiento de intercambio de gases son las principales limitaciones que dificultan el aumento de escala de 100 m² (CPBR) de superficie frente a los 10.000 m² en caso de los OPS (Klein-Marcuschamer *et al.*, 2013). Además otro factor a tener en cuenta es el coste operacional a la hora de manejar y limpiar multitud de CPBR que llega a ser hasta 100 veces superior al de los OPS (Kumar *et al.*, 2015). A pesar de estos inconvenientes ya hay compañías que están produciendo con éxito microalgas en CPBR, como por ejemplo Algatechnologies (<https://www.algatech.com/>) en Israel que posee un reactor tubular de 300 km de longitud que ocupa 10 acres de terreno desértico dedicado al cultivo de *H. pluvialis* para la producción de astaxantina. En China la compañía Algix cuenta con 1000 km de reactor tubular para abordar una producción de astaxantina pura de 3 t/año¹.

Otro método establecido para la producción de algunas microalgas para la obtención de subproductos en reactores cerrados es el cultivo heterótrofo el cual requiere la adición de fuentes de carbono orgánicas. Para la producción a gran escala, estos cultivos se realizan en fermentadores de acero que dependiendo del tamaño pueden estar dentro o fuera de las instalaciones de la industria. Actualmente estos fermentadores se utilizan para la producción de ácidos grasos insaturados de cadena larga por *Cryptosporidium cohnii*, *Shyzochytrium* o *Ulkenia*. En ocasiones *Chlorella* se ha cultivado en fermentadores para la obtención de un inóculo de alta densidad. Las algas heterotróficas pueden ser cultivadas en fermentadores de 100.000 L alcanzando unas densidades de 30-100 g/L (Enzing *et al.*, 2014)

El futuro de la biotecnología de microalgas depende del desarrollo de PBR a gran escala capaces de operar en condiciones óptimas definidas con riesgos mínimos de contaminación (Grobbelaar *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2012). En comparación con los OPS, los CPBR pueden eludir la mayoría de sus problemas, pero se necesita un desarrollo de sistemas de cultivo cerrado más económico y eficiente. Además, también se necesitan nuevos desarrollos en la iluminación y su control para hacer que los sistemas de cultura cerrados sean competitivos. En este sentido, se han utilizado fibras ópticas o diodos orientados a la irradiación (inclinados) que proporcionan iluminación interna para mejorar la intensidad de la luz (Glemser *et al.*, 2016; Sun *et al.*, 2016). Diseñar superficies con materiales adecuados, grupos funcionales o

¹ <http://algix.com/the-worlds-largest-haematococcus-farm-built-in-china/>.

recubrimientos superficiales, para prevenir la adherencia de las microalgas es también esencial para resolver los problemas típicos de bioincrustación en los reactores (Zerriouh *et al.*, 2017).

Por otro lado, las metodologías de escalado deben mejorarse para lograr disposiciones de luz eficientes, pérdidas mínimas de CO₂ y una mezcla y eliminación eficiente del O₂ generado (Gupta *et al.*, 2015). Los procesos de producción de microalgas guardan muchas similitudes con los bioprocesos tradicionales con otros microorganismos, pero exigen requisitos de monitorización únicos (Havlik *et al.*, 2016). La modulación y la dinámica de fluidos computacional se han utilizado para optimizar las configuraciones estructurales de los PBR (Xu *et al.*, 2009). El cultivo continuo de cultivos (Fernandes *et al.*, 2015), así como el desarrollo de PBR para sistemas de soporte vital en el espacio (Wagner *et al.*, 2016) añaden nuevos desafíos en este campo.

No hay muchos estudios que proyecten escenarios futuros sobre posibles mejoras de los costes de producción de microalgas (Ruiz *et al.*, 2016; Lam *et al.*, 2017; Brasil *et al.*, 2017). Uno de estos estudios asume que los costes de producción de microalgas (OPEX+CAPEX) en países o zonas muy soleadas (Turquía, Curazao, Arabia Saudita, Islas Canarias, Andalucía) que actualmente se estiman entre 3,2-3,8 euros/kg de biomasa utilizando CPBR de paneles planos en una escala de 100 ha podría llegar a bajar hasta los 0,5 euros en el sur de España (Ruiz *et al.*, 2016). La escala del proceso de producción es muy importante, ya que se estima que los costes de cultivo, cosecha y biorefinado de los productos en una escala de 100 ha podría suponer unos 6,4 euros/kg, en tanto que en una escala de 1 ha este coste sería 10 veces mayor (64,2 euros/kg = 28,4 euros/kg cultivo-cosecha + 35,8 euros/kg biorefinado) (Ruiz *et al.*, 2016). Sin embargo, escalas mayores de 100 ha no parecen disminuir significativamente los costes y la opción de usar módulos de producción de 100 ha parece la más conveniente.

Finalmente, a pesar de los problemas encontrados para desarrollar CPBR a gran escala, hay que mencionar que aunque los reactores cerrados podrían ser demasiado pequeños para algunos productos como los biocombustibles, pueden tener tamaños razonables para obtener productos de alto valor añadido como los nutracéuticos. Además, los CPBR permiten la producción de nutracéuticos mediante el uso de microalgas recombinantes.

5. Mercado de las microalgas para uso alimentario

La producción de microalgas se encuentra en una etapa temprana de desarrollo. Actualmente se estima una producción global de 30.000 t anuales, una cifra muy pequeña si se compara con los productos agrícolas, los derivados de fermentaciones o incluso con la producción de macroalgas. En España existe un número cada vez mayor de empresas dedicadas al cultivo de microalgas (Tabla 3).

En los últimos años, se ha generado un interés creciente de los consumidores por los «alimentos funcionales» de origen natural. Dentro de este concepto de «alimentación funcional» (o *healthy food* en inglés) se encuentran productos alimenticios, ingredientes o suplementos

dietéticos que pueden tener beneficios para la salud en general o que pueden prevenir, tratar o incluso curar algunas enfermedades. Los consumidores conscientes del impacto de la alimentación en la salud están impulsando la demanda de productos que tienen como objetivo mejorar el estado físico, aumentar la longevidad y prevenir la aparición de enfermedades crónicas (Price Waterhouse & Coopers, 2009). Según *Transparency Research Market* (TRM, 2015), el mercado mundial de nutracéuticos (que incluye ingredientes funcionales de alimentos y bebidas, suplementos dietéticos y productos de cuidado personal y farmacéuticos), que fue valorado en 165.620 millones de dólares en 2014, aumentará a 278.960 millones de dólares en el año 2021, exhibiendo una tasa CAGR de 7,3 % para este período. En este sentido, el uso alimentario de la biomasa procedente de microalgas y de sus metabolitos se considera un enfoque innovador dentro del desarrollo moderno de productos alimenticios más saludables (Gouveia *et al.*, 2008).

Aunque el volumen total de producción de las microalgas en general es relativamente pequeño, este mercado se ha caracterizado por sufrir una gran expansión. De acuerdo con un reciente informe de mercado publicado por *Credence Research (Algae Products Market - Growth, Future Prospects, Competitive Analysis, and Forecast 2016-2023)*, se espera que el mercado de productos de algas alcance ventas de 44.600 millones de dólares para el año 2023, con una tasa CAGR de más del 5 % entre los años 2016 a 2023.

Actualmente los productos de microalgas que dominan el sector de la alimentación son las microalgas secas (espirulina y *Chlorella*) comercializadas fundamentalmente como suplementos alimenticios. Los productos de alto valor añadido extraídos de las microalgas con mayor potencial en el mercado son los pigmentos y los ácidos grasos insaturados (PUFA) utilizados como aditivos y suplementos alimenticios.

A principios de los años sesenta emergió la primera industria de producción de microalgas con fines alimenticios en Japón a la que siguió más tarde otra en Taiwan para la producción de *Chlorella* para su utilización como complemento alimenticio. La biomasa se producía en estanques abiertos y se vendía como pastillas, primero en Japón y actualmente en todo el mundo. En la actualidad se producen cerca de 10.000 t anuales de *Chlorella* mediante cultivos autotróficos en OPS (a menudo suplementado con acetato) y cultivos heterótrofos en fermentadores en oscuridad donde se añade una fuente orgánica de carbono y energía. El precio de *Chlorella* en el mercado varía entre 20-30 dólares/kg según el fabricante, el proceso de producción, el volumen, los clientes y otros factores. El mercado de ingredientes de *Chlorella* está preparado para registrar una tasa CAGR de 25,4 %, y alcanzar ventas por 700 millones de dólares en el año 2022. El mercado es competitivo y está impulsado por el aumento de alimentos y bebidas funcionales y la creciente demanda de ingredientes naturales por parte de los consumidores.

La espirulina se ha comercializado desde principios de los años 70 y es actualmente el líder del mercado con el doble de producción que *Chlorella*. Se produce exclusivamente de forma autótrofa y casi en su totalidad en OPS tipo *raceway*. En los últimos diez años la producción de espirulina ha aumentado de 5.000 a 15.000 t, lo que supone un crecimiento anual del 15 %. Su precio es de alrededor de 30 dólares/kg y casi el 70 % se produce en China, India

y Taiwán. Se ha producido un mayor grado de desarrollo en los últimos 5 años desde que la FDA aprobó en el año 2013 la ficocianina para su uso como colorante azul en dulces. La lista de productos permitidos a los que se podía añadir la ficocianina se amplió en los años 2014 y 2015, y actualmente es el único colorante azul de origen natural que se encuentra aprobado en US, Europa y Asia. En la actualidad hay otros dos colorantes azules aprobados por la FDA, el *brilliant blue* y la indigotina pero ambos son de origen sintético. El mercado de pigmentos naturales está creciendo significativamente impulsado por sus propiedades antioxidantes y el rechazo progresivo de los consumidores hacia los colorantes artificiales, particularmente significativo en Europa (Transparency Research Market, 2015). Se espera que el mercado global de espirulina registre una tasa CAGR de 10 % hasta el año 2026, con un valor de casi US 2.000 millones de dólares, debido incluso a otros factores complementarios como el aumento de la aplicación de la espirulina en cosméticos.

Dunaliella y *Haematococcus* se cultivan también de forma auxótrofa para la extracción de β -caroteno y astaxantina, respectivamente. Estos carotenoides son muy abundantes en estas microalgas y se venden como nutracéuticos para consumo humano por sus propiedades antioxidantes y como suplemento alimenticio en acuicultura y otro tipo de piensos. Su producción total es pequeña (3.000 t de *D. salina* y 700 t de *H. pluvialis*) pero sin embargo su precio es elevado y se encuentra en el rango de 1.000-10.000 dólares/kg para β -caroteno y astaxantina, respectivamente. El mercado global de astaxantina sintética y de fuente natural en alimentos acuícolas, nutracéuticos, cosméticos y alimentos y bebidas se estima en 280 t valoradas en 447 millones de dólares en 2014, pero se proyecta que alcance en el año 2020 las 670 t valoradas en 1.100 millones de dólares. La astaxantina sintética, la levadura *Phaffia* rica en astaxantina y la bacteria *Paracoccus* se usan predominantemente en el sector de la acuicultura, mientras que la astaxantina derivada de *H. pluvialis* es la fuente principal para aplicaciones humanas tales como suplementos dietéticos, cosméticos y alimentos y bebidas.

El mercado mundial de carotenoides alcanzará los 1.700 millones de dólares en el año 2022 según las estimaciones. Esta cifra no está lejos de otra en la que este mercado está preparado para crecer a una tasa CAGR de alrededor del 5,1 % en la próxima década para alcanzar aproximadamente 1.950 millones de dólares en ventas en el año 2025. Hay que mencionar que, de forma general, los carotenoides de origen natural son mucho más apreciados en el mercado llegando a duplicar su precio respecto a las variantes sintéticas.

Un avance muy importante en la producción comercial de microalgas se ha producido gracias al cultivo de *C. cohnii* en fermentadores para la producción de DHA y EPA que se utilizan como ingredientes en las fórmulas de alimentos infantiles. Estos productos han generado un mercado de varios cientos de millones de dólares anuales. El volumen de negocio para estos productos es cada vez mayor (500 t de *C. cohnii* por año) por lo que no parece utópico que con el tiempo puedan remplazar completamente a los DHA/EPA obtenidos de los peces. De todos los productos derivados de las microalgas el DHA es el más vendido a continuación de la espirulina, de la *Chlorella* y de los carotenoides. El tamaño del mercado de

los ingredientes EPA/DHA en su aplicación como suplementos dietéticos podría superar las 95.000 t para el año 2022.

Otro mercado de gran potencial económico para las microalgas es el de la acuicultura de peces, moluscos, y crustáceos cuyo estado larvario requiere alimentación con microalgas vivas (Sirakov *et al.*, 2015). El valor para la acuicultura se encuentra en el hecho de que las microalgas son los principales y únicos productores de ácidos grasos omega-3 de cadena larga y algunos aminoácidos esenciales. Las microalgas son responsables, por ejemplo, del contenido de omega-3 de los peces y mariscos y su valor nutritivo para los humanos. La acuicultura está en continuo crecimiento desde mediados de los años setenta. El uso de proteínas de algas en lugar de harina de pescado en la alimentación de peces adultos permitiría un desacoplamiento de la producción acuícola de las pesquerías de forraje. Hasta ahora, la harina de pescado y el aceite de pescado siguen siendo sustancialmente más baratos que las microalgas, lo que limita que las microalgas entren con más fuerza en el mercado de los alimentos acuícolas, pese a ser un producto más sostenible desde el punto de vista medioambiental ya que no incide en la sobreexplotación de los recursos marinos. Sin embargo, la falta de alternativas a las microalgas para alimentar larvas y juveniles de peces asegura un mercado para las microalgas en acuicultura.

6. Legislación sobre el consumo de las microalgas

La seguridad alimentaria es un aspecto relevante en la producción y comercialización de las microalgas, especialmente en lo que se refiere a la producción en sistemas al aire libre, debido a que son más susceptibles de ser contaminados por otros microorganismos (Enzing *et al.*, 2014). Las normas aplicables a la producción y comercialización de los productos derivados de microalgas son responsabilidad de diferentes organismos reguladores en los diferentes países o regiones.

Tanto espirulina como *Chlorella* están aprobadas en Europa y en EEUU para el uso en alimentos y piensos, ya que se han venido consumiendo tradicionalmente durante décadas y su consumo se ha demostrado seguro y prolongado en el tiempo en humanos y animales. Si embargo, todas las demás microalgas están sujetas al cumplimiento de una regulación específica, antes de proceder a su comercialización, ya que es necesario demostrar su seguridad según el uso previsto.

En la UE, por ejemplo, en la actualidad hay dos reglamentos vigentes que afectan más estrechamente a la producción y comercialización de productos basados en microalgas para alimentos y piensos (Vigani y Olper, 2015), que son el Reglamento sobre alimentos y seguridad alimentaria y el Reglamento sobre nuevos alimentos y nuevos ingredientes alimentarios. La regulación sobre OMG (organismos genéticamente modificados) para alimentos y piensos se excluye de la lista porque, en este momento, no hay microalgas modificadas genéticamente en fase de comercialización. En 2002, el Parlamento Europeo y el Consejo adoptaron el Reglamento de la Ley General Alimentaria (EC n.º 178/2002) que establece los principios y

requisitos generales de la legislación alimentaria. Esta normativa establece un marco para el desarrollo de normativa específica sobre alimentos y piensos, tanto a nivel de la UE como de los diferentes países miembros. También establece una agencia independiente responsable del asesoramiento y apoyo científico, la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA)² y fija los procedimientos relativos a la seguridad alimentaria.

Por otra parte, los llamados «nuevos alimentos» (*novel foods*) se definen como alimentos que no han sido consumidos en gran medida por los seres humanos en la UE antes de 1997, cuando entró en vigor el primer Reglamento sobre nuevos alimentos. Los ejemplos de nuevos alimentos incluyen productos agrícolas de terceros países (semillas de chía), nutrientes recién producidos (zeaxantina sintética) o extractos de alimentos existentes (proteína de colza)³. Entre los años 1997 y 2014, hubo alrededor de ciento setenta solicitudes de autorización en toda la UE (7-10 solicitudes/año).

En noviembre del año 2015 se adoptó un nuevo reglamento sobre nuevos alimentos para la UE⁴. Este reglamento tiene como objetivo mejorar las condiciones para que las empresas puedan llevar más fácilmente alimentos nuevos e innovadores al mercado de la UE, manteniendo al mismo tiempo un alto nivel de seguridad alimentaria para los consumidores europeos. El nuevo Reglamento aumenta la eficacia del procedimiento de autorización, permite una entrada más rápida de alimentos seguros e innovadores al mercado y elimina obstáculos innecesarios para su comercialización, al tiempo que garantiza un alto nivel de seguridad alimentaria⁵. La regulación entró en vigor en enero de 2018, introduciendo un procedimiento centralizado de autorización y evaluación que será llevado a cabo a través de la EFSA.

Varios productos de microalgas ya han sido aprobados de acuerdo con estas regulaciones. *Odontella aurita* (Innovalg SARL) y *Tetraselmis chuii* (Fitoplancton Marino SL) han sido aprobados como nuevos complementos alimenticios. Por otra parte, como nuevos ingredientes alimentarios se han aprobados los aceites ricos en DHA y EPA de *Schizochytrium* sp. (Martek Bioscience, DSM Nutritional Products, Ocean Nutrition Canada Limited, Daesang Corp.) y de *Ulkenia* sp. (Lonza Ltd.) y astaxantina de *H. pluvialis* (Herbal Sciences International Ltd., Alga Technologies Ltd., Beijing Gingko-Group Biological Technology Co., Ltd., Fenchem Biotek Ltd., Cyanotech Corporation, InnoBio Ltd., AstaReal AB Ltd.).

En EEUU, la FDA es la agencia que regula la seguridad de los alimentos, incluidos los productos derivados de las microalgas. De acuerdo con la clasificación del Centro para la Seguridad Alimentaria y la Nutrición Aplicada de la FDA⁶, la biomasa de microalgas se clasifica como «otro suplemento dietético». La espirulina, *Chlorella*, *Dunaliella*, *Haematococcus*, *Schizochytrium*, *P. cruentum* y *C. cohnii* se clasifican como fuentes de alimentos que entran en la categoría GRAS por la FDA. También hay algunos productos clasificados como GRAS

² https://ec.europa.eu/food/safety/general_food_law_en.

³ https://ec.europa.eu/food/safety/novel_food_en.

⁴ https://ec.europa.eu/food/safety/novel_food/legislation_en.

⁵ <http://europa.eu>.

⁶ <http://www.cfsan.fda.gov>.

derivados de microalgas, como el aceite obtenido de *Schyzochitrium* sp. o *Ulkenia* sp., y el polvo entero de proteínas o un ingrediente lipídico obtenidos de *Chlorella* sp.

La FSANZ (*Food Standards*) de Australia y Nueva Zelanda es una autoridad binacional independiente responsable de las normas alimentarias y el etiquetado en ambos países. Esta agencia también regula el uso de nuevos ingredientes alimentarios, como son los productos de microalgas. De acuerdo con su *Food Standard Code*⁷, han otorgado permiso a Omega Tech Inc. (Fairfax, VA, EEUU) para el uso de la microalga marina seca *Schizochytrium* sp., que es rica en DHA, como un nuevo ingrediente alimentario en una gama limitada de alimentos.

Health Canada aconseja a los consumidores que tengan cuidado al usar productos con cianobacterias que no sean espirulina. Además, no permite la propaganda como sustancias terapéuticas de las sustancias comercializadas como alimentos.

7. Perspectivas futuras

El mercado de las microalgas es un mercado en expansión especialmente impulsado por los sectores energético y alimentario. En lo que se refiere a este último sector, aunque las microalgas se han utilizado durante siglos para proporcionar alimento a los humanos y a los animales, ha sido durante las últimas décadas cuando se ha ampliado el cultivo a escala industrial para usos alimentarios. Sus propiedades como suplementos alimentarios de valor nutracéutico están contribuyendo a expandir su mercado. Si a esto añadimos el creciente interés del sector cosmético es evidente que las microalgas van a ocupar, si no lo ocupan ya, un sitio importante dentro de la bioeconomía.

El mayor reto que se plantea desde el punto de vista de la bioeconomía de las microalgas es disminuir sus costes de producción. Para ello es necesario trabajar en distintas direcciones. Por una parte, hay que mejorar el diseño y la construcción de los grandes fotobioreactores. Aunque en los últimos años se han logrado importantes mejoras en este aspecto, debido principalmente a los trabajos para producir grandes cantidades de biocombustibles como energía renovable a partir de microalgas, aún se necesita invertir más en investigación en el campo de la construcción de fotobioreactores, y principalmente en los OPS realizados con materiales más económicos y respetuosos con el medioambiente. Por otro lado, hay que abaratar los costes de los procesos posteriores de *downstream*, tanto para cosechar y desecar la biomasa de microalgas como para llevar a cabo la extracción y purificación de compuestos nutracéuticos. Estos procesos representan los principales costos de las plantas de producción de microalgas, y por lo tanto es fundamental desarrollar técnicas menos exigentes que tengan bajo consumo de energía.

Aunque los beneficios nutricionales de las microalgas son muy diversos y están probados en muchos estudios en todo el mundo, es muy probable que con el incremento de su uso se

⁷ <http://www.foodstandards.gov.au/>.

puedan descubrir nuevos beneficios positivos para la salud que impulsen más aún su consumo. Su potencial para tratar y prevenir muchos tipos de enfermedades, por ejemplo, infecciones cardiovasculares, virales y bacterianas, debería mejorar el interés y promover las actividades de investigación clínicas para la salud humana. Por lo tanto, es necesario que se lleve a cabo una investigación más intensiva y rigurosa sobre los beneficios de los compuestos funcionales de las microalgas.

Es evidente que la pesca intensiva está haciendo disminuir la disponibilidad de peces y esto hace que con el tiempo dejen de ser una fuente sostenible de PUFA. Aunque las microalgas se pueden utilizar como una fuente alternativa de producción de estos compuesto, sin embargo, se usan muy pocas especies para y por lo tanto se requieren más estudios en este campo.

Finalmente destacar que, aunque pudiera parecer lo contrario, las microalgas son uno de los grupos de organismos más inexplorados en el mundo, porque no son fáciles de cultivar, y por ello es necesario aumentar el esfuerzo de investigación en el área de la bioprospección que involucre el aislamiento, la identificación y la optimización del crecimiento de nuevas cepas de microalgas.

Agradecimientos

La investigación sobre microalgas en el laboratorio del autor cuenta con el apoyo de subvenciones de la Comunidad de Madrid y los Fondos Estructurales de la Unión Europea (ref. S2013/ABI2783 [INSPIRA1-CM]), del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad (RTC-2016-4860-2), del Programa Intramural del CSIC (ref. 201420E086) y del programa H2020 FET-OPEN (LIAR: ref. 686585).

Referencias bibliográficas

- BAGCHI, D. y NAIR, S. (2017): *Developing New Functional Food and Nutraceutical Products*. San Diego, Academic Press.
- BILAL, M.; RASHEED, T.; AHMED, I. y IQBAL, H. M. N. (2017): «High-value compounds from microalgae with industrial exploitability-A review»; en *Frontiers Bioscience (Schol Ed)* (9); pp. 319-342.
- BLEAKLEY, S. y HAYES, M. (2017): «Algal proteins: Extraction, application, and challenges concerning production»; en *Foods* (6); pii:E33.
- BRASIL, B. S. A. F.; SILVA, F. C. P. y SIQUEIRA, F. G. (2017): «Microalgae biorefineries: The Brazilian scenario in perspective»; en *New Biotechnology* (39); pp. 90-98.

- BUONO, S.; LANGELLOTTI, A. L.; MARTELLO, A.; RINNA, F. y FOGLIANO, V. (2014): «Functional ingredients from microalgae»; en *Food and Function* (5); pp. 1669-1685.
- CHEW, K. W.; YAP, J. Y.; SHOW, P. L.; SUAN, N. H.; JUAN, J. C.; LING, T. C. *et al.* (2017): «Microalgae biorefinery: High value products perspectives»; en *Bioresources Technology* (229); pp. 53-62.
- DOGARIS, I.; WELCH, M.; MEISER, A.; WALMSLEY, L. y PHILIPPIDIS, G. (2015): «A novel horizontal photobioreactor for high-density cultivation of microalgae»; en *Bioresources Technology*, (198); pp. 316-324.
- ENZING, C.; PLOEG, M.; BARBOSA, M. y SIJTSMA, L. (2014): *JRC Scientific and Policy Reports: Microalgae-based products for the food and feed sector: an outlook for Europe*. Institute for Prospective Technological Studies (Eds: Mauro Viganì, Claudia Parisi, Emilio Rodríguez Cerezo). Joint Research Centre. European Commission.
- FAO (2011): «A review on culture, production and use of spirulina as food for humans and feeds for domestic animals»; en HABIB, M. A. B.; PARVIN, M.; HUNTINGTON, T. C. y HASAN, M. R., eds.: *FAO Fisheries and Aquaculture Circular* (1034).
- FAO. (s. f.). *World agriculture: towards 2015/2030*. A FAO perspective.
- FERNANDES, B. D.; MOTA, A.; TEIXEIRA, J. A. y VICENTE, A. A. (2015): «Continuous cultivation of photosynthetic microorganisms: Approaches, applications and future trends»; en *Biotechnology Advances* (33); pp.1228-1245.
- FU, W.; CHAIBOONCHOE, A.; KHRAIWESH, B.; NELSON, D. R.; AL-KHAIRY, D.; MYSTIKOU, A. *et al.* (2016): «Algal cell factories: Approaches, applications and potentials»; en *Mar Drugs* (14); pii:E225.
- GANGL, D.; ZEDLER, J. A.; RAJAKUMAR, P. D.; MARTINEZ, E.M., RISELEY, A., WŁODARCZYK, A. *et al.* (2015): «Biotechnological exploitation of microalgae»; en *Journal of Experimental Botany* (22); pp. 6975-6990.
- GARCÍA, J. L.; DE VICENTE, M. y GALÁN, B. (2017): «Microalgae, old sustainable food and fashion nutraceuticals»; en *Microbial Biotechnology* (10); pp. 1017-1024.
- GLEMSE, M.; HEINING, M.; SCHMIDT, J.; BECKER, A.; GARBE, D.; BUCHHOLZ, R. y BRÜCK, T. (2016): «Application of light-emitting diodes (LEDs) in cultivation of phototrophic microalgae: current state and perspectives»; en *Applied Microbiology and Biotechnology* (100); pp. 1077-1088.
- GROBBELAAR, J. U. (2010): «Microalgal biomass production: challenges and realities»; en *Photosynthesis Research* (106); pp. 135-144.
- GOUVEIA, L.; BATISTA, A. P.; SOUSA, I.; RAYMUNDO, A. y BANDARRA, N. M. (2008): «Microalgae in novel food products»; en PAPADOPOULOS, K. N., ed.: *Food Chemistry Research Developments 2*. Nova Science Publishers, Inc.

- GUPTA, P. L.; LEE, S. M. y CHOI, H. J. (2015): «A mini review: photobioreactors for large scale algal cultivation»; en *World Journal of Microbiology and Biotechnology* (31); pp. 1409-1417.
- HAVLIK, I.; SCHEPER, T. y REARDON, K. F. (2016): «Monitoring of microalgal processes»; en *Advances in Biochemical Engineering Biotechnology* (153); pp. 89-142.
- HENCHION, M.; HAYES, M.; MULLEN, A. M.; FENELON, M. y TIWARI, B. (2017): «Future protein supply and demand: Strategies and factors influencing a sustainable equilibrium»; en *Foods* (6); pii: E53.
- KLEIN-MARCUSCHAMER, D.; CHISTI, Y.; BENEMANN, J. R. y LEWIS, D. (2013): «A matter of detail: assessing the true potential of microalgal biofuels»; en *Biotechnology and Bioengineering* (110); pp. 2317-2322.
- KUMAR, K.; MISHRA, S. K.; SHRIVASTAV, A.; PARK, M. S. y YANG, J. W. (2015): «Recent trends in the mass cultivation of algae in raceway ponds»; en *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (51); pp. 875-885.
- NICOLETTI, M. (2016): «Microalgae nutraceuticals»; en *Foods* (5); pii:E54.
- ODJADJARE, E. C.; MUTANDA, T. y OLANIRAN, A. O. (2017): «Potential biotechnological application of microalgae: a critical review»; en *Critical Review in Biotechnology* (37); pp. 37-52.
- PAGLIOLICO, S. L.; LO VERSOB, V. R. M.; BOSCOA, F.; MOLLEAA, C. y LA FORGIAC, C. (2017): «A novel photo-bioreactor application for microalgae production as a shading system in buildings»; en *Energy Procedia* (111); pp. 151-160.
- PRICEWATERHOUSE&COOPERS (2009): *Leveraging growth in the emerging functional foods industry: Trends and market opportunities*.
- RUIZ, J.; OLIVIERI, G.; DE VREE, J.; BOSMA, R.; WILLEMS, P.; REITH, J. H.; EPPINK, M. H. M.; KLEINEGRIS, D. M. M.; WIJFFELS, R. H. y BARBOSA, M. J. (2016): «Towards industrial products from microalgae»; en *Energy Environmental Science* (9); pp. 3036-3043
- SIRAKOV, I.; VELICHKOVA, K.; STOYANOVA, S. y STAYKOV, Y. (2015): «The importance of microalgae for aquaculture industry»; en *International Journal of Fisheries Aquatic Studies* (2); pp. 81-84.
- SLOCOMBE, P. S. y BENEMANN, J. R. (2017): *Microalgal production for biomass and high-value products*. CRC Press.
- SUN, Z.; LI, T.; ZHOU, Z. G. y JIANG, Y. (2016): «Microalgae as a source of lutein: chemistry, biosynthesis, and carotenogenesis»; en *Advances in Biochemical Engineering Biotechnology* (153); pp. 37-58.
- T LAM, G. P.; VERMUË, M. H.; EPPINK, M. H. M.; WIJFFELS, R. H. y VAN DEN BERG, C. (2017): «Multi-Product microalgae biorefineries: From concept towards reality»; en *Trends in Biotechnology*; pii: S0167-7799(17); pp. 30275-5.

- TRANSPARENCY MARKET RESEARCH (2015): *Nutraceuticals Market - Global Industry*.
- VIGANI, M. y OLPER, A. (2015): «Patterns and determinants of GMO regulations: An overview of recent evidence»; en *AgBioForum* (18); pp. 44-54.
- WAGNER, I.; STEINWEG, C. y POSTEN, C. (2016): «Mono- and dichromatic LED illumination leads to enhanced growth and energy conversion for high-efficiency cultivation of microalgae for application in space»; en *Biotechnology Journal* (11); pp. 1060-1071.
- WANG, B.; LAN, C. Q. y HORSMAN, M. (2012): «Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses»; en *Biotechnology Advances* (30); pp. 904-912.
- WELLS, M. L.; POTIN, P.; CRAIGIE, J. S.; RAVEN, J. A.; MERCHANT, S. S.; HELLIWELL, K. E. *et al.* (2017) «Algae as nutritional and functional food sources: revisiting our understanding»; en *Journal of Applied Phycology* (29); pp. 949-982.
- XU, L.; WEATHERS, P. J.; XIONG, X. R. y LIU, C. Z. (2009): «Microalgal bioreactors: Challenges and opportunities»; en *Engineering Life Science* (9); pp. 178-189.
- YAN, N.; FAN, C.; CHEN, Y. y HU, Z. (2016): «The potential for microalgae as bioreactors to produce pharmaceuticals»; en *International Journal of Molecular Science* (17); pii:E962.
- YOO, J. J.; CHOI, S. P.; KIM, J. Y.; CHANG, W. S. y SIM, S. J. (2013): «Development of thin-film photo-bioreactor and its application to outdoor culture of microalgae»; en *Bioprocess and Biosystems Engineering* (36); pp. 729-36.
- ZERIOUH, O., REINOSO-MORENO, J.V., LÓPEZ-ROSALES, L., CERÓN-GARCÍA, M.D.C., SÁNCHEZ-MIRÓN, A., GARCÍA-CAMACHO, F. y MOLINA-GRIMA, E. (2017): «Biofouling in photobioreactors for marine microalgae»; en *Critical Review in Biotechnology* (37); pp. 1006-1023.



MEDITERRÁNEO
ECONÓMICO

32

- I. Iniciativas europeas en bioeconomía
- II. Perspectivas de la bioeconomía en España
- III. Necesidad de una sólida base científica y técnica en bioeconomía
- IV. Bioeconomía, bioindustrias y seguridad alimentaria
- V. Ejemplos de éxito en la bioeconomía
- VI. Bioeconomía y bioenergía



EL PAPEL DE LA BIOENERGÍA EN LA NUEVA BIOECONOMÍA

Mercedes Ballesteros Perdices
CIEMAT

Resumen

El cambio climático y el agotamiento de determinados recursos estratégicos han colocado a la bioeconomía en la agenda de las políticas públicas en muchos países desarrollados. La energía es un insumo fundamental del tejido productivo y la bioenergía está destinada a ser un elemento central en esta nueva bioeconomía. El paulatino remplazo de los combustibles fósiles por biocombustibles, se presenta como una respuesta a las actuales crisis sociales y ambientales derivadas del modelo energético actual y la bioenergía está llamada a satisfacer una proporción cada vez mayor de nuestras necesidades energéticas, tanto en la automoción como de demanda térmica y eléctrica. Al ser una importante fuente de creación de puestos de trabajo, especialmente en áreas rurales a nivel local y regional, la bioenergía puede contribuir a la cohesión social, realizando una valiosa aportación a la sociedad más allá de su genuina contribución energética.

En este capítulo, se describe la biomasa como recurso energético, analizando las materias primas y las tecnologías para su transformación en biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos. Asimismo, se describen las distintas aplicaciones a las que se destinan los biocombustibles (calor, electricidad y combustibles de transporte) y su grado de penetración en el mercado. Por último, se analizan los aspectos medioambientales, sociales y económicos de la producción y uso energético de la biomasa, con especial mención a las controversias generadas sobre la potencial competencia de la producción de biomasa a gran escala con el suministro de alimentos y el acceso al agua y la tierra.

Abstract

Climate change and depletion of certain strategic resources have placed the bioeconomy on the agenda of public policies in many developed countries. Energy is a fundamental component of the production network and bioenergy is destined to be a central element in this new bioeconomy. The gradual replacement of fossil fuels by biofuels is presented as a response to the current social and environmental crises deriving from the current energy model, and bioenergy is called upon to satisfy an ever-growing proportion of our energy needs, both in the automotive industry and for thermal and electrical demand. As a significant source of job creation, particularly in rural areas at a local and regional level, bioenergy could contribute to social cohesion, making a valuable contribution to society beyond its genuine energy contribution.

This chapter describes biomass as an energy source, analysing raw materials and technologies to transform it into solid, liquid, and gas biofuels. Likewise, we look at the various applications of biofuels (heat, electricity, and transport fuel), as well as its market penetration. Finally, we analyse the environmental, social, and economic issues relating to the production and use of energy from biomass, with special mention of the controversies surrounding the potential competition of large-scale biomass production with food supplies and access to water and soil.

1. Introducción

El ciclo actual de crecimiento económico está basado en la explotación de los recursos no renovables para la producción de energía, productos químicos y otros insumos industriales. Aunque dicho modelo ha proporcionado crecimiento, empleo y prosperidad en muchas zonas del planeta, cada vez es más evidente que este modelo no es sostenible en el futuro, tanto por

el agotamiento de los recursos no renovables, como por los efectos ambientales negativos que tiene su uso. Esta situación es especialmente preocupante en el sector energético. El suministro actual de energía mundial está basado en un 80 % en el uso de combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural) y la única solución frente al problema del cambio climático es la transformación del modelo energético actual en uno más sostenible y respetuoso con el medioambiente.

En este contexto, la Comisión Europea está decidida a desarrollar una economía baja en carbono para el año 2050¹. Para ello está trabajando en incorporar al marco legal el concepto de economía verde. Según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente², la economía verde se define como aquella economía «baja en carbono, eficiente en el uso de los recursos y socialmente inclusiva» cuyo objetivo es la mejora del bienestar humano y la equidad social, mientras que se reducen significativamente los riesgos medioambientales. Esta economía verde plantea, entre otras cosas, la necesidad de sustituir el uso de combustibles fósiles por energías renovables, lograr una vida urbana más sostenible y, sobre todo, ser eficientes en el uso de los recursos y la energía.

En el marco del amplio concepto de economía verde, la bioeconomía comprende aquella parte de la economía que utiliza recursos biológicos renovables de la tierra y el mar (cultivos, bosques, peces, animales y microorganismos) para producir alimentos, materiales y energía. Es preciso por tanto, crear los instrumentos necesarios para una transición desde una sociedad basada en la utilización de recursos fósiles a otra de tipo biológico, con la investigación y la innovación como motores, que concilie las demandas de gestión sostenible de la agricultura, la pesca, la seguridad alimentaria y la utilización sostenible de los recursos biológicos renovables, garantizando al mismo tiempo la biodiversidad y la protección del medioambiente.

La evolución hacia un mayor uso de recursos renovables tiene uno de sus mayores potenciales en el campo de la energía. En el contexto energético, la bioeconomía se presenta como una respuesta a las actuales crisis sociales y ambientales derivadas del modelo energético actual, con el objetivo de reemplazar los combustibles fósiles por biocombustibles renovables derivados de la biomasa. La bioenergía está llamada a satisfacer una proporción cada vez mayor de nuestras necesidades energéticas, tanto en la automoción como en la demanda térmica y eléctrica.

2. La biomasa como recurso energético

La energía que contiene la biomasa es energía solar almacenada a través de la fotosíntesis. Mediante este proceso algunos organismos vivos como las plantas superiores y las macro y microalgas, convierten la energía solar, los compuestos inorgánicos, el agua y el CO₂, en compuestos orgánicos.

¹ COMMUNICATION COM (2011).

² UNEP (2011).

Si consideramos el caso de la bioenergía, a las características comunes al resto de las energías renovables, como son su carácter autóctono, el respeto por el medioambiente y la creación de más empleo que las fuentes convencionales, se le unen otras ventajas. Por una parte, es una energía complementaria a otras necesidades medioambientales (limpieza de bosques, prevención de la erosión y fijación de la población rural). Por otra, permite un cierto grado de almacenamiento, lo que la convierte en una energía gestionable que puede adaptar su producción a los picos de demanda. Estas ventajas hacen de la biomasa un recurso energético atractivo, cuyo desarrollo puede constituir una fuente importante de empleo, convirtiéndose en un elemento de gran importancia para el equilibrio territorial, en especial en las zonas rurales. Otro aspecto interesante de la biomasa, es el hecho de ser la única fuente renovable capaz de proporcionar combustibles sólidos líquidos y gaseosos para ser utilizados en la producción de calor, electricidad y biocombustibles líquidos para el sector del transporte.

La biomasa en forma de leña fue la primera y única fuente energética utilizada por el hombre hasta la llegada del carbón y continuó siendo el principal recurso energético mundial hasta el siglo XIX. La producción primaria global de biomasa es equivalente a 4.500 EJ (10^{18} julios)³. En torno al 60 % de esta biomasa se genera en el medio terrestre, mientras que el 40 % restante se produce en las aguas continentales y marinas y es de más difícil utilización. Rosillo-Calle *et al.* (2006) estimaron que del potencial total de la biomasa, menos de un 10 % es utilizable de forma sostenible para el medioambiente y viable desde un punto de vista económico. No obstante, esta energía sería suficiente para satisfacer la demanda mundial de energía primaria. La Agencia Internacional de la Energía⁴ calcula que, actualmente, el 10 % de la energía primaria mundial procede de la biomasa. Es un porcentaje comparable al que se obtiene del gas natural (17 %) o de la energía nuclear (7 %). Gran parte de este porcentaje corresponde a los países pobres y en desarrollo. Según datos del Fondo de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)⁵: «Algunos países pobres obtienen el 90 % de su energía de la leña y otros biocombustibles». En África, Asia y Latinoamérica representa la tercera parte del consumo energético y para 2.000 millones de personas es la principal fuente de energía en el ámbito doméstico. En muchas ocasiones, esta utilización masiva no se realiza mediante el uso racional y sostenible de los recursos, sino como una búsqueda desesperada de energía que provoca la deforestación de grandes áreas. Por ello, el desarrollo de sistemas bioenergéticos que permitan revalorizar los recursos de la biomasa mediante tecnologías eficientes y respetuosas con el entorno puede suponer un avance significativo en el desarrollo de los países pobres, evitando que el aumento del consumo energético asociado a este desarrollo, ponga en peligro el medioambiente y la seguridad de su abastecimiento energético. La propia FAO⁶ reconoce que «la mejora del uso eficiente de los recursos de la energía de la biomasa, incluidos los residuos agrícolas y las plantaciones de cultivos energéticos, ofrece a los países en vías de desarrollo oportunidades de empleo, beneficios ambientales y la posibilidad de mejorar

³ SIMS (2004).

⁴ IEA BIOENERGY (2007).

⁵ FAO (2017).

⁶ FAO (2014).

sus infraestructuras rurales». En la Unión Europea, la bioenergía, según datos de AEBIOM⁷, representa en este momento alrededor del 60 % de toda la energía renovable consumida, lo que equivale al 10 % del consumo final bruto de energía en Europa.

Conviene aclarar que el término «biomasa» engloba un gran grupo de materiales de diversos orígenes y con características muy diferentes. Se considera biomasa energética los residuos de los aprovechamientos forestales y agrícolas, los residuos de las industrias agroforestales, los residuos de origen animal o humano y los cultivos con fines energéticos. A su vez, la biomasa puede transformarse en energía mediante un amplio espectro de procesos termoquímicos (combustión, pirólisis y gasificación) o bioquímicos (digestión anaerobia, fermentación). El observatorio que realiza el seguimiento de la situación de las energías renovables en la Unión Europea⁸ distingue dentro de la biomasa cuatro fuentes energéticas diferentes: biomasa sólida, biogás, fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), y biocombustibles líquidos (también llamados biocarburantes).

Esta heterogeneidad, tanto de recursos como de aplicaciones, es la principal característica de la biomasa, lo que hace imposible abordar esta área desde una única perspectiva, pues existen tantas como combinaciones entre tipos de biomasa utilizables y tecnologías para su aprovechamiento energético. Esta heterogeneidad también se refleja en la falta de consenso en lo que debe considerarse biomasa con fines energéticos. La definición de la Especificación Técnica Europea CEN/TS 14588⁹ considera biomasa «todo material de origen biológico excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización». La Directiva 2009/28/CE, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables¹⁰ define la biomasa como la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal), de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales.

Esta heterogeneidad genera una cierta confusión al utilizar los términos biomasa, biocombustibles y bioenergía que muchas veces se ve reflejada incluso en los informes técnicos y en la legislación. El término «biomasa», engloba un gran grupo de materiales de diversos orígenes y con características muy diferentes y hace referencia al recurso energético, es decir la materia orgánica que puede utilizarse como fuente de energía eficiente. Dentro de esta definición se encuentran los residuos de aprovechamientos forestales, agrícolas, de la industria agroalimentaria, los residuos de origen animal o humano y los cultivos con fines energéticos. Por biocombustible entendemos una serie de productos intermedios obtenidos a partir de la biomasa. Derivan de esta mediante su tratamiento por procesos físicos, químicos y/o biológicos. Dependiendo de su naturaleza, se pueden clasificar en biocombustibles líquidos, sólidos y

⁷ AEBIOM STATISTICAL REPORT (2017).

⁸ RES EUROSERV'ER BAROMETER; en: <https://www.euroserv-er.org/>.

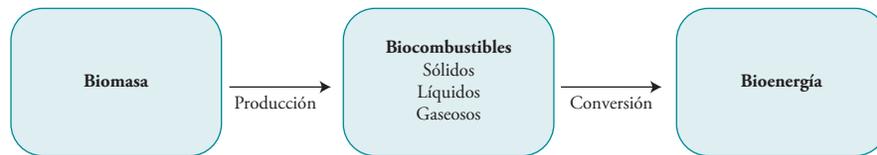
⁹ DD CEN/TS 14588-2004 solid biofuels. Terminology, definitions and descriptions. Standard Number: DD CEN/TS 14588-2004.

¹⁰ Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE; en: <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:es:pdf>.

gaseosos. En el contexto energético, es frecuente la utilización restrictiva del término biomasa para referirse a la biomasa sólida utilizada como combustible, aunque para esta finalidad es más propia la utilización del término biocombustible sólido. Es interesante precisar también que, frecuentemente, se utiliza el término de biocombustible para referirse a los utilizados en el transporte (bioetanol, biodiésel), cuando sería más correcto utilizar la palabra biocarburantes. El término bioenergía hace referencia a la energía obtenida a partir de biocombustibles.

En la Figura 1 se muestra la relación entre los conceptos de biomasa, biocombustible y bioenergía.

Figura 1. Relación entre los conceptos básicos de la biomasa energética



3. Origen y tipos de biomasa

La biomasa, puede clasificarse atendiendo a su composición o su origen. Atendiendo a su composición podemos distinguir cuatro tipos de biomasa: (i) biomazas azucaradas que contienen sacarosa, como la caña de azúcar y la remolacha; (ii) biomazas amiláceas, como los cereales o los tubérculos de patata, que poseen importantes cantidades de almidón (polímero de glucosa) o inulina (polímero de fructosa y glucosa); (iii) biomazas oleaginosas, como el girasol, la colza, la palma y la soja, que en sus semillas contiene aceites vegetales y; (iv) biomazas lignocelulósicas como la madera y la paja cuyos componentes principales son la celulosa, hemicelulosa y lignina.

Atendiendo a su origen, los materiales biomásicos se pueden clasificar en dos grupos. Por un lado la biomasa natural, generada en los bosques y ecosistemas naturales. Aunque la explotación de este tipo de biomasa ha sido y sigue siendo, la principal fuente energética de pueblos y países subdesarrollados y en vías de desarrollo, su utilización a gran escala no es factible por razones de mantenimiento del equilibrio en el medioambiente natural. Por otro, la biomasa antropogénica, en cuya formación interviene el hombre. Se divide en biomasa residual (agrícola, forestal y de sus industrias derivadas, así como los residuos urbanos orgánicos) y cultivos energéticos específicamente dirigidos a la producción de energía.

En muchos casos, los cultivos energéticos son las mismas especies agrícolas o forestales que se cultivan con fines no energéticos, pero con condiciones de cultivo diferentes. Así ocurre por ejemplo, con el chopo, el sauce o el eucalipto que, cuando van a ser dedicadas a uso energético, se cultivan a turnos de corta menores y con mayores densidades de plantación que

cuando se destinan a la producción de madera o papel. Los cultivos energéticos deben cumplir como premisa principal ser capaces de rendir la máxima cantidad neta de energía posible, lo que significa que los balances económicos y energéticos (relación entre la energía contenida en el producto obtenido y la energía total invertida en su producción) deben ser positivos. Deben ser especies perennes y vivaces, con capacidad de rebrote y presentar una alta resistencia, minimizando la utilización de fertilizantes y pesticidas.

Es difícil predecir cuál será en el futuro el papel de la biomasa cultivada específicamente para fines energéticos. Si bien existe una amplia experiencia en las prácticas de gestión tradicionales de las plantaciones leñosas en la industria de la pulpa y el papel, todavía la información de plantaciones forestales a gran escala para energía es escasa. Los cultivos energéticos son en muchos aspectos un nuevo concepto para el agricultor y para su desarrollo es crucial la selección de las especies a cultivar, su localización y la realización de prácticas agrícolas respetuosas con el medioambiente que no desplacen otros usos del suelo de alto valor agrícola y ecológico.

4. Tipos y tecnologías de producción de biocombustibles

4.1. Biocombustibles sólidos

Se consideran biocombustibles sólidos aquellos combustibles obtenidos a partir de biomasa que se encuentran en estado sólido. Son generalmente de naturaleza lignocelulósica y se obtienen mediante procesos físicos. El origen de estos biocombustibles engloba distintos sectores productivos, desde los cultivos agrícolas o los aprovechamientos forestales, hasta los residuos producidos en industrias agroalimentarias o forestales. Las características de los biocombustibles sólidos varían según su composición y humedad y la energía que pueden generar por unidad de masa o de volumen depende de estos parámetros.

La forma más conocida y antigua de utilización de la biomasa sólida es la cocción de los alimentos o la calefacción. En la mayoría de estas aplicaciones, la biomasa se utiliza según se recoge, sin ninguna preparación previa, lo que conlleva dificultad en su manejo y baja eficiencia en los procesos de transformación. Para facilitar el manejo, transporte y alimentación de esta biomasa al sistema de conversión energética (caldera) es preciso realizar reducciones de tamaño y forma de estos residuos, obteniéndose un biocombustible sólido apto para el abastecimiento automatizado del combustible. Estas transformaciones previas pueden ir desde un simple astillado hasta procesos más complejos como la densificación. La densificación es un proceso que permite obtener biocombustibles sólidos con mayor calidad comercial. Consiste en la transformación físico-mecánica, con o sin aditivos, de los materiales lignocelulósicos de granulometría fina y baja densidad, para la obtención de sólidos de forma y tamaño regulares y elevada densidad. Se distinguen dos tipos de productos densificados: los pelets y las briquetas. Se denominan briquetas a los densificados cuya dimensión es mayor de 30 mm y pelets los que tienen menos de 30 mm. En general, las briquetas se emplean en calefacción doméstica

(chimeneas francesas y estufas de leña), mientras que los pellets no solo se utilizan en estufas y calderas de uso doméstico e industrial, sino también en el sector de la producción de energía.

En la actualidad, el 46 % de la energía renovable en la UE proviene de la biomasa sólida, casi exclusivamente madera. Según el Observatorio Europeo de Energías Renovables¹¹, en el año 2016 la biomasa sólida representó 68,8 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep, energía que rinde una tonelada de petróleo) del calor para usos domésticos, el 3 % (93,5 TWh) de la electricidad producida en la UE y el 15 % (10,3 Mtep) del calor producido en las unidades industriales. La Comisión Europea espera, basándose en las estimaciones nacionales, que el suministro de biomasa sólida continuarán aumentando (de 103,3 Mtep en el año 2012 a 132 Mtep en el 2020), cada año con una aportación mayor de la biomasa agrícola (principalmente residuos y subproductos agrícolas) También aumentarán las importaciones procedentes de terceros países, principalmente en forma de astillas y pellets de madera.

4.2. Biocombustibles gaseosos

Los biocombustibles gaseosos (biogás y gas de gasificación) son aquellos combustibles obtenidos a partir de biomasa que se encuentran en estado gaseoso en condiciones normales de presión y temperatura. Se destinan a la producción de calor y electricidad o como combustibles para el transporte.

El biogás (constituido por un 50-70 % de metano y dióxido de carbono, junto con pequeñas proporciones de otros gases como hidrógeno, nitrógeno y sulfuro de hidrógeno), es un gas combustible que se genera por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno y mediante la acción de microorganismos específicos (bacterias anaerobias). Este proceso, denominado digestión anaerobia o biometanización, puede ocurrir de manera forzada en digestores anaerobios o de manera natural en vertederos controlados de residuos sólidos urbanos (RSU).

La nomenclatura internacional utilizada por Eurostat¹² y la Agencia Internacional de la Energía divide el biogás procedente de la digestión anaeróbica en tres subsectores, segmentados por origen y tratamiento de residuos: (i) el biogás de lodos de depuradora, producidos por biometanización de los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales; (ii) el biogás de vertedero, producido de manera natural en las instalaciones de almacenamiento de residuos no peligrosos, y (iii) otro biogás, obtenido por digestión anaerobia de residuos ganaderos, de la industria alimentaria o por codigestión.

El biogás tiene un poder calorífico entre 3.500 y 4.600 kilocalorías/Nm³ (Normal metro cúbico). Este biogás se puede utilizar en hornos, estufas, secadores y calderas, o para producir energía eléctrica mediante turbinas o plantas generadoras de gas a gas.

¹¹ Solid Biomass Barometer. Solid Biomass Barometer-Eurobserv'er-December 2017; en: <https://www.eurobserv-er.org/category/all-solid-biomass-barometers>.

¹² Renewable energy sources statistics in the European Union, (2001). Data 1989-1998; en: <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/5627744/KS-37-01-647-EN.PDF/0996c8ec-3834-44e6-8b72-65f0a9af180e>.

La mayor parte de la producción actual de biogás en la Unión Europea proviene de plantas de digestión anaerobia (biometanización) de muy diversa tipología y capacidad, desde pequeñas plantas instaladas en granjas hasta grandes plantas en industrias de procesado de alimentos. Las materias primas también son muy variables: residuos ganaderos, residuos agrícolas, de la industria agroalimentaria, o residuos domésticos, entre otros. En algunos casos, estos residuos se suplementan con cultivos energéticos, por ejemplo maíz, en lo que se denomina codigestión para aumentar la producción de biogás.

Existe otro biocombustible gaseoso obtenido por gasificación de la biomasa sólida (madera, residuos forestales, residuos domésticos sólidos). El gas de gasificación se obtiene sometiendo a la biomasa a temperaturas muy altas (800-1.000 °C) en presencia de cantidades limitadas de oxígeno. Según se utilice aire u oxígeno puro como agente gasificante, se obtienen dos productos distintos. En el primer caso se obtiene gasógeno o gas pobre (mezcla de monóxido de carbono y nitrógeno) que puede utilizarse para obtener electricidad y vapor. En el segundo caso, se obtiene gas de síntesis (monóxido de carbono e hidrógeno) que puede utilizarse como combustible directo, como fuente de hidrógeno, o como materia prima química para preparar gasolinas o gasóleos mediante el proceso Fischer-Tropsch. Estos procesos no son tecnologías maduras aunque existen proyectos de demostración en marcha en Finlandia, Suecia y Holanda.

4.3. Biocombustibles líquidos

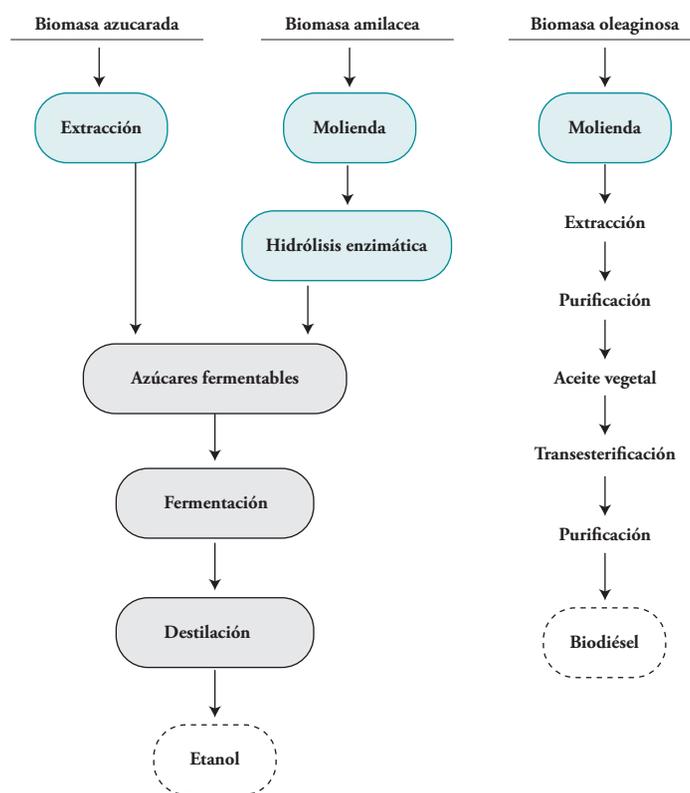
Se definen como biocombustibles líquidos aquellos combustibles obtenidos a partir de biomasa que se encuentran en estado líquido en condiciones normales de presión y temperatura. Se emplean en calderas para la producción de calor y electricidad o en motores de combustión interna que se denominan biocarburantes. Entre ellos se encuentran el biodiésel, el bioetanol y los aceites de pirólisis.

El término biocarburante líquido engloba a todos aquellos combustibles líquidos derivados de la biomasa que tienen características parecidas a gasolinas y gasóleos, lo que permite su utilización en motores sin tener que efectuar modificaciones importantes. En la fase inicial del desarrollo de los biocarburantes se clasificaron en base a sus propiedades como biodiésel (más recientemente aceites vegetales hidrogenados o HVO por sus siglas en inglés) para sustituir el diésel y bioetanol por sustituir a la gasolina. Sin embargo, las preocupaciones derivadas del impacto de los biocarburantes sobre la seguridad alimentaria, ha conducido a una nueva clasificación basada en categorías de generación, por lo que se habla de biocarburantes de primera, segunda y tercera generación. En términos generales, los de primera generación (1G) se producen a partir de materias primas que también pueden consumirse como alimentos humanos como son el azúcar, el almidón o el aceite vegetal. Dado que los biocarburantes 1G se extraen fácilmente utilizando tecnologías convencionales, también se conocen como «biocarburantes convencionales». Los biocarburantes de segunda generación (2G) se producen a partir de materias primas sostenibles, principalmente de tipo lignocelulósico, que no se utilizan

para el consumo humano. Como estas materias primas lignocelulósicas son más difíciles de transformar en biocarburantes y, por tanto, se necesitan tecnologías de conversión más complicadas, los biocombustibles 2G también se conocen como «biocombustibles avanzados». El término tercera generación (3G) es la última subdivisión de biocombustibles y se refiere a biocombustibles obtenidos desde algas.

Los biocombustibles líquidos de primera generación basados en cultivos alimentarios son producidos a escala comercial mediante tecnologías maduras. Incluyen el etanol obtenido de materias primas azucaradas o amiláceas y el biodiésel obtenido a partir de aceites vegetales. En la Figura 2 se muestran las diferentes rutas para la producción de biocombustibles 1G a partir de las diferentes materias primas.

Figura 2. Rutas de producción de biocarburantes de primera generación



El biocombustible más utilizado mundialmente es el bioetanol que se obtiene por fermentación de mostos azucarados que proceden de vegetales ricos en azúcar, o bien de la hidrólisis y fermentación del almidón que los vegetales almacenan como material de reserva. El bioetanol puede utilizarse en motores de encendido por chispa (motores Otto), mezclado con la gasolina en porcentajes del 10-15 % sin modificaciones de los motores, o en vehículos de combustible

flexible si se utiliza en mayor proporción o como combustible exclusivo. En otros casos, el etanol puede utilizarse en forma de su derivado, el etil-terbutil-éter (ETBE), como aditivo a la gasolina para mejorar el índice de octano.

Estados Unidos es el primer productor mundial de bioetanol y su producción está totalmente ligada al cultivo de maíz. El grano de maíz contiene almidón que, mediante hidrólisis, puede transformarse en etanol gracias a procesos en los que intervienen levaduras. Brasil es el segundo productor mundial de etanol que se produce a partir de la caña de azúcar. Esta materia prima contiene sacarosa que puede ser transformada directamente por las levaduras para generar etanol.

Las materias primas utilizadas actualmente en la producción de biodiésel son los aceites de las semillas de plantas oleaginosas como la palma, la soja, y la colza. La utilización de un aceite vegetal como carburante en un motor de encendido por compresión presenta dificultades que se derivan de las diferencias físico-químicas entre el estándar que define al aceite y al gasóleo (básicamente viscosidad, índice de cetano y punto de congelación). Por ello, se recurre a modificar las características de los aceites vegetales para hacerlos más parecidos al gasóleo mediante un proceso de transesterificación en el que los triglicéridos se transforman en ésteres. La Unión Europea es el mayor productor de biodiésel del mundo con cifras en el año 2016 superiores a los 11 millones de toneladas¹³.

Aunque las tecnologías asociadas a la producción de bioetanol y biodiésel están suficientemente desarrolladas y han alcanzado un alto nivel de madurez, debido a problemas de abastecimiento de las materias primas estos biocombustibles de primera generación no pueden responder a la demanda energética que implicaría la sustitución total de petróleo. Además, existe la polémica de la competencia por las materias primas alimentarias que son utilizadas para la producción de biocombustibles y el incremento de precios que puede derivarse de esta competencia. La solución que alejaría este tipo de conflictos pasaría por desarrollar nuevos cultivos más productivos, con bajos costes de producción y que no compitan con el sector alimentario. Algunas especies vegetales productoras de semillas oleaginosas (*Jatropha curcas*, *Brassica carinata*, *Camelina sativa* y *Cynara cardunculus*) o con alto contenido en carbohidratos (como *Helianthus tuberosus*), están bien adaptadas a condiciones de bajos requerimientos nutricionales e hídricos y podrían cultivarse específicamente para la producción de biomasa energética.

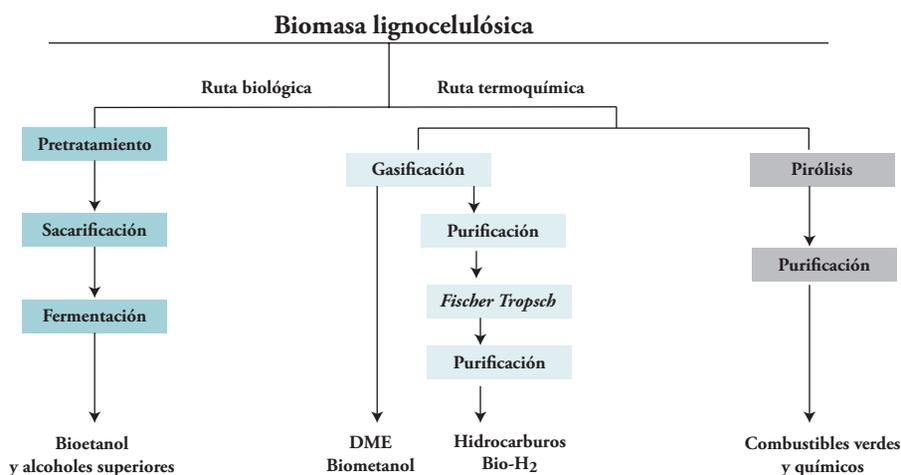
Pero el verdadero desarrollo futuro de este sector está en los biocarburantes avanzados o de segunda generación, es decir los derivados de plantas o de residuos vegetales que no entran en competencia con el sector alimentario. La utilización de materias primas lignocelulósicas ofrece un enorme potencial para la producción de biocarburantes, con la ventaja de utilizar materiales que proceden de los residuos de otros procesos productivos de los sectores forestal, agrícola, industrial o, incluso, doméstico.

Para obtener biocarburantes avanzados pueden elegirse distintas vías (Figura 3). La primera es biotecnológica, extrayendo los azúcares de la celulosa con intervención de enzimas muy

¹³ EUROPEAN BIODIESEL BOARD (2017).

activas. La segunda consiste en gasificar biomasa en una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono, que posteriormente, mediante una serie de etapas intermedias, es transformada en un carburante líquido. La tercera opción que consiste en la obtención de un combustible líquido mediante pirolisis.

Figura 3. Rutas de producción de biocarburantes 2G



Ya se contempla una «tercera generación» de biocombustibles procedentes de microorganismos fotosintéticos como las microalgas autótrofas. Estos microorganismos son cosmopolitas y utilizan la energía solar para crecer y multiplicarse. Una ventaja de las microalgas es su balance medioambiental, ya que consumen CO_2 durante su crecimiento y pueden cultivarse en aguas de baja calidad como las aguas residuales o el agua salada. Otra de las características interesante de las microalgas es su rápido crecimiento que hace que su eficiencia fotosintética sea muy superior a la que presentan las plantas superiores.

Según los datos recogidos en el documento *Building up the future* recientemente publicado por el *Sub Group on Advanced Biofuels* de la Comisión Europea¹⁴, los biocarburantes avanzados derivados de materiales lignocelulósicos y los obtenidos a partir de lípidos podrán abastecer entre el 6 y el 9 % de las necesidades energéticas del sector del transporte en el año 2030. Esto supondrá una demanda creciente de lípidos que la producción actual de aceites vegetales no podrá abastecer por limitaciones en su producción y precio. La producción de lípidos renovables obtenidos a partir de microorganismos puede tener un impacto muy significativo en la producción futura de biocombustibles y oleoquímicos. Los microorganismos oleaginosos, como las microalgas autótrofas o las levaduras heterótrofas, bajo ciertas condiciones pue-

¹⁴ MANIATIS, LANDÁLV, WALDHEIM, VAN DEN HEUVEL y KALLIGEROS (2017).

den producir copiosas cantidades de aceite y presentan mayor eficiencia fotosintética que las plantas superiores.

5. Aplicaciones energéticas de los biocombustibles

5.1. Aplicaciones térmicas

En la actualidad las aplicaciones domésticas de la biomasa más extendidas son las cocinas o chimeneas abiertas de muy bajo rendimiento energético. Sin embargo, existen posibilidades tecnológicamente más avanzadas para utilizaciones individuales con mejores rendimientos energéticos. De hecho, ya existen en el mercado calderas de biomasa con recuperador de calor. Una aplicación interesante para el sector doméstico y el de servicios son las redes de calefacción centralizada, que consisten en una planta térmica central con un sistema de distribución con conducciones que abastece a varios puntos de consumo.

Las aplicaciones térmicas industriales pueden utilizar biomasa en calderas, hornos cerámicos o en secaderos industriales o de productos agrícolas. Lo hacen con un rendimiento energético entre el 80-90 %, según el tipo de biomasa utilizado. Es una alternativa en la que los problemas técnicos están resueltos, y la principal limitación consiste en tener que establecer cauces comerciales para la el abastecimiento y distribución del biocombustible.

Los diferentes tipos de sistemas de combustión están comercialmente disponibles, aunque todavía es necesario desarrollar investigación a medio plazo en áreas como la flexibilidad del combustible o el control de emisiones. Sin embargo, la tecnología de combustión directa es una tecnología madura que no tiene un gran potencial de I+D para aumentar drásticamente la eficiencia de producción de energía.

5.2. Aplicaciones eléctricas

La generación de electricidad con biomasa se hace mayoritariamente con tecnología convencional. Son plantas térmicas (caldera+turbina+condensador) con sistemas de refrigeración y evacuación eléctrica en los que los equipos principales son bien conocidos y existe una amplia oferta en el mercado. Estas plantas alcanzan rendimientos en torno al 30 % de aprovechamiento del poder calorífico de la biomasa y pueden funcionar hasta 8.200 horas al año (cuatro veces más que otras renovables), lo que les confiere una alta calidad energética debida a su alta predictibilidad y baja variabilidad, ajustándose la producción de electricidad a la curva de la demanda. También puede generarse electricidad mediante turbinas de gas o motor alternativo que utilicen como combustible gas de síntesis procedente de la gasificación de biomasa o biogás procedente de una digestión anaerobia.

Una posibilidad para aumentar el rendimiento energético en el uso de la biomasa es la generación conjunta de calor y electricidad (cogeneración). La condensación del vapor supone una evacuación de calor cercano a la mitad de la energía contenida en la biomasa. La recuperación de parte de ese calor de condensación en forma de vapor de baja temperatura o agua caliente, para usos industriales o domésticos, supone un aumento significativo de la eficiencia energética. Para ello se puede disponer de una turbina de contrapresión o bien hacer una extracción de vapor con volumen significativo en la zona de baja presión de la turbina. De esta forma, mediante la instalación de intercambiadores de calor adecuados se pueden obtener rendimientos globales de entre un 40 % y un 60 %.

La producción de frío y calor, así como la hibridación de la biomasa con otras renovables, también abrirá las puertas a nuevos mercados para la conversión termoquímica de biomasa. El creciente mercado de la energía solar y eólica, entre otras, podrá suponer un respaldo para las tecnologías bioenergéticas que tienen una buena flexibilidad de almacenamiento de energía.

5.3. Aplicaciones en el sector del transporte

La utilización de biocarburantes es tan antigua como los motores de combustión. Cuando hace más de cien años Rudolf Diesel diseñó el prototipo del motor que lleva su nombre, lo hizo para utilizar aceites vegetales. De hecho, en la primera demostración de funcionamiento, en la Feria de París de 1898, funcionó con aceite de cacahuete. De la misma manera, cuando Henry Ford hizo el primer diseño de su automóvil Model T en 1908, esperaba utilizar el etanol como combustible. Sin embargo, la rápida irrupción de un combustible barato, razonablemente eficiente y fácilmente disponible como el petróleo hizo que el gasóleo y la gasolina se convirtieran rápidamente en los combustibles más utilizados en el sector de la automoción. No es hasta la crisis del petróleo, en la década de los setenta, que el biodiésel y el bioetanol vuelven a aparecer en escena como resultado de las políticas energéticas para la búsqueda de alternativas a la dependencia de los combustibles fósiles, especialmente en Estados Unidos y Brasil.

6. Aspectos medioambientales, sociales y económicos

La bioenergía realiza una valiosa aportación a la sociedad en diversos ámbitos más allá de su genuina contribución energética. Por un lado, desempeña un importante papel en la preservación del medioambiente, tanto por su contribución a la reducción de emisiones de CO₂ como por su impacto positivo en la gestión de los ecosistemas, ligados, por ejemplo, a la reducción de los incendios forestales que se deriva de una gestión sostenible de los montes. Por otro, su contribución resulta relevante en materia de política social permite el desarrollo de una nueva actividad en las áreas rurales sobre la base de un mercado con una demanda continua y sin fluctuaciones, generando puestos de trabajo estables y bien remunerados, frenando el

despoblamiento del medio rural y contribuyendo al tratamiento de los residuos. El aumento de ingresos de las industrias locales y la fijación de la población facilitan la aparición de nuevas infraestructuras y servicios en áreas rurales. Por otro lado, la aparición de una segunda fuente de ingresos en las industrias agrícolas y forestales, a través de la venta de sus residuos para la generación de energía, equilibra las fluctuaciones de los mercados de los productos principales de estas industrias, dando una mayor seguridad a empresarios y empleados. Desde el punto de vista de los agricultores, la posibilidad de dedicar parte de sus terrenos a prácticas distintas de las tradicionales (alimentación humana o animal, sector del papel, del mueble), supone una mejora de sus ingresos anuales a través de un mercado más amplio para sus productos. En definitiva, se incentiva el desarrollo rural al poner en valor tierras que han quedado fuera de producción por falta de rentabilidad o nuevas áreas agrícolas en las que se pueden implantar cultivos energéticos. A su vez, se le da un valor a los residuos para que sean aprovechados y reutilizados.

Estimulando la inversión económica y la innovación tecnológica es posible desarrollar un modelo de agricultura social y sostenible, que garantice la calidad de vida de los pequeños y medianos agricultores, basándose en métodos responsables de producción que promuevan la protección ambiental y fomenten la conservación de los recursos naturales. Administrar las tierras del mejor modo posible, seguirá siendo una tarea vital y difícil, y por ello es necesaria una cuidadosa regulación de su uso para asegurar que la biomasa se cultive de un modo sostenible y que no interfiera con la productividad de la agricultura alimentaria.

A pesar de estas ventajas, la utilización de biomasa como recurso energético a gran escala genera una cierta controversia. La enorme cantidad total de tierra necesaria para producir biomasa energética se vislumbra como fuente de conflictos por competencia con el suministro de alimentos y el acceso a la tierra. La deforestación de bosques primarios, la desecación de turberas, la erosión de suelos provocada por los monocultivos, el uso de grandes cantidades de fertilizantes y la competencia por el uso del agua son algunos de los grandes riesgos que se invocan cuando se considera la producción de biomasa en grandes extensiones.

También existe una cierta polémica y, en general mucha desinformación, sobre el comportamiento de la biomasa energética frente a las emisiones de dióxido de carbono. Existen dos opiniones comunes, mutuamente excluyentes y ambas erróneas. La primera es que los combustibles derivados de la biomasa, o biocombustibles, y los combustibles fósiles no son diferentes, ya que cuando se queman ambos emiten dióxido de carbono como producto final de la combustión. Esto es cierto si la tierra de la que se extrae la biomasa para su utilización energética no se replanta. Sin embargo, si la biomasa se produce de manera sostenible, la biomasa que crece absorbe el dióxido de carbono de la atmósfera durante la fotosíntesis y almacena el carbono en las estructuras de las plantas. Cuando se quema la biomasa, el carbono liberado a la atmósfera se recicla en la próxima generación de plantas en crecimiento. En este contexto, la productividad y la tasa de crecimiento de las especies vegetales que se cultivan con fines energéticos tiene una gran relevancia. Mientras que en las especies de crecimiento lento puede pasar mucho tiempo antes de que el carbono liberado se vuelva a fijar en la nueva generación, las especies de crecimiento rápido pueden reciclar carbono rápidamente en cada ciclo.

La segunda opinión, bastante generalizada, es que en los sistemas de producción de energía con biomasa, debido a que el carbono se recicla, no se producen emisiones netas de dióxido de carbono. Esto no es estrictamente cierto ya que se necesita energía (en la mayoría de los casos proporcionada por combustibles fósiles) para cultivar, cosechar, transportar y, a veces, transformar la biomasa en un biocombustible. Esto implica que en algunas etapas del ciclo de producción del biocombustible se produzcan emisiones netas de dióxido de carbono. Por ello, es necesario identificar y cuantificar con detalle las entradas y salidas de energía primaria de los diferentes procesos que componen el sistema, identificando los procesos que demandan un mayor consumo de energía primaria y analizando si el proceso en su conjunto es energética y medioambientalmente favorable.

Puesto que uno de los objetivos principales de la producción de energía derivada de la biomasa es reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, es imprescindible tener en cuenta dónde, cómo se produce y cómo se extrae la biomasa. España dispone de abundantes recursos de biomasa que pueden ser utilizados con fines energéticos. Según la Plataforma Española de la Biomasa (Bioplat)¹⁵, cada año se acumulan 32 millones de metros cúbicos de madera (biomasa) en los montes españoles, de los cuales 18 millones podrían ser extraídos para uso energético. Este hecho, unido a que una gran extensión de tierras cultivadas están quedando fuera de producción por falta de rentabilidad, dan idea del gran potencial nacional de recursos biomásicos disponibles para bioenergía y otros usos. Además, España posee el 20 % de la cabaña porcina de la Unión Europea, con más de 25 millones de cabezas que generan más de 72 millones de toneladas anuales de residuos ganaderos.

Para hacer frente a los potenciales efectos adversos de una producción de bioenergía no sostenible a gran escala, la Unión Europea ha establecido criterios de sostenibilidad que, en un principio fueron aplicados a los biocarburantes¹⁶ y, más recientemente, a la biomasa sólida y gaseosa empleada en la calefacción y la electricidad¹⁷. La producción de bioenergía debe incentivar el aumento de la productividad vegetal, la producción integrada de biomasa energética y alimentos (en lugar de sustituirla), la reforestación con cultivos energéticos de tierras agrícolas o desforestadas y la disminución de la degradación y erosión del suelo.

La Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009¹⁷, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, define criterios de sostenibilidad para los biocarburantes y biolíquidos, relativos a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y a la protección de tierras de elevado valor en cuanto a biodiversidad y/o tierras con elevadas reservas de carbono. Dicha directiva reconoce que, si bien el fomento de los biocarburantes y biolíquidos contribuirá al crecimiento de la demanda de materias primas agrícolas, es necesario adoptar medidas de acompañamiento para el sector agrícola que fomenten una mayor tasa de productividad de tierras degradadas y garanticen un correcto uso del suelo.

¹⁵ AFI (2015).

¹⁶ Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009; en: <https://www.boe.es/doue/2009/140/L00016-00062.pdf>.

¹⁷ Propuesta de Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables (refundición). Bruselas, 23.2.2017, COM(2016) 767 final 2016/0382 (COD).

7. Reflexiones finales

El cambio climático y el agotamiento de determinados recursos estratégicos han colocado a la bioeconomía en la agenda de las políticas públicas de muchos países desarrollados. La energía es un insumo fundamental del tejido productivo y la bioenergía está destinada a ser un elemento central en esta nueva bioeconomía, al ser una importante fuente de creación de puestos de trabajo, especialmente en áreas rurales, a nivel local y regional. Asimismo, la bioenergía tiene un papel estratégico en la lucha contra el cambio climático y en la reducción de la dependencia de las importaciones de combustibles.

La vinculación de la biomasa al sector primario (actividades agrícolas, forestales y ganaderas), además de otras industrias asentadas en el medio rural (cooperativas agroalimentarias, industria papelera y maderera, entre otras) convierten al sector de la biomasa en un activo estratégico potencial para estos entornos rurales, generando nuevos puestos de trabajo que podrán contribuir a paliar el elevado desempleo que se concentra en el medio rural (muy vinculada al sector primario, donde además la creación de nuevas oportunidades es escasa).

En definitiva, la bioenergía es un sector clave para la transición del actual modelo económico basado en la utilización de los recursos fósiles hacia una nueva bioeconomía basada en los recursos orgánicos renovables. Si somos capaces de impulsar una producción de biomasa responsable en origen, que sea efectiva contra la pobreza y el cambio climático, estableciendo un sistema internacional de certificación que incluya la comprobación de las emisiones de gases de efecto invernadero que producen y la prosperidad y el nivel de bienestar social que generan en las comunidades rurales, el futuro de la biomasa energética se vislumbra esperanzador.

Con el desarrollo de la bioenergía en el marco de la nueva bioeconomía, España fortalecerá su liderazgo en sectores industriales estratégicos con alto valor añadido en el que interactúen diversos sectores del «área bio», lo que permitirá aumentar la eficiencia, competitividad y sostenibilidad del tejido productivo, así como generar y mantener empleo y riqueza.

Referencias bibliográficas

- AEBIOM STATISTICAL REPORT (2017): <http://www.aebiom.org/statistical-report-2017/statistical-report-2017-17-10-17/>.
- AFI (2015): *Sector de La Bioenergía en España*. En http://www.bioplat.org/setup/upload/modules_docs/content_cont_URI_3886.pdf.

- COM (2016): «Propuesta de Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables (refundición)»; 23.2.2017, 767 final 2016/0382 (COD). Bruselas.
- COMMUNICATION COM (2011): 112 final from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050; en <http://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2011/EN/1-2011-112-EN-F2-1.Pdf>.
- DD CEN/TS 14588-2004: «Solid biofuels. terminology, definitions and descriptions»; Standard Number: DD CEN/TS 14588-2004.
- DIRECTIVA 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE; en <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:es:pdf>.
- DIRECTIVA 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009. En <https://www.boe.es/doue/2009/140/L00016-00062.pdf>.
- EUROPEAN BIODIÉSEL BOARD (2017): <http://www.ebb-eu.org/stats.php>.
- FAO (2017): «Incentivizing sustainable wood energy in sub-Saharan Africa: A way forward for policy-makers»; en *Job Number* (I6815); pp. 12; en <http://www.fao.org/3/a-i6815e.pdf>.
- FAO (2014): *El estado de los bosques del mundo: Potenciar los beneficios socioeconómicos de los bosques*. E-ISBN 978-92-5-308270-4 (PDF).
- IEA BIOENERGY. IEA BIOENERGY: EXCO (2007:02): «Contribution of Bioenergy to the World's Future Energy Demand»; en <http://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/10/Potential-Contribution-of-Bioenergy-to-the-Worlds-Future-Energy-Demand.pdf>.
- RENEWABLE ENERGY SOURCES STATISTICS IN THE EUROPEAN UNION (2001): *Data 1989-1998*. En <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/5627744/KS-37-01-647-EN.PDF/0996c8ee-3834-44e6-8b72-65f0a9af180e>.
- RES EUROBSERV'ER BAROMETER: en <https://www.eurobserv-er.org/>.
- ROSILLO-CALLE, F.; DE GROOT, P.; HEMSTOCK, S. L.; WOODS J. *et al.* (2006): *Biomass Assessment Handbook: bioenergy for sustainable development*. Earthscan.
- SIMS, R. H. (2004): *Bioenergy Options for a Cleaner Environment: In Developed and Developing Countries*. Reino Unido, Oxford. Elsevier Ltd.; p. 184.
- SOLID BIOMASS BAROMETER (2017): «Solid Biomass Barometer–Eurobserv'er–December 2017»; en: <https://www.eurobserv-er.org/category/all-solid-biomass-barometers/>.

SUB GROUP ON ADVANCED BIOFUELS. SUSTAINABLE TRANSPORT FORUM (2017): «Building up the future: Use of the synthetic fuels and biofuels in marine and aviation sector»; en MANIATIS, K.; LANDÄLV, I.; WALDHEIM, L.; VAN DEN HEUVEL, E. y KALLIGEROS, S., eds.

UNEP (2011): Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication - A Synthesis for Policy Makers, www.unep.org/greeneconomy Potential.



EL BIOETANOL COMO UN EJEMPLO PARA IDENTIFICAR BARRERAS A LA BIOECONOMÍA

Pablo Gutiérrez Gómez y Ricardo Arjona Antolín
Biotechnology Developments For Industry

Resumen

El concepto de bioeconomía parte de un principio de sustitución, y ha sido el sector de los biocombustibles el primero en el que se ha producido una sustitución de un porcentaje significativo de recursos fósiles por recursos renovables.

En este capítulo se revisan los diferentes aspectos que han afectado y están afectando a este proceso; incluyendo el acceso a la financiación, adaptación de estándares, aceptación por los consumidores, evaluación de riesgos ambientales, etc.

Sin lugar a dudas, el proceso que han seguido los biocombustibles es similar al que otros bioproductos habrán de seguir, y la experiencia en estos últimos debe de ser tenida en cuenta, ya que la bioeconomía ha de resolver aspectos relativos a la competencia con productos maduros, que han alcanzado escalas óptimas para operar en su entorno, que son aceptados por los consumidores, y con normativas claras y estables, algo con lo que no contarán los bioproductos en su fase de expansión.

Abstract

The concept of bioeconomy is based on substitution, and the biofuel sector is the first in which a large percentage of fossil resources have been substituted with renewable resources.

In this chapter we review the various aspects that have affected, and are affecting, this process; aspects that influence access to funding, the adaptation of standards, acceptance by consumers, environmental risk assessments, and so on.

Without doubt, the process that biofuels have followed is similar to that which other bioproducts will have to follow, and the experience gained must be taken into account, since any new aspect relating to the bioeconomy must resolve aspects relating to competition with mature products: these have reached optimum operational scales in their environment; are accepted by consumers; and have clear, stable regulations, something bioproducts will not have in their expansion phase.

1. Condiciones de contorno

El concepto de bioeconomía parte de un principio de sustitución. Cuando evaluamos las propuestas que al respecto envían diferentes organismos como la Comisión Europea u organizaciones ecologistas, encontramos que se habla de pasar de una sociedad cuyos esquemas de consumo se basan en el uso de materias primas no renovables, fósiles en el caso de la energía, hacia el uso de materias primas renovables.

Por tanto, estos supuestos, pese a que plantean una sociedad concienciada con el medioambiente, no definen un modelo nuevo de sociedad, sino una que gestiona recursos alternativos para mantener los condicionantes actuales de consumo y forma de vida.

Este planteamiento requiere que los bioproductos, y en el caso que nos ocupa, los biocombustibles, sean capaces de sustituir, al menos parcialmente, a los combustibles fósiles utilizados como fuente principal de energía en el sector del transporte.

Sin embargo, en todo proceso de sustitución, y la bioeconomía no cabe duda de que lo es, hay una serie de barreras a considerar que deben, sin ninguna duda, ser gestionadas para que dicha sustitución pueda ocurrir:

- *Inversiones*: las inversiones requeridas para la producción de biocombustibles, para la gestión de las materias primas y para su distribución son significativas y con períodos largos de retorno.
- *Costes de producción*: los biocombustibles deben competir en costes con los combustibles fósiles, que se obtienen en base a procesos maduros y bien establecidos y que aprovechan la economía de escala.
- *Cadena de suministro*: no se han desarrollado infraestructuras adecuadas para el consumo masivo de biocombustibles, y se han planteado dudas de que las existentes puedan operar con estos productos.
- *Regulación y estándares*: los estándares existentes se han desarrollado a lo largo del tiempo exclusivamente para combustibles fósiles, por lo que no se han adaptado a nuevos productos sustitutivos. El desarrollo de normativa específica requiere tiempo y procesos complejos de redacción, por lo que se generan barreras normativas.
- *Mercado*: los consumidores, en general, mantienen una resistencia al cambio que se incrementa cuando los nuevos productos afectan a sus bienes, en este caso los vehículos. Es decir, la «sensación de riesgo» percibida afecta de forma significativa a la adopción de los biocombustibles.
- *Riesgos de mercado*: las materias primas (cereal, azúcar, biomasa) y los productos finales (bioetanol y biodiésel) «cotizan» en mercados diferentes, y por lo tanto no existe una correlación clara entre ellos, lo que incrementa de forma notable el riesgo de los operadores y productores.

Estas barreras son generales para gran parte de los productos que podrían contribuir de forma significativa a la adopción de la bioeconomía como una alternativa sostenible a los actuales productos que forman la base del esquema de consumo.

Cualquier desarrollo asociado a productos que requieran inversiones significativas y que deban competir con sustitutivos implantados y maduros necesitan de un soporte inicial que haga que el proceso de adopción por el mercado pueda superar las barreras indicadas. Este período inicial es conocido en algunos ámbitos como el «Valle de la Muerte», en clara referencia a la dificultad que supone el superarlo.

2. El escenario energético en el sector transporte

El desarrollo de los biocombustibles se ha producido en base a tres condicionantes: abordar un futuro con precios de petróleo elevados, asegurar las necesidades energéticas de un país evitando la dependencia exterior, y minimizar el impacto ambiental del sector del transporte.

Sin embargo, en los últimos años se están produciendo condiciones que alteran de forma significativa algunas de las premisas anteriores, afectando al soporte que han estado recibiendo y sin duda afectarán a los biocombustibles en su expansión futura.

La producción y consumo de combustibles líquidos a escala mundial ha crecido a un ritmo superior a la demanda, y desde el año 2014 esta tendencia se mantiene, con un período entre 2014 y 2016 en el que este hecho ha sido especialmente significativo¹.

Gráfico 1. Producción y consumo mundial de combustibles líquidos



Fuente: *Short-Term Energy Outlook*. EAI (2017).

Parece que esta tendencia se va a mantener en los próximos años. La Agencia Internacional de la Energía opina que hasta el año 2040 el consumo de petróleo crecerá, pero con un ritmo mucho más pausado de lo que ha ocurrido en los últimos 25 años, como se observa en su reporte *World Energy Outlook 2017*².

Además, según los datos de BP las reservas comprobadas de petróleo han evolucionado desde 1.148,8 miles de millones de barriles en 1996 hasta 1.388,3 en 2006 y 1.691,5 en 2015³, con un incremento especialmente significativo en Estados Unidos por el impacto

¹ OIL&GAS JOURNAL (2017).

² IEA (2017).

³ BP (2017).

que sobre las políticas de biocombustibles puede suponer. En este país, de 2006 a 2015 las reservas confirmadas han pasado de 29,4 mil millones de barriles a 48 mil millones. También ha duplicado su producción entre 2006 y 2016 y ha reducido ligeramente su consumo en un 5 %. Obviamente esta situación afecta a una de las motivaciones principales para el fomento de los biocombustibles, la seguridad energética.

Todos estos hechos ha llevado a un escenario de precios de petróleo en el que, tras dos períodos de precios elevados, en 2008 y entre los años 2011 y 2014, en los que el precio se situó por encima de los 100 dólares/barril, se ha llegado de nuevo a un escenario con precios bajos, entre 40 y 60 dólares/barril, que afecta a los biocombustibles que tienen que competir con un petróleo «barato».

Por otra parte, hay aspectos que están igualmente generando un impacto significativo en el sector transporte. Según la Agencia Internacional de la Energía⁴ la «intensidad energética» mundial, definida como el consumo de energía primaria para generar una unidad de producto interior bruto, ha disminuido en un 1,8 % en 2016, y desde 2010 viene disminuyendo una media del 2,1 % anual, reflejo del resultado de múltiples factores entre los que se encuentran las políticas que promueven la eficiencia energética.

Esta mejora de la eficiencia energética afecta a numerosas áreas, y entre otros efectos positivos, está ayudando a mejorar la seguridad energética en numerosos países, entre los que se encuentran aquellos que mantienen programas agresivos en este sentido y en los que se dio un importante impulso a los biocombustibles en base a esta razón.

En el sector transporte los estándares de eficiencia energética están ayudando a reducir notablemente el consumo energético por kilómetro y a esto hay que añadir la expansión del coche eléctrico, que, si bien aún no representa un porcentaje significativo, está creciendo en ventas a un ritmo del 40 % anual, lo que cambiará el escenario actual en los próximos años ayudando a diversificar de forma notable las fuentes de energía primaria disponibles en este campo.

3. Materia prima y producto operando en mercados diferentes

La producción de bioetanol comercial se basa fundamentalmente en el empleo de la caña en Brasil, de los cereales en Estados Unidos y Europa, y del sorgo en la India. Con esta situación es fácil entender que el productor se enfrenta en una situación compleja, ya que sus principales costes, que derivan de la materia prima, no se relacionan con los precios de venta, que dependen fundamentalmente del precio del petróleo.

Si evaluamos el precio del maíz en los últimos años, se detecta una cierta tendencia alcista entre el año 2000 y el 2010, con una gran subida en el año 2008 que fue seguida de un escenario de precios muy elevados entre los años 2011 y 2013, y con una bajada posterior que ha

⁴ IEA (2017).

concluido con precios estables en valores moderados en los últimos años⁵. Este comportamiento no es similar al que sigue la gasolina, totalmente correlacionado con el precio del petróleo, por lo que especialmente en los años 2011 a 2013 se generaron tensiones importantes que incluso obligaron a algunos productores de Estados Unidos a entrar en situación concursal o incluso salir del mercado.

Aun así, los productores de etanol tienen un coproducto, el llamado DDG (por las siglas en inglés de *dried distilled grain*, que se compone de la fibra, la proteína y la grasa presente en el cereal) que se emplea en alimentación animal como un componente de elevado contenido proteico y que sí mantiene relación con el precio de la materia prima. Este componente contribuye en cierta medida a matizar algunas condiciones de mercado.

4. Situación en Estados Unidos

En Estados Unidos la producción en el año 2016 alcanzó los 15.329 millones de galones frente a los 14.807 millones de 2015, con 214 instalaciones productivas de las que 199 han estado operativas a lo largo del año⁶. En el año 2015, los datos de la IEA⁷ indican que la capacidad nominal de las plantas de etanol en Estados Unidos era de 14.369 millones de galones, lo que muestra que se estaba operando a su máxima capacidad dadas las condiciones de rentabilidad existentes. Se trata de una situación paradójica, ya que en dicho año el petróleo mantenía precios bajos y por tanto el etanol igualmente se vendía en rangos igualmente bajos.

En este país, históricamente el principal componente para promover el uso de etanol ha sido la consecución de la independencia energética, para lo cual se ha legislado a través de la denominada RFS (*Renewable Fuel Standard*), creada por el Congreso con el objetivo de reducir la emisión de gases de efecto invernadero y expandir el sector de combustibles renovables, reduciendo la dependencia de combustibles importados. El programa fue autorizado bajo la llamada *Energy Policy Act* de 2005 y se extendió de acuerdo a la *Energy Independence and Security Act* del año 2007. Esta legislación permite que la EPA (*United States Environmental Protection Agency*) defina unos volúmenes para diversas categorías de biocombustible (biodiésel procedente de biomasa, biocombustible celulósico, biocombustible avanzado y biocombustible renovable total, que es la suma de las tres anteriores y del biocombustible estándar) que deben ser cumplidos.

A partir del año 2015 la EPA ha definido unos volúmenes⁸ que para los biocombustibles estándares, fundamentalmente bioetanol, deja disponible 15 billones (americanos, es decir, 15.000 millones) de galones, lo que para el etanol supone básicamente una cifra muy cercana a la denominada *blendwall* (volumen de etanol equivalente al 10 % de mezcla en el mercado

⁵ MACROTRENDS (2018).

⁶ RFA (2016).

⁷ EIA (2015).

⁸ EPA (2015).

de EEUU). Para ello se comercializan mezclas con hasta un 10 % de etanol que es posible utilizar en cualquier vehículo, aunque también se comercializan mezclas con porcentajes superiores como E15 y E85. En un principio este es un sistema que se desarrolló para gestionar la promoción del uso del etanol, pero que posteriormente se ha convertido en una limitación, ya que las mezclas superiores al 10 % han de venderse de forma diferenciada y tan solo pueden ser empleadas por vehículos que explícitamente hayan sido preparados para ello.

Si observamos el consumo de etanol en Estados Unidos, este ha crecido de forma continua entre los años 2006 y 2011, mientras que a partir de ese momento hay pequeñas subidas y bajadas anuales alrededor de los 14.000 millones de galones⁹, hecho que se debe fundamentalmente a que se ha alcanzado el 10 % en las mezclas y la demanda de gasolina se ha estancado, pudiéndose encontrar años en los que incluso ha disminuido debido a la crisis y a la promoción de la eficiencia de los vehículos a motor que se ha implementado en el país.

Este límite del 10 % se alcanza porque el etanol es competitivo frente al coste de la gasolina, favoreciendo que los comercializadores de combustible tiendan a llegar al límite legal. De hecho, en el año 2016 el porcentaje de consumo de etanol frente a la gasolina representó un 10,04 %, mientras que en diciembre del año 2017 ha alcanzado el 10,3 %¹⁰, con estados como Minnesota que han superado claramente esa cifra, fundamentalmente por el uso de mezclas E15 y E85.

Por lo expuesto anteriormente se puede entender que esta regulación se ha convertido en el principal caballo de batalla entre los productores de biocombustible y los de productos petrolíferos. Ambas partes incorporan argumentos a favor y en contra relacionados fundamentalmente con los potenciales daños que mezclas superiores al 10 % pueden generar en los vehículos. Aunque la EPA ha validado que todos los vehículos posteriores a 2001 pueden utilizar mezclas de hasta el 15 % de etanol, es complejo para los conductores y los distribuidores definir esquema que faciliten el uso de estas mezclas ante la dificultad de diferenciar entre vehículos.

Se han desarrollado numerosos modelos y estudios de costes para evaluar los beneficios que el etanol, globalmente, genera en la economía americana. Sin entrar en detalles, lo que sí parece claro es que la industria ha incrementado año tras año su capacidad de producción (NREL, 2015), incluso superando al consumo en los últimos años. Un estudio de la *Iowa State University* muestra que históricamente los productores de etanol han mantenido márgenes suficientes para operar en condiciones de rentabilidad positiva, pero sin embargo la industria no afronta nuevos planes de crecimiento y la inversión está limitada a la mejora de la capacidad actual.

5. Situación en Europa

En Europa la situación es aún más compleja debido a la capacidad de los diversos estados miembro para trasponer las directivas europeas con cierta autonomía.

⁹ NREL (2017).

¹⁰ EPA (2017).

En primer lugar, y frente a Estados Unidos, hay que destacar que mientras que, como antes se mencionó, en este último país ha sido la seguridad energética la que ha fomentado el crecimiento de los biocombustibles, sin dejar fuera aspectos ambientales, en Europa las motivaciones fundamentales han sido ecológicas.

La Comisión Europea, en base a dichos condicionantes ambientales, pretende que el 10 % de la energía consumida en Europa en el transporte proceda de fuentes renovables con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero un 6 % frente a las del año 2010. Este objetivo debe ser cumplido por cada estado miembro (*Renewable Energy Directive* y *Fuel Quality Directive*).

En el caso de los biocombustibles, estos deben certificar su sostenibilidad a través de esquemas voluntarios que aseguren el cumplimiento de criterios definidos por la Comisión. Adicionalmente, en el año 2015 se implementaron, medidas para evitar lo que se ha venido a denominar ILUC (por las siglas en inglés de *Indirect Land Use Change*). Este hecho hace referencia a evitar que el uso de cultivos para la producción de combustible pueda hacer que terrenos con alto contenido en carbono no empleados hasta hora en agricultura pudiesen reconvertirse en terreno agrícola (Directiva EU 2015/1513). En base a esta legislación, el consumo de bioetanol en la Unión Europea se ha mantenido básicamente constante en los últimos años, al igual que la producción, que se ha incrementado ligeramente mientras que las importaciones se han reducido hasta representar porcentajes muy pequeños del total¹¹.

Tabla 1. Porcentajes de bioetanol en gasolina en Europa

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Bietanol producido (MML)	4.392	4.658	5.000	5.253	5.316	5.165	5.340	5.380
Bietanol importado (MML)	1.285	886	595	418	228	228	190	190
Bietanol exportado (MML)	99	95	63	234	184	171	165	165
Bietanol consumido (MML)	5.703	5.676	5.370	5.380	5.425	5.250	5.355	5.445
Gasolina (MML)	114.708	106.928	103.307	103.014	105.170	101.669	98.168	94.667
Mezcla (%)	5	5	5,2	5,2	5,2	5,2	5,5	5,7

Fuente: USDA (2017).

Esta producción se consigue mediante 71 plantas de etanol convencional que tienen una capacidad conjunta de producción de 8.290 millones de litros, un volumen muy superior al producido.

En noviembre del año 2016 la Comisión Europea publicó la RED II, que pretende definir las políticas a implementar entre los años 2021 y 2030, y que persigue que la Unión Europea genere al menos el 27 % de su consumo energético a partir de fuentes renovables en el horizonte

¹¹ UDA (2017).

del año 2030. Adicionalmente define un límite a los biocombustibles convencionales que se define en el 7 % en el año 2021 y que debe ir reduciéndose hasta el 3 % en el año 2030. Por el contrario, protege la producción de biocombustibles avanzados que deben de comenzar en el 1,5 % en el año 2021 y alcanzar el 6,8 % en el año 2030.

Las posturas de las diversas organizaciones afectadas son diversas. Las organizaciones agrarias y la asociación de cooperativas (Copa-Cogeca) han tratado de mantener el porcentaje de etanol de primera generación al 7 % en el año 2030, a la vez que indican que los objetivos para los biocombustibles avanzados no son realistas. Su postura se centra en no considerar a los biocombustibles avanzados como sustitutivos de los de primera generación. Por el contrario, consideran a ambos como parte de una solución sostenible para el transporte, así como una fuente de riqueza para el sector agrario europeo¹².

Esta postura es compartida por organizaciones como ePURE (representante de la industria del bioetanol), EBB (*European Biodiesel Board*) y FEDIOL (*EU Vegetable Oil and Protein Meal Industry*), que indican que excluir los biocombustibles convencionales del mix energético europeo es inaceptable, ya que incrementará el consumo de combustibles fósiles dado que los avanzados no estarán disponibles a escala comercial. Además, apuntan que excluir a los combustibles de primera generación en base a condicionantes que no están avalados por la investigación científica no está justificado y dejará al transporte europeo sin alternativas, mientras disminuirá los ingresos agrarios en al menos en una cifra próxima a los 2,1 billones de euros anuales.

Por otra parte, organizaciones no gubernamentales como *Birdlife*, *Transport & Environment* y *World Wildlife Fund* indican que la Comisión se ha quedado corta no proponiendo un objetivo cero para los biocombustibles de primera generación.

No cabe duda de que la polémica *food vs. fuel* que se ha mantenido en el campo de los biocombustibles en los últimos años ha afectado de forma fundamental al marco en el que el bioetanol se ha desenvuelto en los últimos años y a la legislación que se está desarrollando para definir su futuro.

Por otra parte, la demanda de productos petrolíferos en Europa ha ido disminuyendo desde el año 2011 y el ratio de utilización de sus refinерías ha pasado del 87 % al 78 %, por lo que el uso de biocombustible tensiona aún más el mercado.

Mientras tanto, la existencia de distintas normativas nacionales hace que la situación del bioetanol en los distintos países de la Unión Europea sea diferente. Hay países que ya no contemplan la distinción entre biodiésel y bioetanol en sus objetivos obligatorios, lo que lleva a que los operadores mezclen fundamentalmente biodiésel dado el desbalance entre diésel y gasolina que existe en la Unión Europea. Si analizamos la situación en algunos países, por ejemplo, en Alemania el consumo es estable y se prevé un ligero incremento para el año 2018 al haber pasado de un mandato de mezcla a unos objetivos de reducción de Gases de Efecto Inverna-

¹² COPA-COGECA (2017).

dero (GHG) que lo favorecerán. En Francia el consumo está creciendo debido a que se ha incrementado el número de gasolineras con surtidores de E10 y E85, que mantienen precios competitivos con la gasolina. En Polonia y Holanda el consumo seguirá subiendo debido al incremento que prevé su mandato en los porcentajes de mezcla. En nuestro país los porcentajes incluidos en su mandato aún permiten incrementos de consumo. En el Reino Unido, con un consumo decreciente de gasolina y porcentajes estables, el consumo se espera que se reduzca ligeramente. En Suecia la eliminación de incentivos y el bajo precio de la gasolina harán que el consumo disminuya. En Portugal se ha eliminado el mandato específico para etanol, por lo que es probable que los operadores cumplan a través de mezclas de biodiésel.

6. Conclusiones

Para entender en qué condiciones la bioeconomía puede desarrollarse, si tomamos el bioetanol como un ejemplo paradigmático podemos encontrar conclusiones de interés que son en gran medida extensibles al resto de potenciales productos derivados de la biotecnología. Como indicábamos en la introducción de este capítulo, los nuevos productos que entran en mercados maduros y que requieren alcanzar una escala suficiente para poder competir, deben tener unos condicionantes claros y sostenidos en el tiempo. En el caso del bioetanol los soportes legislativos que apoyaron el crecimiento de la industria fueron adecuados para que esta creciese y evolucionase hasta lograr producir de forma competitiva con la gasolina, algo que no era fácil de lograr si consideramos cuál era el punto de partida. De hecho, incluso en condiciones de bajo precio de petróleo el bioetanol puede competir en costes y todo ello sin haber tensionado al mercado de la materia prima, ya que los cereales se han comercializado con escenarios de precios bajos durante los últimos tres años, en los que la producción de bioetanol a partir de ellos ha alcanzado volúmenes récord.

Sin embargo, lo que no se ha logrado es conseguir un mercado abierto que permita que dicha competencia pueda establecerse de forma que los consumidores seleccionen libremente qué producto quieren utilizar en sus vehículos. Los motivos son diversos. Por un lado, los sistemas de distribución no se han abierto lo suficiente a los nuevos productos, especialmente en Europa. Por otro, la normativa que aplica mantiene criterios no definidos específicamente para los biocombustibles. De hecho, el marco legislativo ha cambiado de forma continua sin ofrecer seguridad jurídica a los inversores en el sector, por lo que desde hace años no hay inversiones significativas ni en capacidad productiva ni en distribución. Finalmente, los consumidores reciben información confusa, marcada por polémicas difíciles de evaluar y basadas en condicionantes que científicamente no se han concretado.

Por tanto, la bioeconomía va a enfrentarse, en casi todos los productos que se identifican como posibles, a situaciones que van a dificultar enormemente que se desarrolle, ya que no hay condiciones para que se ejecuten las inversiones necesarias en un marco en el que la legislación puede cambiar de forma continua y sin un horizonte definido. Además, el impacto que han

tenido las decisiones tomadas en el área de los biocombustibles hace que las autoridades se hayan vuelto muy cautas antes de promover nuevas acciones con relación a los bioproductos.

Referencias bibliográficas

- BP (2017): *Statistical Review of World Energy 2017*. Disponible en <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>.
- CENTER FOR AGRICULTURAL AND RURAL DEVELOPMENT (2018): «Historical Ethanol Operating Margins». Iowa State University. Disponible en https://www.card.iastate.edu/research/biorenewables/tools/hist_eth_gm.aspx.
- COPA-COGECA (2017): «Letter to Ms Kadri Simson concerning the recast of the Directive on the promotion of renewable energy sources: transport sector»; en http://www.copa-cogeca.be/mwg-internal/de5fs23hu73ds/progress?id=jC9J_KBUkxyhzs9zbqezCbgd5KxUMPPOyDS_8EqL_TM,.
- EPA (2017): «Fuels Registration, Reporting, and Compliance Help»; en <https://www.epa.gov/fuels-registration-reporting-and-compliance-help/e15-fuel-registration#about-e15>.
- EPA: «Overview for Renewable Fuel Standard»; en *Renewable Fuel Standard Program*. Disponible en: <https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program/overview-renewable-fuel-standard>.
- FUELS EUROPE (2017): *Statistical Report 2017*. Disponible en https://www.fuelseurope.eu/wp-content/uploads/2017/06/20170704-Graphs_FUELS_EUROPE-_2017_WEBFILE-1.pdf.
- IEA (2016): «US Fuel Ethanol Plant Production Capacity Archives»; en *Petroleum & other liquids*. Disponible en <https://www.eia.gov/petroleum/ethanolcapacity/archive/2015/index.php>.
- IEA (2017): «Energy Efficiency 2017»; en <https://www.iea.org/efficiency/>.
- IEA (2017): «World Energy Outlook 2017»; en <https://www.iea.org/weo2017/>.
- MACROTRENDS (2018): «Corn Prices - 45 Year Historical Chart»; en <http://www.macrotrends.net/2532/corn-prices-historical-chart-data>.
- NREL (2017): *2015 Bioenergy Market Report*. Disponible en <https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/66995.pdf>.
- OIL&GAS JOURNAL (2017): «EIA forecasts higher US oil production in 2018»; en *Short Term Energy Outlook*. Disponible en <http://www.ogj.com/articles/2017/04/eia-forecasts-higher-us-oil-production-lower-prices-in-2018.html>.

RFA (2016): «Fueling a High Octane Future»; *2016 Ethanol industry outlook*. Disponible en http://www.ethanolrfa.org/wp-content/uploads/2016/02/RFA_2016_full_final.pdf.

UDA (2017): «Gain Report NL7015»; *EU Biofuels Annual 2017*. Disponible en https://gain.fas.usda.gov/Recent%20GAIN%20Publications/Biofuels%20Annual_The%20Hague_EU-28_6-19-2017.pdf.

